



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
“FEB”**

WESLEY RODRIGUES DO NASCIMENTO

**UTILIZAÇÃO DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) COM ÁGUA
NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EM CERÂMICA AVANÇADA COM
REBOLO DE LIGANTE RESINO CERÂMICO/METÁLICO**

BAURU

2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
“FEB”**

WESLEY RODRIGUES DO NASCIMENTO

**UTILIZAÇÃO DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) COM ÁGUA
NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EM CERÂMICA AVANÇADA COM
REBOLO DE LIGANTE RESINO CERÂMICO/METÁLICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

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

BAURU

2014

Nascimento, Wesley Rodrigues.

Utilização da mínima quantidade de lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica em cerâmica avançada com rebolo de ligante resino cerâmico/metálico./ Wesley Rodrigues do Nascimento, 2014. 90 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014.

1. Retificação. 2. Cerâmica Avançada. 3. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 4. Meio ambiente. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe Dirceia Isabel, família, Dr. Bianchi e
amigos

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pelo dom da vida, pela saúde, força, paciência para resolver as adversidades e por todas as bênçãos.

Aos meus pais Ezequiel Augusto (*in memoriam*) e Dirceia Isabel, aos quais devo minha vida, por me ensinarem valores e sempre me incentivarem a buscar novas conquistas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela amizade, constante apoio e confiança em meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pelas sugestões e por aceitar co-orientar meu trabalho.

Ao aluno de iniciação científica Adriano Akio Yamamoto, pelo empenho e amizade.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pela grande contribuição e apoios cedidos durante a realização do Projeto.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES por ter concedido recursos para esta pesquisa.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita campus Bauru pela oportunidade que me foi concedida.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru, especialmente Hamilton José de Mello, Prof. Dr. Yukio Kobayashi, Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves, Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanches, agradeço pelo auxílio e respeito com que sempre fui tratado.

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

A empresa ITW Chemical por fornecer os fluidos de corte usados neste trabalho.

A empresa Royall Diamond em especial aos Srs. Galdino, Isaías, por permitirem visitar e utilizar os recursos da empresa e pelos valiosos conselhos na elaboração do trabalho.

Aos amigos Edmauro Meirelles, Lucia Maria (professores do ensino médio), Josie D'Almeida, Joice D'Almeida, Daniel Mourão, Aline Mello, Priscila Ferminio, Família Braga pelo apoio e conselhos fraternais.

Ao grupo de pesquisa de usinagem por abrasão pelo apoio e incentivo.

Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

A sabedoria é a coisa principal; adquira, pois, a sabedoria; sim, com tudo o que possui, adquira o conhecimento. (Provérbios 4:17)

RESUMO

O uso do material cerâmico avançado na engenharia moderna têm sido essencial, principalmente nas áreas aeroespacial, biomédica, eletrônica, ótica e automotiva. As principais razões pela sua utilização provêm de sua composição inorgânica e não metálica que oferece grande resistência ao desgaste, assim como resistência em altas temperaturas, baixa densidade e propriedades eletromagnéticas diferenciadas. Pesquisas recentes mostraram que o processo de retificação é o mais apropriado para que se obtenham superfícies de baixa rugosidade com viabilidade financeira para materiais cerâmicos. Ao se retificar estes materiais, há a necessidade da utilização de grande quantidade de fluido de corte e grandes gastos na aquisição de novas ferramentas. A utilização destes fluidos em grandes quantidades tem se tornado um problema para a indústria mecânica atual, devido à preocupação mundial ao que diz respeito à preservação do meio ambiente e saúde dos trabalhadores, por se tratar de substâncias tóxicas. Referente a esses estudos, surge uma metodologia denominada mínima quantidade de lubrificante (MQL), uma técnica que procura reduzir substancialmente a quantidade de fluido de corte utilizada no processo de retificação e melhora seu desempenho em comparação ao processo convencional de aplicação de fluidos. Assim, a pesquisa analisou o comportamento da retificação de cerâmica avançada juntamente com a técnica de mínima quantidade de lubrificante com adição de água utilizando rebolo diamantado com ligante resino cerâmico/metálico, obtendo importantes resultados em relação à utilização do método de MQL com adição de água. O rebolo utilizado sofreu pouco desgaste em todos os métodos de lubri-refrigeração pesquisados, mostrando assim ser um rebolo ideal para a retificação de cerâmica avançada. Em usinagens mais severas (avanço de 0,75 mm/min) a utilização de MQL com diluição em água apresenta rugosidades muito próximas ao método convencional.

Palavras chaves: cerâmica avançada, retificação, fluido de corte, MQL, meio ambiente

Abstract

The use of advanced ceramic materials in modern engineering have been essential, especially in aerospace, biomedical, electronics, optical and automotive industries. The main reasons for their use are derived from a non-metallic and inorganic composition that offers greater wear resistance as well as high temperature strength, low density and differentiated electromagnetic properties. Recent research has shown that the grinding process is the most appropriate in order to obtain surfaces with low roughness financial viability for ceramic materials. When rectify these materials, there is the need to use large amounts of cutting fluid and large expenditures in retooling. The use of these fluids in large quantities has become a problem for the mechanical industry today, due to the worldwide concern with regard to the preservation of the environment and workers' health, because it is toxic. Referring to these studies, there is a method called minimum quantity of lubricant (MQL), a technique that seeks to substantially reduce the amount of cutting fluid used in the grinding process and improves performance compared to the conventional process fluid application. Thus, the research analyzed the behavior of advanced ceramic grinding along with the technique of minimum quantity lubricant with added water using metal bond diamond wheel, obtaining important results regarding the use of the method of MQL with added water. The grinding wheel used suffered little wear on all methods of lubrication and cooling surveyed, thus showing to be an ideal wheel for grinding of advanced ceramics. In more severe machining operations (feed 0.75 mm / min) using MQL dilution with water roughness features very close to the conventional method. Therefore the application of MQL with water emulsion was feasible in some machining conditions, and can thus obtain large cost savings when applied on a large scale.

Keywords: advanced ceramics, grinding, cutting fluid, MQL environment.

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	4
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	5
3.1. AS PROPRIEDADES MATERIAIS CERÂMICOS	5
3.1.1. Dureza dos Materiais Cerâmicos	6
3.1.2. Mecânica à Fratura	8
3.1.3. Resistência ao Desgaste	10
3.2. REMOÇÃO DO MATERIAL CERÂMICO	11
3.2.1. Remoção Pelo Método Dúctil	13
3.2.2. Transição Entre Método Frágil - Dúctil	14
3.2.3. Remoção Pelo Método Dúctil	16
3.3 PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO	17
3.3.1. Rebolos	18
3.3.1.1. Grãos Abrasivos	20
3.3.1.2. Abrasivos Artificiais Convencionais	21
3.3.1.3. Superabrasivos	22
3.3.1.4. Diamantes	22
3.3.1.5. Nitreto Cúbico de Boro (CBN)	23
3.3.2 Tamanho dos Grãos Abrasivos	23
3.3.3. Ligas	24
3.3.3.1. Ligante Resinoide	24
3.3.3.2. Ligantes vitrificados	25
3.3.3.3. Ligante metálico	25
3.3.3.4. Corpo do Rebolo	26
3.3.4. Perfilamento e Avivamento	27
3.3.4.1. Ferramentas de dressagem estacionária	28
3.3.4.2. Ferramentas de dressagem rotativa	28
3.3.5. PARAMETRO DE CORTE	28
3.3.5.1. Forças de corte	30
3.3.5.2. Potencia de corte	32
3.3.5.3. EMISSÃO ACUSTICA	35
3.4. CARACTERIZAÇÃO DA RETIFICAÇÃO	35
3.4.1. Relação G	36
3.4.2. Rugosidade	37
3.4.3. Danos Superficiais	38
3.4.4. Micrografia Eletrônica de Varredura	39
3.5. REFRIGERAÇÃO	40

3.5.1. Mecanismos de Refrigeração e Lubrificação	41
3.5.2. Tipos de Fluidos de Cortes	42
3.5.2.1. Fluidos Integrais	43
3.5.2.2. Fluidos Solúveis	43
3.5.3. Considerações ambientais e fisiológicas	45
3.5.4. Aplicação Fluido de Corte	45
3.5.5. A Técnica de Refrigeração Convencional	46
3.5.6. A Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	46
4. MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	49
4.2. PARAMETRO DE ENTRADA	49
4.2.1. Corpos de Prova.....	49
4.2.2. Rebolo Utilizado – Diamantado Resina Cerâmico.....	50
4.2.4. O Sistema de Lubrificação por MQL e MQL/Água.....	51
4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA.....	54
4.4.1. Aquisição de Dados	54
4.4.2. Descrição do Método de Aquisição da Emissão Acústica	55
4.4.3. Rugosidade.....	57
4.4.4. Circularidade	58
4.4.5. Desgaste diametral do rebolo	59
4.5. PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE DAS AMOSTRAS PARA O MEV	60
4.5.1. Microscopia Eletrônica de Varredura	60
4.6. CONDIÇÕES DE USINAGEM UTILIZADAS NOS ENSAIOS.....	61
4.6.1. Procedimento Experimental.....	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1. POTENCIA DE CORTE.....	66
5.2. RUGOSIDADE	68
5.3. DESVIOS DE CIRCULARIDADE	70
5.4. DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO	72
5.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	73
6. CONCLUSÃO	77
7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	79
ANEXOS.....	88

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Penetradores para medição de microdureza (Kheinafes, 2006).</i>	7
<i>Figura 2 - Desenho esquemático representando o modelo de Griffith (1996).</i>	9
<i>Figura 3 - Desgaste abrasivo causado por partículas soltas ou presas.</i>	10
<i>Figura 4 - Estágios de formação das trincas através da indentação (Lawn, 1993).</i>	12
<i>Figura 5 - Alterações ocorridas na micro topografia durante a retificação (Tönshoff et al. 1999).</i>	18
<i>Figura 6 - Composição do Rebolo (K.WEGENER et al. 2011).</i>	19
<i>Figura 7 - Velocidade de corte (m/s) indicada para cada tipo ligante de rebolo (KOPAC & KRAJNIK, 2006).</i>	26
<i>Figura 8 - Comprimento de contato (Sanjay Agarwal et al 2012).</i>	30
<i>Figura 9 - Componentes de força para retificação cilíndrica</i>	32
<i>Figura 10 - Distribuição de energia térmica na retificação (Köning apud Severiano 2002).</i>	32
<i>Figura 11 - Energia específica versus a taxa de remoção específica da cerâmica (P. VENKATESWARA RÃO et al, 2010).</i>	34
<i>Figura 12 - Efeito da distância do bocal do MQL na rugosidade</i>	38
<i>Figura 13 - Classificação dos fluidos solúveis em água (El Baradie, 1996).</i>	44
<i>Figura 14 - Corpo de Prova</i>	50
<i>Figura 15 - Conjunto Completo do Sistema MQL e MQL com água.</i>	53
<i>Figura 16 – Desenho do bocal MQL</i>	54
<i>Figura 17 - Unidade de Tratamento do sinal de Emissão acústica</i>	56
<i>Figura 18 - Operação de medição de rugosidade</i>	57
<i>Figura 19 - Detalhe do medidor de circularidade</i>	58
<i>Figura 20 - Formação de degraus na superfície abrasiva</i>	59
<i>Figura 21 - Preparação da amostra para microscopia</i>	60
<i>Figura 22 - Representação dos ensaios realizados</i>	62
<i>Figura 23 - Valores da potencia de corte.</i>	66
<i>Figura 24 - Valores da rugosidade.</i>	68
<i>Figura 25 - Valores de desvio de circularidade em função das condições de ensaio.</i>	71
<i>Figura 26 - Valores de desgaste diametral do rebolo em função das condições de ensaio.</i>	72
<i>Figura 27 - Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração convencional: (a) $v_f = 0,25$ mm/min; (b) $v_f = 0,50$ mm/min</i>	74

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Propriedade do Material Ensaiado</i>	<i>50</i>
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- a – profundidade de corte (-)
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (-)
- a_d - profundidade de dressagem (μm)
- Al_2O_3 - óxido de alumínio (-)
- ANSI – American National Standards Institute (-)
- b - largura média no topo dos grãos abrasivos (mm)
- c - comprimento da trinca crítica (μm)
- CaO – óxido de cálcio (-)
- CBN – nitreto cúbico de boro (-)
- CNC - comando numérico computadorizado (-)
- CVD - chemical vapor deposition (-)
- d_c – espessura máxima do cavaco (μm)
- D_e – diâmetro equivalente (mm)
- D_S – diâmetro do rebolo (mm)
- D_w – diâmetro da peça (mm)
- E – módulo de elasticidade ou módulo de Young (GPa)
- F_n – força normal de corte (N)
- F_t – força tangencial de corte (N)
- G – relação entre volume de material removido e volume de rebolo gasto (-)
- H – dureza do material (GPa)
- h_{eq} – espessura equivalente de corte (μm)
- HV – dureza Vickers (GPa)
- l_c – comprimento de contato (mm)
- IFSC – Instituto de Física de São Carlos (-)
- ISO - International Organization for Standardization (-)
- K_{ic} – tenacidade à fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
- K_s – pressão específica de corte (-)
- K_n – tensão de escoamento do material (N/m^2)
- L – espaçamento entre grãos abrasivos (μm)

MEV - microscópio eletrônico de varredura (-)

MgO – óxido de magnésio (-)

MQL – mínima quantidade de lubrificante (-)

MQR – mínima quantidade de refrigeração (-)

N – número de encontros dos grãos abrasivos ativos com a peça (-)

P – força normal aplicada aos grãos abrasivos (N)

pb – probabilidade do grão ser desalojado devido à fratura do aglomerante (-)

Q_w – taxa de remoção de material (mm^3/s)

Q_w^* – taxa específica de remoção de material (mm^2/s)

R – fator de resistência ao desgaste (-)

SiC – carbetto de silício (-)

SiO₂ – óxido de silício (-)

t – tempo de retificação (s)

t_s – tempo de centelhamento (s)

USP – Universidade de São Paulo (-)

V – volume de material removido por unidade de distância de deslizamento (mm^3/m)

V_f – velocidade de mergulho ou avanço (mm/min)

V_s – velocidade tangencial do rebolo (mm/min)

V_w – velocidade tangencial da peça (mm/min)

W – peso médio de cada grão (g)

ZrO₂ – óxido de zircônia (-)

Z_s – volume de rebolo gasto (mm^3)

Z_w – volume de material removido (mm^3)

ξ – constante adimensional (-)

δ - desgaste radial do rebolo (mm)

σ - tensão de ruptura (MPa)

y - constante que relaciona o tamanho da falha com o tamanho da amostra (-)

γ_i - energia superficial por unidade de área para iniciar a fratura (J/m^2)

α = constante independente do material (-).

1 – INTRODUÇÃO

Cerâmicas de engenharia têm sido amplamente utilizadas em aplicações industriais devido às suas propriedades superiores, tais como alta resistência térmica, dureza, resistência ao desgaste, inércia química, estabilidade térmica e uma elevada relação de rigidez-peso. No entanto, a utilização generalizada de cerâmica de engenharia têm sido limitados pelas dificuldades de usinagem e altos custos de usinagem. Portanto, há uma necessidade essencial para técnicas de usinagem eficiente e custo-eficiente aplicáveis à engenharia de materiais cerâmicos. A sequência do processo de fabricação de peças de cerâmica estrutural consiste normalmente na síntese do pó, conformação, sinterização e quando as aplicações na área de engenharia necessitar de tolerâncias dimensionais precisas ou geometria complexa, a retificação torna-se imprescindível. O sucesso da cerâmica estrutural na maioria das aplicações depende não somente das propriedades do material e do projeto da peça, mas também da qualidade do produto usinado, em termos de acabamento superficial, tensões residuais e defeitos (MARINESCU *et al.* 2008).

Jahanmir *et al.* (1999) e Chand & Guo (2000) citam que a retificação, que é o processo mais utilizado industrialmente na usinagem de cerâmica, pode representar até 90% do custo total do componente cerâmico.

Um dos principais fatores em um sistema de retificação de cerâmica é a aplicação do refrigerante-lubrificante. A adequada seleção e utilização de fluidos no processo de retificação de cerâmica podem resultar em bom desempenho do processo, com menores forças de retificações, melhor qualidade superficial e desgaste do rebolo inferior (MARINESCU *et al.* 2007). Apesar disso, a aplicação do fluido de corte convencionais, isto é, entrega de inundação, não é muito eficiente quando o fluido não pode penetrar adequadamente à zona de contato entre o rebolo e a peça de trabalho. O custo associado com o refrigerante-lubrificante, incluindo a eliminação de resíduos, constitui em um elevado custo de retificação (BRINKSMEIR *et al.* 1999) . Além disso, os fluidos de corte comuns representam riscos para a saúde e segurança, tem impacto ambiental negativo e seu consumo deve ser restrito.

O meio ambiente e a saúde dos seres que nele vivem tornou-se um dos assuntos mais importantes da presente conjuntura, pois a poluição e os resíduos industriais que ameaçam a sobrevivência, desta e das gerações futuras, despertam cada vez mais a atenção e a apreensão das autoridades públicas, da comunidade científica e de inúmeras organizações internacionais. Assim sendo, indústrias, universidades e centros de pesquisas são influenciados a buscar métodos alternativos que equilibrem o conjunto: meio ambiente - seres vivos - geração de riquezas.

No meio industrial, um dos causadores de tal desequilíbrio é o fluido de corte utilizado nas operações de usinagem, já que é um poluente bastante agressivo quando utilizado e descartado sem as devidas precauções e responsabilidade.

Técnica de lubrificação por quantidade mínima (MQL) tem sido estudada e aplicadas em diferentes processos de usinagem para atuar como um método alternativo ecológico de refrigeração inundação (TAWAKOLI *et al.* 2009). Em usinagem MQL, um spray de óleo-ar chamado névoa de óleo é entregue na zona de contato ferramenta de trabalho. MQL não só reduz o consumo de fluidos de corte na usinagem, mas também pode proporcionar melhor lubrificação. Além disso, o desenvolvimento de lubrificantes de alta qualidade, como óleos sintéticos biodegradáveis ou óleos minerais livres de cloro com baixos aromáticos para aplicações MQL diminui riscos ambientais lubrificantes de uso tradicional e aumenta a qualidade da usinagem do material de trabalho. Malkin Hafenbraedl *et al.* (2001) descobriram que utilizando técnica de MQL na retificação cilíndrica interna, proporciona eficiente lubrificação, reduzindo o poder de retificação, bem como energia específica e desgaste do rebolo. Investigações realizadas pela Brinksmeier *et al.* (1999), mostrou que o tipo de lubrificante utilizado durante a moagem MQL (éster óleo ou emulsão) pode influenciar consideravelmente resultados do processo. Sadeghi *et al.* (2009) avaliou o desempenho de MQL com dois tipos de lubrificantes (óleo vegetal e do éster sintético óleo) em processo de liga de titânio: Ti-6Al-4V.

De acordo com Marinesco *et al.* (2004) *apud* Malkin (2008), a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que é usualmente a pulverização de uma quantidade mínima de óleo integral em um fluxo de ar e posteriormente impellido à alta velocidade na região do corte. Esta técnica pode, em alguns casos,

ser utilizada com o lubrificante diluído em água (uma nova variante), diminuindo ainda mais o volume de óleo aplicado.

Conforme Shen (2008), o uso da técnica de MQL em retificação ainda é uma área de pesquisa relativamente nova, e que os resultados destes estudos mostraram que com uma seleção adequada do sistema de MQL e dos parâmetros de corte é possível obter um desempenho semelhante ao da lubri-refrigeração convencional por inundação, em termos de lubrificação, vida útil da ferramenta e acabamento superficial.

Tawakoli *et al.* (2010) mostraram em seus experimentos que quando se utiliza como condição de lubri-refrigeração a Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), a taxa de fluxo de óleo, a pressão do ar, a posição angular e a distância do bocal aplicador em relação à zona de contato peça-rebolo, são importantes parâmetros que influenciam no desempenho da operação de retificação.

2 – OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo promover um aprimoramento da técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL tradicional, MQL1: 1, MQL1:3, MQL1:5). A eficácia do sistema será testada na retificação cilíndrica externa de mergulho usando corpos de provas de material cerâmico avançado. O rebolo usado no ensaio será inédito, com ligante resino cerâmico/metálico. Os resultados observados serão analisados através da potência de corte, rugosidade, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a ser apresentada é relativa aos principais temas envolvidos na elaboração deste trabalho, ou seja, as cerâmicas avançadas; o processo de retificação; os rebolos diamantados; os fluidos de corte e sua aplicação; a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e as variáveis de saída do processo de retificação.

3.1. AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CERÂMICOS

Segundo Tönshoff *et al.* (1999), as cerâmicas estruturais têm de suportar cargas externas e ser montadas em um conjunto mecanicamente ativo, consistindo geralmente de uma combinação de materiais. Para esta classe de cerâmicas, as propriedades mais relevantes são: dureza, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura, resistência mecânica e resistência ao desgaste.

Os materiais cerâmicos geralmente possuem ligações iônicas, e/ou covalentes, ou combinação das duas. O deslizamento de discordâncias é muito pouco na estrutura que facilmente resulta em trincas ou vacâncias. Com o movimento de deslocamento limitado, não permite em materiais cerâmicos uma deformação plástica em grande escala, como acontece nos materiais metálicos antes da fratura. O processo de retificação pode causar uma introdução contínua de novos deslizamentos de discordâncias devido às tensões de cisalhamentos. As vacâncias são formadas pelo contorno de grão de um processo de recuo (BI ZHANG *et al.* 2003).

Nos materiais cerâmicos as microtrincas podem ser criadas com efeito combinado de cargas aplicadas externas e tensões residuais, onde estas tensões residuais são geradas por anisotropia de expansão térmica em uma ou mais fases da cerâmica. A baixa tenacidade em materiais cerâmicos é atribuída principalmente em dois potenciais. Um deles é a interação das trincas e microtrincas que causa a redistribuição das tensões causando assim o enfraquecimento do material. Outra contribuição é a redistribuição das tensões na trinca principal quando as microtrincas são nucleadas (CHEN *et al.* 2004).

3.1.1. Dureza dos Materiais Cerâmicos

A definição de dureza, tal como já é conhecido, é a resistência de um material à penetração permanente à outro material mais duro. Quanto à microdureza, o processo envolve a aplicação de uma carga fixa sobre um penetrador de diamante e a medição, com a ajuda de um microscópio, o tamanho da indentação na superfície do material após a sua descarga, de modo que a deformação elástica do material é ignorada (TAWAKOLI *et al.* 2010).

No passado, a microdureza do material foi avaliada através de métodos diferentes, o mais comum dos quais é a Vickers tradicional. Por este teste a medida da microdureza depende do teste de carga e tempos de permanência (TAWAKOLI *et al.* 2011). No entanto, este método envolve algumas incertezas devidas à imprecisão das medições ópticas e a percepção do operador (VINCENZO TEBALDO *et al.* 2012).

O quociente entre a carga e a área da impressão de indentação residual é considerado como a medida de dureza. Três níveis de dureza podem ser medidas: nano, micro e macro durezas. Indentações nano estão na escala sub-micron e pode ser usado para estimar as propriedades mecânicas de estruturas muito finas. A escala de tamanho micron tem sido amplamente aplicada no nível microestrutural quando penetradores de pirâmide de diamante são normalmente aplicado. Macrodureza são muito maiores em escala do que micro e nanodureza e muitas vezes são aplicados procedimentos de ensaio em geral. No entanto, quando é feito o ensaio de macrodureza na cerâmica, o teste resulta geralmente na formação de lascas e trincas (LEPOSAVA SIDJANIN *et al.* 2007).

Osman Sahin *et al.* (2008) usou em seus experimentos o modelo matemático Oliver - Pharr para medir a dureza em materias cerâmicos:

$$P = \alpha (h - hf)^m \quad (1)$$

Onde: P é carga, h e hf são as profundidade do indetador incial e final respectivamente, α geometria constante, m é o expoente relativo a geometria do indentador. A rigidez de contato de descarga, S, é estabelecida pela diferenciação da equação abaixo na profundidade máxima de penetração, $h = h_{\max}$ (i.e., Eq. (2)).

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{max}} (h_{max} - hf)^{m-1} \quad (2)$$

Então, a profundidade de contato, h_c usando a equação 3:

$$h_c = h_{max} - \beta \frac{P_{max}}{dP/dh} \quad (3)$$

onde P_{max} é a carga máxima do indentador e β é uma constante que depende da geometria do penetrador. Tem sido demonstrado que β tem um valor empírico de 0,75 para o penetrador Vickers.

A dureza usualmente é definida pela relação da carga máxima de indentação P_{max} e a área projetada para a impressão A_c , A dureza dinâmica H_d , então pode ser calculada a partir da equação 4.

$$H_d = \frac{P_{max}}{A_c} = \frac{P_{max}}{26.43h_c^2} \quad (4)$$

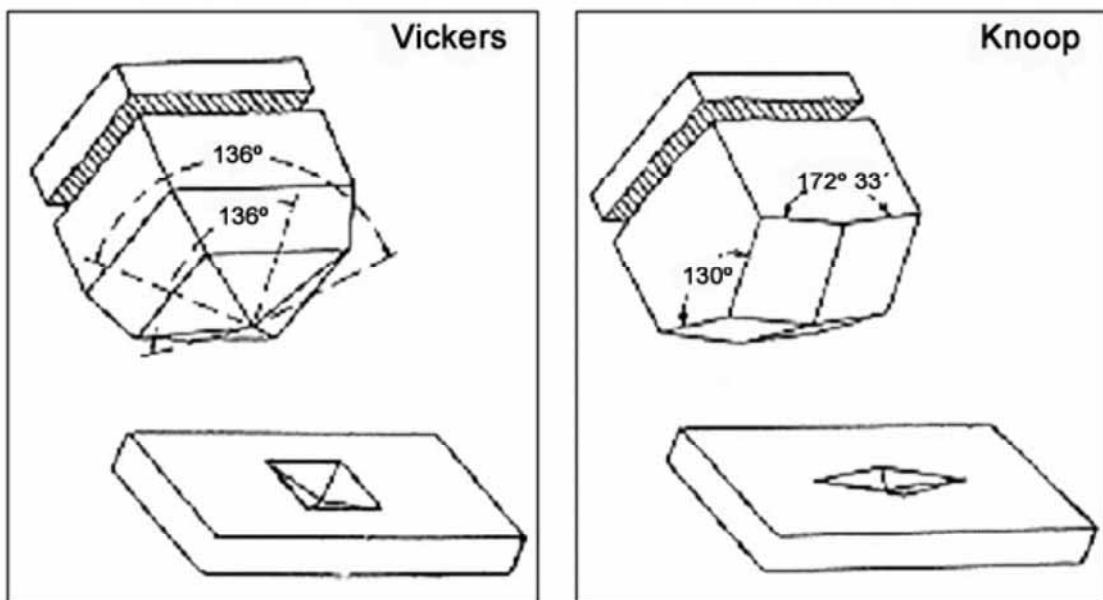


Figura 1 – Penetradores para medição de microdureza (Kheinafes, 2006).

3.1.2. Mecânica à Fratura

Nos materiais cerâmicos, três zonas diferentes podem ser distinguidas no interior do material. Imediatamente abaixo da cunha, um núcleo hidrostático desenvolve o que é devido à alta compressão triaxial induzida pelo penetrador. Esta zona pode absorver apenas por trituração e mecanismos de fragmentação. Fora do núcleo comprimido, uma zona circundante de grandes deformações desenvolve devido à ação de empurrar o núcleo. Nesta área, as trincas de tensão podem ser iniciadas a partir de falhas pré-existentes no material. Fora desta área grande (cujo tamanho depende da área de contato, por fricção entre a cunha e o material de base e na carga normal F_n), o material comporta-se elasticamente, e os campos de tensões previstos pelas teorias lineares podem ser considerados válidos (MALKIN *et al.* 2008).

Fratura padrões em materiais cerâmicos, sob penetradores contundentes, geralmente começam imediatamente com microtrincas fora da área de contato. Através do aumento da carga normal, estas trincas de superfície tendem a evoluir para as assim chamadas trincas cone Hertzianas. Na presença de penetradores agudos (por exemplo, cones ou pirâmides), a elevada tensões hidrostática por baixo da ponta proporciona padrões de fratura diferentes. Em qualquer caso, a ação de divisão dos resultados principais confinados na propagação de trincas incorporada abaixo do penetrador, cuja extensão é controlada pelo tamanho do núcleo hidrostático. Através do aumento da carga, as trincas em forma de moeda evoluem para a meia configuração onde a rachadura atinge a superfície. Por outro lado, de fratura com carga tangencial parte de trás da ferramenta em relação à direção de corte, em que as tensões de tração elevadas se encontram. Além disso, o padrão de fratura depende da interação entre cargas normais e tangenciais e pode evoluir para a formação de cavacos (ALBERTO CARPINTERI *et al.* 2002).

A teoria de Griffith considera que um corpo frágil contém pequenos vazios (microtrincas). Quando um esforço de tensão externo é aplicado, as pontas das microtrincas atuam como concentradores de tensão. Como o corpo não pode liberar estas tensões através de deformação plástica, a tensão local na região próxima à ponta da microtrinca mais severa (crítica) aumenta até atingir a resistência

teórica, causando a ruptura do corpo. A equação 5 descreve este processo, segundo a teoria Griffith (1996):

$$\sigma = \frac{1}{y} \left[\frac{2\gamma_i E}{c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Onde:

σ = tensão de ruptura;

y = constante que relaciona o tamanho da falha com o tamanho da amostra;

γ_i = energia superficial por unidade de área para iniciar a fratura;

E = Módulo de Young;

c = comprimento da trinca crítica.

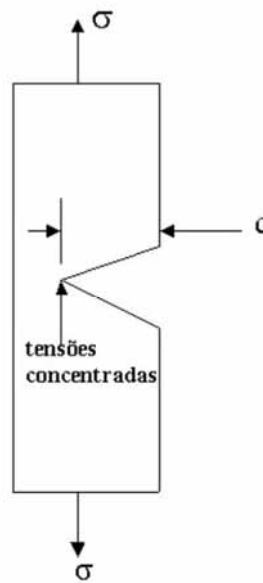


Figura 2 - Desenho esquemático representando o modelo de Griffith (1996).

J.H Lee (2012) usou modelo Lawn - Evans - Marshall (LEM) para quantificar a tenacidade à fratura, conforme apresentado na equação 6.

$$K_I = \frac{P_{max}}{c^{\frac{3}{2}}} \Pi \left(\frac{E}{H}, \nu, \phi, \frac{c}{a} \right) \quad (6)$$

Onde K_C é a tenacidade à fratura, P_{max} é a carga máxima de indentação, c e a são tamanho das trincas e comprimento de contato respectivamente, E é o módulo de Young, ν é o coeficiente de Poisson, H é a dureza do material, e ψ é o ângulo do penetrador.

3.1.3. Resistência ao Desgaste

Shackelford (1996) define o desgaste como a remoção de material na superfície como resultado de uma ação mecânica. Na figura 7 é ilustrado o mecanismo de desgaste abrasivo por partículas presas e soltas. O autor ainda identifica quatro principais tipos de desgaste:

- ⤴ Adesão – quando duas superfícies lisas deslizam entre elas e os fragmentos de uma superfície são expulsos e aderem à outra superfície.
- ⤴ Abrasão – ocorre quando uma superfície dura e rugosa desliza sobre uma superfície mole. São formados sulcos (asperidades) na superfície do material mole e partículas que se originaram do desgaste.
- ⤴ Fadiga superficial – é causada por tensões de cisalhamento tangenciais à superfície do material, bem como impactos iterativos.
- ⤴ Corrosão – ocorre com o deslizamento em ambiente corrosivo e agrega degradação química aos efeitos físicos do desgaste.

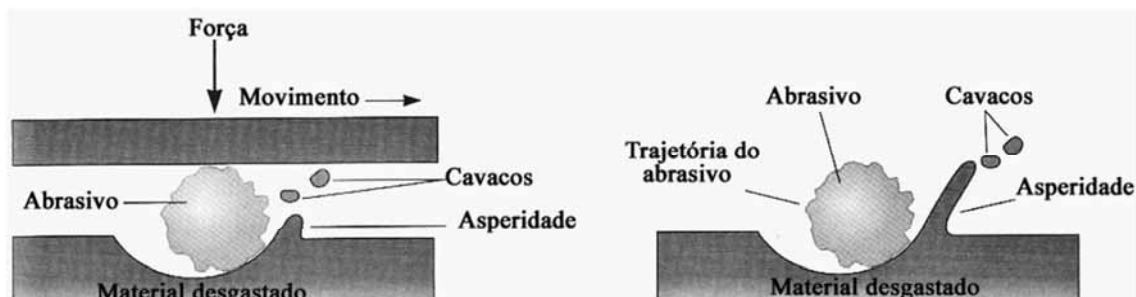


Figura 3 - Desgaste abrasivo causado por partículas soltas ou presas.

Marinescu *et al.* (1998), de uma forma empírica mostrou a relação entre as propriedades mecânicas e resistência ao desgaste e descrita pela equação 7.

$$R \sim Kic^{\frac{3}{4}}H^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Onde R = Fator resistência ao desgaste

3.2. REMOÇÃO DO MATERIAL CERÂMICO

A remoção do material acontece quando há interação entre o meio de retificação e a peça. A remoção de material cerâmico acontece através de trincas laterais e trincas médias. A presença da trinca transgranular (fratura através dos grãos) em conjunto com a trinca intragranular (fratura ao longo do contorno do grãos) sugere uma interação de microfratura ocasionando a remoção do material. No entanto com a abundância das trincas intergranulares na superfície e abaixo da superfície retificada evidencia para o deslocamento do grão (SAID JAHANMIR *et al.* 2003).

Em retificação de cerâmicas avançadas finas (máximo 3 µm), embora bem definida a superfície a interação entre a trincas laterais resulta em uma pequena parte de remoção do material, em vez, das trincas intergranulares, sugestão que o mecanismo de remoção do material em grãos finos acontece por deslocamento de grão (HOCKIN H.K. XU *et al.* 2010).

Segundo Lawn *et al.* (1993) numa indentação, o contato do indentador com a superfície da cerâmica, inicialmente desenvolve uma zona plástica de pequeno diâmetro, conforme ilustrado na (figura 4. a) Em seguida, uma pequena trinca longitudinal (trinca média) inicia-se devido ao campo de tensão desenvolvido (figura 4. b). A trinca se propaga à medida que a indentação prossegue e aumenta (figura 4. c).

Um decréscimo da carga resulta na redução do tamanho ou no fechamento da trinca longitudinal devido às tensões de compressão (figura 4. d). A redução subsequente da carga promove a formação de trincas transversais devido

às tensões laterais (figura 4. e). Após a liberação da carga, devido ao campo de tensão residual desenvolvido, o tamanho da trinca lateral aumenta, conduzindo à separação do material na forma de cavacos (figura 4. f).

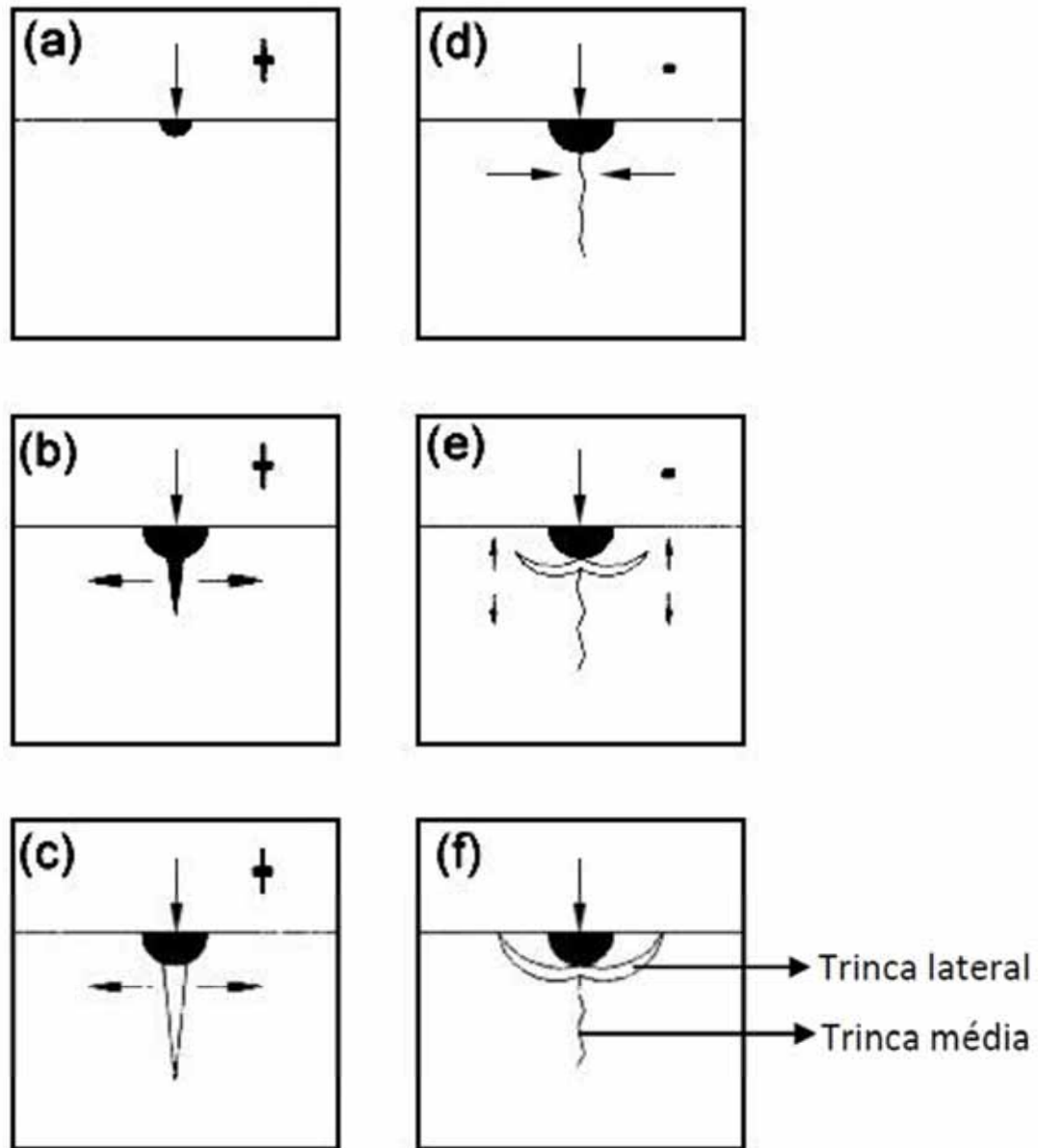


Figura 4 - Estágios de formação das trincas através da indentação (Lawn, 1993).

K.M Patel (2009) estudou a remoção do material cerâmico através da usinagem de descarga elétrica (UDE). Os dois principais mecanismos de remoção de material, que podem ocorrer durante eletro erosão de materiais cerâmicos estão a evaporação de fusão, e dissociação, ou fratura relacionada ao lascamento, dependendo das propriedades do material e dos parâmetros UDE. Muitas tentativas

foram feitas para compreender os mecanismos de remoção de material durante a UDE de produtos compósitos cerâmicos.

Fragmentação térmica ocorre quando três fraturas distintas se combinam: subsuperfície trincas laterais, trincas verticais e fratura por choque térmico induzido devido ao resfriamento rápido.

Sangay Argarwal, P. Venkateswara Rao *et al.* (2011) estudou que os danos abaixo da superfície usinada exposta foi generalizado por meio de lascamento, e a camada de lascamento induz principalmente os deslocamentos dos grãos. Também verificou que durante a retificação, o contato de uma partícula individual do diamante junto com peça usinada produz uma perda de resistência gerando uma distribuição de micro trincas no contorno de grão. A camada danificada contribui para o deslocamento de grãos individuais resultando micro fraturas no contorno de grão.

3.2.1. Remoção Pelo Método Dúctil

Na usinagem de cerâmica a remoção de material se dá através de fratura frágil, no entanto, quando as forças de usinagens são baixas o material pode ser removido pelo modo dúctil sem fratura. A iniciação de trincas no processo de remoção do material está associada com a força normal. A principal característica do modo dúctil é a ausência de trincas residuais na peça. É consenso na literatura que trincas originadas durante a retificação podem favorecer a resistência à ruptura de um componente de cerâmica estrutural. Assim, a resistência mecânica de componentes cerâmicos retificados no modo frágil é muito sensível tanto ao processo de retificação, como à direção de retificação. Quando a indentação é realizada com baixa carga, somente uma deformação plástica (permanente) é introduzida na peça. Para a maioria dos materiais frágeis, esta carga limite é relativamente baixa e não depende exclusivamente das propriedades mecânicas do material indentado, mas também da forma do indentador (XIÃO - FEI SONG, LING YIN *et al.* 2013).

Se a energia cinética total máxima de uma partícula colide, que é transferido para dentro do material da peça de trabalho no momento do impacto superior à sua energia cinética para a iniciação trinca remoção do material ocorre

pelo modo frágil por fratura lateral, caso contrário, o material é removido de um modo dúctil. Com base neste raciocínio, podem-se considerar três condições diferentes no que diz respeito ao modo resultante de remoção de material em micro-USM processo: (H. ZAREPOUR *et al.* 2012).

$U_p < U_R^*$: Não ocorre ruptura frágil em peça de trabalho e o material é removido por partículas abrasivas de um modo puro dúctil.

$U_R^* \leq U_p < U_L^*$: Material é retirado parcialmente no modo dúctil e trincas radial/media que ocorre após o choque de partículas. Fratura lateral é improvável de ocorrer no presente caso.

$U_L^* \leq U_p$: Trinca lateral e ocorre a remoção de material por propagação de trincas de um modo puro frágil

3.2.2. Transição Entre Método Frágil - Dúctil

Marinescu *et al.* (1998) divide a transição do modo dúctil e frágil em escalas.

- Maior que a escala de micrômetro – nesta região, micro trincas e discordâncias estão normalmente incluídas no campo tensionado. Conforme aumenta a escala de retificação, aumenta o número de defeitos no campo tensionado e diminui a energia necessária para propagação de trincas (modo frágil).
- Escala de micrômetro a sub – micrômetro – a energia para fatura não diminui nesta região conforme o campo tensionado. O mecanismo de remoção de material tende a mudar de frágil para dúctil.

- Escala de sub – micrômetro para nanômetro – nesta região a retificação é realizada numa superfície livre de defeitos. A energia para a fratura tende para o mesmo nível de energia para deformação plástica. Esses valores são afetados pela temperatura ambiente.

O conceito básico é que o ponto de transição modo ductil para o fragil ocorre quando a intensidade da tensão é igual à resistência à fratura do material. O início da formação e propagação de trincas é o ponto em que a intensidade de tensão excede a resistência à ruptura do material (SIVA VENKATACHALAM *et al.* 2009).

Fan Yang *et al.* (2008) demonstrou, que o limite do contorno de grão e o contorno de grão deformado são como dois mecanismos concorrentes que controlam a propagação de trincas nos metais nanocristalinos. O limite denominado pela deformação plástica faz com que as trincas atenuem as tensões perto da ponta da trinca para relaxar, enquanto a de coesão no contorno de grão faz com que a trinca se amplie. A quantificação dos dois mecanismos concorrentes (limite do contorno de grão e a de coesão do contorno de grão) pode ser modelada pela dissipação de energia no processo de deformação, conforme apresentado na equação 8..

$$\dot{W} = \dot{W}_{\text{dif}} + \dot{W}_{\text{Lim}} + \dot{W}_{\text{GB}} + \dot{W}_{\text{Desordem}} \quad (8)$$

Onde, \dot{W} correspondem a dissipação de energia por meio de quatro mecanismos: difusão mássica no limite do contorno de grão, deslocamento do grão na camada limite, flutuação da área de contorno de grão e transição ordenação / desordem, respectivamente, segundo a equação 9.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{diffusion}} &= \frac{8m^2 K_B T D^2}{3\sqrt{3}\Omega \left\{ nD_v + D_B \sum_{i=1}^n \frac{\delta}{l} \right\}} \frac{\dot{\epsilon}^2}{\Delta \epsilon^2}, & \dot{W}_{\text{slide}} &= \frac{8\eta_B}{\sqrt{3}\delta} D s^2 \dot{\epsilon}^2 / \Delta \epsilon^2, \\ \dot{W}_{\text{GB}} &= \left(\sqrt{2\sqrt{3}} - \sqrt{3} \right) \frac{4\Gamma}{3D} \frac{\dot{\epsilon}}{\Delta \epsilon}, & \dot{W}_{\text{disorder}} &= \left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \Delta g_0 \frac{\dot{\epsilon}}{\Delta \epsilon} \end{aligned} \quad (9)$$

Onde m e n são parâmetros adimensionais de difusão, K_B indica a constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta, D é o diâmetro do grão, D_V e D_B denotam a difusividade através da rede e por meio de limites de grão, respectivamente, δ é a espessura da camada desordenada e l a distância de difusão, η_B é o coeficiente de viscosidade e s a quantidade adimensional deslizante, Γ denota energia limite de grãos por unidade de área, Δg_0 denota a diferença de energia a partir do desordenada ao estado ordenado, e $\hat{\sigma}$ denota o incremento de tensão depois de um ciclo do processo de deformação.

Alley & Devereux (2003) estudaram o efeito do PH do fluido de corte sobre a dureza dinâmica e a consequente alteração na transição de modo de remoção. A dureza seria afetada pela movimentação das discordâncias. Os autores reportam variações na caracterização após a retificação (resistência mecânica e rugosidade), bem como parâmetros de processo (força de retificação) em função da dureza/ph. O potencial zeta representa o potencial no ponto entre a porção difusa da dupla camada elétrica, que é formada espontaneamente na interface com um eletrolítico. Ele representa o potencial eletrostático gerado pelo acúmulo de íons na superfície de uma partícula em contato com eletrolítico.

3.2.3. Remoção Pelo Método Dúctil

Zhong (2003) observou que a remoção pelo modo dúctil e frágil na retificação pode ocorrer no mesmo material frágil e a transição entre eles pode ser controlada pela configuração dos parâmetros de processos (avanço, fluido de corte). Em seu trabalho, ele reporta um modo intermediário entre frágil e dúctil, que ele chama de retificação por microtrincamento ou retificação parcial dúctil.

A principal característica do modo dúctil é a ausência de trincas residuais nas peças. As trincas originadas durante a retificação podem diminuir a resistência à ruptura de um componente de cerâmica estrutural. Assim, a resistência mecânica de componentes cerâmicos retificados no modo frágil é muito sensível tanto no processo de retificação, como à direção de retificação (MIKIJEL & ALLOR *et al.* 2003).

A usinagem dos materiais cerâmicos pelo regime dúctil é atribuída à transformação de alta pressão de fase que ocorrem no material causado pela compressão elevada e tensões de cisalhamento induzido pela ponta da ferramenta. Cerâmicas monocristalinas é conhecido por sofrer uma transição não metálica para as pressões hidrostáticas no intervalo de 10-13 GPa. Isto ocorre devido alta transformação de fase β -Sn (Si-II) da estrutura da estrutura de diamante (Si-I) (DEEPAK RAVINDRA *et al.* 2012).

3.3 PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO

Processo de retificação é utilizado como a técnica mais eficiente e eficaz para dar acabamento em peças de cerâmica. Como a qualidade de cerâmicas avançadas melhorou drasticamente com as técnicas de produção modernas, os defeitos são reduzidos significativamente em termos de seus tamanhos e números. A principal fonte de apresentar danos em peça de cerâmica é a retificação ou outros processos de usinagem. A cerâmica por ser um material duro e frágil, o processo de retificação é feito removendo material através de danos tais como trincas, camadas de pulverização e uma quantidade limitada de deformação plástica. A retificação pode também induzir tensões residuais de superfície que podem afetar a resistência mecânica e a resistência à fadiga nos materiais cerâmicos. A superfície residual e danos subsuperfície podem alterar seriamente as propriedades de superfície, e provocam a degradação de força ou mesmo uma falha catastrófica na peça cerâmica (BI ZHANG *et al.* 2003).

As forças de retificação desempenham um papel importante no processo de retificação, uma vez que é um importante indicador quantitativo para caracterizar o modo de remoção do material (a energia específica de retificação e os danos de superfície são fortemente dependentes das forças de retificação) no processo de retificação em materiais cerâmicos. Portanto, a medição das forças durante o processo é essencial. A proporção da força tangencial específica em relação a força normal específica pode ser considerada um indicador de fragilidade material (SANJAY AGARWAL *et al.* 2011).

De acordo com Tönshoff *et al.* (1999), a micro topografia ativa da superfície dos rebolos é determinada por dois processos: o procedimento de

condicionamento para preparação da ferramenta (perfilamento e avivamento) e as alterações da micro topografia durante a retificação. A abrasão, a fratura dos grãos abrasivos, a remoção dos grãos abrasivos da liga e o desgaste da liga são responsáveis pela alteração na micro topografia do rebolo.



Figura 5 - Alterações ocorridas na micro topografia durante a retificação (Tönshoff *et al.* 1999).

3.3.1. Rebolos

Um rebolo abrasivo (mais especificamente, o aro, ou ferramenta de retificação) é constituído por grãos abrasivos (areias abrasivas), material ligante e poros. O rebolo pode ser fabricado numa grande variedade de tipos ou estruturas determinadas pela percentagem de volume relativo de grãos abrasivos, de fixação e de porosidade. Quando uma grande quantidade de grãos abrasivos são misturados com material ligante e prensados sob alta pressão, uma camada densa, com baixa porosidade resulta em um rebolo. Esses grãos formam arestas de corte de geometria indefinida. Assim, seu desempenho está relacionado ao tipo de grão abrasivo, as propriedades abrasivas do material ligante (J. H LIU *et al.* 2007).

Os rebolos são compostos por três elementos, o grão abrasivo de contato de material e - remoção, o espaço intergranular para a armazenagem de material removido e o fluxo de líquido de arrefecimento, (poros) e a aglomeração

para reter a areia no rebolo. Rebolos são distinguidos pelo seu material abrasivo e classificados como convencionais (óxido de alumínio e carboneto de silício) e (nitreto cúbico de boro - CBN), rebolos superabrasivo. Eles são ainda classificados em relação ao seu sistema de aderência. Rebolos com ligante cerâmico contem poros no interior do corpo, que criam o espaço intergranular. Para rebolos metálicos e rebolos resinoides espaço intergranular deve ser criado dentro do processo de cura (K.WEGENER *et al.* 2011).

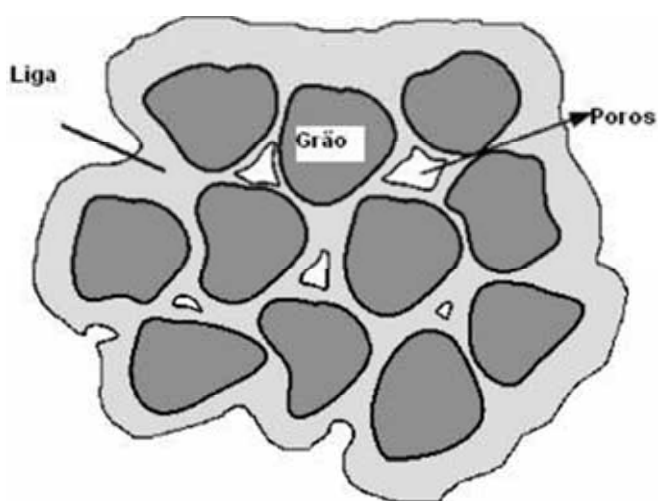


Figura 6 - Composição do Rebolo (K.WEGENER *et al.* 2011).

Desde o aparecimento do rebolo pode-se distinguir a geometria micro e geometria macro. A geometria macro é descrita por um casco convexo sobre todos os grãos salientes na direção circunferencial e perfil médio na direção do meridiano. A geometria micro é dada pelas características geométricas da dimensão do grão, ou um espaço intergranular. Se um grão inteiro é removido do rebolo, isto é chamado de arrancamento. Caso a carga aplicada em um grão for muito alta, porções de grãos se rompem, criando novas arestas afiadas, mas normalmente inativas. Este processo é chamado de quebra do grão. Durante a retificação, por definição, existe um contato entre as arestas de corte e materiais. Este contato é responsável por abrasão do grão, que leva ao desgaste do grão que consiste de atrito de desgaste e com isso ocasiona micro e macro fratura nas arestas. O contato entre o aglomerado e o cavaco leva ao desgaste, o que enfraquece a retenção de grãos. A sequência começa com danos de desgastes por atrito nas zonas de contato, acompanhada de um aumento nas forças de grãos ou por um

enfraquecimento das forças de retenção de grãos, dando origem a uma falha mais proeminente, além disso, que conduz a um aumento de geração de calor, que por sua vez aumenta o desgaste e danos a integridade da superfície da peça (K.WEGENER *et al.* 2011).

3.3.1.1. Grãos Abrasivos

Os grãos abrasivos empregados em todas as operações de retificação são partículas duras e frágeis que podem ser classificadas de acordo com sua dureza ou composição química (SHAW, 1996).

A escolha de um abrasivo para uma aplicação em particular pode ser baseada nos testes de durabilidade envolvendo resistência ao impacto, resistência à fadiga, compressão, friabilidade dinâmica e a resistência ao lascamento os quais ocorrem sob a influência de tensão térmica (MARINESCU *et al.* 2004).

Uma importante característica de um abrasivo é que ele seja mais duro do que o material a ser retificado. A dureza é geralmente definida em termos de resistência a indentação estática como determinado por um teste de dureza Knoop. O método de medição de dureza Knoop consiste em realizar uma microindentação na amostra com uma ponta de diamante lapidada na forma piramidal sob cargas que podem variar de 25 a 300 gramas. O valor de dureza é definido pela medição da diagonal da impressão produzida pelo diamante e relacionando-a com a carga utilizada (STEMMER, 2005).

Outras características essenciais para avaliação de um abrasivo é a friabilidade. Para Marinescu *et al.* (2006), friabilidade é a tendência da desintegração do grão em pequenos fragmentos sob pressão. Estas características são em função da forma, integridade e pureza do cristal que formam o grão. Estas propriedades que são criadas em consequência do crescimento do cristal durante sua síntese.

Existem dois principais grupos de grãos: naturais e artificiais.

Os abrasivos naturais são aqueles extraídos diretamente da natureza, pode-se citar como os principais representantes deste grupo: coríndon, esmeril, quartzo e o diamante.

O segundo grupo, os abrasivos artificiais, iniciou o seu desenvolvimento no final do sec. XIX. Estes abrasivos possuem vantagens em relação aos abrasivos naturais, pois eliminam os problemas das impurezas e a

inconsistências dos abrasivos naturais. Isto é, sua produção pode ser cuidadosamente controlada. Os principais representantes deste grupo são: nitreto cúbico de boro (CBN), carboneto de silício (SiC), alumina sinterizada, carboneto de tungstênio e óxido de alumínio (Al_2O_3) (KRAR, 1994).

3.3.1.2. Abrasivos Artificiais Convencionais

O óxido de alumínio é o abrasivo convencional mais empregado nas operações de retificação atualmente. Ele é o mais duro dos óxidos e é possível encontrá-lo no mercado em diversas formas e tamanhos. Em 1900 Charles Jacobs funcionário da empresa Ampere Electro-Chemical.Co produziu o primeiro óxido de alumínio sintético pelo processo de eletro fusão da bauxita (SHAW, 1996). Os principais tipos de óxido de alumínio são: normal, semifriável, branco, rosa, monocristal, alta tenacidade e o grão produzido pela tecnologia SOL-Gel (SG). De todos citados anteriormente, pode-se destacar o óxido de alumínio SG como a ponta da cadeia evolutiva dos óxidos de alumínio (SHAW, 1996).

Devido a uma combinação de propriedades mecânicas desejáveis, tais como elevada dureza, resistência ao desgaste, resistência a temperaturas elevadas, para além da resistência à corrosão, inércia química, a resposta eletromagnética e biocompatibilidade, abrasivos artificiais são amplamente utilizados para a fabricação de componentes para a óptica, indústrias eletrônicas, mecânicas e biológicas. Carboneto de silício (SiC), uma cerâmica estrutural, está cada vez mais sendo usado para aplicações de engenharia altamente exigentes (rolamentos, válvulas, rotores, ferramentas de corte, selos de face, guias de fios têxteis) onde dimensões / tolerâncias geométricas são extremamente apertadas. Além disso, devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmica, a condutividade térmica elevada, de alta temperatura de decomposição, inércia química, a molhabilidade por baixo de metal em fusão e de baixa densidade, SiC é normalmente usado para peças/ ferramentas de corte resistentes ao calor e aplicações refratárias (D.S. SRINIVASU *et al.* 2009)

3.3.1.3. Superabrasivos

Conforme Kopac & Krajnik (2006), os superabrasivos recebem este nome em razão de serem mais duros, mais resistentes ao desgaste e uma vida mais longa quando aplicados adequadamente. Com avanço na tecnologia de retificação foi desenvolvido dois principais e comerciais superabrasivos: diamante sintético e o nitreto cúbico de boro (CBN). Eles são especialmente adequados para a retificação difícil dos seguintes materiais: superligas, metal duro, cerâmicas e materiais compósitos.

3.3.1.4. Diamantes

Grande parte dos diamantes utilizados no setor industrial é sintética, pois o custo do diamante sintético é menor do que um diamante natural. Diamantes naturais utilizados na indústria são geralmente aqueles rejeitados pelo mercado de joalheria, ou seja, estes diamantes rejeitados não atende o padrão de cor, forma, tamanho e defeitos cristalinos exigidos pelo mercado de joias. A maioria destes diamantes é utilizado em rebolos (grão menores), ou utilizado para fabricação de dressadores de ponta única (MARINESCU *et al.* 2007).

Uma das vantagens do diamante como um abrasivo é a retenção de dureza em temperaturas elevadas. O diamante é termicamente estável até 800 °C no ar e para mais de 1400°C em vácuo. No entanto, porque o diamante é uma forma de carbono é impróprio para retificação de aço. A solubilidade do carbono no ferro provoca um rápido desgaste do abrasivo de diamante, um efeito que é acelerado com a temperatura. Químico-térmico degradação geralmente faz diamantes inadequados para aços e ligas à base de níquel. O diamante é extremamente resistente ao desgaste fricção mecânica. Desgaste tende a ser associada com o produto químico-térmica de degradação na presença de oxigênio a temperaturas mais altas.

Diamante tem propriedades térmicas favoráveis que ajudam a reduzir as temperaturas de retificação. A condutividade térmica é mais elevada de qualquer

material, com valores entre 600 e 2000 W / m K à temperatura ambiente. A condutividade térmica cai para 70 W / m K a 700 °C (W. Brian Rower, *et al.* 2009).

3.3.1.5. Nitreto Cúbico de Boro (CBN)

O Nitreto Cúbico de Boro (CBN) surgiu da pesquisa de uma substância lubrificante branca com uma estrutura atômica laminada hexagonal chamada de Nitreto de Boro Hexagonal (HBN) similar ao grafite, mas com átomos de nitrogênio e boro alternados. Nitrogênio e Boro situam-se ao lado do carbono na tabela periódica e foi postulado que em altas temperaturas e pressões poderiam converter HBN para uma estrutura cúbica similar ao diamante. Isto foi o primeiro registro mostrado pelo cientista Wentdorf (MARINESCU *et al.* 2007).

CBN é termicamente estável em atmosferas inertes até 1500°C. No ar, o CBN forma uma camada estável de óxido de boro, que impede a oxidação adicional até 1300°C. No entanto, essa camada se dissolve em água, assim CBN desgasta facilmente quando a base de água que são utilizados fluidos com os fluidos de óleo puro. No entanto, isto não impede CBN de ser utilizado com muito sucesso com água à base de líquidos de resfriamento. Devido à degradação química, térmica, CBN é cinco vezes mais rápido do que o diamante quando se faz retificação de ligas de titânio aeroespaciais (W. Brian Rower, 2009).

3.3.2 Tamanho dos Grãos Abrasivos

Segundo Stemmer (2005), classificam os grãos pela norma americana ANSI Standard B74. 12-1977” *Specification for Size of Abrasive Grain*”, a qual determina o tamanho do grão em mesh, isto é, determina a quantidade de furos por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos durante o processo de seleção.

Para grãos de diamante e CBN é usada a Norma Europeia FEPA (*Federation European Producers of Abrasives*) que especifica o diâmetro teórico do grão (MARINESCU *et al.* 2007).

Os grãos grossos são recomendados para operações mais grosseiras como desbastes e grãos mais finos são para acabamento.

- D 15 à D 46 – Grãos para polimento
- D 46 á D 76 – Grãos para acabamento
- D 76 à D126 – Grãos intermediário (desbastes e acabamento)
- D126 à D 252 – Grão para desbastes

3.3.3. Ligas

A manutenção e fixação dos grãos abrasivos em um rebolo devem-se à ação de materiais ligantes. Estes compostos devem resistir às forças de retificação, às elevadas temperaturas, às forças centrífugas oriundas dos elevados níveis de rotação da ferramenta e ainda aos ataques químicos provocados por componentes dos fluidos de corte. Os ligantes são responsáveis por assegurar a rigidez do rebolo e manter as partículas abrasivas em posição (MALKIN, 1989). Dentre eles existem 3 principais tipos: rebolo resinoide, rebolo vitrificado e rebolo metálico.

3.3.3.1. Ligante Resinoide

Rebolos com ligante orgânicos tendem a ser mais elástico do que outros rebolos. A elasticidade é geralmente um fator na escolha de um ligante orgânico. Elasticidade pode ser útil para a segurança no local de alta velocidade ou com a aplicação da carga ou invulgar para a realização de uma superfície mais polida. Ligantes orgânicos são utilizados principalmente com abrasivos convencionais, mas também são utilizados com superabrasivos para atingir rugosidade muito baixa.

Sendo de natureza orgânica, estes rebolos têm uma vida útil limitada, mesmo antes da utilização. Rebolos resinoides também podem ser utilizados quando o processo de retificação coloca grandes cargas de torção sobre as faces

laterais do rebolo ou onde é necessário para suportar cortes interrompidos (Rower, 2009).

3.3.3.2. Ligantes vitrificados

Um rebolo com ligante vitrificado é uma estrutura de grãos abrasivos, material de fixação e poros. O vínculo é muito mais difícil do que ligantes orgânicos, mas consideravelmente mais suave do que os ligante metálico. Este tipo de estrutura permite uma flexibilidade considerável na variação da natureza da superfície da peça de trabalho de corte para materiais diferentes. A grande vantagem de um rebolo vitrificado é que ele pode produzir uma forma de retificação com diferentes perfis.

Para retificação superabrasivo, a maioria dos rebolos é vitrificada CBN.

Ligantes vitrificados são preparados a partir de uma mistura de vidro temperado, argilas, e fluxos, tais como feldspato, bórax, água e outro ligante (dextrina). As proporções exigidas de material abrasivo e ligação são misturados e em seguida compactados em um molde. Materiais de enchimento podem também ser usados para criar porosidade. O rebolo em seguida é aquecido em um forno com um sistema de aquecimento cuidadosamente controlado e ciclo de arrefecimento a temperaturas até 1300 °C. A temperaturas de aproximadamente 1100°C, a ligação torna-se vítreo e começa a fluir. O controle de temperatura é absolutamente crítico para assegurar o resultado (Rower, 2009).

3.3.3.3. Ligante metálico

Ligas metálicas são usadas para superabrasivos. Diamantes ou grãos de CBN podem ser aplicados em uma única camada no rebolo ou como uma camada de multi-abrasivo em uma ligação sinterizada ferro fundido.

Um método comum de fixar os grãos no rebolo é por revestimento adequado e galvanoplastia. Um método alternativo para algumas operações corrige os grãos por brasagem. Este é um processo muito mais elevado do que a temperatura de galvanoplastia e existe o perigo de danificar os grãos.

Rebolos com ligas metálicas são usados frequentemente para retificação de cerâmica e materiais frágeis. Multicamada utilizando rebolos de grãos

de diamante muito pequeno é utilizada para a produção de uma precisão muito elevada e rugosidade reduzida. O rebolo eletrolítico novo sistema em processo curativo de retificação permite multi-camada de de abrasivos colados em um metal condutor para manter a nitidez e forma (Rower, 2009).

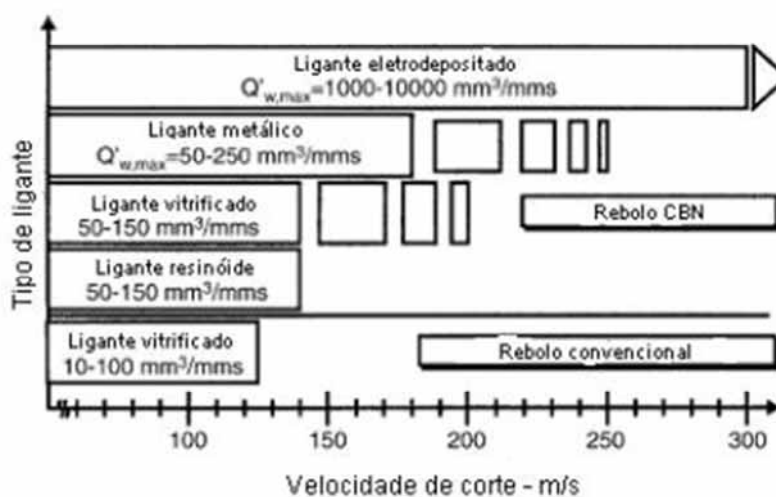


Figura 7 - Velocidade de corte (m/s) indicada para cada tipo ligante de rebolo (KOPAC & KRAJNIK, 2006).

3.3.3.4. Corpo do Rebolo

Diferente dos rebolos convencionais os rebolos diamantados podem ser combinados com ampla faixa de materiais no corpo. Na retificação de cerâmica é importante minimizar vibrações externas, devido a sua inerente fragilidade. O efeito de vibração pode ser minimizado pela redução do peso do corpo do rebolo. Por isso, devido a sua baixa densidade combinada a sua boa resistência mecânica, corpos de resina (podem ser reforçados com fibras) são comumente utilizados para rebolos multicamadas. Na indústria cada vez está sendo comum o uso de rebolo com corpo de alumínio, devido o baixo peso, uma vez, que os magazines das retificadoras CNC suportam no máximo 10 kg e também para melhor dissipação de calor.

O formato e material do rebolo de retificação determinam os seus comportamentos estáticos e dinâmicos que, por sua vez, desempenham papéis significativos no processo. Isto pode ser de particular interesse em termos de alta eficiência em retificação profunda (HEDG – High Efficiency Deep Grinding), em que

o rebolo está submetido a temperaturas extremamente altas e forças centrífugas (TAGHI TAWAKOLI *et al.* 2012).

3.3.4. Perfilamento e Avivamento

Além do perfil necessário do rebolo no processo de retificação o processo de dressagem deve produzir um perfil apropriado. A perfilamento do rebolo influencia na rugosidade da superfície da peça de trabalho e da camada superficial do rebolo, o volume de poro e o comportamento ao desgaste da camada abrasiva. O processo de perfilamento deve permitir um processo de retificação o mais consistente possível, tendo em consideração o desgaste do rebolo (B. LINK, 2008).

Dressagem é realizado sobre um rebolo na preparação para retificação. Os aspectos de dressagem incluem.

- Retificação para eliminar desvios de forma específica ou retidão;
- Dressar para obter uma superfície de corte afiada e uma distribuição aleatória uniforme das arestas de corte;
- Condicionamento para remover as ligas em torno dos grãos abrasivos e criar uma superfície do rebolo mais protuso (avivamento). Isto é particularmente importante para a resina-ligada e super-abrasivos vitrificados. Outra técnica consiste em realizar um processo de remoção de uma taxa reduzida de retificação.
- Limpeza para remover a camada de abrasivo que é carregada com o material da peça de trabalho.

Rebolos vitrificados e outros rebolos são dressados sempre antes de realizar uma operação de retificação. Rebolos galvanizados não são dressados contêm uma única camada de grãos abrasivos. Removendo os grãos a vida útil do rebolo acaba. Rebolos metálicos, multi-camada de super-abrasivos são, por vezes, preparadas utilizando um rebolo de carboneto. Além disso, eletrolítico em processo tem sido usado com sucesso considerável (OHMORI E NAKAQAWA. 1990). Retificação electro-descarga a seco também foi proposta e demonstrada por micro-retificação combinada com uma ferramenta rotativa de carboneto (XIE *et al.* 2008).

Existem dois tipos básicos de ferramentas de curativo (MARINESCU *et al.* 2004,2006), ferramentas estacionárias e ferramentas rotativas.

3.3.4.1. Ferramentas de dressagem estacionária

Ferramentas de dressagem estáticas incluem um único ponto diamantes e ferramentas de diamante impregnadas e são usados principalmente para dressar abrasivos. Tais ferramentas vêm em uma variedade de formas, incluindo ferramentas redondas e forma de faca.

3.3.4.2. Ferramentas de dressagem rotativa

Vitrificados CBN, resina-ligada CBN e rebolos de diamante são geralmente preparados utilizando ferramentas rotativas de dressagem para evitar problemas de desgaste rápido do rebolo. A ferramenta de limpeza rotativa pode ser um rebolo com uma camada estreita de diamantes em conjunto em torno da periferia ou de um copo com uma camada de diamantes em torno da borda. De modo mais geral, as ferramentas rotativas de dressagens são designadas para avivar o rebolo independentemente da sua largura. Os melhores processos de dressagens são movidos por um motor de modo a dar toda a periferia em contato com o rebolo de dressagem.

3.3.5. PARAMETRO DE CORTE

De acordo com W.Li (2007) durante a retificação a taxa de remoção do material (R_g) (isto é, o volume de remoção de material / tempo de retificação) pode ser escrita na equação 8.

$$R_g = V_s W h \quad (8)$$

Onde: W é largura de corte, h é profundidade de corte e V_s é a velocidade de corte. A taxa de remoção pode ser compreendida com uma arte de material que é removida da peça à uma velocidade de corte.

Heinzel & Bleil (2009) definem que a razão entre a taxa de remoção específica do material Q_w' e a velocidade de corte V_s a espessura da camada de

material removida pelo rebolo com a velocidade periférica do mesmo denomina-se espessura equivalente de corte h_{eq} , é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho. A espessura equivalente de corte (h_{eq}) [μm] representa a espessura da camada de metal que é arrancada pelo rebolo numa volta completa. Trata-se de um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho a partir das variáveis V_s e V_w , sendo, portanto, muito importante no processo de retificação.

Na prática, a profundidade do grão abrasivo durante a operação varia significativamente sobre uma grande gama de valores de penetração. Isto é devido ao espaçamento variável entre grãos, profundidade variável dos grãos abaixo da superfície do rebolo e da rugosidade superficial da peça antes da usinagem. Por exemplo, um rebolo com desgaste irregular causa profundidades muito maiores ou menores do que o mesmo rebolo recém dressado. No entanto, a espessura de corte equivalente é útil para comparação da penetração do grão em diferentes operações usando uma estrutura abrasiva similar (MARINESCU *et al.* 2007). A equação 9 apresenta como se quantifica a espessura equivalente do corte para a retificação cilíndrica de mergulho,

$$h_{eq} = \frac{Q'w}{V_s} = \frac{\pi.dw.vf}{60.1000.v_s} \quad (9)$$

Ainda de acordo com Malkin (1989), além da força de corte, a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas tais como: rugosidade, topografia do rebolo, etc.

Segundo Marinescu *et al.* (2004), esse parâmetro não leva em conta o espaçamento dos grãos do rebolo e para que também sejam consideradas as características do rebolo é possível calcular a espessura teórica máxima do cavaco h_{max} que é apresentada na equação (10).

$$h_{max} = 2L \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a}{d_s}} \quad (10)$$

A retificação e integridade da superfície da peça são muito afetadas por desvios que ocorrem dentro da zona de contato da retificação. O comprimento de

contato é, portanto, um determinante importante e dependem das deflexões de contato que modificam a forma da zona de contato. Geometricamente, as deflexões de contato podem influenciar tanto o acabamento da superfície da peça de trabalho como a precisão do tamanho dos componentes (SANJAY AGARWAL *et al.* 2012).

Um dos parâmetros mais importante na retificação o comprimento de contato l_c é dado pela equação (11):

$$l_c = \sqrt{D_s \cdot a} \quad (11)$$

Onde: D_s , diâmetro externo do rebolo, a , profundidade de corte.

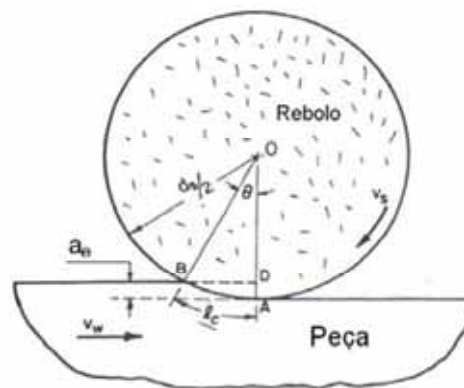


Figura 8 - Comprimento de contato (Sanjay Agarwal et al 2012)

3.3.5.1. Forças de corte

Tang *et al.* (2009), afirmam que a força de corte na retificação exerce influência em diversos parâmetros durante a usinagem, tais como, no desgaste do rebolo, desempenho dinâmico da retificadora, precisão geométrica e a qualidade superficial das peças. As forças de retificação exigem grande desafio para caracterizá-las e entendê-las, pois as formas dos elementos de corte não podem ser bem definidas e as arestas de cortes são irregulares e tem distribuições aleatórias, diferentemente dos outros métodos de usinagem com ferramenta definida, tais como os processos de torneamento e fresamento (CHOI *et al.* 2008).

As forças de retificação cilíndrica de mergulho podem ser divididas em dois componentes principais: força normal e força tangencial. Segundo Marinescu *et al.*

(2004), a força normal age tangencialmente à superfície da ferramenta abrasiva e também a velocidade de corte.

A proporção da força tangencial específica para força normal específica é um indicador de fragilidade do material e diminui quando o material torna-se frágil (SANJAY AGARWAL, 2010).

Durante o processo de retificação, os grãos abrasivos vão se desgastando ao longo da usinagem sendo que os seus topos começam a perder as “cristas”, ou seja, sua afiação tornando os grãos “cegos”. Devido à perda dos grãos ocorre um aumento nos esforços de remoção do material, originando deformações na superfície do material ao invés de sua efetiva remoção. Com aumento desses esforços e deformações citadas ocorre o aumento da força de corte tangencial, em consequência de maiores atritos do topo do grão abrasivo com a superfície do material gerando temperaturas altas e calor envolvido no processo.

A força normal desempenha um papel importante no processo de retificação, uma vez que tem uma forte influência sobre a deflexão de contato local e a natureza da deformação de contato tem um efeito importante sobre o mecanismo de remoção de material. Isto significa que a força normal de retificação é um indicador importante para caracterizar o modo de remoção de material em cerâmica. Assim, a relação entre a força normal e as propriedades da peça de trabalho, bem como o parâmetro de retificação, pode ser estabelecida de acordo com o modo de remoção de material.

Sanjay Agarwal (2013) estudou que a remoção de material na usinagem de cerâmicas foi principalmente devido a deslocamento de grãos. Para a remoção de material por meio de deslocamento dos grãos, a taxa de remoção de material em riscar com base em uma simples análise da mecânica fratura tenha sido estabelecida. Geralmente, a remoção de material na usinagem de material frágil tal como cerâmica é influenciada pela sua microestrutura, o qual domina as propriedades mecânicas do material, conforme a equação 12.

$$F_n' = \beta \cdot \left(\frac{K_{IC}^{\frac{1}{2}} \cdot H^{\frac{9}{10}}}{E^{\frac{2}{5}}} \right) \cdot \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot a^{\frac{11}{12}} \cdot D_s^{\frac{1}{12}}$$

(12)

Na retificação de cerâmica, o mecanismo de remoção de material depende da formação de cavaco caracterizada pelo fluxo plástico ou de ruptura frágil com o aumento da profundidade de corte. Se a profundidade de corte é suficientemente grande para causar trincas, uma remoção de cavacos será devido à fratura do material. Quando fratura ocorre, a energia específica requerida é menor do que na formação do cavaco normal, mas os danos de superfície ocorrem levando a uma redução da força. Quantitativamente, o parâmetro t_{\max} (espessura do cavaco não deformado) caracteriza a profundidade de penetração do grão abrasivo na peça de trabalho quando ela está envolvida em corte. O valor de t_{\max} representa, assim, as condições do efeito de retificação sobre a força de retificação e depende tanto dos parâmetros da máquina e do rebolo (P.VENKATESWARA RAO *et al.* 2010). A t_{\max} pode ser expresso como na equação 13.

$$T_{\max} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{0,548} \left[\left[\frac{4}{Cr} \left(\frac{vw}{vs}\right) \left(\frac{ae}{ds}\right)^{1/2} \right] \right]^{1/2} \quad (13)$$

Onde:

r é a relação entre largura e espessura do cavaco, C o número de grãos por unidade de área ativa da periferia do rebolo (densidade de superfície), E_1 módulo de elasticidade do rebolo, E_2 o módulo de elasticidade da peça, v_w a velocidade de alimentação da peça, v_s de velocidade da roda, a_e a profundidade de corte e d_s diâmetro do rebolo.

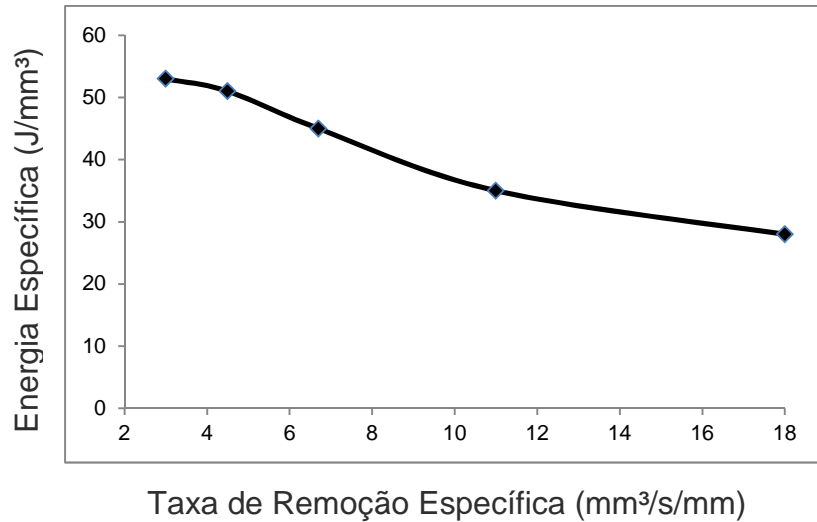


Figura 11 - Energia específica versus a taxa de remoção específica da cerâmica (P. VENKATESWARA RÃO *et al*, 2010)

A energia específica total de retificação tem basicamente três componentes, energia de formação específica do cavaco, energia específica de deslizamento e energia específica de resistência. Energia de formação específica de cavaco ou a energia de corte é a energia mínima de retificação requerida para a remoção de material. Energia específica de deslizamento é devido à ação de deslizamento dos diferentes tipos de grãos abrasivos quando estão com as pontas achatadas em contato com a peça (grãos cegos). Energia específica de resistência é a energia gasta durante os fenômenos de renovação dos grãos contra a peça (VIJAYENDER SINGHN *et al*. 2012).

A energia específica está relacionada com os parâmetros de retificação através da equação 14.

$$\mu = \frac{F_t V_s}{b \cdot V_w \cdot a} \quad (14)$$

3.3.5.3. EMISSÃO ACÚSTICA

Kwak & Ha (2004) reportaram que o sinal de potência de corte observado consiste da potência estática e dinâmica, sendo que a primeira é a potência do ponto de início ao ponto de acomodação, e apresenta um nível absoluto de potência gerado na zona de usinagem. Já a potência dinâmica é uma componente de potência de alta frequência, e flutua em torno do nível da potência estática. Normalmente, a potência estática permanece constante com uma pequena variação do processo, mas quando uma falha ocorre o nível desta potência é alterado. Na ocorrência de vibração e queima, a potência estática e dinâmica apresenta uma amplitude bem diferente daquela do estado normal de operação.

O sinal de emissão acústica é o resultado de uma rápida liberação de energia que se propaga na forma de uma onda elástica longitudinal transiente em corpos sólidos e pode ser detectada por sensores de emissão acústica. Ela ocorre de modo semelhante em fluidos nos estados gasoso e/ou líquido. A fonte da emissão acústica em corpos sólido pode ser um agente externo – impacto de um corpo externo sobre o corpo na qual está sendo verificada a emissão acústica – uma fonte interna – deformação plástica, fratura, formação de uma trinca (LIÃO *et al.* 2006).

As ondas de emissão acústicas possuem frequências na faixa de 50kHz a 1000 kHz, o que supera a faixa de frequência de muitos ruídos advindos de fonte exteriores ao processo em análise. Por isto, é um método sensível e adequado para monitoramento do processo de retificação (SENA, 2007).

3.4. CARACTERIZAÇÃO DA RETIFICAÇÃO

De acordo com Zhang *et al.* (2003), devido à natureza dura e frágil da cerâmica durante o processo de retificação são introduzidos defeitos como trincas superficiais, danos subsuperficiais e tensões residuais que podem afetar a resistência e comprometer a vida de um componente cerâmico. Desta forma, um dos propósitos da retificação é minimizar os danos induzidos no processo através da minimização do h_{max} (GUO & CHAND, 1998). Contudo, este procedimento resulta

em menores taxas de remoção, conflitando com os interesses de aumento de produtividade.

A relação G também é de grande interesse econômico, pois quanto maior esta relação, maior a durabilidade do rebolo. Assim, além de elevadas taxas de remoção e minimização dos danos induzidos na retificação (Subhash *et al.*, 2002), a maximização da relação G é um dos objetivos na aplicação da retificação nas indústrias.

3.4.1. Relação G

Segundo Ramesh *et al.* (2001), o desempenho de um rebolo pode ser avaliado através da relação G, definido como sendo a relação entre o volume de material removido Z_w e volume de rebolo gasto Z_s , conforme a equação 15.

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (15)$$

Segundo Choi *et al.* (2008), as mudanças nas arestas de corte da superfície de corte da ferramenta abrasiva afetam o desempenho da retificação. Com isso, Marinescu *et al.* (2004) relatam que o desgaste do rebolo durante a retificação influencia entre outros, nos seguintes aspectos do processo:

- Erro na profundidade de corte;
- Erro na dimensão final da peça;
- Aumento das forças características do processo;
- Aumento no decréscimo da rugosidade;
- Mudança no número de arestas de corte efetivas;
- Nova dressagem do rebolo, ocasionando perdas na superfície da ferramenta, desgaste da ferramenta de dressagem, tempo perdido e custo.

Entretanto, alguns fatores que influenciam o desgaste da ferramenta abrasiva são citados em alguns trabalhos. Choi *et al.* (2008), redigiu em seu artigo que a relação G está primariamente relacionada com a espessura de corte, onde o aumento dessa espessura promove diminuição do parâmetro G. Além do mais, a

maior eficiência do grão abrasivo é conseguida por meio de uma maior velocidade de corte e também pela aplicação de lubri – refrigeração.

Taghi Tawakoli (2011) estudou que reduzindo a densidade da aresta de corte estática pela diminuição da camada do rebolo momentaneamente o número de cinemática engajam as arestas de corte. Assim, a área média da secção transversal do cavaco e aumento do tamanho de cavaco , conseqüentemente, as forças de retificação e temperaturas reduzem. Diminuindo as forças de retificação forças e temperaturas causam um aumento na relação G pelo processo de retificação.

3.4.2. Rugosidade

Qualidade da superfície da peça durante a retificação de cerâmica é uma preocupação cada vez maior das indústrias atualmente. Toda indústria se preocupa em produzir produtos com acabamento de superfície supostamente melhor. A importância do acabamento de superfície de um produto depende de seus requisitos funcionais. Uma vez que o acabamento da superfície é regulado por vários fatores, dentre eles a rugosidade (Ra), que pode ser definida com um erro da superfície geométrica ideal (P. VENKATESWARA RÃO *et al.* 2010).

Além da força tangencial e a energia específica de retificação, a rugosidade da superfície é também um excelente indicador para caracterizar a remoção de material associado com o processo de retificação. A qualidade da superfície gerada durante o processo de retificação de cerâmica depende de condições de retificação, tais como: velocidade da peça e do rebolo, profundidade de corte, escolha do fluido refrigerante (SANJAY AGARWAL *et al.* 2009).

Huang *et al.* (2003) observaram que a dificuldade em observar a transição frágil-dúctil no processo de retificação deve-se a fatores como a protusão irregular dos abrasivos, exatidão de posicionamento e vibrações. Sendo assim, os acréscimos das velocidades de corte em função das vibrações desenvolvidas na retificação poderiam prejudicar o acabamento.

Bigerelle *et al.* (2008) relata que a redução da rugosidade está diretamente relacionada com o tamanho e a forma do grão abrasivo do rebolo, onde

quanto mais arestas de corte em contato com a superfície melhor a rugosidade. A natureza do ligante influencia nessa variável, segundo Dermirci *et al.* (2008).

M. Ermani *et al.* (2013), estudou que a medida de superfície de rugosidade R_a e R_z na retificação de cerâmica em função da distância do bocal MQL variam. As distâncias dos bocais fizeram com que a rugosidade da superfície diminuísse os valores quando próximos à área de retificação, e aumentaram de forma constante a um valor mínimo quando $L = 30$ mm foram atingidas. De acordo com os seus experimentos concluiu que há uma correlação fina entre componentes de força de retificação e os valores de rugosidade de superfície. Além disso, as menores forças de retificação e melhor acabamento superficial são obtidos quando o bico MQL está à uma distância $L = 30$ mm.

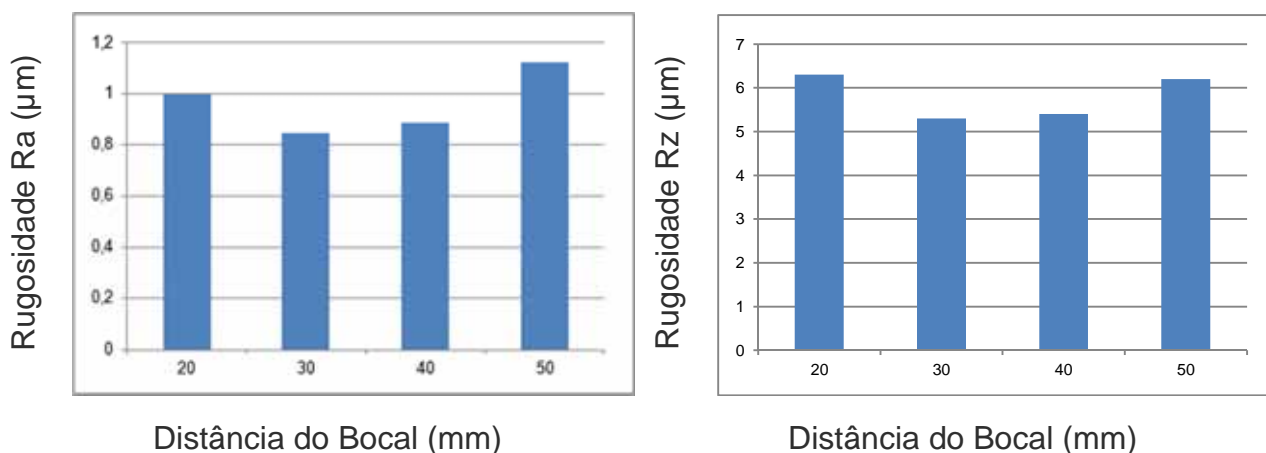


Figura 12 - Efeito da distância do bocal do MQL na rugosidade (Retificação MQL: $Q = 100$ ml/h (M Ermani *et al.* 2013)).

A figura 12 contribuiu neste trabalho para indicar a distância do bocal do MQL.

3.4.3. Danos Superficiais

Dano superficial pode ser definido como qualquer efeito degradante que se manifesta abaixo da superfície. Os defeitos residuais no acabamento da superfície como micro trincas e rugosidade alta têm efeitos diretos na qualidade do produto cerâmico. A microestrutura da cerâmica policristalina consiste de partículas de cristal e poros, a massa cerâmica policristalina pode ser imaginada como um

conjunto de partículas discretas ligadas entre si de forma aleatória (YUAN QIANG TAN *et al.* 2008).

Sanjay *et al.* (2010) estudou dois tipos de danos na subsuperfície, lascamento e trincamento, induzidas por processo de retificação. Durante a retificação, o contato de uma partícula de diamante com a peça cerâmica produz uma zona de dano na superfície contendo contornos de grãos e micro trincas. Camada danificada contribui para o deslocamento de grãos individuais resultantes das micro fraturas do contorno de grão. Este fato levou à conclusão que as camadas que sofreu lascamento foi induzida pelo deslocamento de grão. O efeito de lascamento para alta profundidade de corte era mais esmagadora e, provavelmente, coberto a camada de danos. Este poderia ser devido a fato de que à medida que a profundidade de corte na retificação foi aumentada, o força de contato local e o número de partículas de diamante contatando aumentou, levando a uma possível remoção de um segmento de material que contem grãos individuais.

3.4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

O desenvolvimento da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a criação de um diferente tipo de microscópio eletrônico, o de varredura, instrumento que permite a visualização da superfície de amostras volumosas. Este tipo de aparelho obteve rapidamente grande aceitação devida sua ampla gama de utilização no setor metalúrgico.

As principais vantagens do MEV são a resolução e a profundidade de foco. O microscópio eletrônico de varredura apresenta uma resolução de cerca de 0,003 μm , enquanto que um microscópio óptico pode chegar a aproximadamente 0,01 μm . O MEV é também capaz de realizar ampliações de até 300.000 vezes, cerca de 300 vezes mais que um microscópio óptico.

Quinn *et al.* (2003) reportaram que é possível examinar trincas de retificação através de microscópios óticos (estereomicroscópio), sendo essencial iluminar a superfície fraturada da amostra lateralmente de uma fonte luminosa brilhante com baixo ângulo de incidência.

Joo Hwan (2011) usou a técnica “bonded interface sectioning”. Nesta técnica, dois corpos de prova (alumina verde) têm uma de suas superfícies polidas e

presas através de uma pasta cerâmica, criando uma interface menor que 1 microm. Após a retificação perpendicular a esta interface, os corpos são separados através de aquecimento, as superfícies polidas depois de limpas são recobertas com uma fina camada de ouro e analisadas no MEV. A grande vantagem desta técnica é avaliar a extensão e interação dos danos provocados na retificação em camadas abaixo da superfície.

3.5. REFRIGERAÇÃO

Líquido refrigerante é um termo geralmente utilizado para descrever os fluidos de retificação, utilizado para resfriar e lubrificar o processo de retificação. Os efeitos principais de um fluido de retificação podem ser categorizados em lubrificação, resfriamento, transporte de cavacos, a limpeza do rebolo e minimizar a corrosão. Por outro lado, os fluidos de refrigeração têm influências negativas sobre o ambiente de trabalho, em termos de saúde do operador de máquina, a poluição e a possibilidade de explosão (no caso de retificação com óleo mineral) (T. TAWAKOLI *et al.* 2009) .

Os fluidos de corte são importantes para melhorar o desempenho da retificação que pode ser caracterizado pelo acabamento superficial, pelas tolerâncias dimensionais e geométricas.

O controle da formação de calor na retificação é vital para a qualidade da peça e integridade térmica, uma vez que durante a retificação a temperatura na zona de contato entre a peça retificada e a camada abrasiva pode atingir 1800°C, devido ao atrito, deformação elástica e remoção do cavaco. Esta solicitação térmica dura poucos milissegundos e é proporcional à velocidade de corte (L.M.BARCZAK *et al.* 2010).

Na indústria o método mais usado é o método convencional, onde há abundância de fluidos na área de corte a uma velocidade baixa do fluido.

3.5.1. Mecanismos de Refrigeração e Lubrificação

Segundo Liang (1992) a refrigeração é importante na retificação com rebolos diamantados para impedir a degradação do diamante pela temperatura e inibir reações químicas. Uma boa refrigeração está normalmente associada com alto calor específico elevada condutividade térmica, boa refrigeração e boa lubrificação. A lubrificação reduz as forças no arco de contato entre o rebolo e a peça; a ação lubrificante está relacionada com a habilidade do fluido de reduzir a fricção e adesão entre os grãos abrasivos e a peça.

Quando o fluido de corte é aplicado na região de corte, ele inicia o processo de ebulição. Este processo aumenta a taxa de transferência de calor entre a peça e o fluido. No entanto, conforme a temperatura aumenta, o mecanismo de ebulição irá formar uma fina camada de vapor entre o fluido e a peça. O vapor atua como um isolante e impede a transferência de calor para o fluido. Como resultado, a temperatura da peça sobe rapidamente, queimando a superfície (IRANI *et al.* 2005).

Sanjay *et al.* (2010) estudou que, em altas taxas de remoção de material cerâmico na operação de retificação usando uma maior velocidade de fluxo do fluido refrigerante, a pressão hidrodinâmica substancial foi construída no espaço de retificação entre o rebolo e a peça de trabalho, resultando em uma força normal de retificação adicional na zona de contato. Geralmente, torna-se difícil para o refrigerante penetrar na zona de contato durante alta taxa de remoção de material. No entanto, em alguns casos, pode ser possível que uma pequena quantidade de líquido refrigerante penetre na zona de contato através de mecanismos, tais como: vibração, ou difusão. Uma parte do refrigerante, que flui através da zona de contato, é eficaz e a maior parte do fluido desloca sobre a superfície do rebolo.

De acordo com P Venkateswara Rao (2011), definiu com as equações de Navier-Stokes, quando um fluido de refrigeração à base de água é aplicado na zona de retificação, as forças de corte ou as forças de atrito na zona de contato pode ser negligenciada, devido à sua baixa viscosidade. Isto sugere que o aumento da taxa de fluxo de refrigerante não necessariamente causa qualquer redução adicional do atrito na peça de trabalho interface rebolo / peça. No entanto, a aplicação de uma grande quantidade de refrigerante de baixa viscosidade à base de

água não irá induzir qualquer força tangencial adicional de retificação na zona de contato, aumenta apenas com a força total normal de retificação.

3.5.2. Tipos de Fluidos de Cortes

Segundo L.M. Barczak (2010), o controle da geração de calor na retificação é vital para a qualidade da peça e que esta esteja assegurada quanto a integridade térmica. Atualmente, o controle da geração de calor é conseguido através da escolha de um bom fluido pela condução de calor para a peça de trabalho por meio de lubrificação e refrigeração por convecção. A eficiência da lubri-refrigeração de fluido que é utilizado tem uma forte influência no desempenho de retificação.

T.Jim (2011) demonstrou que para o fluido à base de água em retificação da cerâmica ZrO_2 , mostrou que a maior parte do calor de retificação foi levado pelo fluido de retificação, com a partição de energia R_f variando entre 0,75 e 0,84. Os valores elevados do coeficiente de transferência de calor por convecção (CTCC) poderia ser devido às temperaturas elevadas da peça de trabalho, o que altera substancialmente as características térmicas do fluido. Valores muito elevados de CTCCs podem ser conseguidos quando as temperaturas de retificação alcançam os pontos de ebulição dos fluidos.

Estudos comparativos na retificação de cerâmica entre emulsões e óleos integrais revelaram vantagens quanto ao acabamento superficial e desgastes do rebolo na utilização dos óleos integrais. Tönshoff *et al.* (2000) também compararam o desempenho de um óleo mineral e uma emulsão na rugosidade da alumina retificada. Segundo o autor o óleo mineral resultou num acabamento melhor, isso é devido à sensibilidade da alumina ao choque térmico e pela maior capacidade calorífica da emulsão são gerados gradientes de temperatura, tensões térmicas e conseqüentemente fratura frágil.

3.5.2.1. Fluidos Integrais

Segundo Novaski & Rios (2004), podem ser inclusos todos os compostos capazes de formar películas oleosas, lubrificantes e aderentes. Normalmente tais compostos são de origem mineral, vegetal ou sintético. Os óleos integrais são basicamente óleos minerais puros ou misturados com aditivos, geralmente do tipo extrema pressão (EP).

- Óleos minerais
- Óleos graxos
- Óleos compostos
- Óleos aditivados (EP)
- Óleos de múltiplo uso

Os óleos integrais fornecem excelente lubrificação ao processo de retificação. As formas e a temperatura no arco de contato de retificação entre o rebolo e a peça são assim reduzidas, permitindo obter maiores taxas de remoção de material. Os aditivos de extrema pressão reagem com os cavacos formando um filme de baixa resistência ao cisalhamento que atua como um lubrificante sólido. Estes aditivos são normalmente compostos de cloro ou enxofre que reagem com a peça metálica para formar sulfetos ou cloretos; no entanto, para cerâmica, estes mesmos aditivos podem não ser efetivos.

Segundo Pereira *et al.* (2005) as desvantagens dos óleos integrais são: rápidas deterioração, alto custo, risco de incêndio, ineficiência na lubrificação a altas velocidades de corte, baixo poder de refrigeração, formação de fungos e ataque à saúde do operador.

3.5.2.2. Fluidos Solúveis

Fluidos solúveis são formados pela mistura de água e óleo, ou sais orgânicos e inorgânicos. Essas misturas variam entre emulsões e soluções dependendo da constituição básica do fluido de corte solúvel concentrado, da presença e da quantidade de emulgadores no concentrado. Segundo Diniz *et al.* (2003), emulgadores também conhecidos como emulsificadores, são substâncias que reduzem a tensão superficial da água com isso facilitando a dispersão do óleo na água, formando uma emulsão estável.

Os fluidos solúveis dividem-se em emulsões de óleo em água (óleos emulsionáveis), fluidos semi-sintéticos e fluidos sintéticos.

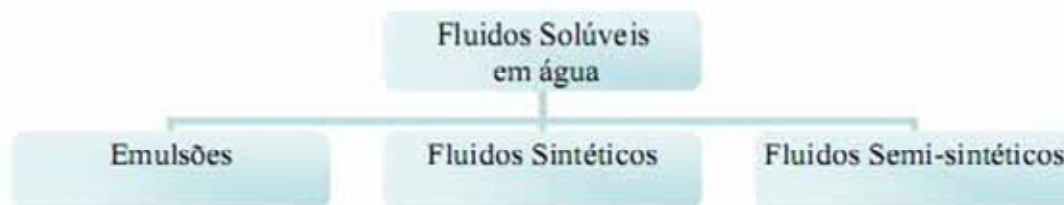


Figura 13 - Classificação dos fluidos solúveis em água (El Baradie, 1996).

Os fluidos sintéticos (soluções) são fluidos de corte que não possuem óleo mineral na composição. São baseados em substâncias químicas que formam uma solução com água. São obtidos a partir de uma composição de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos lubrificantes, biocidas e outros, adicionado à água (PEREIRA *et al.* 2005). Segundo Liang (1992), os fluidos sintéticos foram desenvolvidos para combinar o alto calor específico e condutividade térmica da água com aditivos anticorrosivos, lubrificante e de extrema pressão, para compensar o baixo poder de lubrificação e corrosão da água. De acordo com Novaski & Rios (2004), os fluidos sintéticos apresentam baixa tensão superficial e assim possuem melhor poder de penetração, atingindo rapidamente a zona de corte. Além disso, ao atingirem elevadas temperaturas evaporam sem deixar resíduos.

Os fluidos semi sintéticos combinam características dos fluidos sintéticos e das emulsões, visando obter um desempenho mais eficiente que as próprias emulsões, principalmente no que diz respeito a um melhor controle de oxidação e melhor estabilidade microbiológica. Contudo, os fluidos semi sintéticos mantêm uma boa capacidade de lubrificação, mesmo possuindo quantidades inferiores de óleos. Atualmente, estes fluidos são compostos majoritariamente por compostos sintéticos, complementados por óleos emulsionáveis numa proporção que varia entre 5 e 30% do total do fluido. Desta forma é possível se obter uma emulsão translúcida, composta por minúsculas partículas de óleo (EL BARADIE, 1996).

3.5.3. Considerações ambientais e fisiológicas

Os fluidos de corte representam fatores de risco para os trabalhadores. O contato direto com a pele, a inalação, imersão ou contato com vapores e fumaças, pode ocasionar danos dermatológicos e respiratórios. Os danos dermatológicos ocasionados pelos fluidos de corte podem ocorrer basicamente de duas formas: irritação da pele, através do contato e efeitos alérgicos.

As substâncias realmente prejudiciais sob o aspecto fisiológico são: agentes emulsificantes, inibidores de corrosão e metais pesados. Além disso, cloro, nitrosaminas, níquel e cobalto são produtos que podem criar problemas para a disposição dos resíduos. As emulsões e soluções são mais problemáticas no que se refere à disposição de águas. Os menores riscos estão associados a lubrificantes biodegradáveis como ésteres (HOWELL *et al.* 2008).

3.5.4. Aplicação do Fluido de Corte

Retificação é inerentemente caracterizada pelo alto aquecimento localizado. Geralmente, a temperatura da zona de contato na retificação é controlada pelo fornecimento abundante de fluido de corte. O fluido de corte deve proteger as arestas do diamante do desgaste diretamente, evitando a sua oxidação; ou indiretamente, reduzido a temperatura na região de contato. Essa redução de temperatura pode ser alcançada pelo aumento da capacidade de remover o calor gerado durante a retificação, pela redução da fricção através da lubrificação direcionada ou evitando o acúmulo de cavaco na interface abrasivo/peça (SIMUL BANERJEE *et al* 2008).

As aplicações do fluido de corte na forma de abundante ou jato são as práticas mais comuns para reduzir a temperatura na zona de retificação. O fluido desempenha três funções básicas: (a) refrigerar a peça e o rebolo, (b) retirar o cavaco e grãos abrasivos soltos da área de contato e (c) de lubrificação. O papel da refrigeração abundante por fluido de corte para reduzir a temperatura da zona de retificação é menos significativa. Para fins de lubrificação, reduzindo fluido deve entrar na zona de retificação, de outro modo fluido serão ineficazes para o efeito. A este respeito, uma crítica questão é "taxa de fluxo eficaz". É a quantidade de fluido

de corte, que, na verdade, passa através da zona de retificação. Quanto maior for a taxa de fluxo eficaz, melhor será a lubrificação e refrigeração da zona de retificação (TANMAY DUTTA *et al.* 2009).

M. Ermani *et al.* (2013), estudou que a distância, formato do bocal ajudam a reduzir a temperatura na região de corte, angulo de incidência do jato na região de corte não altera de maneira significativa a refrigeração da peça, mas a velocidade periférica do rebolo com relação ao jato é muito significativa no processo de refrigeração da peça

3.5.5. A Técnica de Refrigeração Convencional

A aplicação convencional de fluidos de corte tem sido estudada por vários autores. Irani *et al.* (2005) apresentaram uma revisão sobre aplicação de fluido de corte, onde o projeto do bocal aplicador, o posicionamento do bocal, a velocidade de aplicação do fluido foram consideradas relevantes para eficaz utilização dos fluidos de corte.

Segundo Irani *et al.* (2005), os fluidos de cortes utilizados frequentemente no meio industrial de forma inadequada, gera desperdícios (BIANCHI *et al.* 2011). Normalmente, o fluido é aplicado de forma abundante (elevadas vazões) à baixa pressão e mal direcionado à zona de refrigeração. A lubrificação e refrigeração dependem da entrada efetiva do fluido na região de corte entre a peça e o rebolo e dessa forma grandes volumes de fluido podem ser reduzidos pela otimização da aplicação.

3.5.6. A Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

A técnica de MQL consiste em aplicar através de um jato de ar, uma quantidade mínima de fluido no ponto em que está realizando a usinagem. A mínima quantidade de fluido de corte dever ser suficiente para reduzir o atrito e evitar a aderência de materiais. A técnica Mínima Quantidade de Lubrificação pode ser entendida como uma pequena quantidade de óleo lubrificante misturada a um fluxo de ar comprimido, capaz de formar uma névoa que direcionada à região de contato entre a peça e o rebolo. As propriedades lubrificantes do óleo utilizado na MQL são

responsáveis por reduzir o atrito, que por sua vez resulta numa redução do calor gerado, mantendo a ferramenta dentro da temperatura que não prejudique seu desempenho (BIANCHI *et al.* 2012).

M. Ermani *et al.* (2013), estudou que a MQL em retificação de cerâmica foi satisfatório em comparação ao método convencional, devido a redução das forças de corte, potência de retificação e a energia específica. A rugosidade teve uma redução em seus valores devido à mistura do óleo localizado. Lubrificação eficiente reduziu o atrito entre a peça e o rebolo, manteve os grãos ligados por mais tempo. A dureza e a tenacidade associado com a engenharia da cerâmica causa uma alta força de retificação, taxa de remoção baixa de material, desgaste excessivo do rebolo, como danos na superfície. No entanto, a lubrificação usando método MQL pode reduzir os desafios existentes na retificação de cerâmica.

O MQL não é somente uma técnica que reduz o custo operacional, que chega em torno de 20% do custo total do processo, mas também elimina os problemas associados à utilização dos fluidos convencionais, como problemas respiratórios e dermatológicos, bem como a contaminação de solos e águas, no caso de descartes inadequado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será feita a descrição de todos os equipamentos e materiais empregados e também dos procedimentos e análises adotados no transcorrer do desenvolvimento do trabalho. Tais procedimentos visaram à aquisição das variáveis de saída, minimizando e quando possível, eliminando os ruídos e interferências. As variáveis de saída analisadas foram: força tangencial de corte, força normal, energia específica de corte, emissão acústica, rugosidade, relação G e dano superficial. Será feito um detalhamento de todos os parâmetros de entrada utilizados, tais como tipos de aplicação de fluido de corte (convencional e MQL), tipo de ferramenta empregada e parâmetros de usinagem, como espessura de corte, taxa de remoção, arco de contato e “spark-out”.

A metodologia utilizada consistiu na preparação do rebolo, verificação dos parâmetros de processo, execução dos ensaios e caracterização dos materiais. Dado a relevância do condicionamento dos rebolos nos resultados (Bianchi *et al.* 2012), cada novo ensaio era precedido da correção do perfil do rebolo e exposição dos abrasivos, seguindo um procedimento padrão, cujo objetivo era manter esta condição constante.

A execução dos ensaios consistiu na aquisição de dados referentes a 10 ciclos de retificação no corpo de prova, para quantificar a condição inicial de retificação. Após esta aquisição de dados, outro corpo de prova era retificado, sendo removido 3 mm (aproximadamente 3.000 mm³) na sua altura com o propósito de promover desgaste no rebolo suficiente para medir a relação G. Esta operação era seguida da aquisição de dados de mais de 10 ciclos de retificação, registrando a condição final de retificação, após a alteração na micrografia do rebolo. Cabe observar que antes da aquisição inicial e após a aquisição de dados da condição final, o perfil do rebolo era impresso num corpo de prova para avaliar o desgaste do rebolo.

Posteriormente os corpos de prova usados para aquisição de dados foram caracterizados quanto à rugosidade superficial e foram avaliados os danos provocados pela retificação, através de exame superficial com MEV. Os corpos de prova com a impressão do perfil foram comparados para medir o desgaste do rebolo.

Todo o trabalho de experimentação foi desenvolvido no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia da UNESP, campus de Bauru. Neste mesmo laboratório foi feita análise das variáveis de saída, sendo elas, forças de corte, energia de retificação, emissão acústica, rugosidade, bem como a compilação de dados que permitiu a confecção deste trabalho. A medição do desgaste diametral do rebolo foi executada pelo rugosímetro Taylor Hobson Enquanto a caracterização microscópica através do MEV foi realizada no departamento de química da USP – São Carlos

4.1. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Os experimentos foram realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP515H equipada com comando numérico computadorizado CNC da Fagor para acionamento do eixo “X”. Utilizaram – se dois programas CNC; um para a usinagem dos corpos de provas e outro para impressão do rebolo desgastado.

A retificadora possuía vedação com cortinas plásticas e placas de policarbonato para minimizar a perda de fluido para o ambiente.

4.2. PARAMETRO DE ENTRADA

4.2.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova foram adquiridos por intermédio da empresa “Máquinas Agrícolas Jacto S/A”. Eles são constituídos, segundo informação da empresa, de uma alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio, 4% de outros óxidos (SiO_2), CaO e MgO) e fundentes. A densidade aparente do material é de $3,7 \text{ g/cm}^3$. A escolha da alumina como material do corpo de prova é devido ao fato de que ela é um material universal e é comumente empregada no meio industrial.

Tabela 1 - Propriedade do Material Ensaiado

Propriedade	Norma	Valor
Resistência à Flexão 4 Pontos	ASTM C 1161-02	279± 11MPa
Tenacidade à Fratura	ASTM C 1421-01	3,18 ± 0,07 MPa.m ^{1/2}
Módulo de Elasticidade	JIS R1602-1986	3,12 ± 4 GPa
Microdureza Vickers	JIS R1610-1991	1339 ± 47 HV1
Tamanho médio de grão	ASTM E1382-97	1,57 µm

A figura 14 ilustra o formato (arruela) e as dimensões (diâmetros e espessura) dos corpos de prova que foram usados nesta pesquisa.

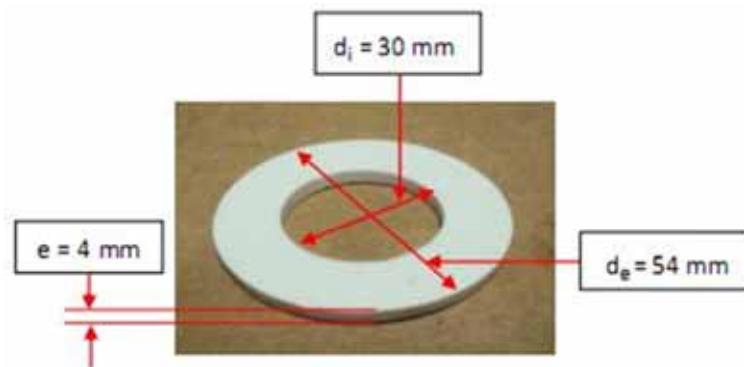


Figura 14 - Corpo de Prova

4.2.2. Rebolo Utilizado – Diamantado Resina Cerâmico

Utilizou – se um rebolo inédito fornecido pela empresa Royall Diamond. O rebolo diamantado resina cerâmico que tem um ligante híbrido e é composto por resinas tipo fenólicas e cerâmicas. A estrutura atômica é formada por polímeros e vitrocerâmica. Uma das vantagens do rebolo resina cerâmico como um abrasivo é a retenção de dureza em temperaturas elevadas. O rebolo resina cerâmico é termicamente estável até 300° C no ar e para mais de 800° C em vácuo. Este rebolo é extremamente resistente ao desgaste fricção mecânica. Desgaste tende a ser associado com o produto químico-térmica de degradação na presença de oxigênio a temperaturas mais altas. As vantagens do rebolo resino cerâmico para o

rebolo resinoide ou rebolo CBN é que o rebolo da pesquisa consegue trabalhar em uma $V_s = 30\text{m/s}$; V_a até 150mm/min e $a =$ até 5mm por passada, redução significativa no tempo de produção. Por isso, se torna viável para produção em alta escala.

4.2.3. O Sistema de refrigeração Convencional

O Sistema de refrigeração convencional utilizado é o mesmo utilizado em várias empresas atualmente. Consiste essencialmente no reservatório de fluido, bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido de corte. O reservatório da retificadora possui capacidade de 80 litros.

O fluido de corte utilizado foi uma emulsão de 2,5% em água do óleo solúvel semi-sintético QUIMATICME-I concentrado. O Fluido de corte usado possuía na sua composição, anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocativos não iônicos, alcanolomidas, entre outros.

As medições de concentração da emulsão foram verificadas periodicamente através do refratômetro portátil do fabricante ATAGO modelo N-1E, na concentração de 2,5%.

Foram utilizados bocais de alta vazão e baixa pressão, esses bocais vieram junto com a máquina quando a mesma fora comprada. O fluido de corte com aplicado a uma vazão de 18l/min . em uma pressão de aproximadamente 6 bar. Esta vazão foi máxima alcançada pela bomba empregada e foi mensurada através de um medidor tipo turbina e um display digital.

4.2.4. O Sistema de Lubrificação por MQL e MQL/Água

O conjunto completo para aplicação de MQL (tradicional e com água) é composto de: (a) sistema produz, transporta, regula a pressão e mede a vazão do ar comprimento necessário para os experimentos; (b) unidade de controle de MQL e (c) bocal projetado para aplicação de MQL na retificação, conforme ilustrado na figura 15.

O fluido de corte utilizado no sistema de MQL foi Accu-Lube LB-1000 da empresa ITW Chemical Products LTDA (lubrificante natural e biodegradável, contendo aditivos de extrema pressão), fornecido pela ITW Chemical Products

LTDA. Este foi utilizado in natura (para MQL tradicional) e misturado com água (para MQL/água) em três proporções pré-determinadas por ensaios anteriores, as quais se obtiveram os melhores resultados.

O sistema de ar comprimido compõe-se dos equipamentos descritos na figura 15(a), O regulador de pressão, o medidor de vazão e o leitor digital foram necessários para o controle e a medição precisa da vazão (m^3/h) do ar comprimido, a qual imprime a velocidade do jato de ar requerida nos experimentos do MQL (30 m/s). Com pressão do ar no MQL de 6 bar e vazão do fluido de corte no MQL de 120ml/h.

A unidade de controle de MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) permite uma fina regulagem do volume de óleo e de ar, separadamente, utilizando-se de válvulas tipo agulha, Depois, a pequena quantidade de lubrificante dosada é pulverizada em um fluxo de ar, cuja pressão (constante) é de 6 bar aproximadamente. Em seguida a mistura ar/óleo pressurizada é aplicada na região de corte pelo bocal apropriado.

A figura 15(b) mostra a unidade de controle do equipamento de MQL e seus componentes, onde são feitas a dosagem do óleo lubrificante e a regulagem da vazão de ar comprimido.

Na figura 15(c) ilustra-se em duas vistas, o bocal desenvolvido e utilizado na experimentação da técnica MQL no processo de retificação.

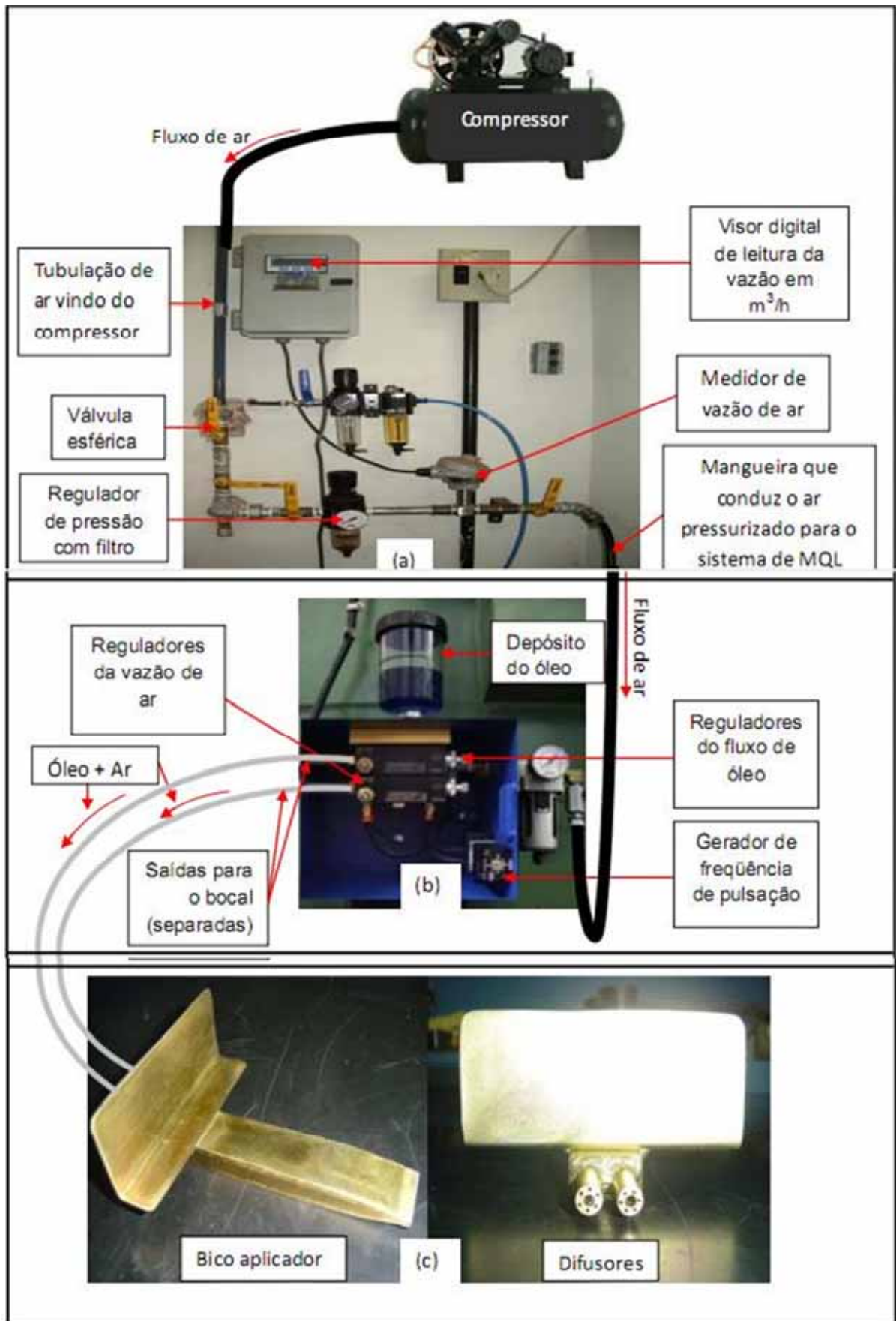


Figura 15 - Conjunto Completo do Sistema MQL e MQL com água.

Os dados de rotação e potência elétrica consumida, gerados durante o processo de retificação, foram transmitido à placa de aquisição de dados através de circuito condicionador de sinais, que possui bornes de entrada para recebimentos de dados.

Para manipulação e armazenamento dos dados foi desenvolvido um programa no LabView que fornece uma tela de apresentação para aquisição de dados.

Para ensaios, o sistema foi programado para operar com uma taxa de aquisição de 1000 pontos por segundo. Tal programa realizou a aquisição do sinal da força tangencial de corte e emissão acústica, sendo que estas variáveis de saída serão armazenadas num arquivo para posterior análise.

A programação no LabView 7.1 é feita em sub-rotinas, destacando-se:

- Entrada de dados físicos dos materiais ensaiados;
- Aquisição de dados em tempo real;
- Análise e disposição destes dados em gráficos, simultaneamente à aquisição dos dados;
- Apresentação dos resultados;
- Armazenamento dos dados de interesse em arquivos

4.4.2. Descrição do Método de Aquisição da Emissão Acústica

A medição da emissão acústica (EA) pôde ser feita através de um aparelho da marca Sensis, modelo DM 42 com tratamento de sinal e um sensor e EA acoplado no dinamômetro, junto à morsa de fixação dos corpos de prova. Estes equipamentos são capazes de monitorar em tempo real o sinal de emissão acústica por meio do seu valor medido quadrático (RMS). A captação do sinal era feita da seguinte forma: o sensor EA captava as variações das tensões de deformação provenientes da retificação e enviava-as em seguida para o módulo EA, que as convertia em tensões elétricas. O módulo enviava o sinal destas tensões elétricas até a placa de aquisição instalada no microcomputador de maneira direta sem a necessidade de nenhum tipo de manipulação de dados. Optou-se pelo posicionamento do sensor EA o mais próximo possível da peça, impossibilitando o surgimento de interferências.

O conjunto formado pela unidade de tratamento do sinal e o sensor foi calibrado baseado em ensaios preliminares e consulta a outros trabalhos, visando obter um sinal de qualidade, livre de saturação. Os parâmetros da calibração permaneceram constantes durante os ensaios.

- Ganho de sinal = 1dB;
- Redução de ruído = 0;
- Ganho de entrada = 1dB;
- Filtro passa alta = 50 kHz;
- Constante de tempo = 1ms.



Figura 17 - Unidade de Tratamento do sinal de Emissão acústica

Os resultados de emissão acústica (RMS) são apresentados na forma de gráficos. Cada ponto corresponde a uma média aritmética dos pontos máximos obtidos para cada um dos 10 ciclos de retificação.

4.4.3. Rugosidade

Para a medição da rugosidade média das peças representada pelo parâmetro Ra, foi utilizado um aparelho da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3⁺⁺. Foi feita a medição na direção da espessura (e) da peça. O rugosímetro foi ajustado para trabalhar com um comprimento de medição (cut-off) igual a 0,25 mm. Foram feitas 5 medições em posições distintas e aleatórias do diâmetro da superfície retificada da peça.



Figura 18 - Operação de medição de rugosidade

4.4.4. Circularidade

A circularidade foi obtida utilizando um medidor de circularidade modelo *Tayround 1C*, marca *Taylor Hobson*.

Na ponta do braço possui um apalpador com ponta de diamante, a qual entra em contato com a peça e ao girar o conjunto onde a peça está fixada, obtêm-se os valores de circularidade de acordo com a figura 19.

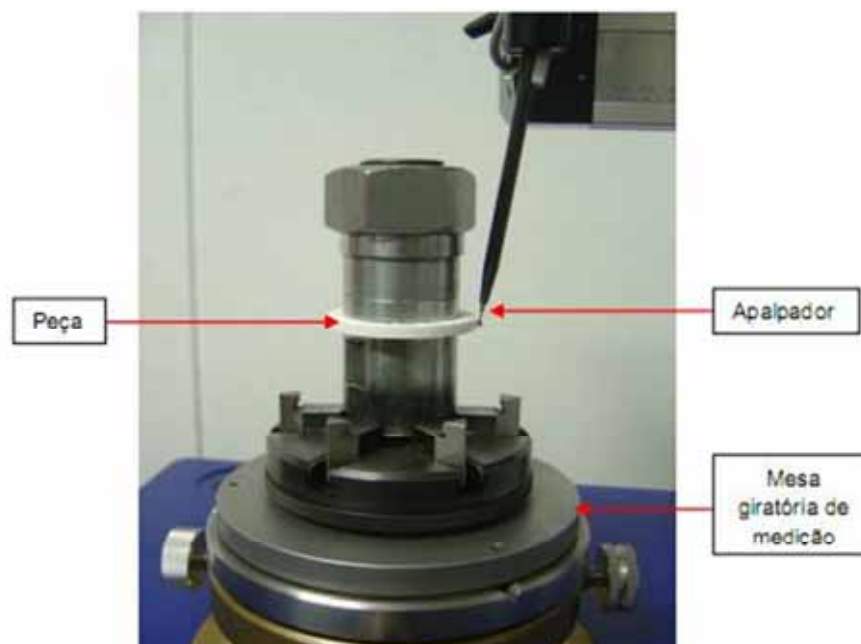


Figura 19 - Detalhe do medidor de circularidade

O medidor de circularidade é alimentado por um sistema de ar comprimido, para formar uma camada de ar sob a mesa giratória, garantindo assim que seus movimentos sejam extremamente precisos.

4.4.5. Desgaste diametral do rebolo

Considerando que a superfície do corpo de prova que foi retificada tem 4mm de largura, a do rebolo 15 mm e o número de ensaios pro dressagem foram dez (cinco em uma posição de um lado, cinco em outra posição do lado oposto da superfície de corte) . Usou-se então 4 mm à esquerda e 4 mm à direita da superfície abrasiva, acarretando desgaste e conseqüente formação de degraus nessas posições ilustrado na figura 20.

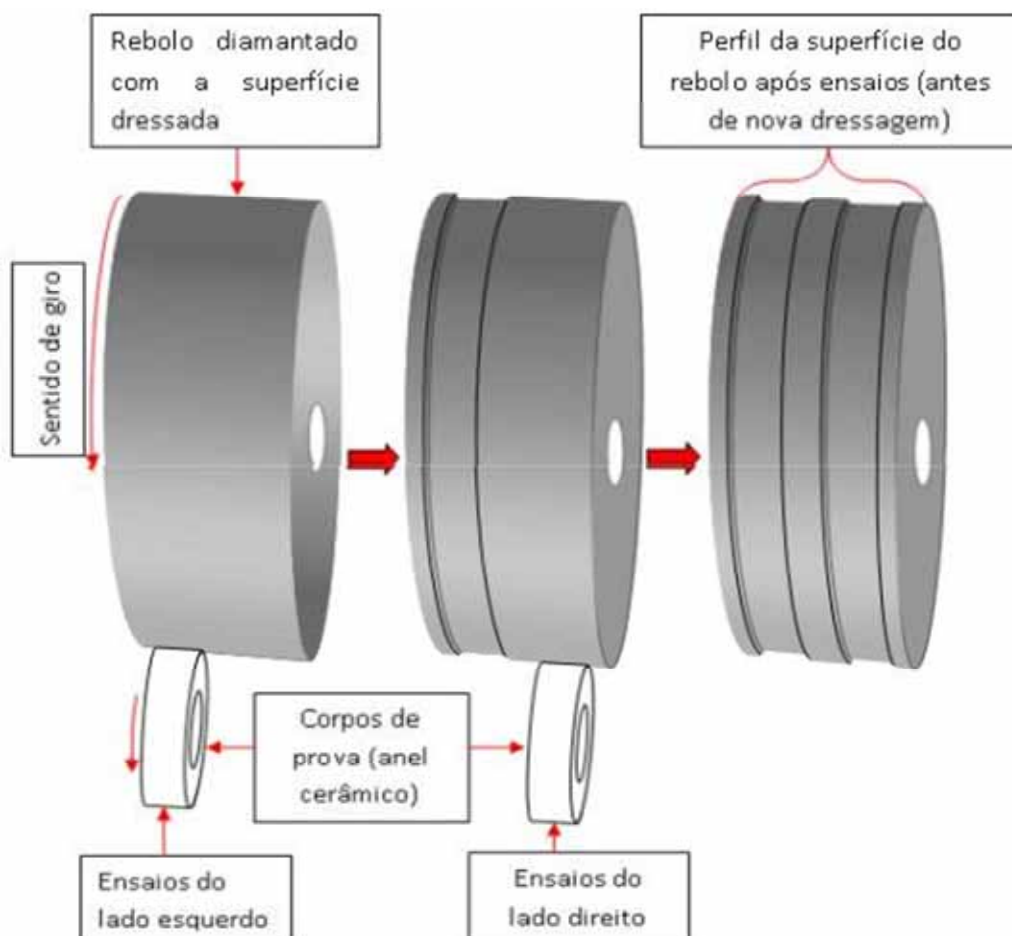


Figura 20 - Formação de degraus na superfície abrasiva

Em seguida, para medição desses desgastes, fez-se a impressão do perfil da superfície do rebolo em um tarugo cilíndrico de aço ABNT 1020. Os desníveis marcados neste corpo de prova foram medidos com a ajuda do aparelho Taylor Hobson, modelo SURTRONIC 3⁺⁺, o mesmo usando para rugosidade.

4.5. PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE DAS AMOSTRAS PARA O MEV

Depois de feitos os ensaios e medições, amostras foram retiradas das peças retificadas e preparadas para análise com microscopia eletrônica de varredura (MEV). O preparo da amostra consiste no corte (máquina policorte, com disco diamantado para corte metalográfico), embutimento em resina e polimento (politriz mecanográfica, com pastas de diamante de granulometrias 15 μm , 9 μm , 6 μm , 3 μm , 1 μm , 0,25 μm conforme a figura 21.



Figura 21 - Preparação da amostra para microscopia

4.5.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

A finalidade dos ensaios de MEV foi observar a presença ou não de alterações microestruturas no material, provocadas pelas severas condições de usinagem a que foram submetidos os corpos de prova.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Instituto de Química da Universidade de São Paulo – USP, campus de São Carlos (IFSC).

Para caracterização de um corpo de prova cerâmico no microscópio eletrônico de varredura é necessário, para aterramento elétrico, uma deposição manométrica de ouro. Esta deposição foi feita através de um “sputtering”, modelo SCD 050 da Balzers, do próprio Instituto.

A microscopia eletrônica de varredura foi feita utilizando-se um microscópio modelo DSM 960 da Carl Zeiss, Jena.

4.6. CONDIÇÕES DE USINAGEM UTILIZADAS NOS ENSAIOS

Foram realizados ensaios preliminares para se encontrar os melhores parâmetros de usinagem, nas condições de lubri-refrigeração propostas. São eles:

- Velocidade de corte (V_s) de 30 m/s;
- Rotação da peça (V_w) de 204 rpm;
- Penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm;
- Tempo de centelhamento (t_s) igual a 5 segundos;
- Largura de retificação de 4 mm;
- Velocidade de dressagem (V_d) de 600 mm/min (Feita manualmente, marcando-se o tempo para percorrer determinada distância).
- Profundidade de dressagem (a_d) de 0,04mm;
- Vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 18l/min; pressão de 6 bar;
- Vazão do fluido de corte no MQL de 120ml/h
- Pressão do ar no MQL de 6 bar;
- Velocidade de saída do ar de 30 m/s no bocal;
- Quantidade de 5 peças cerâmicas ensaiadas por lado do rebolo;
- Sistema de limpeza do rebolo com dois bocais na posição tangente à superfície de corte.

Para a velocidade de mergulho, foram utilizados três valores, sendo estes de 0,25mm/min, 0,50mm/min e 0,75 mm/min.

Parâmetros de entrada

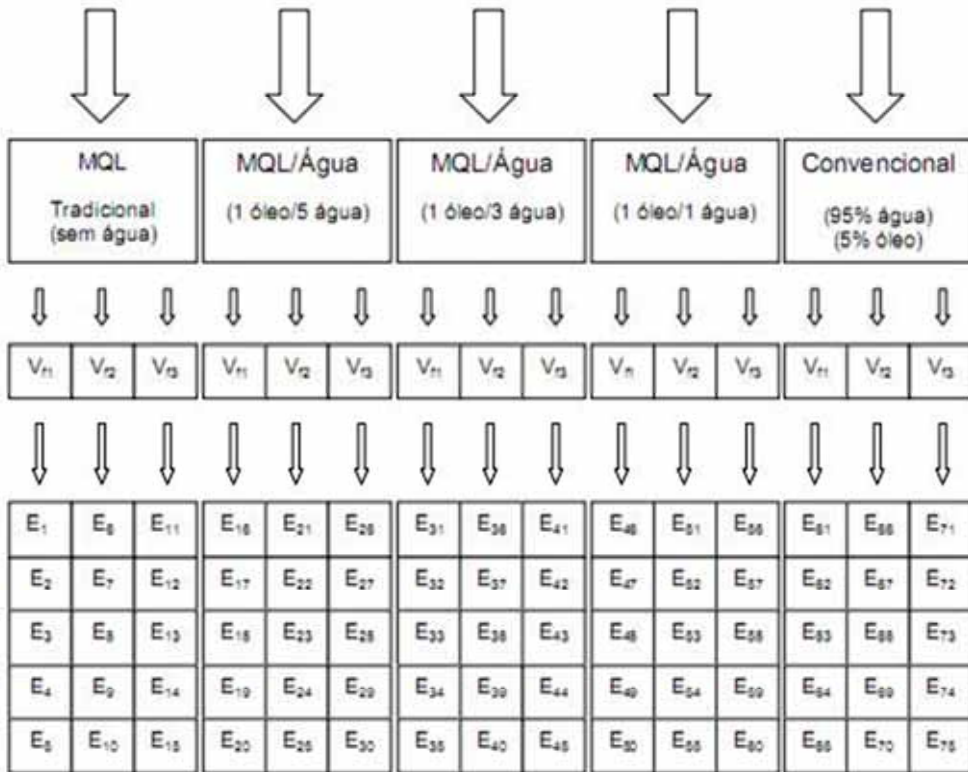


Figura 22 - Representação dos ensaios realizados

Onde:

Vf = velocidade de avanço;

E1... E75 = ensaios realizados;

MQL = Mínima Quantidade de Lubrificante;

4.6.1. Procedimento Experimental

Antes de cada ensaio com refrigeração convencional, verificou-se a concentração do fluido de corte com um refratômetro manual de bolso. Se estivesse diferente do pré-estabelecido (5% de óleo e 95% de água), eram feitas correções com a adição de fluido de corte ou água.

Realizou-se um por um dos ensaios, procedendo-se da seguinte forma: O anel cerâmico foi preparado e preso no mandril e, após, o conjunto foi fixado entre pontas na máquina.

Estando o conjunto (peça/mandril) devidamente fixado à máquina, o computador do laboratório foi preparado para executar o programa de aquisição de dados desenvolvido (utilizando-se o programa LabVIEW®, versão 7.1) para que no momento do acionamento da retificadora fossem captados os valores instantâneos de rotação do rebolo, potência e nível RMS do sinal de emissão acústica.

O ajuste da velocidade de avanço foi feito na própria máquina. No programa CNC da máquina constava a velocidade de avanço de 1 mm/min, com possibilidade de trabalho em 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 150% dessa velocidade. Foram escolhidos os três primeiros valores, pois foram os que melhores que se comportaram diante das variáveis de entrada (lubri-refrigeração) impostas, o que implicou em velocidades de avanço de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min em trabalho anteriores.

Antes do início de cada ensaio, na condição convencional, a área de retificação da máquina foi vedada, para minimizar a perda de fluido de corte, evitando assim a poluição do ambiente de trabalho e a variação na concentração do fluido. Já nas condições MQL e MQL/Água, após a vedação, a névoa formada era retirada do local por um exaustor para que não fosse inalada pelo operador.

A aquisição foi iniciada, o sistema de lubri-refrigeração acionado e o rebolo ligado pelo inversor de frequência. Deixava-se um tempo de aproximadamente 3 segundos antes do primeiro mergulho (início da usinagem), para efeitos de análise da força em vazio. Após isso, deixou mais 5 segundos como tempo de centelhamento e então foi executada a retificação propriamente dita.

Depois de concluída a retificação de cada peça, o programa era pausado de aquisição de dados, o sistema de lubri-refrigeração e o rebolo eram

desligados, a peça trocada e os mesmos procedimentos repetidos até que cinco operações fossem completadas, quando então o programa de aquisição de dados era parado.

Quando era trocado à condição de lubri-refrigeração e/ou a velocidade de avanço, o lado do rebolo e os procedimentos anteriores foram repetidos por mais cinco ensaios.

A cada dez ensaios (cinco cada lado), o rebolo era dressado até que a superfície de corte do mesmo não apresentasse nenhum vestígio da usinagem anterior. Como os parâmetros de dressagem eram iguais, a ferramenta abrasiva apresentou as mesmas condições iniciais em todos os ensaios.

Isso foi feito para cinco condições de lubri-refrigeração [convencional, mínima quantidade de lubrificante (MQL) tradicional, MQL/Água (1:1), MQL/Água (1:3), MQL/Água (1:5)]; Três velocidades de avanço (0,25; 0,50 e 0,75 mm/min.) e, em cinco peças para cada combinação (velocidade de avanço /condição de lubri-refrigeração), totalizando setenta e cinco ensaios.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios são apresentados e discutidos. As variáveis de saída medidas durante a execução dos ensaios foram calculadas através de uma média de dez leituras sequenciais e estão dispostas na forma de gráfico de barras, com seus intervalos de confiança calculados com confiabilidade de 95%, segundo distribuição de Student. Medidas de potência, rugosidade estão representadas pela média de 15 leituras, também em figuras de barras e com intervalos de confiança calculados com confiabilidade de 95%. As medidas da relação G foram obtidas a partir de uma única medida do corpo de prova.

Antes da aquisição das forças de corte durante a retificação foram aquiritadas as forças induzidas pelo fluido de corte, isto é, foram coletados os dados de força sem a retificação do corpo de prova, mas com bocal de lubri-refrigeração trabalhando.

5.1. POTÊNCIA DE CORTE

A Figura 23 apresenta os resultados das médias e desvio padrão dos valores de potencia de corte aferidos após a retificação das peças, uma vez que a potencia de corte e a força de corte são proporcionais, para cada condição de lubri-refrigeração (MQL, MQL/Água 1:5, MQL/Água 1:3, MQL/Água 1:1 e Convencional) e em cada velocidade de avanço (0,25; 0,50 e 0,75mm/min).

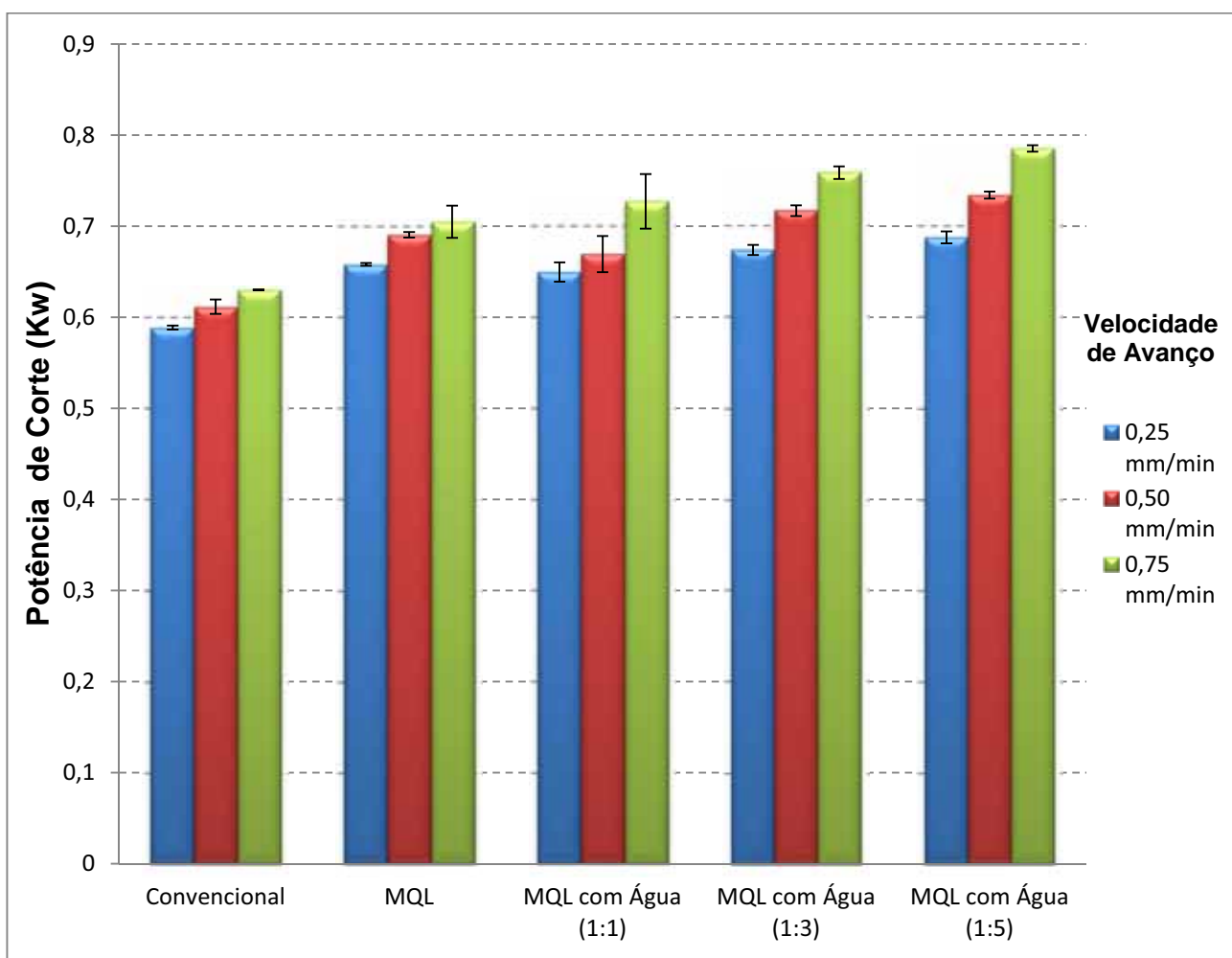


Figura 23 - Valores da potencia de corte.

Segundo Tawkaoli *et al.* (2009) a potência de corte é intrínseco relacionado com a taxa de remoção do cavaco. Na figura 23 potência de corte e os valores do desvio padrão em relação à velocidade de avanço.

No método convencional, MQL, MQL1: 1, MQL1:3, MQL1:5 para a velocidade de avanço baixa (0,25mm/min) as potências de corte são praticamente iguais, pode ser explicado através do fenômeno renovação natural dos grãos abrasivos do rebolo os resultados de relação G comprovam isso, onde os grãos achatados para baixo são preferencialmente removidos depois que grãos micro fraturados os aguça.

Em retificação com MQL, as gotículas de óleo depositado sobre a superfície do rebolo formam uma película lubrificante (película lubrificação de limite), que é aplicado para lubrificação da zona de retificação. Com aumento da taxa de fluxo de óleo, a taxa de deposição de gotículas na superfície do rebolo aumenta reduzindo o atrito na interface peça/rebolo segundo F. Itoigawa *et al.* (2005). Portanto, como mostram as figuras 23 e 24 potências de retificação e rugosidade da superfície diminui quando se tem uma proporção água/óleo de 1:1 (refrigeração e lubrificação). Esse resultado está de acordo com Irani *et al.* (2011).

O método [MQL/Água (1:1)] tendeu ao melhor resultado cerca de 6% menor do método convencional e 10% menor que o MQL tradicional, que pode ser resultado dos efeitos hidrodinâmicos que para o método convencional energia específica aumenta devido o método convencional possuir uma quantidade expressiva de água, quando se tem uma relação de 1:1 melhora a lubrificação e refrigeração no ponto de contato.

Analisando-se apenas os MQLs com água, verifica-se que quanto mais água na mistura, [MQL/Água (1:3)], [MQL/Água (1:5)] maiores são os valores de força de corte obtidos, isso explica porque neste momento existe uma ineficiente lubrificação, na retificação os grãos abrasivos vão se desgastando ao longo da usinagem sendo que os seus topos começam a perder as “cristas”, ou seja, sua afiação tornando os grãos” cegos”. Por ineficiência de lubrificação na região de contato, ou seja, com aumento de água no método de lubri-refrigeração, existe perda prematura dos grãos ocorrendo um aumento nos esforços de remoção do material, originando deformações na superfície do material ao invés de sua efetiva remoção. Com aumento desses esforços e deformações citadas ocorre o aumento da força de corte tangencial, em consequência de maiores atritos do topo do grão abrasivo com a superfície do material gerando temperaturas altas e calor envolvido

no processo, conforme mostrados nos gráficos da figura 23 [MQL/Água (1:3)], [MQL/Água (1:5)].

5.2. RUGOSIDADE

A Figura 24 apresenta os resultados das médias e do desvio padrão dos valores de rugosidade aferidos após a retificação das peças, para cada condição de lubri-refrigeração (MQL, MQL/Água 1:5, MQL/Água 1:3, MQL/Água 1:1 e Convencional) e em cada velocidade de avanço (0,25; 0,50 e 0,75mm/min).

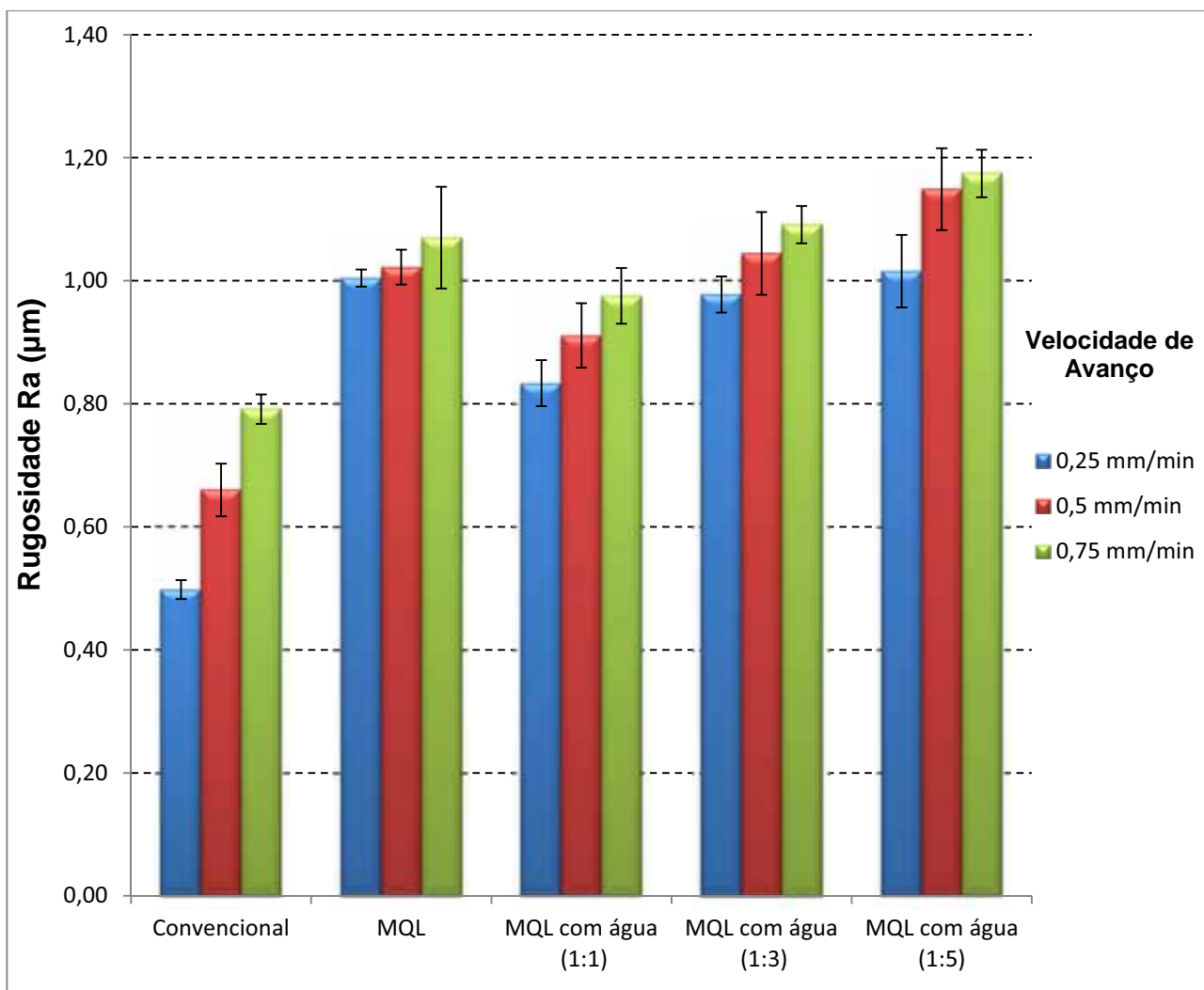


Figura 24 - Valores da rugosidade.

Os valores de rugosidade obtidos pelo método lubri-refrigeração convencional foram menores que os obtido com método MQL devido o método de convencional possuir abundância em fluido de corte.

Segundo Tawakoli *et al.* (2008), na lubri-refrigeracao convencional a elevada quantidade de fluido também atua na retirada dos cavacos da zona de corte. Já quando é utilizada a técnica MQL a menor quantidade de fluido não é suficiente para remover os cavacos das porosidades do rebolo. Os cavacos alojados nas porosidades além de impedir a entrada do fluido de corte produzem um maior riscamento da superfície piorando assim a rugosidade da peça.

Os valores obtidos pelo método MQL, os valores de rugosidade apresentaram um acréscimo acentuado, comparado com o convencional, que pode ser explicado pela falta da refrigeração na área de contato, uma vez que o MQL tradicional consiste na mistura óleo-ar, se tem uma boa lubrificação e uma péssima refrigeração. Itoigawa *et al.* (2006) também comentaram que a habilidade de refrigeração gerada devido às gotículas de água não é importante somente para a precisão dimensional, mas também para evitar alguns efeitos entre a ferramenta e a superfície de trabalho, como por exemplo a adesão. O cavaco preso aos poros do rebolo risca a peça, aumentando sua rugosidade.

Os valores apresentados pelo MQL tradicional foram em média 65% maiores que os do convencional, devido à aplicação do óleo *in natura* interagir com os cavacos formando uma “borra” parcial que entranha nos poros do rebolo. Este resultado confirma que Bianchi *et al.* (2011) estudou retificação de cerâmica usando rebolo vitrificado.

O método de MQL com adição de água forneceu médias de rugosidade intermediárias entre as do sistema convencional e as do MQL tradicional, nas três diluições e nas três velocidades de avanço. Uma diluição [MQL/Água (1:1)] tendeu ao melhor resultado, cerca de 40% maior que o convencional e 20% menor que o MQL tradicional. Para explicar os melhores resultados da mistura ar-óleo-água em relação à de ar-óleo no MQL é que a diluição do óleo solúvel em água diminui a viscosidade do fluido resultante, diminuindo assim a aderência da “borra” cavaco-fluido à superfície de corte do rebolo, o que facilita a sua retirada dos poros, amenizando o riscamento da peça, atenuando a rugosidade desta. Outra hipótese gira em torno da melhor capacidade de refrigeração da diluição óleo-água em

relação à do óleo puro no MQL tradicional. Evidentemente quando se aumenta a proporção de água, nota-se a tendência da elevação dos valores de rugosidade pela perda da capacidade de lubrificação. Lubrificação eficiente permite que o cavaco deslize mais facilmente sobre a superfície da ferramenta, resultando em um melhor acabamento superficial. Então, na mistura óleo-água, quanto maior a quantidade de água: mais fácil é a limpeza do rebolo (retirada dos cavacos dos poros), o que proporciona um efeito positivo na rugosidade; pior é a lubrificação das interfaces cavaco-ferramenta (menor lubrificação), o que gera um efeito negativo na rugosidade. A maior rugosidade gerada com o uso do MQL tradicional em relação ao MQL com água confirma esse efeito positivo.

Os piores valores de rugosidade dentre aqueles obtidos usando-se MQL com água, foi o que utilizou a maior proporção de água (1:5).

5.3 DESVIOS DE CIRCULARIDADE

A figura 25 apresenta os resultados obtidos para o desvio de circularidade, referente a comparação entre as condições de lubri-refrigeração e as diferentes velocidades de avanço empregadas.

O método de lubri-refrigeração convencional, aliado a cada uma das três velocidades de mergulho, foi o que ofereceu os melhores resultados (valores médios de circularidade). Isso se deve à maior capacidade de limpeza da superfície de corte do rebolo que este método proporciona (expulsão do cavaco da área de corte).

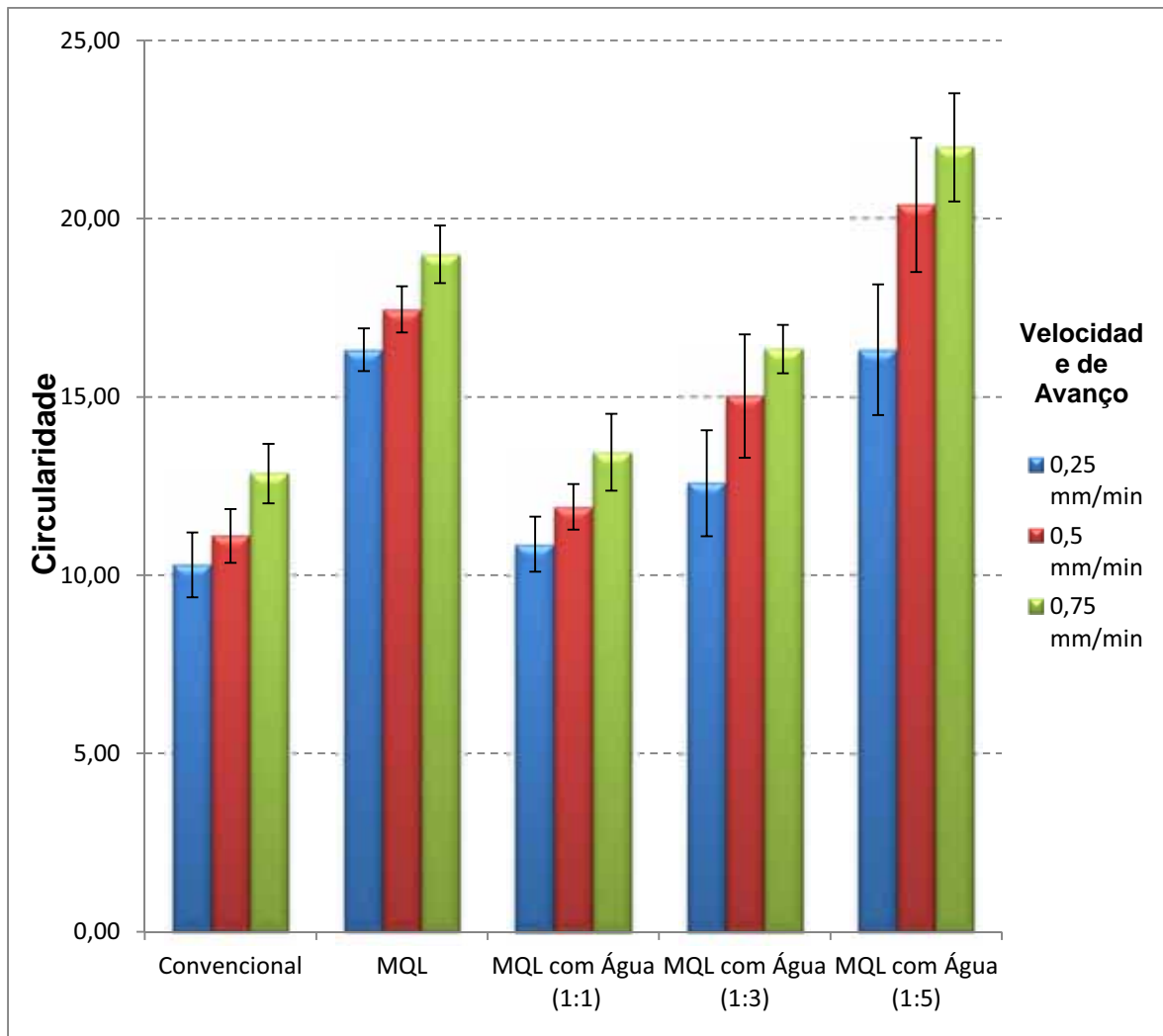


Figura 25 - Valores de desvio de circularidade em função das condições de ensaio.

Conforme foi demonstrado na potência de corte e rugosidade com aumento na quantidade de água na mistura ar-óleo-água (MQL/Água) acarreta um aumento no erro de forma da peça, pois os valores médios de circularidade aumentaram com o aumento da diluição. Isso foi consequência da diminuição do poder de lubrificação da mistura, pelo aumento do teor de água e redução do teor de óleo nela.

Por outro lado, quando somente se aplicou óleo-ar (MQL tradicional) como lubri-refrigerante, que é quando se tem a maior capacidade de lubrificação dentre os sistemas de MQL, os valores de circularidade foram maiores que na condição ensaiada MQL/Água 1:1 e parecidos que na MQL/Água 1:5 (mistura ar-óleo-água). Isto é devido ao fato de que, apesar do aumento da capacidade de lubrificação do MQL tradicional, a mistura de ar-óleo perde em capacidade de

limpeza do rebolo, o que, como já citado, também tem forte influência na circularidade. Segundo Silva *et al.* (2008), uma lubrificação eficiente permite que o cavaco deslize mais facilmente sobre a superfície da ferramenta, resultando em um melhor acabamento superficial.

5.4. DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO

O desgaste do rebolo é dependente de três fatores principais: desgaste do aglomerante, desgaste do grão abrasivo, e friabilidade dos grãos e a dureza da peça usinada. Trata-se de uma variável de extrema importância no processo de retificação, já que quanto maior o desgaste do rebolo, menor será o rendimento da ferramenta.

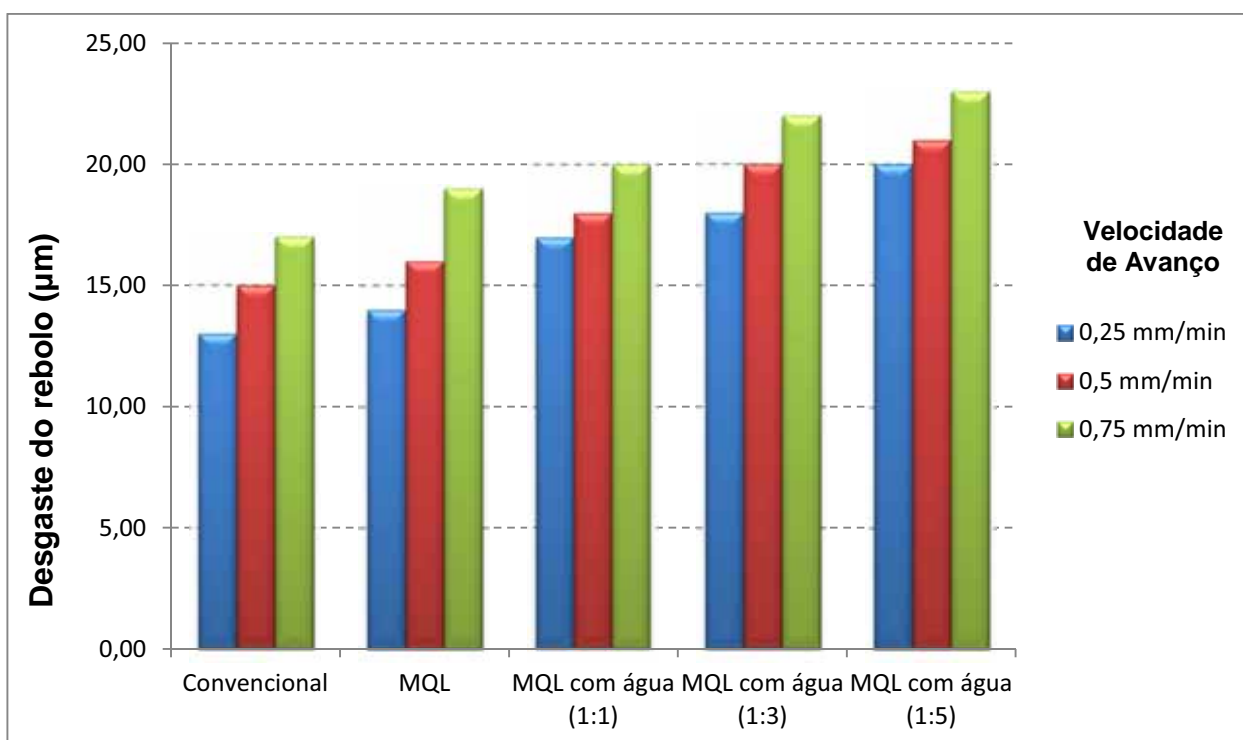


Figura 26 - Valores de desgaste diametral do rebolo em função das condições de ensaio.

É importante salientar que a velocidade periférica empregada 30m/s, foi limitada pelas características construtivas da máquina disponível para os ensaios.

A limitação de velocidade de corte presente nos ensaios contribuiu para que o desgaste de tal ferramenta se apresente mais acentuado, contudo se

comparadas as situações de lubri-refrigeração propostas, o novo método de lubri-refrigeração apresentado mostra resultados interessantes comparados aos outros métodos de lubri-refrigeração utilizados.

Na figura 26 o método convencional proporcionou menores valores de desgaste do rebolo. Esta condição foi a que propiciou menores valores de rugosidade e circularidade da peça e, portanto, mais eficiência na retirada do cavaco do rebolo.

Silva *et al.* (2007), citam que o aumento da lubrificação proporcionado pelo fluido de corte, resulta na diminuição do desgaste do rebolo através da redução do atrito grão-peça e do atrito cavaco, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo unidos ao ligante ocasionando menor desgaste do rebolo.

Também se verifica que, com o aumento da velocidade de mergulho, a espessura equivalente de corte cresce o que aumenta o desgaste diametral do rebolo (CHOI *et al.* 2008). Esta teoria concorda com todas as condições de corte Convencional, MQL, MQL 1:1, MQL1: 3 e MQL1:5.

Como já citado neste trabalho, o MQL 1:5 foi a condição de lubri-refrigeração menos efetiva na retificação, ou seja, esta foi a condição em que um maior número de cavacos permaneceu aderido à sua superfície. Com isso, o cavaco aderido ao rebolo atrita com a peça e, este atrito aliado ao baixo poder de lubrificação.

5.5. ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A fim de comparar as microestruturas e verificar a ocorrência de danos térmicos, realizaram-se análises metalográficas com ampliação de 500x em seções transversais dos corpos de prova.

Conforme exposto na revisão bibliográfica a não visualização de defeitos a olho nu não isenta a peça de apresentar danos térmicos. Nesse aspecto a análise metalográfica permite visualizar os danos que ocorrem na microestrutura da peça.

Alterações na resistência ao desgaste, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça podem ser causadas por danos

na superfície de um material. Por isso, a integridade superficial de uma peça é de extrema importância.

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

A Figura 27 representa a microscopia eletrônica de varredura (MEV), feita na região da aresta da amostra retirada do corpo de prova retificado na condição de lubri-refrigeração convencional.

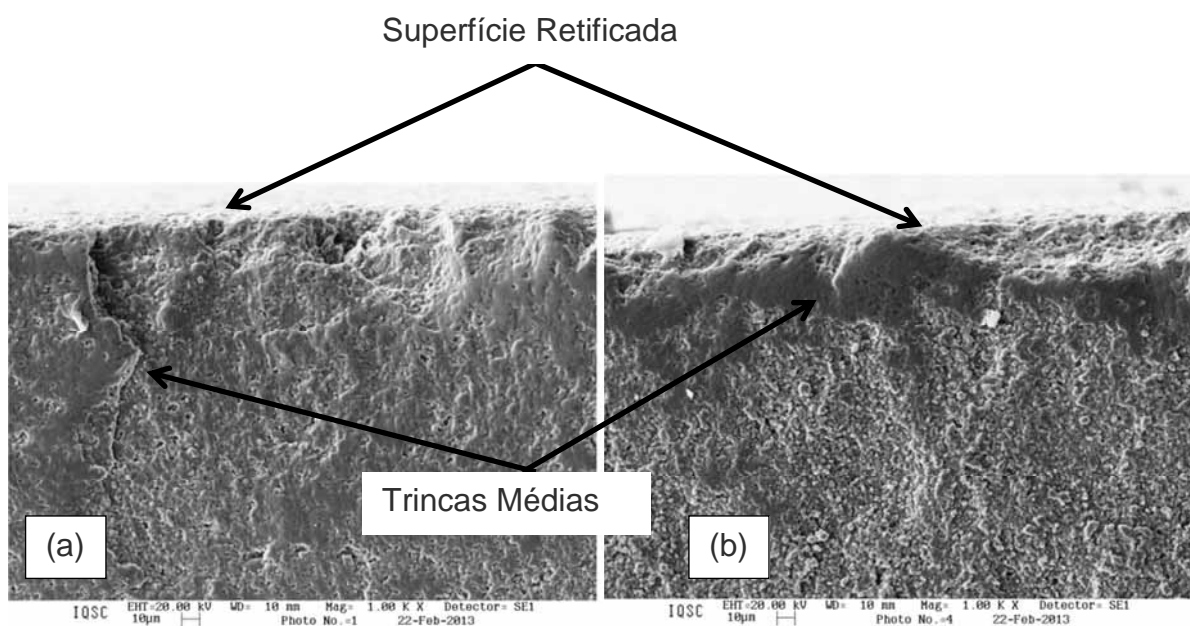


Figura 27 - Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração convencional: (a) $v_f = 0,25$ mm/min; (b) $v_f = 0,50$ mm/min

Analisando a Figura 26, percebe-se que, na refrigeração convencional, o modo frágil de remoção do material predominou no processo. Nota-se um bom acabamento superficial, apesar do modo de remoção frágil, que pode gerar micro trincas na peça, que é um fator predominante na remoção de cavaco em retificação de cerâmica. Quanto à integridade da aresta, nota-se um lascamento da mesma formando uma cratera, pela propagação de trincas, devido à força normal de corte (F_n) que o rebolo exerce sobre a peça durante a operação de retificação.

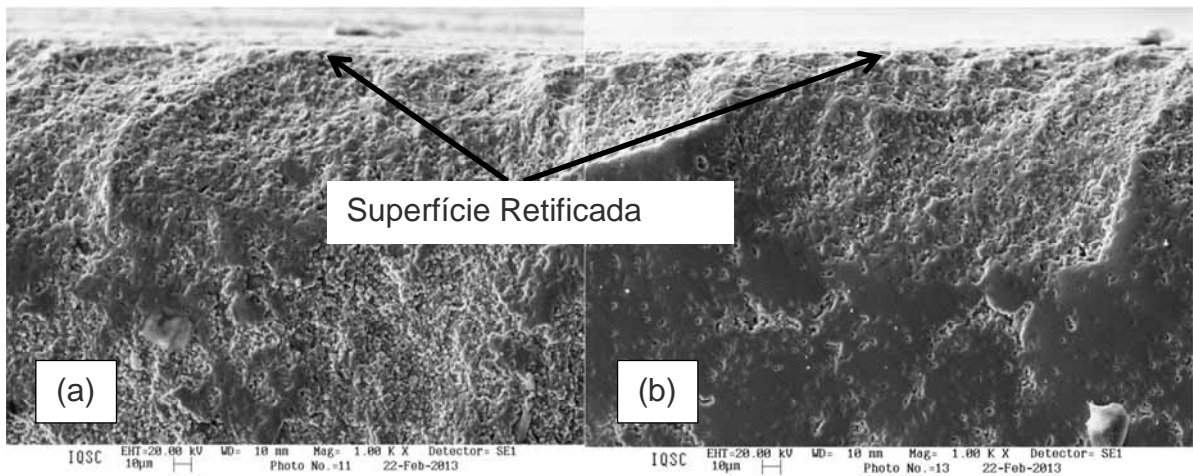


Figura 28 - Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração MQL Tradicional: (a) $v_f = 0,25$ mm/min; (b) $v_f = 0,50$ mm/min.

Analisando a figura 28, nota-se que, para a MQL tradicional predominou o modo de remoção dúctil, proporcionando ótimas condições de acabamento superficial, com reduzida presença de micro trincas (agente concentrador de tensão), o que contribui positivamente na resistência do material.

Quanto à integridade da aresta, nota-se nitidamente uma cratera formada por um lascamento, pela propagação de trincas nesta região, devido à força normal de corte (F_n) exercida pelo rebolo.

Esse melhor acabamento superficial da peça retificada com a técnica de lubri-refrigeração MQL tradicional, em relação ao conseguido utilizando-se a convencional, pode ser explicado pelo maior poder de lubrificação que o fluido (óleo in natura) usado na MQL tem, quando comparado ao da convencional (emulsão 5%).

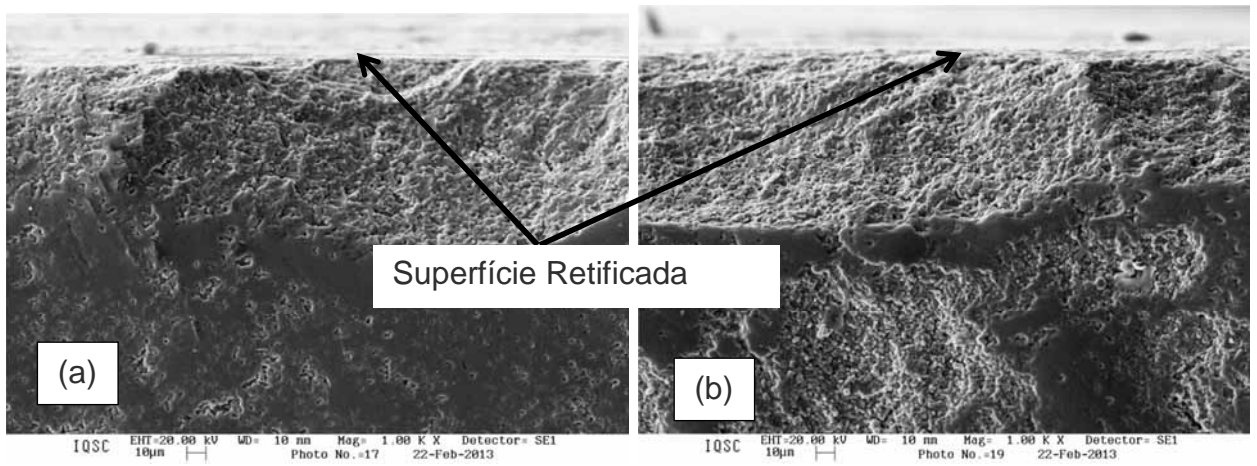


Figura 29 - Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração MQL 1:1: (a) $v_f = 0,25$ mm/min; (b) $v_f = 0,50$ mm/min.

Na Figura 29 nota-se que o modo de remoção dúctil também predominou para a técnica de MQL/Água (1:1), devido à utilização do mesmo fluido de corte que na técnica de MQL tradicional com uma pequena diluição. Praticamente não se nota a diferença entre um e outro, o que leva à conclusão de que a adição de água nessa proporção não influi significativamente no poder de lubrificação e, portanto, também não altera a integridade superficial da peça após a retificação.

6. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que, na retificação de cerâmica com rebolo resino cerâmico em condições similares às utilizadas neste trabalho:

1. Quanto a rugosidade da peça conclui-se que, baseado somente nessa variável, tem-se o MQL com água 1:1 como um potencial vantajoso substituto do MQL tradicional e um possível substituto do convencional, pois é um fluido menos poluente pela menor quantidade de óleo utilizada e menos onerosa pelo mínimo descarte e ausência de recuperação.

2. Os resultados para o item circularidade foram semelhantes àqueles obtidos com a rugosidade, exceto que o MQL 1:5 foi a condição que apresentou os maiores valores médio (pior desempenho), pois a melhor lubrificação deste sistema gerou peças retificadas com o desvio de circularidade menor que aquelas obtidas na MQL/Água (1:1).

3. A condição de lubri-refrigeração que obteve o maior desgaste diametral do rebolo foi aquela que foi menos eficiente em termos de limpeza do rebolo (MQL 1:5), crê-se pelo fato de ter pouca lubrificação e gera mais atrito na região de corte. Porém, a condição mais eficiente em termos de limpeza do rebolo foi o método convencional (fluido em abundância) foi aquela que obteve o menor desgaste diametral do rebolo, devido à sua baixa capacidade de remoção do cavaco e poder de resfriamento do rebolo.

7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de metodologias para utilização em escala industrial da retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmicas com rebolos resina cerâmico, utilizando-se o método MQL/Água como meio de lubri-refrigeração.
- Estudo do método de lubri-refrigeração otimizado (bocal Webster) convencional na retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmicas, com rebolos resino cerâmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEY D.W.; DEVEREUX, O.F. Coolant pH control for optimum ceramic grinding. *Journal of Materials Science*, n.37, p.5135-40, 2002.

ALLEY D.W.; DEVEREUX, O.F. Coolant pH control for optimum ceramic grinding. *Journal of Materials Science*, n.38, p.1353-58, 2003.

ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. *The science and engineering of materials*. Pacific Groove. Thomson Brooks/Cole, 2003.

BLAEDEL, K.L.; TAYLOR, J.S.; EVANS, C.J., Ductile-regime grinding of brittle materials. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. *Machining of Ceramics and Composites*, Marcel Dekker, Cap.5, 1999.

CARPINETTI, L. C. R. "Planejamento e análise de experimentos." EESC -USP, São Carlos - SP, p.205, 2000.

CHAND, R.H.; GUO, C. Machining technical ceramics: the cost factor. *Ceramic industry*, v.150, n.7, p.31-32, 2000.

CHAND, R.H.; GUO, C.; PUJARI, V.K. Grit matters. *Ceramic Industry*, v.152, n.13, p.23-26, 2002.

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

CHEN, X.; ROWE, W.B. Analysis and simulation of the grinding process, Part I: Generation of the grinding wheel surface, *Int. J. Math. Tools Manufact.* Vol. 36, No. 8, pp. 871-882, 1998.

DEMETER E. C., HOCKENBERGER M. J. The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric error. *International Journal of Production Research*, nº 35, v.12, 1997.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, p.225-244, 2000. 98

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 6ª Edição, 2006.

EBBRELL, S., WOOLLEY, N. H., TRIDIMAS Y. D., ALLANSON D. R., ROWE, W. B., Effects of cutting fluid application methods on the grinding process, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2) (2000) 209–223.

EL BARADIE, M. Cutting fluids: part I. Characterization. Journal of Materials Processing Technology, 56, p.786-97, 1996.

MARSHALL, D.B.; EVANS, A.G., Reply to “Comment on „Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/ Radial Crack System””, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 64, 12ª ed., p. C-182–C-183, 1981

FERNANDES, U. B. Análise da influência do tempo de centelhamento para diferentes métodos de refrigeração na retificação. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

FUJITA, H.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; SANCHEZ, L. E. A.; SILVA JR, C. E.; Cerâmica **52** (2006) 269-275

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

GUO, C., MALKIN, S. Analysis of fluid flow through the grinding zone. Journal of Engineering for Industry, 114, p.427-34, 1992.

GUO, C.; CHAND, R.H. A ceramic machining primer. *Ceramic Industry*, 4, p.71-78, 1998.

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

HASSUI, A.; DINIZ A. E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, p. 855–862, 2003. 99

HEISEL, U., LUTZ, M., SPATH, D., WASSMER, R., WALTER, U., Application of Minimum Quantity Cooling Lubrication Technology in Cutting Processes, *Production Engineering Vol. III* (1994), p. 49-54.

HITCHINER, M. P. Precision grinding systems for production grinding with vitrified CBN. *SME Technical Paper MR90-507*, 1990, p. 1-11.

HUANG, H.; YIN, L.; ZHOU, L. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels. *Journal of Materials Processing Technology* , 141, p.329-36, 2003.

INASAKI, I. Fundamental of grinding. In: MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Handbook of Ceramic Grinding and Polishing*, New Jersey. Noyes Publications, p.190-204, 1998.

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

ITOIGAWA, F.; CHILDS, T.H.C.; NAKAMURA, T.; BELLUCO, W.; Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. *Wear* 260, p. 339-344, 2006.

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

JAHANMIR, S.; XU, H.K.; IVES, L.K., Mechanisms of material removal in abrasive machining of ceramics. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. *Machining of Ceramics and Composites*, Marcel Dekker, Cap.2, 1999.

JAHANMIR, S.; XU, H.K.; IVES, L.K., Mechanisms of material removal in abrasive machining of ceramics. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. *Machining of Ceramics and Composites*, Marcel Dekker, Cap.2, 1999.

KHENAIFES, M. Investigação de novas ferramentas estatísticas e utilização de microcontrolador no monitoramento da queima na retificação plana tangencial. 2006. 166f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006. 100

KING, R. I. E., HAHN, R. S. *Handbook of Modern Technology*. New York, Chapman And Hall, 1986.

KING, R. I., HAHN, R. S., *Handbook of Modern Grinding Technology*. 3a Ed., Cap.6, P.119-167, 1992.

KIRCHNER, H.P.; LARCHUK, T.J.; CONWAY, J.C. Crushing as a mechanism of material removal during abrasive machining. *J. Am. Ceram. Soc.*, v.68, n.4, p.209-15, 1985.

KLOCKE, F.; VERLEMANN, E.; SCHIPPERS, C. High speed grinding of ceramics. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. *Machining of Ceramics*

and Composites, Marcel Dekker, Cap.4, 1999.

LAWN, B. R. Fracture of brittle solids, p.257, 2a edição, Cambridge, Cambridge University Press, 1993.

LIANG, S.X. Grinding of ceramics: mechanisms, forces and coolant evaluation. 1992. 113 f. Dissertação (Mestrado) – University of Connecticut, Estados Unidos, 1992.

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

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

MALKIN, S. Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage, In: MALKIN, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, 1a edição, Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MALKIN, S. in: Grinding Technology: Theory and applications of machining with abrasives, 2nd ed., Industrial Press Inc., 2008.

MALKIN, S.; HWANG, T.W. Grinding Mechanism for Ceramics. Annals CIRP, 45, p.569, 1996. 101

MAMALIS A. G.; KUNDRAK J., GYANI K.; HORVATH M.; On the Precision Grinding of Advanced Ceramics. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. (2002) 20:255–258

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. Handbook of Machining with Grinding Wheels 2.ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. Handbook of Ceramic Grinding and Polishing, New Jersey. Noyes Publications, Cap.2, 1998.

MARINESCU, I; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. in: Tribology of Abrasive Maching Process, NY, William Andrew Publishing, 2004.

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

MIKIJEJLJ, B.; ALLOR, R. Effects of machining on Si₃N₄ strength. American Ceramic Society Bulletin, v.82, n.4, p.57-60, 2003.

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.

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

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

OLIVEIRA, J. F. G. Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação. Tese (Doutorado) - USP, São Carlos, SP, Brasil, 272 p., 1988.

PEREIRA, C.; CORREA, S.J.; PIVATO, C. Como se apresentam e para que servem os lubrificantes e refrigerantes. Revista Máquinas e Metais, p.352-61, abril, 2005. 102

QUINN, G.D.; IVES, L.K.; JAHANMIR, S. Fractography reveals machining cracks. American Ceramic Society Bulletin, v.82, n.7, 2003.

RAMESH K.; YEO 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.

RICE, R.W. Mechanical properties of ceramics and composites. New York. Marcelo Dekker Inc., 2000.

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

SALES, W.F.; DINIZ, A.E.; MACHADO, A.R. Application of cutting fluids in machining processes. J. Braz. Soc. Mech. Sci., v.23, n.2, 2001.

SALMON, S. C. Modern Grinding Process Technology. MacGraw-Hill, 1992.

SHACKELFORD, J.F. Introduction to materials science for engineers. New Jersey. Prentice Hall, 1996.

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

SHEN, J. Y.; LUO, C. B.; ZENG, W. M.; GAO, Y. S.; MATER, J. Proc. Techn. 129 (2002) 176.

SHEN, B. Minimum Quantity Lubrication Grinding Using Nanofluids A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University Of Michigan 2008, Chapter 3, pg 33-34. 103

SHIH, ALBERT J. An experimental investigation of rotary diamond truing and dressing of vitreous bond wheels for ceramic grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, p.1755–1774, March 2000.

SOARES, D. D. e OLIVEIRA, J. F. G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. Revista Máquina & Metais, nº 436, p.140 – 157, Maio, 2002.

SUBHASH, G.; LOUKUS, J.E.; PANDIT, S.M. Application of data dependent systems approach for evaluation of fracture modes during a single-grit scratching. Mechanics of Materials, n.34, p.25-42, 2002.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI, M.H. Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 521–531.

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

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

WEBSTER, J.A.; CUI, C.; MINDEK, R.B. Grinding fluid application system design. Annals CIRP, 44, 1996.

WOBKER, H.G.; MARINESCU, I.; ROWE, B.; LING, Y. Abrasive

process. In: MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. Handbook of Ceramic Grinding and Polishing, New Jersey. Noyes Publications, Cap.3, 1998.

YIN, L.; HUANG, H.; RAMESH, K.; HUANG, T. High speed versus conventional grinding in high removal rate machining of alumina and alumina-titania. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, p.897-907, 2005.

YOSHIMURA, H.; ITOIGAWA, 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, v.48, pp. 723-729, 2005. 104

ZANOTTO, E.D.; MIGLIORE JR., A.R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Uma introdução. Cerâmica, v.37, n.247, p.7-16, 1991.

ZHANG, B.; ZHENG, X.L.; TOKURA, H.; YOSHIKAWA, M. Grinding induced damage in ceramics. Journal of Materials Processing Technology. , n.132, p.353-64, 2003.

ZHONG, Z.W. Ductile or partial ductile mode machining of brittle materials. Int. J. Adv. Manuf. Technol. , n.21, p.579-85, 2003.

ANEXOS

Anexo 1. Programa CNC para usinagem do corpo de prova

LINHA	FUNÇÃO	PROGRAMA	DESCRIÇÃO
000	X	500000	Coordenada inicial da máquina
001	G	0071	Avanço rápido
002	X	3482400	Coordenada de toque na peça, acrescida de 0.2mm
003	G	91	Programa incremental
005	G	61	Condição de trabalho para velocidades de avanço de 0,1 mm/min
006	M	01	Condição de parada
007	G	01.71	Aproximação lenta
017	F	00001	Taxa de alimentação do eixo
018	G	04.02.00	Normalização
019	X	-0.2000	
020	G	04.05.00	Tempo de "spark out"
021	X	-0.1000	Incremento (usinagem da peça)
022	G	04.05.00	Tempo de "spark out"
023	X	-0.1000	Incremento (usinagem da peça)
027	G	25	"Função looping"
028	N	020.023.42	
029	G	04.05.00	Tempo de "spark out"
030	X	2.0000	Incremento (saída da ferramenta)
031	M	02	Desliga a "peça"
032	M	30	Finalização do programa

Anexo 2. Programa CNC para usinagem do corpo de prova para medição de desgaste do rebolo

LINHA	FUNÇÃO	PROGRAMA	DESCRIÇÃO
033	X	550000	Coordenada inicial da máquina
034	G	00.71	Avanço rápido
035	X	348.6440	Coordenada de toque na peça, acrescida de 0.2mm
036	G	91	Programa incremental
037	G	61	Condição de trabalho para velocidades de avanço de 0,1 mm/min
038	M	01	Condição de parada
039	G	01.71	Aproximação lenta
040	F	00001	Taxa de alimentação do eixo
041	G	04.02.00	Tempo de “spark out”
042	X	-0.1000	Incremento (usinagem da peça)
043	G	25	“Função looping”
044	N	040.042.10	
045	G	04.08.00	Tempo de “spark out”
046	X	0.5000	Incremento (saída da ferramenta)
047	M	02	Desliga a “peça”
048	M	30	Finalização do programa