



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus Bauru



**ESTUDO EXPERIMENTAL DO USO DE REBOLOS
CONVENCIONAIS NA USINAGEM DO AÇO VP-50 UTILIZADO
NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA, POR MEIO DE DIFERENTES
MÉTODOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO**

MARCO ANTÔNIO DOS ANJOS

**Bauru, SP
2015**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO USO DE REBOLOS
CONVENCIONAIS NA USINAGEM DO AÇO VP-50 UTILIZADO
NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA, ATRAVÉS DE DIFERENTES
MÉTODOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO**

MARCO ANTÔNIO DOS ANJOS

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP – Câmpus de Bauru,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Co-orientador: Prof. Dr. Thiago Valle França

**Bauru – SP
2015**

Anjos, Marco Antônio.

Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, através de diferentes métodos de lubri-refrigeração./ Marco Antônio dos Anjos, 2015. 117 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Co-orientador: Thiago Valle França

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015.

1. Retificação. 2. Rebolo. 3. Aço VP-50. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCO ANTONIO DOS ANJOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 29 dias do mês de junho do ano de 2015, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação, da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Profa. Dra. KATIA CRISTIANE GANDOLPHO CANDIOTO do(a) Engenharia Mecânica/EEL/USP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCO ANTONIO DOS ANJOS, intitulado "ESTUDO EXPERIMENTAL DO USO DE REBOLOS CONVENCIONAIS NA USINAGEM DO AÇO VP50 UTILIZADO NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA, ATRAVÉS DE DIFERENTES MÉTODOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN
Profa. Dra. KATIA CRISTIANE GANDOLPHO CANDIOTO

Dedico esta conquista ao meu pai José dos Anjos (*in memoriam*), minha esposa Sônia Alves dos Anjos e meus filhos Robert Willan dos Anjos e Dyanni Cristina dos Anjos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos que me proporcionou ao longo de toda minha vida, e por me guiar dando força, saúde e disposição para que eu pudesse concluir este trabalho.

À minha amada esposa Sônia, pela compreensão e apoio incondicional em todas as horas.

Aos meus filhos Robert e Dyanni que são a razão da minha luta e dedicação em tudo que faço.

Aos meus pais José dos Anjos (*in memoriam*) e Ana Maria Souza dos Anjos pelos ensinamentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo auxílio, ajuda e confiança, desde o início deste trabalho. Expresso minha total gratidão e apreço não somente aos conhecimentos compartilhados, mas também pelo profissionalismo e exemplo de ser humano.

À Universidade Estadual Paulista pelos recursos disponibilizados e por acreditar e se preocupar com a educação dos alunos, e pela oportunidade que me foi dada.

Aos alunos de graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, Ighor Costa Barili, Derik Rios Umberto e Raul Ramos Figueiredo pelo grande apoio e desempenho.

Aos Professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru, agradeço todo o suporte que me foi dado.

À Empresa ABRASIPA pelo fornecimento dos rebolos e em especial ao Engº Écio Luiz Sais pelo grande apoio técnico.

À ITW pela doação dos fluidos de MQL.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

Há homens que lutam um dia e são bons, há outros que lutam um ano e são melhores, há os que lutam muitos anos e são muito bons, mas há os que lutam toda a vida e estes são imprescindíveis. **(Bertolt Brecht)**

RESUMO

A retificação é um processo de usinagem preciso, sendo uma das etapas mais caras na fabricação dos moldes para injeção de termoplásticos. Na retificação o rebolo é a ferramenta abrasiva responsável pela retirada do material. O conhecimento das suas características técnicas, vantagens, defeitos e condições de trabalho são fundamentais para os Engenheiros de produto, de processos e, naturalmente, para os gerentes de área industrial, identificarem qual o rebolo mais indicado para realização do processo de retificação. Dentre os aços utilizados na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos destaca-se o aço VP-50, o qual foi o aço usado neste experimento sendo usinado pelo processo de retificação cilíndrica. No processo de retificação também foi adotado para fins de experimento dois métodos de lubri-refrigeração sendo eles o método convencional com lubri-refrigeração abundante e o MQL que é a técnica com mínima quantidade de lubri-refrigeração. O objetivo deste trabalho foi analisar de forma comparativa o desempenho de corte, executado com três tipos de rebolos convencionais: rebolo de óxido de alumínio branco, rebolo de carbureto de silício verde e rebolo de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco. Os resultados foram analisados e comparados pelas variáveis de saída, tais como comportamento da força tangencial de corte, rugosidade, emissão acústica, relação G (volume de material removido/volume de material desgastado), microscopia óptica (para verificar se houve dano térmico) e micro dureza. Observando-se os níveis aceitáveis de rugosidade característicos do processo, também foi possível observar que o rebolo de carbeto de silício verde apresentou melhor resistência ao desgaste em relação aos outros rebolos. O rebolo de carbureto de silício preto obteve os menores valores de variação da circularidade. Após a análise metalográfica dos corpos de prova verificou-se que houve uma pequena formação de novos elementos de liga na superfície retificada, que corroboram para um leve aumento da dureza do material.

Palavras-chaves: *retificação cilíndrica; rebolo de óxido de alumínio branco; rebolo de carbureto de silício verde; rebolo de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco; aço VP-50.*

ABSTRACT

Grinding is an accurate machining process, one of the most expensive steps in the manufacture of molds for thermoplastic injection. The grinding wheel abrasive tool is responsible for removal. The knowledge of their technical characteristics, advantages, defects and working conditions are essential for product engineers, process and, of course, to the industrial area managers, which identify the most appropriate wheel to perform the grinding process. Among the steels used in the manufacture of molds for thermoplastic injection highlight the VP-50 steel, which was the steel used in this experiment being machined by the cylindrical grinding process. In the grinding process was also adopted for the purpose of experiment two methods of lubrication and cooling them with the conventional method with plenty of lubrication and cooling, and the MQL is the technique with minimal amount of lubrication and cooling. The objective of this study was to analyze comparatively cutting performance, performed with three types of conventional grinding wheels: grinding wheel white aluminum oxide, green silicon carbide grinding wheel and grinding of black silicon carbide with white aluminum oxide. Results were analyzed and compared by the output variables such as behavior of the tangential cutting force, surface roughness, acoustic emission, G ratio (volume of material removed / volume of material removed), optical microscopy (to check if there thermal damage), and micro hardness. Observing acceptable levels of roughness characteristic of the process, it was also observed that the grinding green silicon carbide had the best wear resistance in relation to the other wheels. The grinding wheel of black silicon carbide obtained the lowest range of values of circularity. After metallographic examination of the specimens was found that there was little formation of new alloying elements in the ground surface, to confirm that a slight increase in hardness of the material.

Keywords: *cylindrical grinding; grinding wheel white aluminum oxide; grinding wheel Green silicon carbide; grinding of black silicon carbide with white aluminum oxide; VP-50 steel.*

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS.....	16
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVO	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. O processo de retificação.....	22
3.2. A retificação cilíndrica externa de mergulho	23
3.2.1. O ciclo de retificação cilíndrica externa	24
3.3. Parâmetros envolvidos no processo.....	26
3.3.1. Comprimento de contato (l_c).....	26
3.3.2. Profundidade de corte (a)	28
3.3.3. Velocidade de Corte (v_s).....	29
3.3.4. Velocidade da Peça (v_w)	30
3.3.5. Velocidade de mergulho (v_f)	31
3.3.6. Taxa de remoção de material.....	31
3.3.7. Espessura equivalente de corte (h_{eq}).....	32
3.4. Forças de corte no processo de retificação	32
3.5. Mecanismo de formação do cavaco	34
3.6. Potência na retificação	36
3.7. O rebolo	36
3.7.1. Nomenclatura dos rebolos	38
3.7.2. Dureza do rebolo	40
3.7.3. Estrutura do rebolo	41
3.7.4. Grãos abrasivos	42
3.7.5. Descrição dos grãos abrasivos comumente utilizados.....	43
Salmon (1992) ainda relata que o SiC é usado para a usinagem de carbetos de tungstênio, ferro fundido, mármore e cerâmicas, alumínio, titânio, latão e cobre. É um abrasivo bastante duro e tem uma forma agressiva que ajuda na penetração em superfícies de certos materiais macios como os aços de baixa resistência à tração, alumínio, ligas de cobre, plásticos, borracha, entre outros. Além disso, seu coeficiente de expansão térmica é bastante pequeno (Marinescu et al., 2004).....	46
granito, concreto, cerâmicas e cermet.	47
3.8. Processo de dressagem dos rebolos convencionais	47
3.8.1. Dressador do tipo conglomerado	51
3.9. Fluidos de corte no processo de retificação.....	51
3.9.1. Classificação dos fluidos de corte	52

3.9.1.1.	Gases	52
3.9.1.2.	Fluidos não solúveis em água	53
3.9.1.2.1.	Óleos de Corte	53
3.9.1.3.	Fluidos à base de Água	54
3.9.1.3.1.	Emulsões	55
3.9.1.3.2.	Fluidos Sintéticos	56
3.9.1.3.3.	Fluidos Semi-Sintéticos	56
3.9.2.	Custos dos fluidos de corte no processo	57
3.9.3.	Manutenção e descarte	58
3.9.4.	Problemas causados pelo uso de fluidos de corte	58
3.10.	Formas alternativas de lubri-refrigeração no processo de retificação	59
3.10.1.	Usinagem a seco	59
3.10.2.	A técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL)	60
3.10.2.1.	Aplicabilidade do MQL na retificação e suas vantagens	62
3.10.2.2.	Desvantagens no uso do MQL	63
3.11.	Aço VP50	64
3.12.	As variáveis do processo de retificação cilíndrica externa	66
3.12.1.	Relação G	66
3.12.2.	Emissão Acústica	67
3.12.3.	Análise da Microestrutura – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	68
3.12.4.	Rugosidade	69
3.12.5.	Circularidade	70
3.12.6.	Forças de Corte no Processo de Retificação	71
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	73
4.1.	MATERIAIS	73
4.1.1.	Retificadora Cilíndrica externa	73
4.1.2.	Mandril utilizado na fixação da peça	73
4.1.3.	Corpo de prova	74
4.1.4.	Descrições dos rebolos utilizados	76
4.1.4.1.	Rebolo de carbeto de silício preto com óxido de alumínio branco	76
4.1.4.2.	Rebolo de carbeto de silício verde (SiC)	76
4.1.4.3.	Rebolo de óxido de alumínio branco	77
4.1.5.	Dressador	78
4.1.6.	Sistema de refrigeração convencional	78
4.1.7.	O sistema de MQL	79
4.2.	MÉTODOS	81
4.2.1.	Planejamento dos ensaios	81
4.2.2.	Aquisição de Dados	83
4.2.3.	Força tangencial de corte	85
4.2.4.	Emissão acústica	86
4.2.5.	Circularidade	86
4.2.6.	Rugosidade	87
4.2.7.	Desgaste diametral do rebolo	87
4.2.8.	Microdureza	88
4.2.9.	Microscopia óptica	88
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1.	Rugosidade	89
5.2.	Circularidade	90

5.3.	Desgaste diametral do rebolo	92
5.4.	Potência de corte na retificação	94
5.5.	Emissão acústica.....	95
5.6.	Análise metalográfica	97
5.7.	Microdureza.....	101
6.	CONCLUSÕES.....	104
6.1.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	105
7.	BIBLIOGRAFIA	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos das quatro formas básicas de retificação (MARINESCU, et al, 2007 – modificado).....	23
Figura 2: Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (Malkin 1989, modificado).....	24
Figura 3: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (Soares & Oliveira, 2002).....	25
Figura 4: Influência da velocidade de corte sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho (König, 1980).	30
Figura 5: Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho MALKIN, 2008 - modificado).....	33
Figura 6: Formação do cavaco por um grão abrasivo (König,1980).....	35
Figura 7: Principais constituintes do rebolo (adaptado de Machado <i>et al.</i> , 2012). ...	37
Figura 8: Especificação do rebolo (Marinescu, 2004).....	39
Figura 9: Sonda para teste da dureza do rebolo (KLOCKE & MERBECKS, 2001- modificado).....	41
Figura 10: Relação entre a energia específica e o desgaste radial do rebolo, (Azizi et al., 2009).	48
Figura 11: Esquematização da operação de dressagem (Hassui & Diniz, 2003 adaptada).....	50
Figura 12: Classificação dos fluidos solúveis em água (EL BARADIE, 1996).....	54
Figura 13: Classificação dos fluidos solúveis em água (EL BARADIE, 1996).....	55
Figura 14: Custos com fluído de corte (Young et. Al., 1997).	57
Figura 15: Modelo esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação por pressão (Obikawa, 2006).	61
Figura 16: Peça com erro de circularidade (Taylor-Hobson, 2000).	70
Figura 17: Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica - RUAP 515 H	73
Figura 18: Desenho esquemático do mandril	74
Figura 19: Ilustração do formato do corpo de prova usado	75
Figura 20: Ilustração do tarugo utilizado para impressão do rebolo	75
Figura 21: Dressador do tipo conglomerado	78
Figura 22: Mangueiras utilizadas na aplicação convencional do fluido de corte	79
Figura 23: Unidade de controle do MQL	80
Figura 24: Duas vistas do bocal para experimentação com MQL.....	80
Figura 25: Sistema de ar comprimido para o MQL.....	81
Figura 26: Matriz de realização dos ensaios.....	82
Figura 27: Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados.....	84
Figura 28: Esquematização da obtenção da força tangencial de corte.	85
Figura 29: Sensor para captação da emissão acústica	86
Figura 30: Medidor de circularidade utilizado	87
Figura 31: Exemplo de operação de medição da rugosidade	87
Figura 32: Comparação das medições de rugosidade.....	89
Figura 33: Comparação das medições de circularidade	91

Figura 34: Comparação das medições de desgaste diametral.....	92
Figura 35: Resultados de potência de corte pela espessura equivalente.....	94
Figura 36: Comparação da emissão acústica.....	96
Figura 37: Fotografia da estrutura na região central sem retificação.	97
Figura 38: Micrografia dos ensaios com $v_f = 0,25\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL	98
Figura 39: Micrografia dos ensaios com $v_f = 0,50\text{mm/min}$, ampliada (a) Convencional, (b) MQL	98
Figura 40: Micrografia dos ensaios com $v_f = 0,75\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL	98
Figura 41: Destaque de inclusões na superfície da amostra	99
Figura 42: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,25\text{mm/min}$, ampliada (a) Convencional, (b) MQL	99
Figura 43: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,50\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL	100
Figura 44: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,75\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL	100
Figura 45: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,25\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL	101
Figura 46: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,75\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL	101
Figura 47: Resultado das medições de microdureza para todos os ensaios retificados com o rebolo convencional de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco	102
Figura 48: Resultado das medições de microdureza para todos os ensaios retificados com o rebolo de óxido de alumínio branco	102
Figura 49: Resultado das medições de microdureza para todos os ensaios retificados com o rebolo de carbeto de silício verde	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Esquema para marcação e identificação de ferramentas abrasivas (ABNT NBR 15230:2008).....	38
Tabela 2: Caracterização dos principais tipos de fluídos (Webster, 1995)	52
Tabela 3: Caracterização do aço VP-50 - adaptado (VILLARES METALS, 2004)	65
Tabela 4: Características dos rebolos utilizados.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CBN – nitreto cúbico de boro

CNC - comando numérico computadorizado

IFSC – Instituto de Física de São Carlos

ISO - International Organization for Standardization

MEV - microscópio eletrônico de varredura

MQL – mínima quantidade de lubrificação

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

- a – profundidade de corte (μm)
- ad - profundidade de dressagem (μm)
- Al_2O_3 - óxido de alumínio
- b - largura média no topo dos grãos abrasivos (mm)
- c - comprimento da trinca crítica (μm)
- h_{max} – 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)
- HR_c – dureza Rockwell C
- l_c – comprimento de contato (mm)
- l – espaçamento entre grãos abrasivos (μm)
- n_s – rotação do rebolo (rpm)
- n_w – rotação da peça (rpm)
- 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

SiO_2 – óxido de silício

t – tempo de retificação (s)

v_f – velocidade de mergulho ou avanço (m/s)

v_s – velocidade de corte (m/s)

v_w – velocidade da peça (m/s)

z_s – volume de rebolo gasto (mm^3)

z_w – volume de material removido (mm^3)

δ - desgaste radial do rebolo (mm)

σ – tensão de ruptura (MPa)

1. INTRODUÇÃO

A retificação é, provavelmente, um dos mais antigos processos de manufatura, e mesmo assim ainda hoje ela persiste como um moderno componente do sistema de produção quando é necessária precisão dimensional e geométrica associada a um excelente acabamento superficial. É caracterizado pelo fato de ser um processo final com baixa taxa de remoção de material, o que a possibilita produzir componentes com grande precisão e qualidade superficial (NGUYEN & BUTLER, 2005).

O processo de retificação é principalmente utilizado para produzir peças de alta qualidade, com grande exatidão, e diminuir tolerâncias. (MARINESCU *et al.*, 2007). É amplamente aplicada para se alcançar alta precisão e alta qualidade mecânica, elétrica e visual. (GAO *et al.*, 2007).

A ferramenta de corte utilizada no processo é o rebolo composto de vários grãos, é uma ferramenta multicortante de geometria não definida. Devido a essa característica técnica, a retificação comparada aos outros processos de usinagem envolve uma grande quantidade de energia e parte dessa energia é transformada em calor na zona de corte (TAWALOKI *et al.*, 2009), o que é prejudicial à peça final. Na retificação o rebolo é a ferramenta abrasiva responsável pela retirada do material, os inúmeros e pequenos grãos abrasivos são responsáveis por retirar uma quantidade minúscula de material da peça possibilitando a obtenção de tolerâncias bastante apertadas. O número de tipos de abrasivos e granulometrias disponíveis são bastante grandes e junto com a quantidade de ligantes possíveis, estruturas e durezas além dos formatos fazem com que cheguemos a uma enorme variedade de produtos. O conhecimento das suas características técnicas, vantagens, defeitos e condições de trabalho são fundamentais para os Engenheiros de produto, de processos e, naturalmente, para os gerentes de área industrial, identificarem qual o rebolo mais indicado para realização do processo de retificação. Com tantas características que podem variar, a correta especificação de um rebolo resulta em uma grande gama de opções no momento da escolha do rebolo mais indicado para uma determinada operação, entretanto são poucas as informações que temos sobre os resultados que podem ser obtidos após o processo de retificação dos aços para moldes de injeção de termoplásticos.

Então, é necessário analisar e comparar resultados obtidos, pelas variáveis de saída, tais como comportamento da força tangencial de corte, rugosidade, emissão acústica, relação G (volume de material removido/volume de material desgastado), microscopia óptica (para verificar se houve dano térmico) e micro dureza. O aço utilizado para análise e obtenção dos resultados foi o aço VP-50.

O aço VP-50 foi desenvolvido pela VILLARES METALS especialmente para fabricação de matrizes para extrusão de termoplásticos e moldes para injeção de termoplásticos. É um aço endurecível por precipitação, sua usinabilidade elevada permite o fornecimento no estado solubilizado para posterior envelhecimento, ou solubilizado e envelhecido, dispensando o tratamento térmico final (VILLARES METALS, 2004).

Na fabricação de moldes e matrizes para injeção de termoplásticos os custos de fabricação são muito elevados, a fração maior destes custos esta nas etapas de usinagem e acabamento por se tratarem de etapas críticas do processo. Por isso é importante a apresentação de dados sobre a usinagem do aço VP-50. Na fase de acabamento, o processo de retificação torna-se a etapa mais cara da usinagem da ferramenta, onde erros não são admissíveis. A escolha do rebolo correto é uma das variáveis que podem garantir o sucesso de todo o processo de fabricação da ferramenta.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo analisar de forma comparativa o desempenho de corte dos rebolos de óxido de alumínio (Al_2O_3), carbureto de silício verde (SiC) e carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco no processo de retificação do aço VP50. O desempenho dos rebolos será avaliado durante o processo de retificação, utilizando-se dois métodos de lubri-refrigeração, o método convencional (refrigeração abundante) e o MQL. As variáveis de saída que serão analisadas para análise comparativa dos rebolos serão a rugosidade, o desgaste diametral do rebolo, relação G, emissão acústica e análise de microscopia ótica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica descrita a seguir apresenta os principais conceitos relativos ao tema que será desenvolvido: processo de retificação e os parâmetros envolvidos, características e estruturas dos rebolos de óxido de alumínio, carbureto de silício verde e carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco, a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), a aplicação de fluido de corte, as variáveis de saída no processo de retificação cilíndrica em aço endurecido.

3.1. O processo de retificação

A retificação faz parte do processo de usinagem por abrasão. A usinagem por abrasão é um nome genérico dado ao processo de remoção de material, tanto metal quanto não metal, de pequenas partículas produzidas pelas arestas de cortes de materiais abrasivos (SALMON, 1992).

Segundo Malkin (2008), o processo de retificação provavelmente seja o processo de modelagem de materiais mais antigo que exista, datando de períodos pré-históricos, onde o homem descobriu como afiar suas ferramentas ao atritá-las em grãos de pedras.

Marinescu (*et al*, 2007) define retificação como um processo de usinagem que utiliza um reboło formado por grãos abrasivos rotacionando numa alta velocidade para a remoção de material.

A retificação é tradicionalmente o processo de usinagem final numa produção, usado para melhorar superfícies de acabamento e tolerâncias mais finas (MALKIN 2008).

Diferente de outros processos de usinagem, como torneamento e fresamento, que apresentam ferramentas de corte definidas, a retificação utiliza-se de ferramentas de corte não definida, ou seja, os grãos abrasivos apresentam arestas de cortes não definidas (REN, *et al*, 2009).

No processo de retificação podemos observar que as operações podem ser agrupadas de acordo com a superfície a ser usinada e com o movimento relativo entre peça e reboło.

Existem quatro operações básicas na retificação, conforme pode ser visualizado na figura 1.

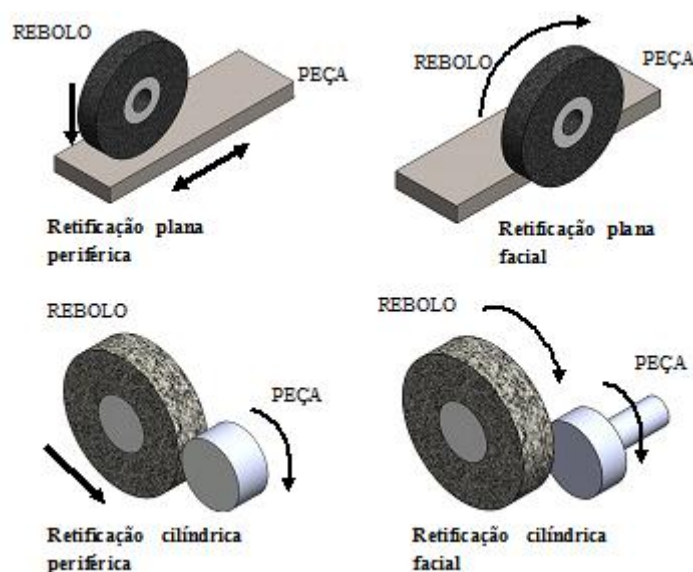


Figura 1: Exemplos das quatro formas básicas de retificação (MARINESCU, et al, 2007 – modificado).

É neste processo que serão corrigidos eventuais problemas surgidos em processos anteriores. A retificação é tipicamente um processo de acabamento onde a qualidade é importante e erros custam caro (ANDERSON *et al.*, 2008).

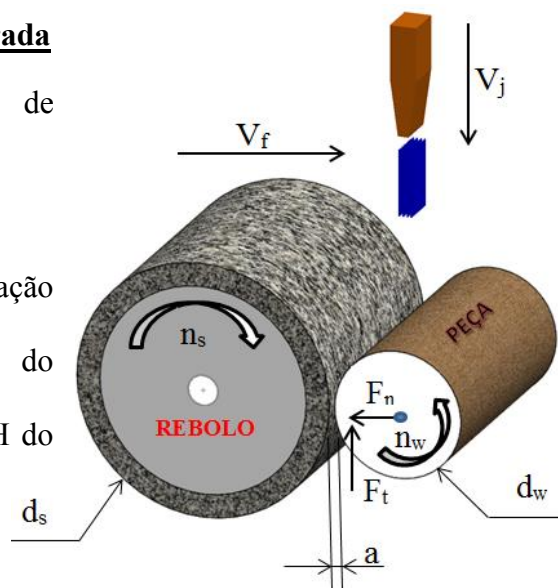
Segundo Nguyen & Butler (2005), apesar de a retificação ter sido um tópico de extensa pesquisa pelos últimos 20 anos, o completo entendimento desta ainda tem que ser alcançado. Isso ocorre, particularmente, pelo fato de que a retificação é um processo estocástico, no qual um grande número de grãos abrasivos de geometria não definida está aleatoriamente atuando na superfície de corte do rebolo (ferramenta de corte utilizada no processo de retificação). A textura final da superfície usinada pode ser considerada como um resultado da somatória da ação individual de cada grão. De fato, a natureza de interação grão/peça é muito complexa e depende de vários fatores que envolvem o rebolo, a peça, a máquina-ferramenta e parâmetros do processo.

3.2. A retificação cilíndrica externa de mergulho

A retificação cilíndrica externa de mergulho é apresentada na figura 2.

Parâmetros de entrada

- Condições de usinagem;
- Material da peça;
- Tipo do rebolo;
- Tipo do fluido;
- Condições de afiação do rebolo;
- Pressão e vazão do fluido de corte;
- Concentração e pH do fluido.

**Variáveis de saída**

- Força de corte;
- Rugosidade;
- Desgaste diametral do rebolo;
- Emissão acústica;
- Tensão residual;
- Energia específica;
- Circularidade.

Figura 2: Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (Malkin 1989, modificado).

Onde:

- n_s é a velocidade tangencial do rebolo ou de corte;
- d_s é o diâmetro do rebolo;
- d_w é o diâmetro da peça;
- a é a profundidade de corte;
- n_w é a velocidade tangencial da peça;
- V_f é a velocidade de avanço do rebolo.
- V_j é a velocidade de jato do fluido.

3.2.1. O ciclo de retificação cilíndrica externa

Segundo Diniz *et al.* (2003), quando o rebolo toca a peça e começa seu avanço radial, o conjunto peça mais rebolo se deforma elasticamente, fazendo com que o avanço por volta não seja o real. Com isso, a posição real do rebolo fica atrasada em relação à teórica. Depois de algumas voltas, o avanço real se iguala ao avanço comandado, mas a diferença entre a profundidade de corte real e teórica continua.

Então, para garantir a dimensão desejada da peça, é necessário que, ao fim do corte, o rebolo pare seu movimento de avanço radial por alguns instantes até que o eixo porta-rebolo e a peça se recuperem da deformação (tempo de *spark-out*).

Soares & Oliveira (2002) demonstram, na figura 3, o ciclo de retificação e o detalhamento de cada tempo.

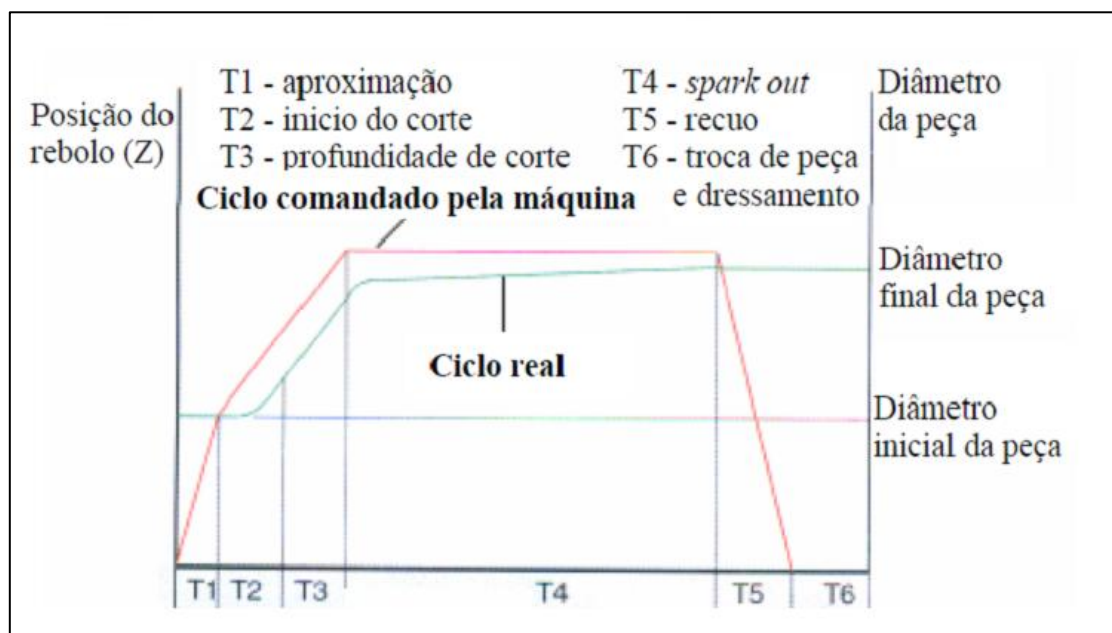


Figura 3: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (Soares & Oliveira, 2002).

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

- T1: corresponde ao deslocamento da ferramenta em relação à peça, sem a ocorrência de remoção de material;
- T2: neste instante se dá o contato entre o rebolo e a peça, proporcionando deformações elásticas em ambos e também na máquina. Estas deformações são responsáveis pelo atraso entre a posição real do rebolo e a posição indicada pelo comando da máquina. No momento do contato observam-se aumentos momentâneos da potência consumida pelo motor da máquina e também dos índices de emissão acústica;
- T3: atinge-se a profundidade total de corte estabelecida para um ciclo de retificação;

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

Se fizermos a soma de todos os tempos apresentados no gráfico, teremos o tempo total do processo de retificação, parâmetro importante na produção de grandes lotes.

3.3. Parâmetros envolvidos no processo

Para um maior entendimento do processo, foram criados parâmetros. Dessa forma, tais parâmetros estão em função, muitas vezes, da geometria da retificação, ou seja, plana ou cilíndrica. Nesse tópico serão apresentados e descritos os parâmetros do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

3.3.1. Comprimento de contato (l_c)

Define a extensão de contato entre a peça e o rebolo. Pode ser calculado considerando apenas a geometria dos elementos em contato. Marinescu *et al.* (2004) equacionam o comprimento de contato conforme a equação (1):

$$l_c = \sqrt{ad_s} \quad (1)$$

Onde:

l_c = comprimento de contato;

a = profundidade de corte;

d_s = diâmetro do rebolo.

Segundo Malkin (1989), a equação (1) não considera os movimentos e deformações envolvidas e por isso ela descreve uma aparente área de contato entre a peça e o rebolo e, com isso, esse parâmetro pode ser descrito como *comprimento de contato estático*.

King & Hahn (1992) afirmam que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato. Além do mais, a diferença de curvatura entre a retificação cilíndrica externa e interna pode ser relacionada, segundo Guo & Malkin (2000), com a retificação plana através do diâmetro equivalente (d_e), conforme a equação (2):

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \left(\frac{d_s}{d_w} \right)} \quad (2)$$

Onde:

d_e = diâmetro equivalente;

d_s = diâmetro do rebolo;

d_w = diâmetro da peça.

Malkin (1989) ainda relata que, para a equação (2), adota-se o sinal negativo quando se trata da retificação cilíndrica interna e o sinal positivo referindo-se à externa. Para a plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito e, então, $d_e = d_s$. Além do mais, ainda segundo esse autor, a curvatura oposta do rebolo e da peça diminui l_c na retificação cilíndrica externa e, na interna, aumenta.

Para certo esforço no sentido radial do rebolo, tem-se uma pressão específica de corte que é função inversa do comprimento de contato entre a peça e o rebolo. A pressão rebolo-peça é repartida sobre os grãos abrasivos de forma que, quanto maior l_c , menor o esforço e pressão em cada grão e isso faz com que o rebolo pareça mais duro. Dessa forma, aumentando-se o parâmetro l_c , a área de contato é maior e maiores devem ser os grãos e mais macio e poroso o rebolo. (Diniz *et al.*, 2003).

Anderson *et al.* (2008) afirmam que a remoção de cavaco e a subsequente geração de calor ocorre ao longo do comprimento de contato.

3.3.2. Profundidade de corte (a)

Segundo Malkin (1989), a é a profundidade que o rebolo entra na peça com uma velocidade v_f durante uma revolução completa da mesma. A profundidade de corte é definida pela equação (3).

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (3)$$

Onde:

a = profundidade de corte;

d_w = diâmetro da peça;

v_f = velocidade de mergulho;

v_w = velocidade da peça.

Marinescu *et al.* (2004) relatam que a peça, o rebolo e a estrutura da máquina defletem quando se estabelece o contato entre o rebolo e a peça. Dessa forma, o real valor do parâmetro a é menor do que o calculado baseado na taxa de avanço v_f . Isso ocorre devido às deflexões mecânicas, térmicas e desgaste do rebolo. Entretanto, depois de certo tempo de avanço, as deflexões se estabilizam e se tornam constantes. Se a taxa de desgaste do rebolo é desconsiderada, usa-se a equação (3). No entanto, no caso da retificação de material muito duro, onde a taxa de desgaste do rebolo é mais rápida, o parâmetro a será dado conforme a equação (4), com G denominada relação “G” que designa o volume de material removido por volume de rebolo gasto.

$$a = \frac{\pi \cdot d_w}{1 + (1/G) \cdot (d_w / d_s)} (v_f / v_w) \quad (4)$$

Onde:

a = profundidade de corte;

d_w = diâmetro da peça;

G = relação entre volume de material removido e volume de rebolo gasto;

d_s = diâmetro do rebolo;

v_f = velocidade de mergulho;

v_w = velocidade da peça.

A profundidade de corte está amplamente relacionada com o parâmetro espessura equivalente de corte, onde aumentando a , ocorre aumento dessa espessura e, com isso, maiores esforços de corte, desgaste do rebolo e elevada rugosidade (Diniz *et al.*, 2003).

3.3.3. Velocidade de Corte (v_s)

Hwang *et al.* (2000) relatam que um aumento na velocidade do rebolo diminui a severidade do processo de corte pela redução da profundidade de corte. Isso faz com que a força diminua. Jackson *et al.* (2001) dizem que um aumento na velocidade do rebolo, melhora a qualidade final da peça, diminuindo o desgaste da ferramenta abrasiva também. Entretanto, isso causa aumento do calor gerado e da potência, pois $P = F_t \cdot v_s$, onde P é a potência e F_t a força tangencial. Com isso, em altas velocidades, costuma-se usar rebolos de ligante metálico ou eletro-depositado.

Segundo Ramesh *et al.* (2001), a retificação de alta eficiência requer grande diâmetro do rebolo ou alta velocidade do mesmo. O diâmetro grande implica em uma máquina muito robusta, enquanto alterando apenas a velocidade, a máquina pode ser menor.

Graf (2004) define essa velocidade como a equação (5), onde n_s é a rotação do rebolo:

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (5)$$

Onde:

v_s = velocidade de corte;

d_s = diâmetro do rebolo;

n_s = rotação do rebolo.

König (1980), por sua vez, sintetiza a influência do parâmetro velocidade de corte no processo de retificação como um todo, conforme a figura 4.

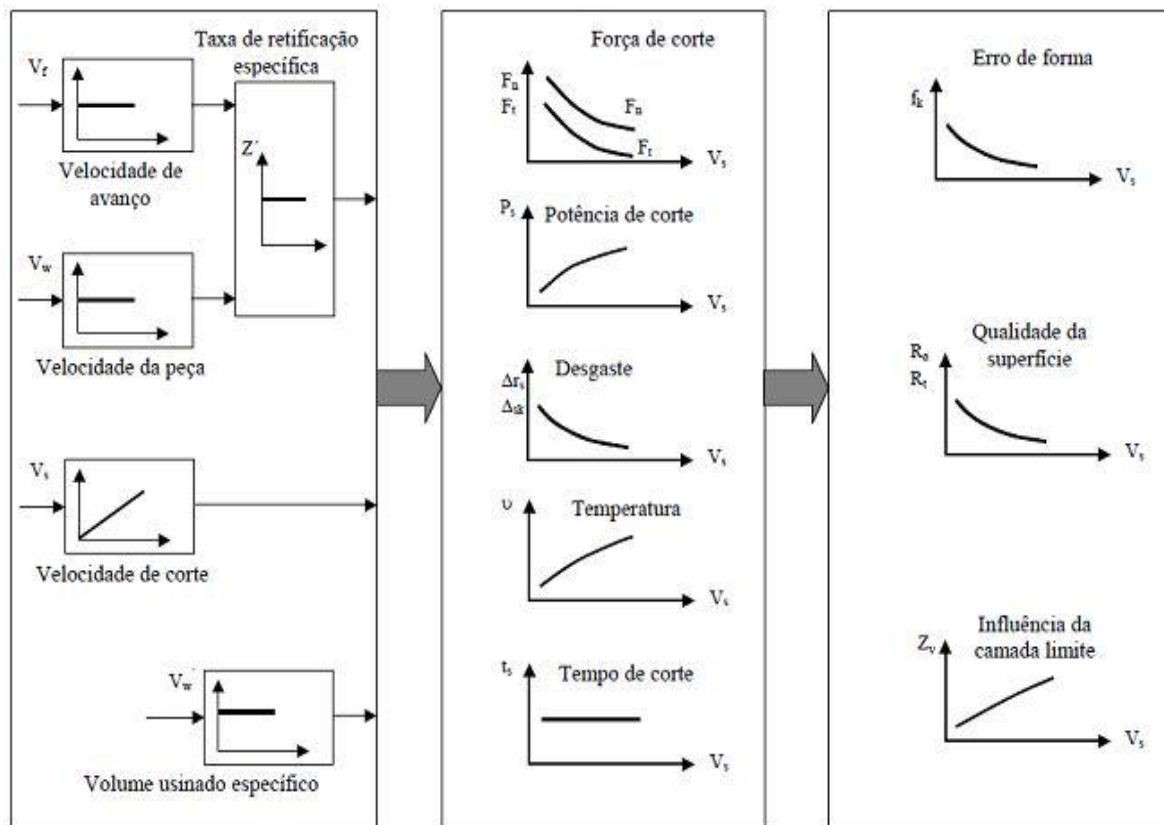


Figura 4: Influência da velocidade de corte sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho (König, 1980).

Velocidades de corte mais elevadas, em virtude da redução da espessura do cavaco não-deformado, proporcionam um desgaste radial e de quina reduzidos, porque o maior atrito e a frequência crescente de utilização dos gumes são compensados pela menor força de corte e pelo menor tempo de atuação dos gumes por corte (König, 1980).

3.3.4. Velocidade da Peça (v_w)

Essa velocidade é coincidente com a velocidade periférica da peça. De acordo com Graf (2004), a velocidade da peça v_w pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma, conforme equação (6). Ainda segundo esse autor, pode-se afirmar que o aumento da velocidade da peça acarreta em uma elevação da taxa de remoção de material, gerando cavacos mais grossos e maior carga sobre cada grão abrasivo do rebolo.

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (6)$$

Onde:

v_w = velocidade da peça;

d_w = diâmetro da peça;

n_w = rotação da peça.

3.3.5. Velocidade de mergulho (v_f)

A velocidade de mergulho v_f é definida como a velocidade de avanço do rebolo. Esta afeta o acabamento pretendido e também a força tangencial de corte, que se eleva com o aumento da mesma (Alves, 2005).

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

3.3.6. Taxa de remoção de material

De acordo com Malkin (1989), durante a retificação, a taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (v_w) e pela largura de retificação (b). Dessa forma, Demirci *et. al.* (2007) utilizam em seu trabalho a seguinte relação, segundo a equação (7), onde v_f é a velocidade de avanço e d_w é o diâmetro da peça:

$$Q_w = a \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b_w \quad (7)$$

Ainda segundo Malkin (1989), pode-se obter a taxa específica de remoção de material (Q'_w), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b) e, com base nesta taxa específica, pode-se avaliar a produtividade de um processo de retificação (Krueger *et al.*, 2000) :

$$Q'_w = a.v_w = \pi.d_w.v_f \quad (8)$$

Marinescu *et al.* (2004) ressaltam, como no caso da profundidade de corte para a retificação de material muito duro com desgaste rápido do rebolo, a taxa de remoção de material deve ser dada pela equação (9).

$$Q_w = \frac{b_w.\pi.d_w}{1 + (1/G)(d_w/d_s)} v_f \quad (9)$$

3.3.7. Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Segundo Peters e Decneut (1975) citado por Oliveira (1988), a espessura da camada de material removida pelo rebolo numa volta completa denomina-se de espessura equivalente de corte h_{eq} , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho, sendo ainda definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material Q'_w e a velocidade de corte.

De acordo com Graf (2010) a espessura equivalente de corte pode ser representada pela equação (10):

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi.d_w.v_f}{60.1000.v_s} \quad (10)$$

Apesar da espessura equivalente de corte não levar em consideração o espaçamento dos grãos do rebolo, pode ser considerado um dos melhores parâmetros de caracterização de um processo de retificação uma vez que engloba três importantes características do processo (v_s , v_f , d_w) (MARINESCU *et al.*, 2004).

Segundo Malkin (2008), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas tais como, além da força de corte, rugosidade, topografia da ferramenta, entre outras.

3.4. Forças de corte no processo de retificação

Os esforços de corte no processo de retificação são gerados entre a interação do abrasivo e a peça em forma de deformação plástica e elástica, pela formação do cavaco e pelo atrito entre abrasivo, ligante e peça (Ren *et al.*, 2009).

Segundo Li *et al.* (2002), a força na retificação é uma das mais importantes variáveis em avaliar o processo como um todo. Geralmente essa força é decomposta, como ilustrado na figura 5, em três componentes: normal (F_n), tangencial (F_t) e uma componente ao longo da direção de avanço longitudinal (axial - F_a), que não tem muita significância. A força tangencial afeta principalmente o consumo de energia e o tempo de vida de serviço do rebolo, o que acaba afetando também na temperatura e rugosidade superficial da peça trabalhada.

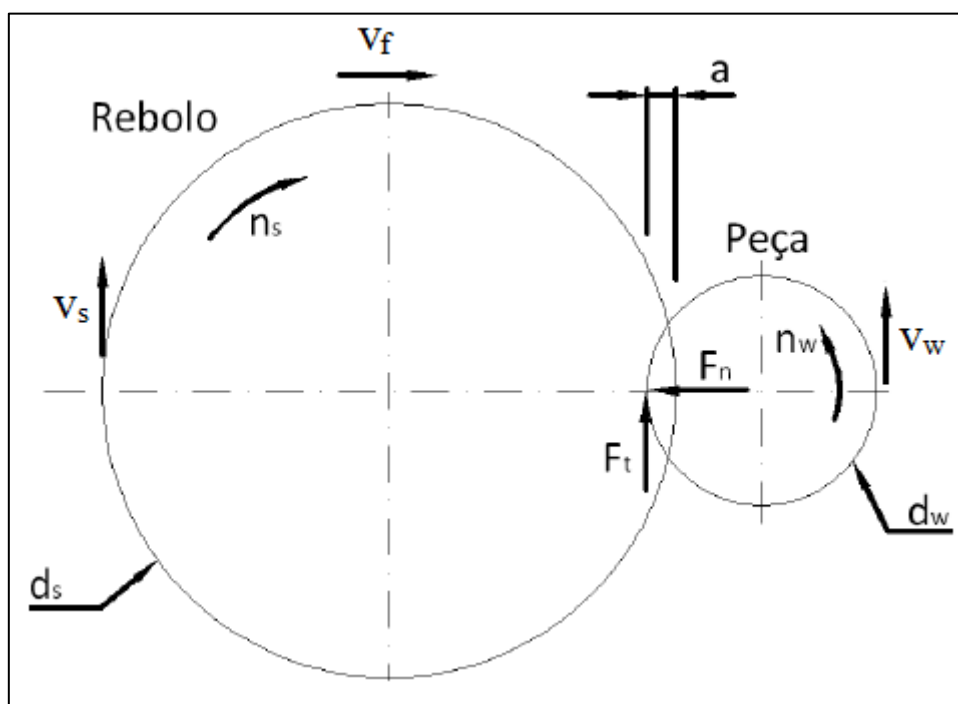


Figura 5: Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho MALKIN, 2008 - modificado)

Segundo Marinescu *et al.* (2004), a força normal atua perpendicularmente à superfície do rebolo e depende da dureza do grão abrasivo e do material a ser usinado. Esta é maior que a tangencial e age diretamente na redução da profundidade de corte, sendo também responsável por deflexões da peça, rebolo e estrutura da máquina. A componente axial só ganhará importância quando houver certo deslocamento lateral do rebolo.

Esses autores ainda demonstram uma equação para a mensuração da deflexão peça/rebolo/máquina, dada em função da força normal (F_n) e da rigidez total da máquina-peça-ferramenta (k_m).

$$\delta = \frac{F_n}{k_m} \quad (11)$$

A força tangencial de corte em um grão abrasivo é expressa pela equação (12):

$$F_t = b \times h_{\max} \times K_s + \mu \times b^2 \times \pi \times \frac{K_n}{4} \quad (12)$$

Onde: b (mm) = largura média no topo dos grãos abrasivos;

K_s (N/mm²) = pressão específica de corte;

μ = coeficiente de atrito entre grão e peça;

K_n (N/mm²) = tensão de escoamento do material.

Tawaloki *et al.* (2007) ainda relatam que as componentes da força são originadas por três fatores: deformação que dará origem à formação do cavaco; atrito entre os grãos e a peça, cavacos e ligante; pressão hidrostática entre a peça e o rebolo e também pelo impacto entre o fluxo de lubrificante e a peça, bem como com o rebolo. Além disso, aumentando a velocidade do rebolo, diminui a força devido à redução da espessura de cavaco. Com a taxa específica de remoção menor, reduz-se a espessura e comprimento do cavaco, implicando em menor atrito.

Saleh *et al.* (2009) explicam em seu trabalho que usar o monitoramento da força para detectar o desgaste do rebolo durante o processo de usinagem é um dos métodos mais simples e usados.

3.5. Mecanismo de formação do cavaco

Com base no trabalho de Nguyen & Butler (2005), dependendo das condições de retificação, somente um pequeno número de grãos abrasivos no rebolo irão entrar em contato com a superfície da peça. Entre esse número de grãos ativos, somente uma pequena parte irá cortar e produzir cavaco. Na retificação de materiais,

três fases distintas de interação do grão na peça são vistas: região elástica, plástica e de corte. Quando a profundidade de corte é muito pequena o grão irá deslizar na superfície, causando deformações elásticas com nenhum material removido (fase elástica). A fase plástica acontece quando ocorre deformação plástica na direção do escorregamento com o material sendo escoado e “quebrado”. Os modos de remoção dependem das propriedades mecânicas do material, lubrificação, entre outros.

Na retificação, o corte não é a única situação que produz forças no grão. Em adição, há a força de escorregamento do grão quando este e a peça se deformam elasticamente. Então, quando a tensão entre o grão e a peça aumenta muito, ocorre a deformação plástica e, assim, o escoamento do material. Se o material deformado na frente da aresta de corte entra em contato com esta, então há a formação do cavaco. Esses três estágios aumentam a força e energia no processo (Alfares & Elsharkawy, 2000).

Um entendimento dos mecanismos de remoção de material e da natureza dos problemas associados são pré-requisitos que podem ajudar no desenvolvimento do processo de retificação (Nguyen & Butler, 2005).

Conforme a figura 6, König (1980) descreve as três fases do mecanismo de remoção do material durante a retificação:

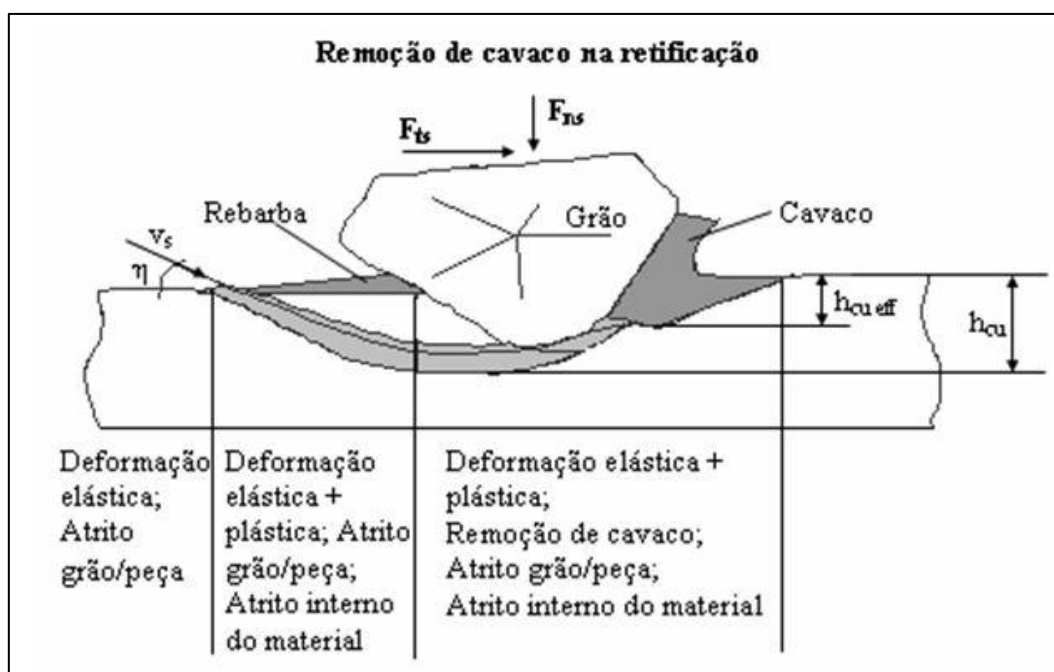


Figura 6: Formação do cavaco por um grão abrasivo (König,1980).

- *Região I* – onde ocorre apenas deformação elástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;

- *Região II* – onde ocorrem deformações elástica e plástica (sulcamento) e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- *Região III* – onde ocorrem deformações elástica e plástica, o atrito entre grão abrasivo e peça e o sulcamento associado à formação de cavacos.
- F_{ts} – força de corte;
- F_{ns} – força normal a F_{ts} ;
- $h_{cu\ eff}$ – espessura de corte efetiva;
- h_{cu} – espessura de usinagem.

3.6. Potência na retificação

Segundo Malkin (1989), a potência (P) de retificação é associada à velocidade de corte (V_s) e velocidade da peça (V_w), segundo a equação (13). Marinescu *et al.* (2004) ainda relatam que a força tangencial é a componente da força de retificação responsável pela dissipação de potência em situações de alta velocidade do rebolo.

$$P = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (13)$$

O sinal positivo indica que v_s e v_w têm direções opostas e o sinal negativo indica mesma direção. Entretanto, se v_s é muito maior que v_w , a equação da potência fica como na equação (14).

$$P = F_t \cdot v_s \quad (14)$$

Geralmente, a potência associada ao avanço e à velocidade transversal é desprezada.

3.7. O rebolo

O rebolo é a ferramenta de revolução utilizada nos processos de retificação. Possui grãos abrasivos ligados por um ligante que formam um corpo abrasivo. Esses grãos formam arestas de corte de geometria não definidas, os quais são responsáveis pela remoção do material no processo de retificação (MALKIN, 2008).

O rebolo pode ser considerado um sistema trifásico, sendo constituído por grãos abrasivos, aglomerantes e poros. Dessa forma, seu desempenho está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão abrasivo, as propriedades abrasivas do material e porosidade do conjunto (MALKIN, 2008).

A fabricação dos rebolos destinados à retificação apresentam diversos tipos de grãos, com diferentes tamanhos e combinados com vários tipos de ligantes com composições distintas (MALKIN, 2008).

Segundo Cai & Rowe (2004) *apud* Webster & Tricard (2007) o rebolo engloba quatro partes fundamentais, conforme a figura 7.

- Grãos: os grãos cristalinos abrasivos mais usuais são os de óxido de alumínio, de carbureto de silício, de nitreto de boro (borazon) ou de diamante;
- Ligantes: unem e suportam todos os abrasivos;
- Porosidade: acomodam os cavacos gerados, transportam os fluidos melhorando na refrigeração da peça e a troca de calor.
- Design: perfil de rebolo, camada de abrasivo, material do corpo, resistência à força rotacional, precisão e resistência ao ataque químico.

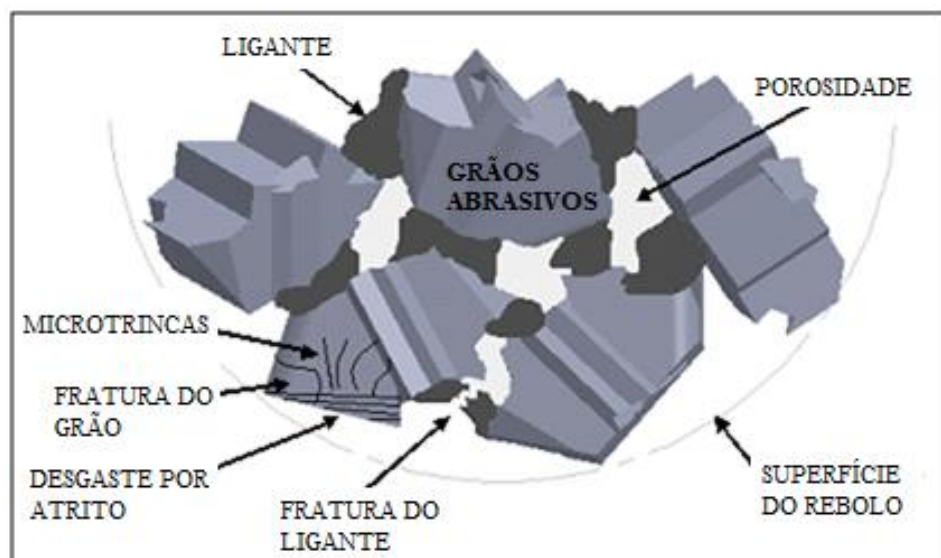


Figura 7: Principais constituintes do rebolo (adaptado de Machado *et al.*, 2012).

3.7.1. Nomenclatura dos rebolos

O formato dos rebolos, sua dureza, porosidade, ligante, tamanho e tipos dos grãos devem ser classificados e simbolizados conforme a norma técnica da ABNT NBR 15230:2008. Na tabela 1 é apresentado o esquema para marcação e identificação de ferramentas.

Tabela 1: Esquema para marcação e identificação de ferramentas abrasivas (ABNT NBR 15230:2008)

Abrasivo	Tamanho do grão			Dureza	Porosidade	Aglutinante	Identificação
	Grosso	Médio	Fino				
A	6	46	220	E	1	V	De acordo com o fabricante
	8	54	240	F	2	B	
C	10	60	320	G	3	R	
	12	70	400	H	4	E	
Z	14	80	500	I	5	S	
	16	90	600	J	6	O	
DA	20	100	700	K	7		
	24	120	800	L	8		
AA	30	150	1000	M	9		
	36	180		N	10		
GC				O	11		
				P	12		
				Q			
				R			
				S			
				T			
				U			
				V			

Os símbolos para os tipos de grãos abrasivos são:

A – Óxido de alumínio, cristalizado no sistema trigonal (Al_2O_3);

C – Carбето, carbureto, carboneto de silício (SiC);

Z – Óxido de Zircônio;

DA – para indicar mistura de óxido de alumínio comum com óxido de alumínio branco;

AA – para indicar óxido de alumínio branco (99% de pureza);

GC – para indicar carbeto de silício verde.

Para os símbolos de dureza os rebolos devem ser classificados em ordem crescente por letras que vão de A a Z, onde:

A-B-C-D – para rebolos extremamente macios;

E-F-G – para rebolos muito macios;

H-I-J-K – para rebolos macios;

L-M-N-O – para rebolos de dureza média;

P-Q-R-S – para rebolos duros;

T-U-V-W – para rebolos muito duros;

X-Y-Z – para rebolos extremamente duros.

Quanto a porosidade a simbologia deve ser pela série de números a partir de 1, sendo:

De 1 a 4 para rebolos de aglomerante fechado dos grãos;

De 5 a 7 para rebolos de aglomerante médio dos grãos;

De 8 a 12 para rebolos de aglomerante aberto dos grãos;

Acima de 12 os rebolos são classificados como superporosos.

Os cristais abrasivos são mantidos em suas posições por um material que chamamos aglutinante ou ligante e são classificados por letras que indicam o tipo da liga, sendo:

V – material vitrificado;

B – resina orgânica;

R – borracha;

E – goma de laca;

S – silicato;

O – oxiclreto.

Marinescu *et al.* (2004) descrevem a classificação dos rebolos baseando-se na figura 8.

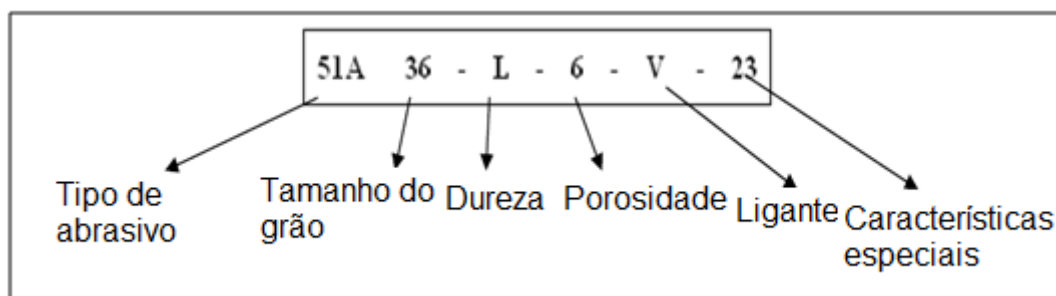


Figura 8: Especificação do rebolo (Marinescu, 2004).

O primeiro símbolo refere-se à quantidade de abrasivo que há nesse rebolo. A letra A indica o tipo de grão abrasivo que no caso é um óxido de alumínio,

onde, se fosse SiC, seria C esta letra. O número à direita indica o tamanho do abrasivo em mesh, sendo que, quanto maior esse número, mais fino é o grão. Às vezes, alguns fabricantes adicionam mais um dígito depois do número mesh para dizer se existe alguma mistura na composição do abrasivo (MARINESCU *et al.*, 2004).

3.7.2. Dureza do rebolo

A dureza de um rebolo está relacionada à dificuldade de remoção dos grãos abrasivos de sua superfície, ou ainda, à dificuldade de proporcionar o rompimento entre grãos e o material aglomerante. Define-se como sendo a resistência do rebolo ao arrancamento das partículas abrasivas, ou seja, a resistência à tração do ligante (Malkin, 2008).

Esta dureza é diretamente dependente das propriedades mecânicas do material aglomerante, pois se este possuir elevada resistência mecânica, reduzirá a possibilidade de ruptura dos grãos abrasivos, devido a uma satisfatória acomodação dos impactos sofridos pelo rebolo. Além disso, uma elevada resistência ao desgaste do material aglomerante dificulta a remoção de grão inteiros, pois desta forma a ancoragem dos grãos se mantém estável durante toda a vida do rebolo. Deste modo observa-se que as características do material aglomerante são fundamentais para determinar a dureza dos rebolos (King & Hahn, 1992).

Rebolos denominados moles são empregados na retificação de aços endurecidos tratados termicamente, enquanto rebolos duros são aplicados na usinagem de aços moles. Sob as mesmas condições de usinagem, rebolos duros tendem a gerar mais calor e vibração que os moles. Isso acontece porque a alta resistência ao desgaste do ligante impossibilita a expulsão dos grãos, mesmo quando estes já estão “cegos” (grão com aresta de corte gasta), gerando superfícies planas de corte e aumentando, desta forma, o atrito do rebolo com a peça. A geração excessiva de calor se não controlada, pode provocar danos térmicos à peça, tais como desvios dimensionais e queimas superficiais como já citado anteriormente.

Por outro lado, rebolos moles sofrem auto-afiação durante o processo de usinagem. Isto ocorre devido à perda dos grãos “cegos”, e conseqüentemente quebra de outros, gerando assim, novas arestas cortantes (King & Hahn, 1992).

Klocke & Merbecks (2001), citados por Webster & Tricard (2007), criaram um método para medir a dureza do ligante usando uma sonda mecânica, conforme a figura 9. Esse processo permite visualizar problemas de homogeneidade do rebolo. O sistema atinge diretamente o grão individualmente para ver com que força o ligante se fratura. Nesse caso, o grão pode fraturar como pode se desprender. Usando um sensor de emissão acústica e, com base no sinal produzido, pode-se conhecer o mecanismo de falha na interface grão/ligante.

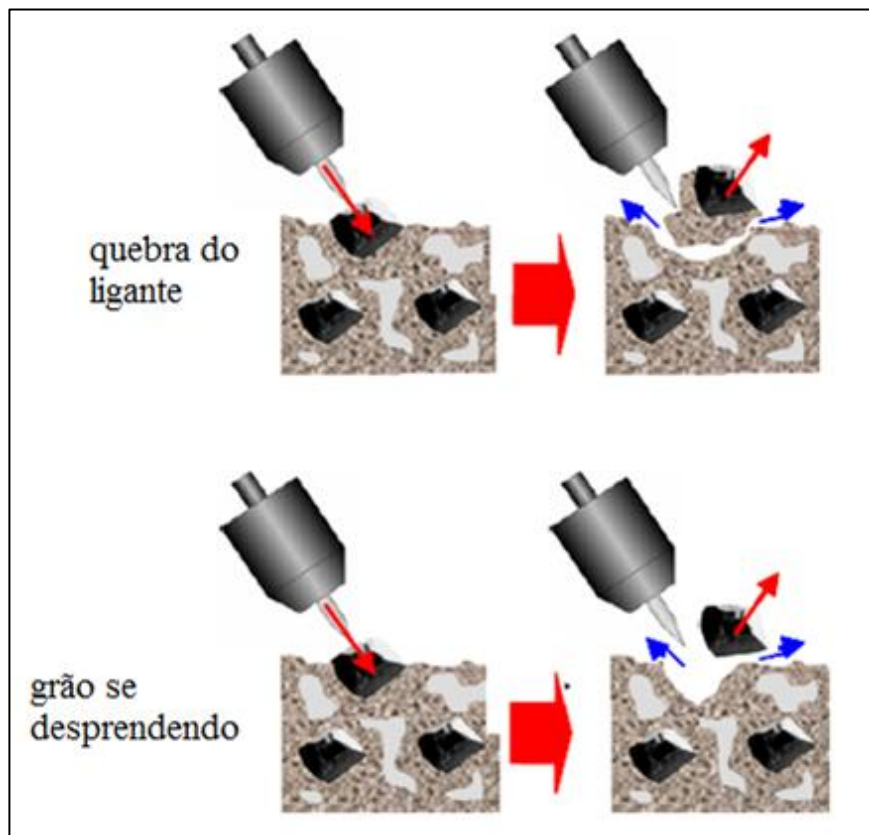


Figura 9: Sonda para teste da dureza do rebolo (KLOCKE & MERBECKS, 2001-modificado).

3.7.3. Estrutura do rebolo

Durante o processo de prensagem do rebolo nem todo o espaço é ocupado pelo aglomerante e os grãos, ficando entre eles espaços vazios, chamados estrutura ou porosidade. A estrutura de um rebolo pode ser entendida como densidade de grãos e porosidade.

A maior porosidade de um rebolo facilita o alojamento dos cavacos, o que torna esse tipo de ferramenta adequado para a remoção de grandes quantidades de

material com maior rapidez (WEBSTER & TRICARD, 2004). Além disso, a porosidade elevada é indicada na retificação de materiais dúcteis.

Uma quantia de grãos muito finos misturada com uma quantia grande de ligante sob elevada pressão resulta em baixa porosidade. Entretanto, se for uma quantia de grãos grossos, resultará em uma estrutura mais aberta e, conseqüentemente, mais porosa. Para induzir a porosidade no rebolo, podem ser usados elementos voláteis durante um estágio da fabricação, chamado estágio verde, antes do forno (SALMON, 1992).

3.7.4. Grãos abrasivos

Os grãos abrasivos usados nas operações de retificação são partículas refratárias duras e frágeis que podem ser classificadas de acordo com sua dureza ou composição química (LIAO *et al.*, 2007).

Para a escolha de certo abrasivo, para uma aplicação particular, deve ser baseada nos testes de durabilidade envolvendo resistência ao impacto, resistência à fadiga de compressão, friabilidade dinâmica e resistência ao lascamento ocasionado por tensões térmicas decorrentes do processo (MARINESCU *et al.*, 2004).

Uma imprescindível propriedade de um abrasivo é que este seja mais duro do que o material a ser retificado. A dureza de um abrasivo é, casualmente, definida em termos de resistência e endentação estática obtida através de um teste de dureza Knoop (MALKIN, 2008). Este método consiste em realizar uma micro endentação na amostra com uma ponta de diamante lapidado no formato piramidal sob a variação de diversas cargas. O valor da dureza é então definido pela medição da diagonal da marca produzida pelo diamante e relacionando-a com a carga utilizada (BROOKS, 2010).

A friabilidade é uma importante característica para a avaliação e escolha de certo abrasivo. Ela pode ser definida com a tendência da desintegração do grão em pequenos fragmentos sob pressão. Essa tendência deve-se devido à forma, integridade e pureza do cristal que forma o grão abrasivo, cujos quais surgem em decorrência do crescimento do cristal durante sua fabricação (MARINESCU, *et al.*, 2004).

Podem-se diferenciar os grãos abrasivos em dois grupos distintos, os grãos naturais e os artificiais. Os abrasivos naturais são aqueles obtidos diretamente da

natureza. Como exemplo tem-se o coríndon, o esmeril, o quartzo e o diamante (SALMON, 1992).

Os grãos abrasivos artificiais são os obtidos sinteticamente através de pesquisas e trabalhos laboratoriais. Apresentam a vantagem sobre os naturais de ser possível eliminar certos problemas como as impurezas e inconsistência dos grãos abrasivos naturais. Assim, sua produção pode ser cuidadosamente controlada e realizada de acordo com a especificação do consumidor. Os principais representantes deste grupo são o diamante sintético, o nitreto de boro cúbico (CBN), carboneto de silício (SiC), a alumina sintetizada, o carboneto de tungstênio e o óxido de alumínio (Al_2O_3) (MALKIN, 2008).

Os grãos abrasivos do rebolo se mantêm unidos por um componente chamado de ligante (DINIZ *et al*, 2013). Os principais tipos de ligantes são:

- Vitrificada: é a liga mais comum para retificações de precisão. Sua rigidez facilita a manutenção do perfil do rebolo, permitindo trabalhos com maior precisão. Não resiste a grandes impactos ou pressões e não é afetada por água, óleos ou ácidos. Trabalho normalmente com velocidade periférica de 33 m/s. No entanto, operações a 60 m/s são comuns atualmente e ligas especiais foram desenvolvidas para atender a essa necessidade. Seu símbolo na identificação do rebolo é a letra V.

- Resinoide: é composta por resinas orgânicas, é uma liga de resistência e resiliência elevadas. Dependendo da construção do rebolo, pode operar até 100 m/s. Utilizada para operações de desbaste pesado, cortes e, por outro lado, operações que exijam alto nível de acabamento. Seu símbolo na identificação do rebolo é a letra B.

3.7.5. Descrição dos grãos abrasivos comumente utilizados

Óxido de Alumínio fundido:

Segundo Salmon (1992), para a fabricação desse abrasivo, primeiramente é extraído da bauxita o óxido hidratado de alumínio e então esse óxido é calcinado. Depois, é misturado ao coque e levado a um forno. Ao sair do forno, o material é deixado para esfriar por alguns dias e, depois, moído e lavado. A dureza desse abrasivo cresce com a pureza que é conseguida no mesmo. Segundo Marinescu *et al.* (2004), as propriedades desse abrasivo são obtidas no processo do forno e trituração.

Dependendo do processo ou da composição química, existem diversos tipos de óxidos de alumina. Entretanto, uma característica geral é a baixa condutividade

térmica, propriedade intrínseca, que se torna um fator limitante no processo de retificação (Marinescu *et al.*, 2004).

O óxido de alumínio fundido é amplamente usado para usinagem das ligas de baixa usinabilidade e das altas ligas de aço. Há várias técnicas para modificar as propriedades, o tratamento térmico com sílica, por exemplo, proporciona adesão ao grão em relação ao ligante resinóide. Outros tratamentos térmicos, como adição de elementos de liga, podem aumentar a friabilidade (Salmon, 1992).

Óxido de Alumínio (Al_2O_3):

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).

Segundo King e Hahn (1992) o óxido de alumínio é o abrasivo que apresenta menor dureza, entretanto é o mais resistente ao impacto. Sua estrutura é baseada no $\alpha-Al_2O_3$ e várias misturas. Entre os materiais adicionados ao óxido de alumínio destacam-se os óxidos de ferro, titânio e cromo.

Segundo Marinescu *et al.* (2007) existem diversos tipos de óxidos de alumínio, entretanto, uma característica geral é a baixa condutividade térmica, propriedade intrínseca, que se torna um fator limitante no processo de retificação. A dureza desse abrasivo cresce com a pureza que é conseguida no mesmo (Salmon, 1992).

Dependendo de sua pureza e da preparação do abrasivo, esse tipo de grão pode ser tanto afiado como formado de um bloco. Grãos com formato de bloco possuem alta resistência ao impacto e são melhores para operações de remoção pesada de material. Já os grãos mais afiados minimizam a força nos grãos e minimizam o volume da perda de grão por fratura (Brian, 2009).

Segundo Salmon (1992), o óxido de alumínio cerâmico é feito pelo processo sol-gel. O processo usado em sua manufatura produz um cristal sólido de óxido de alumínio com pouca friabilidade, em relação ao óxido de alumínio fundido. Entretanto, o poder de corte é maior.

Óxido de Alumínio Cerâmico:

Este é feito pelo processo sol-gel. O processo usado na manufatura do óxido de alumínio cerâmico produz um cristal sólido de óxido de alumínio com pouca friabilidade, em relação ao óxido de alumínio fundido. Entretanto, o poder de corte é maior (Salmon, 1992).

O processo sol-gel, segundo Webster & Tricard (2007), compreende a precipitação de uma solução de óxido de alumínio mono hidratado, originando um gel, que então é seco e queimado para formar alumina α . A solução inicial deve conter até 15% de dióxido de magnésio, titânio, magnésia e zircônia. Esses aditivos são adicionados para melhorar as propriedades como tenacidade à fratura, dureza, friabilidade, entre outros.

Ainda segundo esses autores, uma vez formado o gel, deve ser dado uma forma a ele. Então o mesmo é prensado, modelado, extrusado e cuidadosamente seco para formar um corpo sólido. Então, é calcinado e colocado em um forno para remover os materiais voláteis. O material calcinado é sinterizado pelo calor até toda alumina mono hidratada se transformar em alumina α . Depois, pode ser moído e triturado para formar os grãos.

Os rebolos de sol-gel são mais usados em retificação robusta. A combinação da cerâmica com o óxido de alumínio fundido tende a produzir um rebolo mais suscetível à retificação de ultra-precisão. Dessa forma, o rebolo passa a possuir um alto nível de corte e ação agressiva, além de assegurar qualidade de forma à peça e vida longa a si mesmo. As propriedades do grão de sol-gel são completadas pela friabilidade do óxido de alumínio fundido (Salmon, 1992).

Óxido de Alumínio Branco:

Alumina branca é o grau mais popular para abrasivos de tamanho microscópio. Para ser produzida em escala de micron, alumina é moída depois de ser esmagada e então separada em dois tamanhos diferentes usando o processo de decantação. Isto consiste em passar lodo abrasivo e água por uma série de colunas verticais. A largura das colunas é ajustada para produzir um fluxo que diminua sua velocidade progressivamente de coluna em coluna. O processo é efetivo até 5 μ m e também é utilizado para o carbetto de silício.

Carbeto de Silício (SiC):

Segundo Salmon (1992), o SiC foi o primeiro abrasivo a ser manufaturado. Em 1981, Dr Edward misturou coque e areia e levou a mistura a um forno para ser fundida. Ele obteve o carborundum, uma mistura de carbono e corundum que era composta por 60% de sílica e 40% de coque. Marinescu *et al.* (2004) relatam que, para aumentar a porosidade da mistura, foi adicionado serragem e também sal como catalisador para ajudar na purificação do SiC, removendo as impurezas de ferro. Depois que o material sai do forno ele é quebrado e triturado e, então, separado por tamanho.

Salmon (1992) ainda relata que o SiC é usado para a usinagem de carbeto de tungstênio, ferro fundido, mármore e cerâmicas, alumínio, titânio, latão e cobre. É um abrasivo bastante duro e tem uma forma agressiva que ajuda na penetração em superfícies de certos materiais macios como os aços de baixa resistência à tração, alumínio, ligas de cobre, plásticos, borracha, entre outros. Além disso, seu coeficiente de expansão térmica é bastante pequeno (Marinescu et al., 2004).

Salmon (1992) também define outros tipos principais de grãos de carbeto de silício:

- *Carbeto de silício impuro preto*: é usado em operações de desbaste. Segundo Marinescu *et al.*(2004), possui menos de 95% de SiC e é aplicado na retificação de ferro fundido, alumínio, bronze e vidro.
- *Carbeto de silício puro verde*: é mais friável e proporciona usinagem com menor geração de calor, sendo a retificação mais precisa em materiais duros e sensíveis termicamente. Segundo Marinescu *et al.*(2004), estes apresentam elevada pureza (97-99%); são de difícil produção, elevado custo e aplicados na usinagem de carbonetos sinterizados.
- Carbeto de silício preto com óxido de alumínio branco: fabricado com ligante vitrificado, seu grão apresenta elevada dureza e friabilidade, devido ao carbureto de silício e baixa tenacidade, porém alta dureza, advindos do óxido de alumínio, constituindo-se em uma combinação desses grãos em sua composição.

Entretanto, ainda segundo esses autores, o diamante, uma forma metaestável do grafite em pressões normais, tende a transformar-se em grafite a temperaturas relativamente baixas: 700°C no ar e 1500°C em meio a uma atmosfera inerte. Com base nisso, Sreejith & Ngoi (2000) relatam que, apesar do diamante e CBN

terem estruturas cristalinas semelhantes, o diamante sofre grafitação na usinagem de aço. Salmon (1992) descreve o processo industrial para a manufatura do diamante sintético. Segundo o autor, utilizam-se pressões na casa de 55000 a 130000 bar e temperaturas de 1400 a 2500 °C. A interface catalítica de metal é um ponto muito importante nesse processo. Primeiramente, foi usado o ferro e depois cromo-cobalto, magnésio, níquel, platina, entre outros. Diferentes temperaturas, solventes e pressões produzem os tipos de diamantes sintéticos. Em certos casos, o revestimento metálico do diamante com cobre ou níquel proporciona melhor ligação mecânica e também caminho para o fluxo de calor gerado durante a retificação, particularmente em usinagem a seco. Dessa forma, o diamante é usado na usinagem de carvão de tungstênio, pedras naturais, granito, concreto, cerâmicas e cermet.

Segundo Marinescu et al. (2004), o diamante sintético domina na fabricação de rebolos, mas o diamante natural ainda é o preferido para as ferramentas de dressagem e perfilamento.

3.8. Processo de dressagem dos rebolos convencionais

Idealmente, as partículas abrasivas na superfície do rebolo deveriam se tornar automaticamente afiadas quando desgastadas, mas elas se desprendem do rebolo ou se fraturam expondo novas partículas com novas arestas de corte. Entretanto, ambas as características e funcionalidades do rebolo devem ser ajustadas por meio da dressagem periódica. A dressagem é uma etapa integrante do processo de retificação, sendo esta uma operação executada para reconstituição da camada radial do rebolo (DINIZ, *et al.* 2013), ou seja, dressagem é uma operação de afiação gerando uma superfície particular na superfície de corte do rebolo, sendo que 10% do rebolo é gasto no processo de usinagem, em si, e os 90% restantes são gastos com a dressagem (JACKSON *et al.*, 2007).

Segundo Chen *et al.* (1990), a topografia do rebolo é geralmente caracterizada pelo número de arestas de corte. Essa topografia influencia na geometria do cavaco produzido e, conseqüentemente, no processo de retificação.

Cai & Rowe (2004) relatam que alterações na topografia podem ajudar a explicar os efeitos do parâmetro de retificação no desempenho do processo e como controlá-lo, como se observa na figura 11, que descreve a relação entre a energia específica de retificação e o desgaste do rebolo, onde, segundo Harimkar & Dahotre

(2006), o desempenho da retificação é julgado em termos do desgaste do rebolo e da energia específica. O desgaste por atrito causa menor desgaste radial, mas a quebra do ligante ou desprendimento do grão estraga mais rapidamente o rebolo. A fratura do grão, por sua vez, gera arestas de corte mais afiadas, fenômeno conhecido como a ação de auto-afiação do rebolo, como no caso de rebolos com ligante vitrificado.

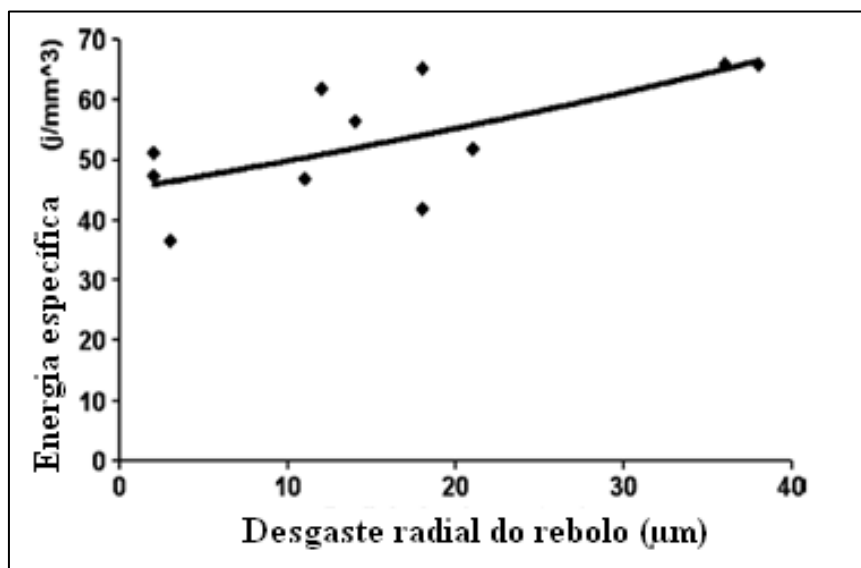


Figura 10: Relação entre a energia específica e o desgaste radial do rebolo, (Azizi et al., 2009).

Dessa forma, o processo de retificação é considerado, como um todo, um processo que engloba a dressagem e a própria retificação, onde o efeito da dressagem é imediato após a mesma.

Do ponto de vista de remoção do material, as propriedades estáticas mais importantes da topografia do rebolo são os parâmetros relacionados à aresta de corte e sua distribuição. Tais parâmetros são: afiação, largura e densidade de arestas. Estas últimas remetem ao número de arestas de corte ativas por unidade de área da superfície do rebolo. Assim, durante a dressagem, a superfície do rebolo é gerada pela fratura do grão ou do ligante (Saleh *et al.*, 2009).

Alfares & Elsharkawy (2009) *apud* Azizi *et al.* (2009) dizem que o número de arestas ativas, irá depender das condições de dressagem impostas. À medida que o rebolo vai se desgastando, aumenta-se a força, pois aumenta a área desgastada na superfície do mesmo. Isso ocorre durante a retificação, devido aos grãos afiados

desenvolverem arestas achatadas, enquanto os já achatados tornam o efeito do desgaste do rebolo mais acentuado e propiciam uma maior adesão de partículas. Dessa forma, o atrito se torna uma parcela importante do desgaste, responsável diretamente pelo aumento da força e cegamento dos grãos.

Com base nisso e de acordo com Azizi *et al.* (2009), os benefícios do grão de CBN só podem ser extraídos conhecendo uma boa condição de dressagem.

A prática mais comum de dressagem nas indústrias é a dressagem mecânica que usa um diamante de ponta única. Entretanto, as desvantagens encontradas são: desgaste do diamante, perda no tempo de operação e aumento de custo por parada do processo para várias dressagens (Harimkar & Dahotre, 2006).

Segundo Jackson *et al.* (2007), a dressagem mecânica induz tensão e causa trincas profundas. Isso eventualmente promove perda de pedaços dos grãos e reduz o número de arestas efetivas. Assim, a dressagem convencional (mecânica) não produz uma boa topografia do rebolo. Um dressador desgastado, segundo Zhang & Shin (2002), não pode produzir uma protrusão eficiente de arestas de corte. Dessa forma, alternativas para isso têm sido mudar a geometria do dressador.

Uma aplicação da dressagem mecânica diz respeito a rebolos com ligante vitrificado e resínóide. Já rebolos com ligantes metálicos são dressados pelo método eletrolítico (Xi *et al.*, 2004).

Assim, na dressagem mecânica, faz-se o perfilamento e a dressagem, propriamente. Segundo Marinescu *et al.* (2004), a operação de perfilamento busca atingir uma forma precisa para o rebolo, enquanto a dressagem tem como objetivo restaurar a eficiência de corte da ferramenta.

De acordo com Malkin (1989), o perfilamento é responsável pelo ajuste de forma da topografia do rebolo, por meio da remoção de material. Em rebolos superabrasivos, esta operação deve ser executada além da dressagem. No caso de rebolos convencionais, dispensa-se tal operação, pelo fato de que este ajuste já é atingido no momento da dressagem.

Malkin (1989) afirma que em operações de dressagem mecânica são geradas superfícies compostas de macro e micro-efeito definidas como:

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

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

Segundo Hassui & Diniz (2003), no macro-efeito existe um pequeno número de grãos ativos, os quais são responsáveis por remover grandes quantidades de material. Isso faz com que os esforços sobre cada grão sejam grandes, o que, no entanto, não impede o bom desempenho do processo (com predominância deste efeito), pelo fato das reduções das perdas com deformações plásticas e elásticas do material na zona de corte minimizarem o total de energia envolvida no processo.

A agressividade das novas arestas formadas no micro-efeito depende em grande escala da friabilidade do grão e das condições de dressagem. Na dressagem fina, com baixa profundidade de penetração e baixo avanço do dressador, ocorre a remoção ou fratura de grãos muito pequenos, proporcionando a formação de planos nas superfícies de corte dos mesmos tornando-os, desta forma, menos agressivos. Na dressagem grossa, com altas taxas de penetração e avanço, grande parte dos grãos é quebrada, formando arestas maiores e mais afiadas (Hassui & Diniz, 2003).

Ainda com base no trabalho desses autores, a figura 12 ilustra o mecanismo de dressagem.

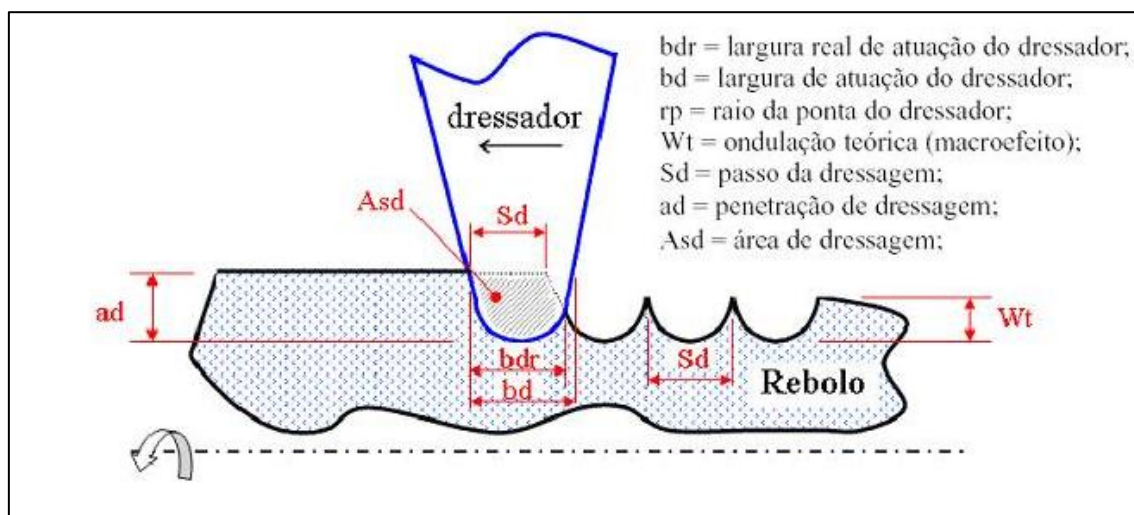


Figura 11: Esquemática da operação de dressagem (Hassui & Diniz, 2003 adaptada).

Uma observação importante é com relação aos rebolos superabrasivos, onde a equação 15 apenas poderá ser usada para profundidade de dressagem bem pequena. Esses rebolos são dressados pela técnica da dressagem rotativa, entretanto,

nessa pesquisa, será usado um dressador conglomerado que será apresentado em materiais e métodos.

3.8.1. Dressador do tipo conglomerado

As formas e dimensões são variadas, do mesmo modo a especificação. Esse tipo de ferramenta possui maior largura de usinagem que outros tipos de dressadores, isso permite maiores avanços na dressagem.

3.9. Fluidos de corte no processo de retificação

Segundo Pawlak et al. (2004), os fluidos de corte foram aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir, através da lubrificação, as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta e também reduzir o calor na região de corte através da refrigeração.

De acordo com Stanford et al. (2007), os fluidos de corte também promovem propriedades anticorrosivas à peça e à máquina ferramenta. Além dessas funções, os fluidos transportam os cavacos gerados e promovem a limpeza do rebolo (Tawaloki et al., 2007).

Guo et al. (2000) afirmam que, no processo de remoção do material, o calor irá gerar deformação térmica na máquina e na peça e, então, a precisão da usinagem fica limitada. Esse calor provém do atrito entre peça e rebolo. Se lubrificante é aplicado, o calor pode ser reduzido pela diminuição do atrito e, com isso, as forças serão menores e a tensão residual também. Segundo Ramesh et al. (2001), uma boa aplicação de refrigerante evita tensão residual, pois reduz a tensão térmica e mecânica durante a formação do cavaco.

Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, o tipo de refrigerante, sua composição, a posição do bocal e seu design e vazão são parâmetros que influenciam na produtividade, qualidade da peça e desgaste do rebolo (Brinksmeier et al., 1999).

3.9.1. Classificação dos fluidos de corte

Blenkowski et al. (1993), citados por Irani et al. (2005), definem quatro categorias de fluidos de corte, baseadas em suas composições: sintéticos, semi-sintéticos, óleos emulsionáveis e óleos minerais, onde os óleos usados podem ser sintéticos ou minerais.

Minke et al. (1999) compararam os óleos solúveis, integrais e a base de água para diferentes situações de usinagem. Seu trabalho sugeriu que, se a integridade superficial é mais importante, então a sequência de fluidos de corte do melhor para o pior é: óleo de éster e emulsões a base de água. Os fluidos a base de água têm maior efeito refrigerante, porém causam aumento das forças.

Na tabela 1 podem-se comparar os fluidos de corte mais comumente utilizados na indústria.

Tabela 2: Caracterização dos principais tipos de fluídos (Webster, 1995)

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

3.9.1.1. Gases

Gases como o argônio, hélio e nitrogênio são utilizados, em alguns casos, para prevenir a oxidação da peça e dos cavacos. Já o CO₂ (dióxido de carbono) que possui ponto de ebulição abaixo da temperatura ambiente, pode ser comprimido e injetado na região de corte promovendo sua refrigeração. No entanto, devem-se evitar grandes fluxos de calor gerado, pois estes podem promover distorções nas peças e surgimentos de tensões residuais, uma vez que o poder lubrificante de gases não é suficiente para diminuir o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta.

A aplicação de gases apresenta certas desvantagens. Segundo El Baradie (1996), o elevado custo desses gases faz com que eles sejam economicamente inviáveis para a produção industrial. Além disso, gases e lubrificantes sólidos não são tão eficientes quando comparados aos fluidos líquidos, uma vez que apresentam baixa capacidade de refrigeração.

Entretanto, Choi *et al.* (2002), citados por Irani *et al.* (2005), concluíram em um dos seus estudos que a aplicação de ar frio em processos de retificação obtém resultados próximos à aplicação com fluidos para profundidades de corte bem pequenas. No entanto, surgiram tensões superficiais e a rugosidade superficial aumentou com o aumento da profundidade de corte, resultado da falta de lubrificação dos fluidos gasosos na região de corte.

3.9.1.2. Fluidos não solúveis em água

Segundo Marinescu *et al.* (2007), o grupo de fluidos não miscíveis em água compreende hidrocarbonetos naturais e sintéticos como os óleos minerais, ésteres vegetais e sintéticos. Esses fluidos podem conter substâncias que melhorem suas propriedades lubrificantes além de aditivos anti-corrosivos, anti-espumantes e até anti-oxidantes.

Segundo Souza *et al.* (2011), os melhores lubrificantes são os óleos integrais, porém são extremamente nocivos à saúde do trabalhador. Então, os lubrificantes mais usados são emulsões sintéticas que podem ser recicladas e garantem boa qualidade de refrigeração e lubrificação.

3.9.1.2.1. Óleos de Corte

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

Os óleos minerais apresentam, em sua grande maioria, base parafínica, isto é, compostos aromáticos policíclicos, que se não forem destruídos durante o

processo de formação do óleo de corte através de forte hidrogenação, porém, esses compostos podem causar câncer e dermatites (Webster, 1995).

De acordo com Bianchi *et al.* (2006), estes óleos possuem excelentes propriedades lubrificantes, bom controle anti-ferrugem e longa vida útil. No entanto, eles apresentam menor poder refrigerante quando comparados com os fluidos de corte solúveis em água, devido ao seu calor específico ser cerca de metade em relação ao da água.

Segundo Pereira *et al.* (2005) as desvantagens dos óleos integrais são: rápida deterioração, altos custos, riscos de incêndio, ineficiência na lubrificação a altas velocidades de corte, baixo poder de refrigeração, formação de fumos e ataque à saúde do operador.

3.9.1.3. Fluidos à base de Água

A água tem uma boa capacidade de refrigeração, melhor que o óleo, e pelo ponto de vista ambiental, é o mais ideal. Entretanto, devido a sua baixa viscosidade, baixa capacidade de lubrificação, de anti-corrosão, anti-ferrugem, e propriedades anti-bactericidas, a água deixa de ser uma boa alternativa. Desse modo, vêm surgindo alternativas, como as emulsões, que dão ao fluido, as características de ambos os componentes, do óleo e da água (Marinescu *et al.*, 2004).

Segundo Novaski e Rios (2004), nesta categoria estão inclusos as emulsões de óleo em água (óleos emulsionáveis), os semi-sintéticos e os fluidos sintéticos, os quais não possuem qualquer proporção de óleo mineral.

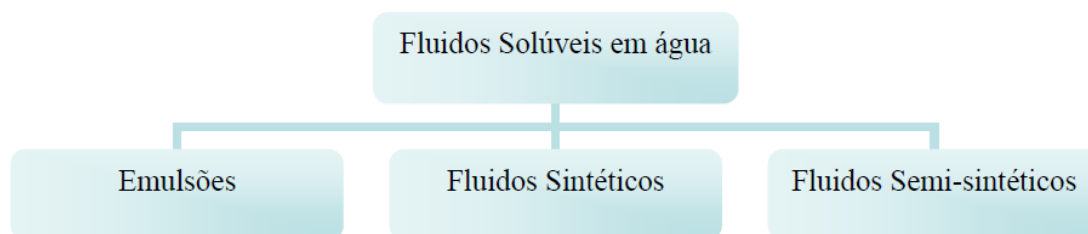


Figura 12: Classificação dos fluidos solúveis em água (EL BARADIE, 1996)

3.9.1.3.1. Emulsões

Define-se emulsão como uma mistura entre dois líquidos imiscíveis em que um deles é a fase dispersa (água) e o outro a fase contínua (óleo); estas são obtidas com a adição de emulgadores, compostos orgânicos que diminuem a tensão superficial, promovendo a dispersão do óleo em água.

Esses emulgadores agem, conforme esquematizado na figura 14 quebrando o óleo mineral em minúsculas partículas conferindo-as cargas repulsivas, impossibilitando uma nova união das mesmas. Eles devem ser usados uma vez que, segundo Novaski e Rios (2004), o óleo apresenta uma natureza apolar, enquanto a água tem natureza fortemente polar, fazendo com que a mistura de estes componentes não ocorra sem a adição destes emulgadores.

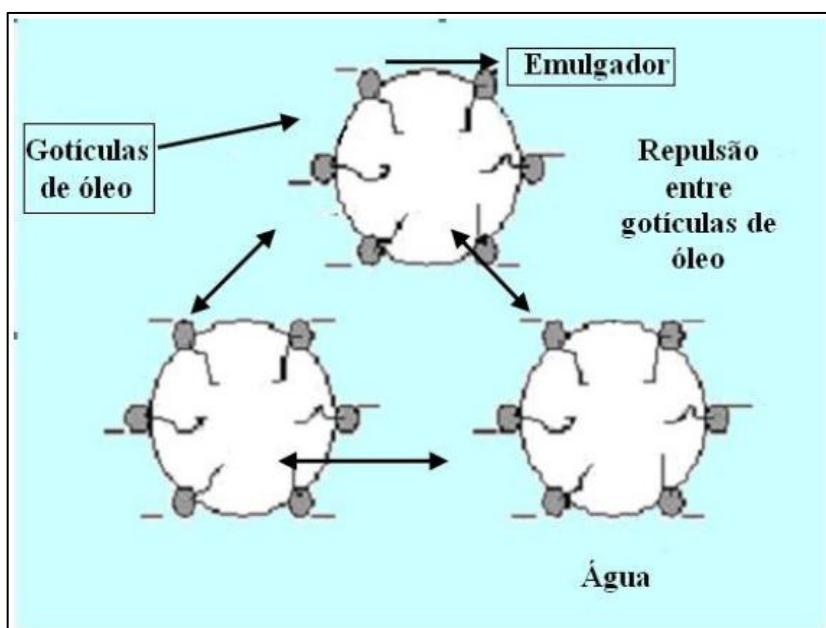


Figura 13: Classificação dos fluidos solúveis em água (EL BARADIE, 1996).

Segundo El Baradie (1996), os óleos solúveis combinam as propriedades de lubrificação e anti-corrosão dos óleos com a excelente característica refrigerante da água. As vantagens em relação aos óleos de corte incluem a melhor extração de calor da interface peça/ferramenta, melhor limpeza da superfície de trabalho, economia resultante da diluição em água, e condições de trabalho mais saudável e segura. Como a desvantagem estes fluidos apresentam menor poder de lubrificação, não diminuindo de forma eficiente o atrito entre peça e ferramenta, assim como os fluidos semi-sintéticos.

Um grande problema relacionado às emulsões está relacionado à estabilidade biológica, pelo fato de que os agentes emulgadores transformam-se em fonte de alimento para bactérias aeróbias e anaeróbias, as quais em grande quantidade degradam o fluido, destruindo suas propriedades de refrigeração e lubrificação, tornando-o inutilizável. Para combater tal efeito indesejável aplicam-se biocidas ao fluido (Novaski & Rios, 2004).

3.9.1.3.2. Flúidos Sintéticos

Os fluidos sintéticos são soluções químicas, constituídas de materiais (sais) orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, não contendo óleo mineral. São compostos monofásicos de óleos dissolvidos totalmente em água. Não há a necessidade da atuação de elementos emulsificadores, pois os compostos reagem quimicamente formando fases únicas (Diniz *et al.*, 2003).

Em geral, estas substâncias permitem rápida dissipação de calor, bom controle dimensional, excelente poder detergente e boa visibilidade da região de corte, facilidade no preparo da solução e elevada resistência à oxidação do fluido e à corrosão. Os fluidos sintéticos apresentam elevada estabilidade microbiológica, não necessitando ser periodicamente descartado devido ao ataque de bactérias. Esta característica proporciona uma redução de tempo de máquina parada para limpeza e reabastecimento do reservatório (Novaski & Rios, 2004; Diniz *et al.*, 2003)

Stanford & Lister (2002) confirmam que esse tipo de fluido é resistente ao ataque de bactérias e proporciona excelente propriedade de refrigeração, apesar de possuir uma capacidade realmente baixa de lubrificação. Suas limitações incluem a necessidade de controlar a concentração de fluido, alterada por fatores como evaporação de água e formação de resíduos. Esses fluidos apresentam maiores custos de aquisição e descarte, devido à difícil tarefa de se separar esses compostos em fluido efluentes.

3.9.1.3.3. Flúidos Semi-Sintéticos

Este tipo de fluido é uma combinação de fluidos sintéticos e emulsões de óleo em água. A concentração de óleo é menor que 60%. Essa menor quantidade de

óleo torna a atividade microbacteriana das emulsões semi-sintéticas mais fáceis de serem controladas.

Segundo Novaski e Rios (2004), o óleo contido nas emulsões semi-sintéticas está sendo parcialmente substituído por produtos sintéticos que são solúveis em água e complementado por óleos emulsionáveis numa proporção que varia entre 5 e 30% do total do fluido. Os autores Stanford & Lister (2002) ressaltam que as características operacionais destes fluidos incluem remoção de calor mais rápida, resistência a bactérias, melhor poder lubrificante e resistência à corrosão, que os fluidos de origem sintética. No entanto, a capacidade de lubrificação dos fluidos semi-sintéticos é inferior à capacidade de óleos de corte e óleos emulsionáveis, embora estes sejam suscetíveis à contaminação e à formação de espuma em sua superfície.

3.9.2. Custos dos fluidos de corte no processo

Young *et al.* (1997) mostram um típico sistema de custos envolvendo as despesas gerais de produção e em particular, as despesas com fluidos de corte, mostrada na figura 15.

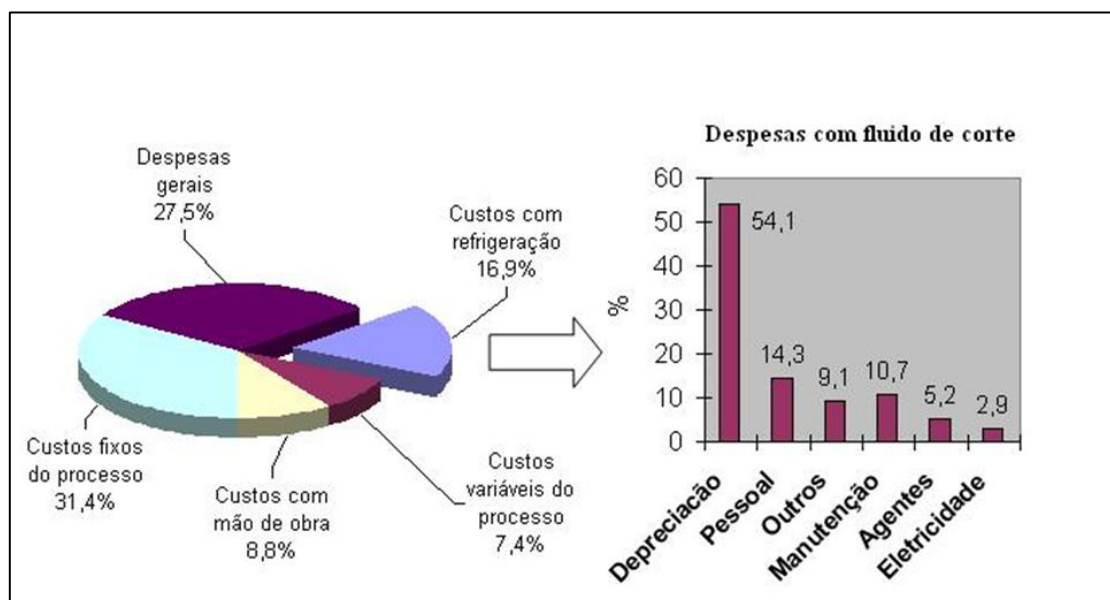


Figura 14: Custos com fluido de corte (Young et. Al., 1997).

3.9.3. Manutenção e descarte

Segundo Irani *et al.* (2005), uma vez usado o fluido de corte, ele contém pequenas quantidades de materiais, como pedaços do rebolo, cavacos e materiais da peça. Em função disso, depois de certa quantidade de tempo todo fluido deve ser trocado e descartado em ordem a manter um nível consistente de produção. Entretanto, esse descarte feito de forma indevida é prejudicial ao meio ambiente.

O uso e descarte dos fluidos de corte devem obedecer a regras de proteção ambiental. Dessa forma, a eliminação dos fluidos de corte pode ser economicamente inviável, pois estes custam mais caro que as ferramentas utilizadas. (Ge *et al.*, 2003).

3.9.4. Problemas causados pelo uso de fluidos de corte

Dhar *et al.* (2007) afirmam que, apesar das vantagens tecnológicas que os fluidos de corte promovem, ultimamente vêm sendo questionados os efeitos negativos que eles causam.

Segundo Pleifer *et al.* (1994), os fluidos de corte são formados por substâncias tóxicas que têm a função de garantir maior vida útil de operação aos mesmos. Entre elas, estão dispersantes, anticorrosivos, biocidas e clorantes. Conforme Anon (2003), essas substâncias causam danos à saúde humana. As pessoas podem entrar em contato com tais substâncias por meio do contato pela pele, pela inalação da névoa de fluidos ou por engolir pequenas partículas. Em função disso, podem ocorrer problemas como irritação da pele, alergias e distúrbios respiratórios e digestivos. Tais distúrbios são devidos aos metais pesados existente na composição.

Sadeghi *et al.* (2009) ainda relatam que os fluidos de corte, em operação sempre produzem névoa, fumaça e outras partículas que prejudicam a qualidade do ar.

Além disso, Hoff *et al.* (2002) observaram que muitos fluidos de corte promovem um meio propício ao crescimento de bactérias, sendo perigoso ao operador da máquina-ferramenta, onde estes, segundo Ge *et al.* (2003), podem contrair problemas na pele ou respiratórios, também.

3.10. Formas alternativas de lubri-refrigeração no processo de retificação

Os fluidos de corte foram introduzidos nos processos de corte com o intuito de melhorar as características tribológicas dos processos que estão sempre presentes entre a ferramenta e a peça. Entretanto, uma crescente atenção tem sido voltada para a cuidadosa seleção do fluido que adicionalmente deve respeitar o meio ambiente. Dessa forma, além dos requerimentos tribológicos, os fluidos de corte devem satisfazer os requerimentos de proteção ambiental regidos pela norma internacional ISO 14000. Em função disso, os custos crescentes com o descarte desses fluidos, estão forçando as empresas a implementarem estratégias de refrigeração no processo de usinagem (Sokovi & Mijanovic, 2001).

Tawaloki *et al.* (2007) afirmam que as estratégias para diminuição do uso de fluidos de corte e a busca por formas mais eficientes de lubri-refrigeração são: usar bocais especiais, otimizar o fluxo de fluido, usar a *mínima quantidade de lubrificante*, aumentar a vida do fluido, usar grafite e criogênio, bio-fluidos e *usinagem a seco*.

3.10.1. Usinagem a seco

Segundo Sreejith & Ngoi (2000), a usinagem a seco é ecologicamente desejável e é considerada uma necessidade das empresas. As empresas consideram a usinagem a seco uma forma de impor leis ambientais e zelar pela saúde das pessoas. As vantagens dessa técnica são: não polui a atmosfera ou a água; não há resíduos de fluido nos cavacos e com isso diminui o custo de descarte; não é perigosa à saúde humana, onde não há causas de irritação de pele e alergias. Na usinagem a seco, entretanto, haverá maior atrito entre a ferramenta e a peça, uma vez que estarão submetidos a altas temperaturas. Isso causará aumento no desgaste da ferramenta e redução de sua vida. Entretanto, as vantagens listadas pelo autor são: redução dos choques térmicos e promoção à ferramenta de um ambiente constante de corte.

Ainda segundo esse mesmo autor, rebolos de diamante e CBN têm grande aplicação na usinagem a seco, pois produzem melhores superfícies com menos desgaste da ferramenta. Isso se deve à elevada dureza e boa condutividade térmica desses.

A alta geração de calor está associada, na retificação, com o ângulo de incidência da aresta de corte e o grande comprimento de contato. Na usinagem a seco, usando especiais condições de rebolo (tamanho do grão, ligante e porosidade) ou mudanças nos parâmetros como profundidade de corte, taxa de remoção de material ou velocidade avanço, é possível reduzir o calor (Tawaloki *et al.*, 2009).

Entretanto, Sreejith & Ngoi (2000) relatam que os alumínio e suas ligas são os materiais mais críticos para a usinagem a seco, pois conduzem muito calor e, então, o calor gerado na usinagem vai todo para a peça, causando deformações. Para esses materiais, aplica-se como ferramenta o diamante, devido a seu alto coeficiente térmico, alta difusão de calor e sua não afinidade com o alumínio.

Um exemplo de aplicação bem sucedida da usinagem a seco é relatado no trabalho de Spur & Lachmund (1995), onde é retificado ferro fundido a alta velocidade e avanço, usando ferramentas de cerâmica e CBN. A alta velocidade é para diminuir o tempo de contato entre a peça e a ferramenta, implicando em menor desgaste da ferramenta e isso previne o calor na interface cavaco e peça.

Segundo Sadeghi *et al.* (2009), as limitações da usinagem a seco podem ser superadas, em muitos casos, pela introdução da mínima quantidade de lubrificante (*near-dry-machine*) que atua baseado no princípio do uso de fluidos, sem resíduos com vazão da ordem de 10-100ml/h e pressão de 4-6,5bar.

Portanto, a usinagem a seco é um processo de produção ambientalmente correta, entretanto, não é tão efetiva quando se precisa de grande eficiência na usinagem como melhor acabamento superficial e especialmente quando situações severas de usinagem são requeridas. Por isso, segundo Ge *et al.* (2003), tem-se usado pequenas quantidades de lubrificante como a técnica da mínima quantidade de lubrificante.

3.10.2. A técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL)

Segundo Attanasio *et al.* (2006), os fluidos de corte custam em torno de 7-17% dos custos do processo e as ferramentas 2-4%. O uso do MQL para redução dos custos está associado à redução dos fluidos usados. Dessa forma, no MQL são usados fluidos da ordem de vazão de ml/h ou l/min.

Assim, Obikawa *et al.* (2006) definem o MQL como a mínima quantidade de lubrificante, onde uma pequena quantidade de óleo é misturada com ar

comprimido e direcionada diretamente na região de corte, evitando as inundações de óleo observadas na refrigeração convencional.

Attanasio *et al.* (2006) ainda descrevem uma aplicabilidade interessante do MQL, onde este pode ser usado para a redução dos gastos com a ferramenta na retificação de aços endurecidos com rebolo de CBN. Sendo assim, algumas vantagens são: cavaco, peça e ferramenta apresentam menor resíduo de fluido, sendo a limpeza dos mesmos mais fácil e econômica. Além do mais, durante a usinagem, a peça não é totalmente coberta com fluido e é fácil de ser observada.

A figura 16 demonstra o funcionamento do sistema de mínima quantidade de lubrificação.

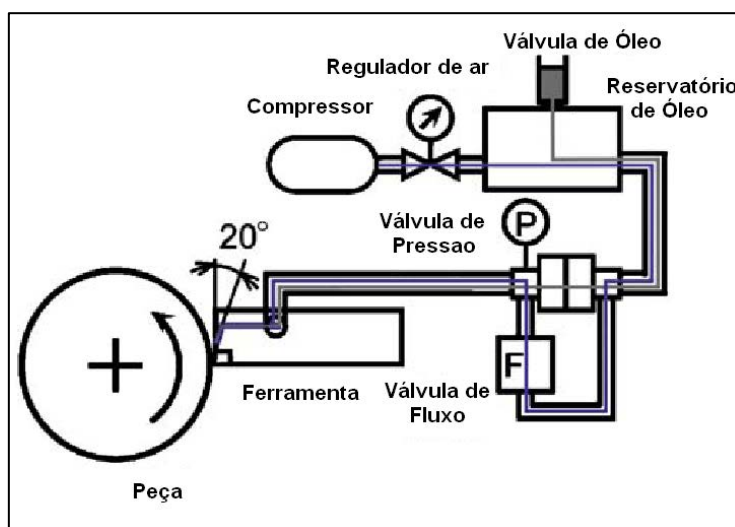


Figura 15: Modelo esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação por pressão (Obikawa, 2006).

Choi *et al.* (2003), citados por Nguyen & Zhang (2003) estudaram o efeito da aplicação de ar comprimido refrigerado para atuar como refrigerante no processo de retificação cilíndrica de aços endurecidos. Ele observou que a eficiência do ar em reduzir os danos térmicos foi igual à dos fluidos convencionais quando a profundidade de corte era pequena. Entretanto, a tensão superficial apareceu e a rugosidade subiu com o aumento da profundidade de corte. Eles concluíram que isso ocorria devido à quantidade reduzida de lubrificante. Dessa forma, aumentou-se o desgaste do rebolo, conforme aumentaram os passes, mas a força e energia foram menores em relação aos fluidos de corte.

Silva *et al.* (2007) estudaram os parâmetros de retificação do aço ABNT 4340 usando a técnica do MQL. Eles encontraram que a rugosidade superficial, desgaste

diametral do rebolo, as forças e tensão residual foram melhoradas usando o MQL devido ao maior escorregamento do grão na zona de contato.

Já com relação ao fluido usado no sistema de MQL, Suda *et al.* (2002) afirmam que o óleo sintético de éster tem grande propriedade como, biodegradável, antidesgaste da ferramenta, anticorrosão e estabilidade ao ser armazenado. Brunner *et al.* (1998) mostraram que a retificação com MQL à vazão de 4ml/min de óleo de éster em comparação com a aplicação de óleo mineral a 11ml/min na retificação da liga SAE (5115) com rebolo de óxido de alumínio, reduziu a força normal e tangencial em um terço, mas aumentou a rugosidade em 50%. Brinksmeier *et al.* (1997) afirmam que o tipo de fluido usado na retificação com MQL influencia no processo.

Além disso, existem restrições a certos fluidos no processo do MQL. Os fluidos de corte a base de água com cloro orgânico, aditivos de zinco e óleos minerais não podem ser usados junto ao MQL (Stäbler *et al.*, 2003). Segundo Skerlos & Hayes (2003), óleos a base vegetal estão sendo vistos como uma ótima alternativa também no processo de usinagem perante os tradicionais fluidos de corte.

Hadad *et al.* (2012), conseguiu ótimos resultados na retificação de aço endurecido utilizando a técnica tradicional da MQL. Segundo o estudo, este método reduz a forças da retificação e os danos superficiais em comparação aos métodos de lubrificação convencional, MQL com água e à seco. Ele conclui que sob determinadas condições a MQL é apta a competir com os resultados oferecidos pelo método convencional de lubri-refrigeração. Tal fato, pode ser verificado no estudo em questão, no qual o valor do desgaste para MQL é próximo ao valor obtido no método convencional.

3.10.2.1. Aplicabilidade do MQL na retificação e suas vantagens

Segundo Sadeghi *et al.* (2009), a preocupação ambiental se tornou incrivelmente importante para os processos produtivos, aliada com os aspectos econômicos e tecnológicos. A crescente busca por técnicas que respeitem o meio ambiente e que reduzam os custos com descarte de fluido tem dado lugar às formas alternativas. Entre essas alternativas tem estado o MQL e a usinagem a seco. O MQL é interessante, pois combina lubrificação com baixo consumo de óleo, onde o ar consegue

chegar muito perto das interfaces peça/cavaco e ferramenta/cavaco, reduzindo o atrito e as forças.

Heisel *et al.* (1998) e Klocke *et al.* (2000) listaram as vantagens do MQL comparado aos fluidos de corte convencionais no processo de retificação:

- Reduzida quantidade de fluido é utilizada, onde não há a necessidade de equipamentos adicionais para a circulação dos fluidos;
- Não é necessário sistema de filtragem e reciclagem;
- Menor manutenção do fluido;
- As peças saem mais limpas no final da operação;
- Reduz o volume de fluido impregnado no cavaco;
- Reduz o uso de biocidas e fungicidas.

3.10.2.2. Desvantagens no uso do MQL

Comparada com a técnica tradicional dos fluidos de corte, o MQL apresenta custos adicionais para pressurizar o ar, segundo Machado & Diniz (2000), Devem-se ter, também, sistemas adicionais para o transporte dos cavacos. Além do mais, esses autores relatam que a produtividade de corte deve decrescer devido aos danos térmicos aos componentes das máquinas. Deve-se ter um bom sistema de exaustão. O barulho do sistema de ar comprimido também excede o normalizado.

Além do mais, apesar de o MQL promover lubrificação eficiente, redução da energia de retificação, da energia específica e do desgaste do rebolo para um nível de comparação com os fluidos de corte (óleos solúveis) em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente bons também. (Hafenbraedel & Malkin, 2001).

Tawaloki *et al.* (2009) relatam que, para o uso eficiente do MQL, é preciso avaliar o efeito dos parâmetros do sistema e das diferentes peças na performance do processo de retificação. Eficiência na lubrificação faz com que o cavaco deslize mais facilmente na superfície da ferramenta e promova melhor acabamento superficial.

3.11. Aço VP50

O aço VP50 é o material que foi usado. Sendo fornecido pela VILLARES METALS. Este aço é desenvolvido especialmente para fabricação de moldes para conformação de polímeros termoplásticos. Sua composição química é 0,15% de Carbono, 0,3% de Silício, 1,55% de manganês, 3% de Níquel, 1% de Alumínio, 1% de Cobre em sua composição. Esse aço é endurecível por precipitação, possuindo resistência ao desgaste, elevado grau de pureza e também boa usinabilidade. Envelhecido, possui dureza de 40-42 HRc, já solubilizado possui uma dureza de 30-35 HRc, para envelhecimento após usinagem de acabamento.

3.12. As variáveis do processo de retificação cilíndrica externa

Diferentes materiais proporcionam diferentes mecanismos de remoção de cavacos, os quais influenciam nas variáveis de saída também de forma diferente (Kramer, 2007). As variáveis de saída serão analisadas no experimento para melhor análise dos resultados, pois a interação singular entre o grão abrasivo e a peça possui uma influência direta na modelagem de tais variáveis, tais como o consumo de energia e rugosidade superficial (Hecker *et al.*, 2007).

3.12.1. Relação G

Segundo Malkin (2008), existem três formas de ocorrência do desgaste da ferramenta abrasiva durante o processo de retificação. Dessa forma, o desgaste pode ocorrer pelo atrito com a peça, por fratura dos grãos abrasivos ou por meio do desprendimento dos grãos que estão aglomerados no ligante. Isso é decorrente das solicitações mecânicas que o rebolo é submetido e também da deterioração térmica do ligante.

Com base nisso, a eficiência do rebolo pode ser medida com base na relação G. De acordo com Marinescu *et al.* (2004), a relação G é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto, conforme a equação (15):

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{a.v_w.t}{\pi.d_s\delta} \quad (15)$$

Onde: t = tempo de retificação;

δ = desgaste radial do rebolo.

Z_w = volume de metal removido.

Z_s = volume de rebolo gasto

Ainda segundo esse autor, o desgaste da ferramenta abrasiva durante a retificação influencia, entre outros, nos seguintes aspectos do processo:

- Erro na profundidade de corte;
- Erro no tamanho final da peça;

- Aumento das forças características do processo;
- Aumento ou decréscimo da rugosidade superficial;
- Mudança no número de arestas de corte efetivas;
- Nova dressagem do rebolo, ocasionando percas na superfície da ferramenta, desgaste da ferramenta de dressagem e também gasto de tempo.

Entretanto, alguns fatores que influenciam no desgaste da ferramenta abrasiva são citados em alguns trabalhos. Choi *et al.* (2008) redigiram em seu artigo que a relação G está primariamente relacionada com a espessura equivalente 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.

3.12.2. Emissão Acústica

Nos últimos anos, o uso da monitoração dos processos de usinagem tem sido feito para providenciar maior qualidade do produto (Tönshoff *et al.*, 1999). A emissão acústica tornou-se uma boa opção, pois todos os materiais emitem sons a alta frequência quando submetidos a um esforço ou quando são deformados ou fraturados. A vantagem dessa técnica é que o processo pode ser monitorado instantaneamente. No entanto, esta variável é limitada pelos ruídos externos.

A emissão acústica é definida como onda elástica transiente gerada por uma rápida liberação de energia de uma fonte localizada no material quando submetido a um estado de tensão. A energia liberada está associada a uma abrupta redistribuição de tensão e com isso uma onda é propagada pelo material (Ravindra *et al.*, 1997). Na maioria das vezes, a emissão acústica está ligada à interação entre o grão do rebolo e a superfície do material.

Com base nisso, Wang *et al.* (2001) dizem que esta variável está intimamente ligada com o estado do processo de retificação e as condições superficiais da ferramenta abrasiva e da peça que está sendo trabalhada. Assim, com o emprego da emissão acústica, pode-se analisar a interface peça/ferramenta, o desgaste do rebolo, o corte do material, e também a integridade superficial. Além do mais, Webster *et al.* (1996) enfatizam o emprego dessa variável na verificação da dressagem e dos danos térmicos.

Para Rangawala & Dornfeld (1991), existe a relação da emissão acústica com a primeira e segunda zona de centelhamento, associadas com a grande energia da deformação plástica. Além do mais, a EA é uma função da velocidade e da profundidade de corte e dependendo da dureza do material usinado, torna-se difícil a remoção e morfologia de formação do cavaco, implicando na maior emissão dos sinais acústicos.

3.12.3. Análise da Microestrutura – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O processo de retificação requer uma extrema energia inicial por unidade de volume de material removido. Toda essa energia é convertida em calor que é concentrado na zona de corte. A elevada temperatura obtida pode causar vários danos térmicos, como queima da superfície da peça, transformação de fase, amolecimento superficial e até mesmo aumento da tensão residual, trincas e diminuição da resistência à fadiga (Malkin, 1989).

Ainda segundo esse autor, os aços são retificados após o tratamento térmico. Com isso, a queima superficial pode ocasionar uma retêmpera, originando uma microestrutura frágil que prejudicará a resistência à fadiga. Entretanto, em função do aquecimento do material durante a retificação e também da taxa de resfriamento proporcionada pelo refrigerante, pode ocorrer o revenimento e perda de dureza superficial.

Portanto, a microdureza é uma variável que reforça os resultados da análise microscópica do material. Dessa forma, é importante para avaliar as possíveis transformações microestruturais que a peça possa passar durante sua produção e com isso consegue-se uma maior análise da integridade superficial.

Segundo Marinescu *et al.* (1998), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é muito utilizada na caracterização de superfícies fraturadas, para investigar a estrutura superficial, detectar falhas e poros abertos. Um feixe de elétrons de 0,01 μm de diâmetro varre a superfície linearmente e o impacto dos elétrons primários provoca a emissão de elétrons secundários da amostra. Estes elétrons secundários são detectados e formam uma imagem, onde as regiões mais profundas irradiam menos e as mais elevadas irradiam mais elétrons. A resolução deste microscópio é limitada a 0,01 μm .

3.12.4. Rugosidade

A rugosidade é uma propriedade que define, em partes, a qualidade superficial de uma peça usinada e, segundo Svirshchev *et al.* (2008), os parâmetros do processo e também da ferramenta abrasiva influenciam nessa variável.

Nesse aspecto, Malkin (1989) define que a qualidade superficial é dividida em dois aspectos:

- Integridade superficial; influenciada pelas solicitações mecânicas e térmicas que a peça é submetida.
- Textura da superfície; caracterizada pela topografia da peça e está associada à rugosidade.

Segundo Marinescu *et al.* (1998), a rugosidade é definida como o desvio da forma geométrica ideal da superfície. O parâmetro de rugosidade mais utilizado é média aritmética (Ra) e é definido como a média aritmética dos valores absolutos dos desvios de altura da rugosidade mensurada para um determinado comprimento de medição (Kajorinchaijakul, 2000).

Essa variável é influenciada pelo tipo de grão do rebolo, o tamanho da malha do rebolo e o diâmetro da ferramenta, tipo de dressagem, dureza da peça, características estruturais e dinâmicas da máquina, profundidade de corte, velocidade do rebolo e peça e tipo de fluido (Shaji & Radhakrishnan, 2003).

Xu *et al.* (2002) ainda afirmam que o tamanho da malha do rebolo melhora a rugosidade. Além disso, Tönshoff *et al.* (1999) *apud* Jahanmir *et al.* (1999) confirmam que a correta escolha do fluido de corte é de fundamental importância, pois, segundo Sedlacek *et al.* (2008), quando o coeficiente de atrito é baixo em função do uso de lubrificante melhora-se a rugosidade.

Já com relação ao aumento da velocidade da ferramenta abrasiva, esse fato faz com que melhore a rugosidade superficial (Ramesh *et al.*, 2001 *apud* Huang *et al.*, 2003). E adicionalmente as velocidades transversal e longitudinal características do mecanismo de usinagem (Svirshchev *et al.*, 2008).

Ainda segundo Ramesh & Huang (2003) o tempo de centelhamento e dressagem, de fato, melhoram a qualidade superficial porque há uma fragmentação nos cavacos.

3.12.5. Circularidade

O erro de circularidade é definido como qualquer diferença entre a peça usinada e a projetada com tolerâncias especificadas (Jedrzejewski & Modrzejcky, 1997). De acordo com Cho & Tu (2001) o desvio de circularidade se baseia em dois limites circulares concêntricos que compreendem o maior pico e menor vale de um perfil, conforme a figura 17.

O erro de circularidade ocasionado pelo processo durante a usinagem está diretamente relacionado com as condições de retificação, os danos térmicos, as solicitações mecânicas, a pressão e a vazão de fluido de corte utilizado. O erro de circularidade expressa qual o erro de forma final da peça usinada, pois em processos de retificação de precisão este fator é muito importante, já que o mesmo indica qual o estado cilíndrico final da peça (Fusse *et al.*, 2004).

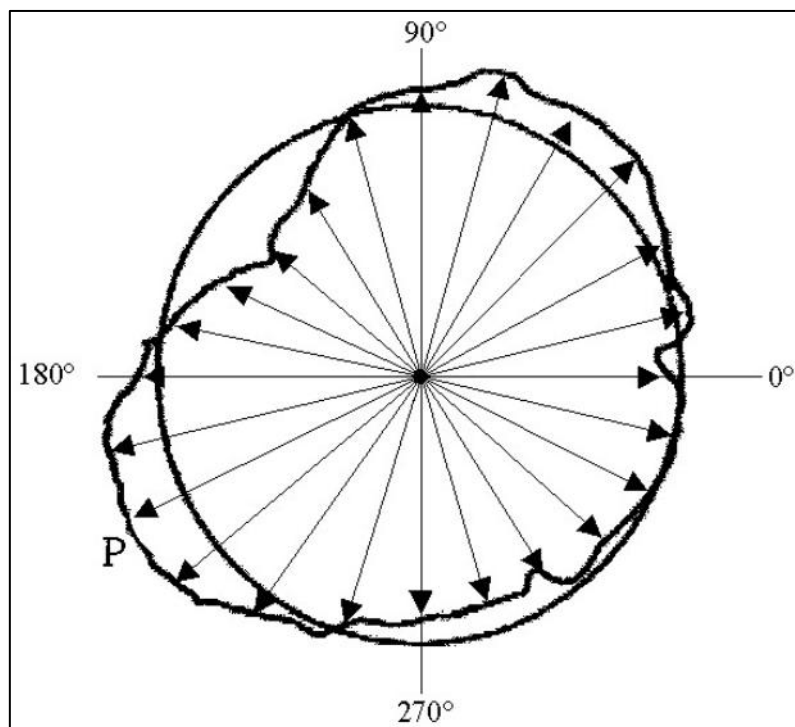


Figura 16: Peça com erro de circularidade (Taylor-Hobson, 2000).

Além disso, com base no trabalho de Shaji & Radhakrishnan (2003), a geometria produzida em uma superfície retificada dependerá, também, das características do rebolo, do material sendo usinado e também dos parâmetros do processo. Além disso, Yuan (1998) relata que a imprecisão da máquina ferramenta e

também as distorções térmicas do material durante a usinagem são fontes de erro de circularidade.

Com base nisso, quanto maior o calor na zona de corte maior dilatação e deformações térmicas ocorreram na peça um aumento nos erros geométricos, especialmente no erro de circularidade (Demeter & Hockenberger, 1997). Para que isso seja evitado, é conveniente, pois, o uso de refrigerantes no processo.

3.12.6. Forças de Corte no Processo de Retificação

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, na figura 6 é possível verificar esta atuação. 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 distribuição aleatória, diferentemente dos outros métodos de usinagem com ferramenta geometria definida, tais como os processos de torneamento e fresamento. (Choi *et al*, 2008).

Para Agarwal *et al.* (2013) a força de corte no processo de retificação tem uma função importante, pois ela influencia diretamente sobre o desgaste do rebolo, precisão da peça, temperatura e da integridade da superfície.

Liu *et al.* (2005) afirma que o monitoramento da força de retificação tem a vantagem de prevenir a redução da taxa de remoção de material além de diminuir o desgaste do rebolo. Isto é, os mecanismos de desgaste do rebolo fazem aumentar a área de contato do grão com a superfície da peça, consequentemente, aumentam-se os esforços de corte e diminui-se a capacidade de remoção do rebolo e também prejudica a manutenção da qualidade superficial durante operação (Lachance et al, 2004). Portanto, o monitoramento das forças de retificação mantém a topografia do rebolo adequada a operação, pois, é possível determinar o melhor momento para condicionar o rebolo para a operação.

Segundo Li *et al.*(2002), a força na retificação é uma das mais importantes variáveis em avaliar o processo como um todo. Geralmente essa força é decomposta, em três componentes: normal (F_n), tangencial (F_t) e uma componente

ao longo da direção de avanço longitudinal (axial - F_a), que não tem muita significância. A força tangencial afeta principalmente o consumo de energia e o tempo de vida de serviço do rebolo, o que acaba afetando também na temperatura e rugosidade superficial da peça trabalhada.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

Nessa seção são descritos todos os equipamentos e materiais utilizados nos ensaios, assim como a descrição dos procedimentos durante a experimentação.

4.1.1. Retificadora Cilíndrica externa

Os experimentos foram executados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa Sulmecânica, modelo RUAP 515 H ilustrada na figura 18.



Figura 17: Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica - RUAP 515 H

4.1.2. Mandril utilizado na fixação da peça

O mandril utilizado para fixar o corpo de prova na máquina, tornando possível uma usinagem entre pontas com precisão, para que os ensaios fossem realizados corretamente e os resultados obtidos dentro do esperado esta ilustrada na figura 19.

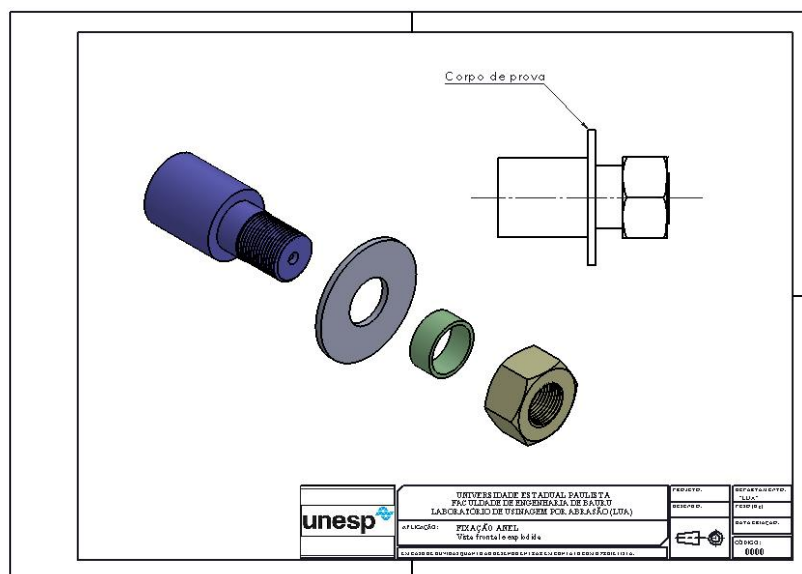


Figura 18: Desenho esquemático do mandril

4.1.3. Corpo de prova

Os corpos de prova que foram utilizados para os ensaios são feitos de aço VP50, fabricado e doado pela empresa VILLARES METALS por intermédio do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, da Universidade Federal de Uberlândia, sendo que esse aço é utilizado na fabricação de moldes para injeção de polímeros termoplásticos. As características do aço são: resistência ao desgaste e elevado grau de pureza, dureza de 40HRC, tendo 0,15% de Carbono, 0,3% de Silício, 1,55% de Manganês, 3% de Níquel, 1% de Alumínio, 1% de Cobre em sua composição.

As dimensões do corpo de prova são: diâmetro externo $75,0 \pm 0,1$ mm, diâmetro interno $30,0 \pm 0,1$ mm, espessura $4,0 \pm 0,1$ m. A figura 20 ilustra o formato do corpo de prova que foram usados neste experimento.



Figura 19: Ilustração do formato do corpo de prova usado

Além deste corpo de prova, foi utilizada outra peça para a impressão do rebolo, com o objetivo de medir seu desgaste. O material utilizado na confecção desse segundo tipo de corpo de prova é o aço ABNT 1045, não temperado. A escolha desse aço deve-se ao fato de ser um aço dúctil quando não temperado. Dessa forma a marcação do perfil desgastado do rebolo é facilmente feita neste material. As dimensões do tarugo são: 30 mm de diâmetro e um comprimento de 90 mm. Tais peças são remanescentes de trabalhos anteriores realizado no Laboratório de Usinagem por Abrasão, e para a função a que prestarão, encaixam-se bem (Figura 21).



Figura 20: Ilustração do tarugo utilizado para impressão do rebolo

4.1.4. Descrições dos rebolos utilizados

4.1.4.1. Rebolo de carbetto de silício preto com óxido de alumínio branco

O rebolo de carbetto de silício preto com óxido de alumínio branco fornecido pela empresa ABRASIPA, tem granulometria de 60mesh, dureza média, grãos meio unidos (estrutura 7) e ligante vitrificado. Normalmente os óxidos de alumínio sejam marrom, branco ou rosa, possuem a função de dar retificação em aços e suas ligas (cromo, molibdênio, titânio, manganês, etc.), por se tratar de uma mistura nova, não foram encontradas literaturas específicas sobre esse assunto podendo ser alvo de futuras pesquisas, porém será uma pauta de relevância para a análise dos resultados desta presente pesquisa. Com ligante vitrificado, seu grão apresenta elevada dureza e friabilidade, devido ao carbureto de silício e baixa tenacidade, porém alta dureza, advindos do óxido de alumínio, constituindo-se em uma combinação desses grãos em sua composição. O ligante vitrificado também é utilizado em retificação onde se deseja uma ótima qualidade no acabamento final das peças, onde normalmente são peças com ângulos e detalhes de acabamento muito precisos. A combinação dos grãos de óxido de alumínio branco e o carbetto de silício de granulometria média normalmente são usados em pequenas remoções de aços liga ou materiais metálicos, onde se deseja arrancar décimos de milímetros, com estrutura média para facilitar a refrigeração do rebolo durante o processo de retificação.

4.1.4.2. Rebolo de carbetto de silício verde (SiC)

O rebolo convencional de carbetto de silício verde fornecido pela empresa ABRASIPA (GC60L7V), com granulometria de 60mesh, dureza média, grãos meio unidos (estrutura 7) e ligante vitrificado. O rebolo de Carbetto de Silício possui elevada dureza, sendo indicado para a realização deste trabalho. Os grãos da família do carbetto de silício (preto ou verde) são indicados para materiais não ferrosos e suas ligas, aço inox e metais.

O rebolo de carbeto de silício verde é indicado especialmente para o trabalho em pastilhas de metal duro. Por ser uma forma cristalina mais pura que a do SiC comum, apresenta mais facilidade de ruptura dos seus cristais (DINIZ, *et al.* 2013).

4.1.4.3. Rebolo de óxido de alumínio branco

O rebolo de Óxido de Alumínio Branco, fabricado pela empresa ABRASIPA, e possui especificação AA 60L7 V201, fabricado com liga vitrificada, dureza média, possui grão de tamanho médio, com dimensões de 350,2mm de diâmetro externo, por 30,03mm de altura por 127,45mm de diâmetro interno. Segundo a empresa fabricante, esse rebolo é usado para metais não ferrosos, peças cromadas, aços com dureza entre 30 e 55 HRC, e alguns tipos de rebolos especiais para retificação de cilindros de borracha.

Os grãos de óxido de alumínio branco tendem a durar mais, mas produzem menor descoloração em peças de alumínio e são mais agressivos em certos tipos de aplicação, como em peças de aço endurecido. Produzem acabamento fosco (NORTON ABRASIVOS, 2014).

Na tabela 3 estão apresentadas as características principais de cada rebolo.

Tabela 4: Características dos rebolos utilizados

REBOLO	COMPOSIÇÃO	DIMENSÕES De x Di x h (mm)	ESTRUTURA	GRANULOMETRIA (mesh)	LIGANTE
Carbeto de silício verde	SiC	350x127x30	7	60	vitificado
Carbeto de silício preto com óxido de alumínio branco	SiC+ Al ₂ O ₃	350x127x30	7	60	vitificado
Óxido de alumínio branco	Al ₂ O ₃	350x127x30	7	60	vitificado

4.1.5. Dressador

A dressagem será realizada com dressador do tipo conglomerado, da empresa Master Diamond. Trata-se de um dressador cuja ponta é composta por diamantes em uma matriz metálica. As dimensões da pastilha são 15x8x10mm. É prevista uma penetração de 2 μ m por passada durante o perfilhamento até um valor correspondente à eliminação total da camada desgastada com velocidade de 100mm/min. As condições de dressagem do rebolo serão mantidas constantes para não influenciarem significativamente nos resultados. A figura 22 ilustra o dressador utilizado.



Figura 21: Dressador do tipo conglomerado

4.1.6. Sistema de refrigeração convencional

O sistema de refrigeração convencional utilizado é o mesmo utilizado em várias empresas atualmente. Consiste essencialmente na caixa reservatória de fluido, moto bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido de corte. A caixa reservatória tem capacidade de 80 litros. As partes estão representadas na figura 23.

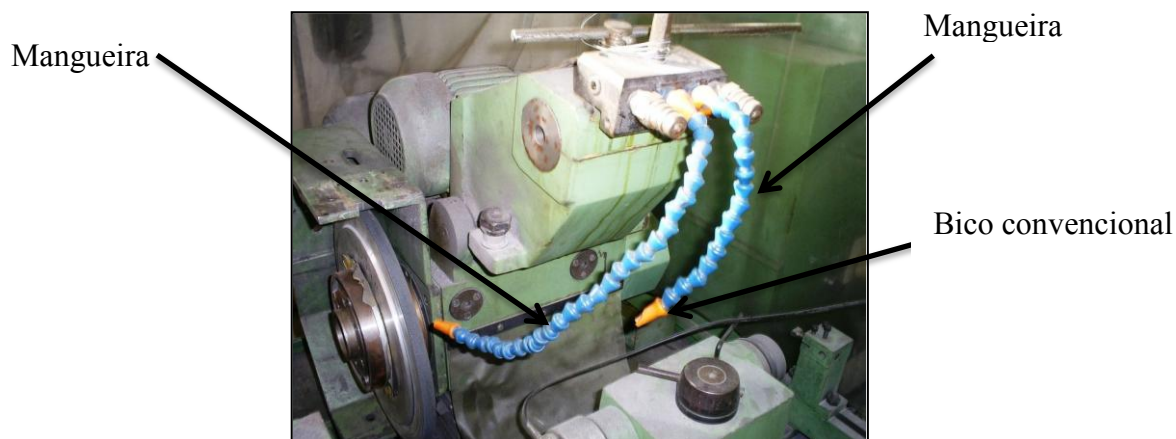


Figura 22: Mangueiras utilizadas na aplicação convencional do fluido de corte

4.1.7. O sistema de MQL

O sistema MQL é composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para sua utilização na retificação. O equipamento de mínima quantidade de lubrificante permite uma fina regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha, atomizando-o em um fluxo de ar à pressão constante de 6,5 kgf/cm², aproximadamente.

A figura 24 mostra a unidade de controle do equipamento de MQL, onde são feitas a dosagem do óleo lubrificante e a regulagem da vazão de ar comprimido. Na figura 25, encontra-se o bocal desenvolvido e utilizado na experimentação da técnica MQL no processo de retificação.

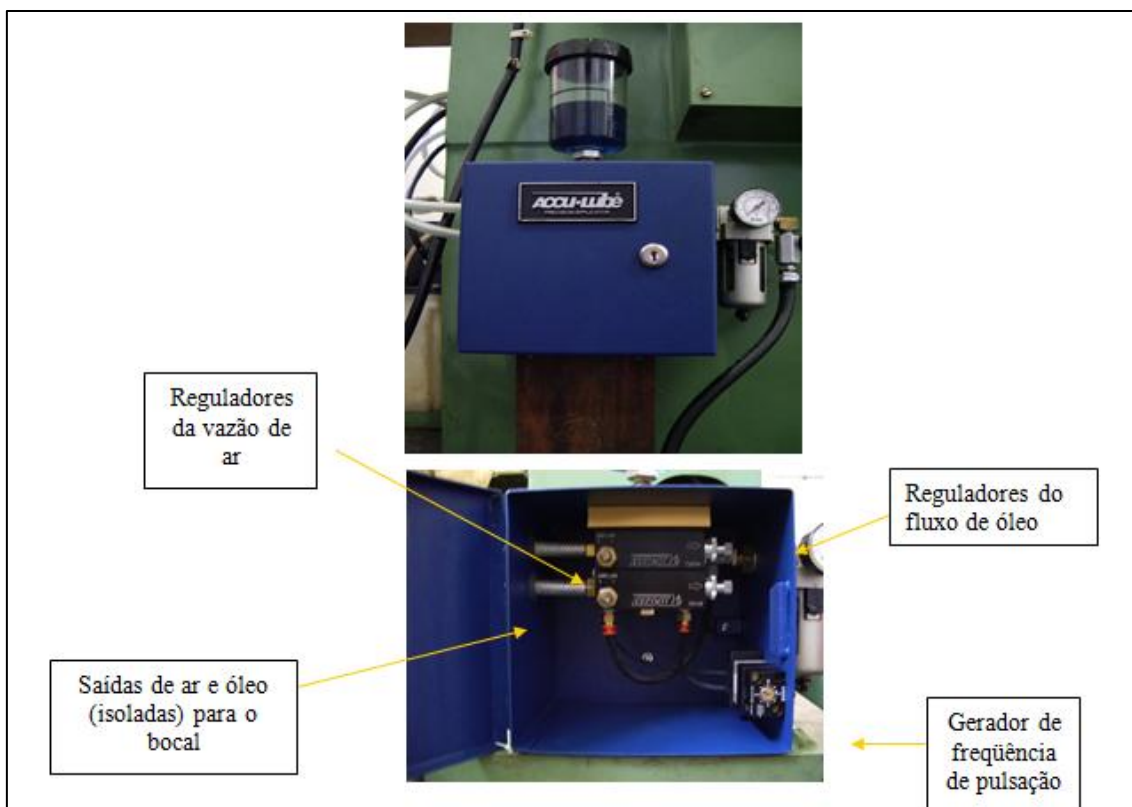


Figura 23: Unidade de controle do MQL

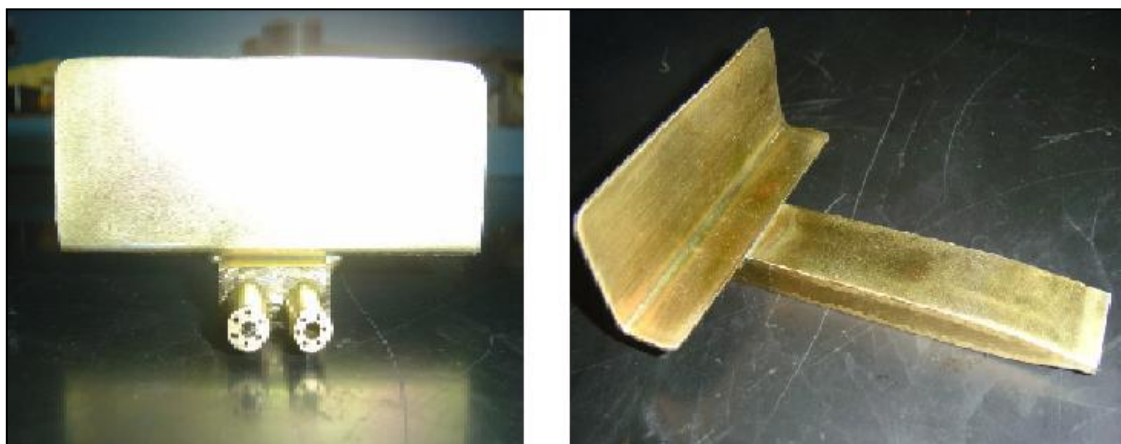


Figura 24: Duas vistas do bocal para experimentação com MQL

Para a medição precisa das vazões de ar comprimido utilizadas nos experimentos, é necessário um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro, mostrado na figura 26. O medidor de vazão é conectado a uma rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em m^3/h .

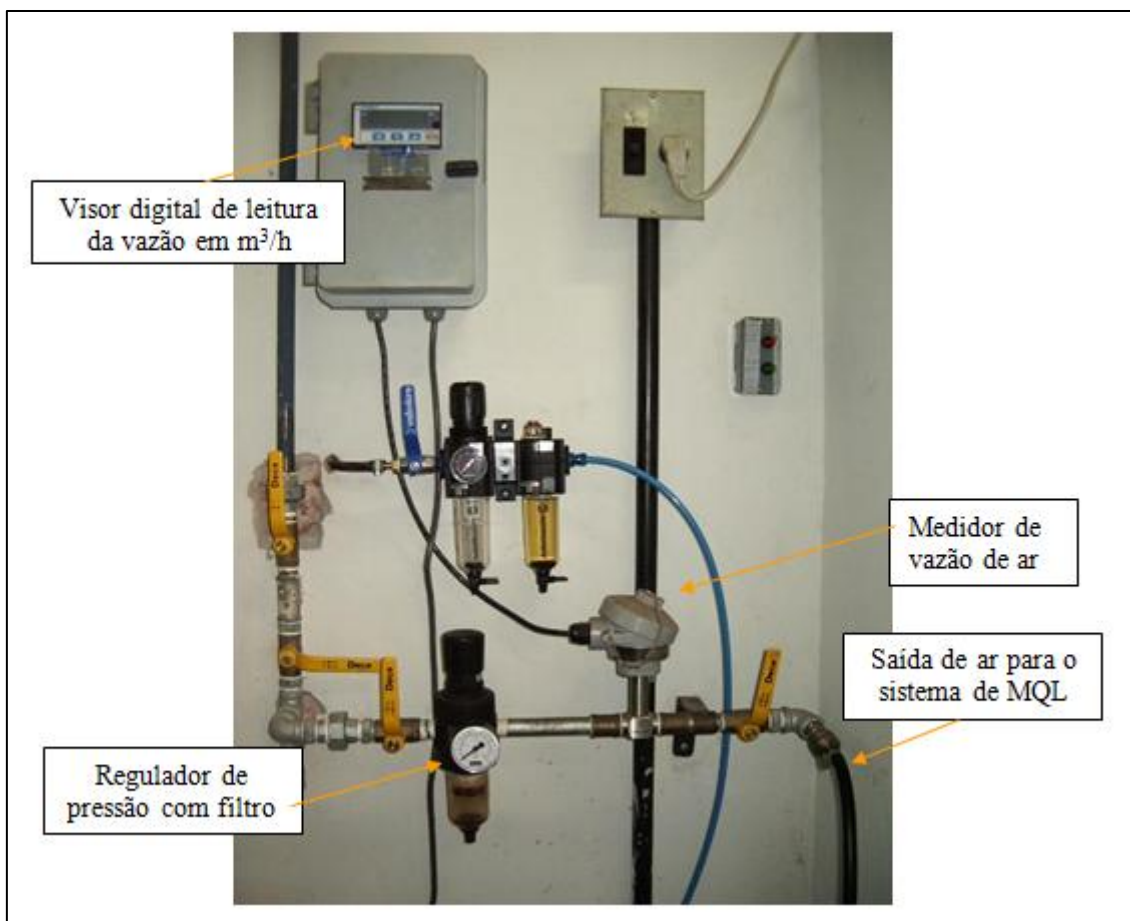


Figura 25: Sistema de ar comprimido para o MQL

O fluido de corte utilizado na MQL foi o óleo Accu-Lube LB 1000, fornecido pela empresa ITW Chemical Products Ltda

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Planejamento dos ensaios

Para realização dos ensaios foram utilizados três tipos de rebolos, onde para cada tipo de reboło foram realizados seis ensaios, sendo três com aplicação do método de lubri-refrigeração convencional e outros três com aplicação de mínima quantidade de fluido (MQL), a uma vazão de 120 ml/h, com ar à pressão constante de 6,5 kgf/cm².

Para cada tipo de refrigeração utilizado, foram utilizadas três velocidades diferentes de avanço com velocidade de corte fixa em 30 m/s.

Na figura 27 esta representada a matriz dos ensaios realizados nesta pesquisa.

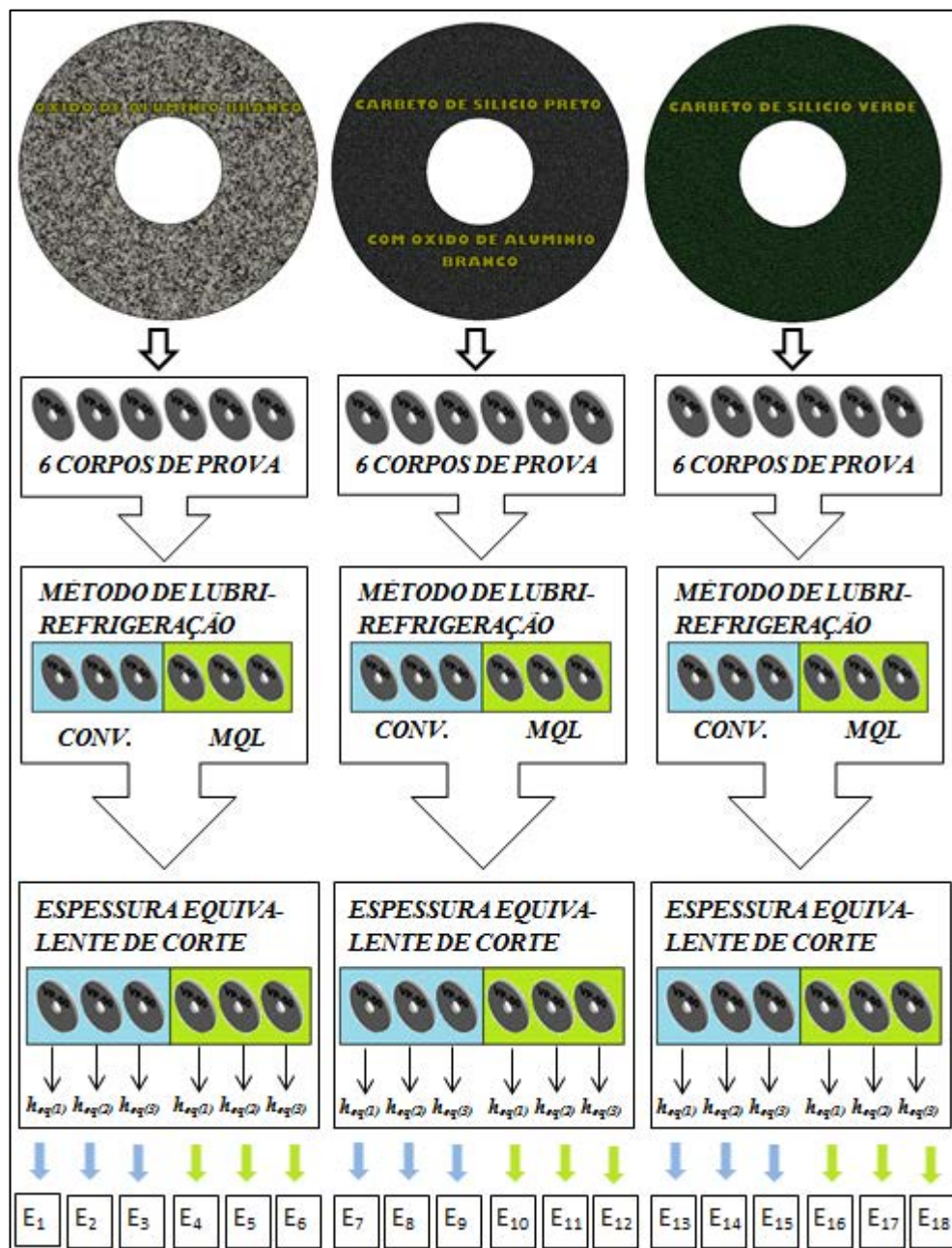


Figura 26: Matriz de realização dos ensaios

Foram realizados dezoito ensaios sendo seis para cada tipo de rebolo e três para cada tipo de lubri-refrigeração, onde variou-se as velocidades de mergulho. Para os experimentos foram estabelecidas as seguintes condições de usinagem: velocidade de corte (v_s) de 30m/s, diâmetro da peça (d_w) de 75mm e as três velocidades de mergulho escolhidas foram 0,25mm/min, 0,50mm/min e 0,75mm/min. Desse modo,

de acordo com a equação (10), as três espessuras equivalentes de corte ora denominadas por $h_{eq(1)}$, $h_{eq(2)}$ e $h_{eq(3)}$ foram: $h_{eq(1)}=0,0327\mu\text{m}$, $h_{eq(2)}=0,0654\mu\text{m}$ e $h_{eq(3)}=0,0981\mu\text{m}$.

4.2.2. Aquisição de Dados

A aquisição dos dados foi realizada através de um computador com placa de aquisição de dados A/D e software LabVIEW versão 7.1 do fabricante National Instruments. Os parâmetros que foram coletados são: potência elétrica (Pelet) consumida pelo motor de acionamento do rebolo, rotação da ferramenta (n) e emissão acústica (EA).

As aquisições dos dados foram realizadas em tempo real e armazenadas através do software na forma de tensão (V) para posterior manipulação dos dados através do software MatLab, da empresa MathWorks.

Os dados de rotação e potência elétrica consumida que foram gerados durante o processo de retificação serão transmitidos à placa de aquisição de dados através de um circuito condicionador de sinais que possuía bornes de entradas para o recebimento dos dados. Na figura 28 é demonstrada a montagem dos equipamentos para a aquisição dos dados.

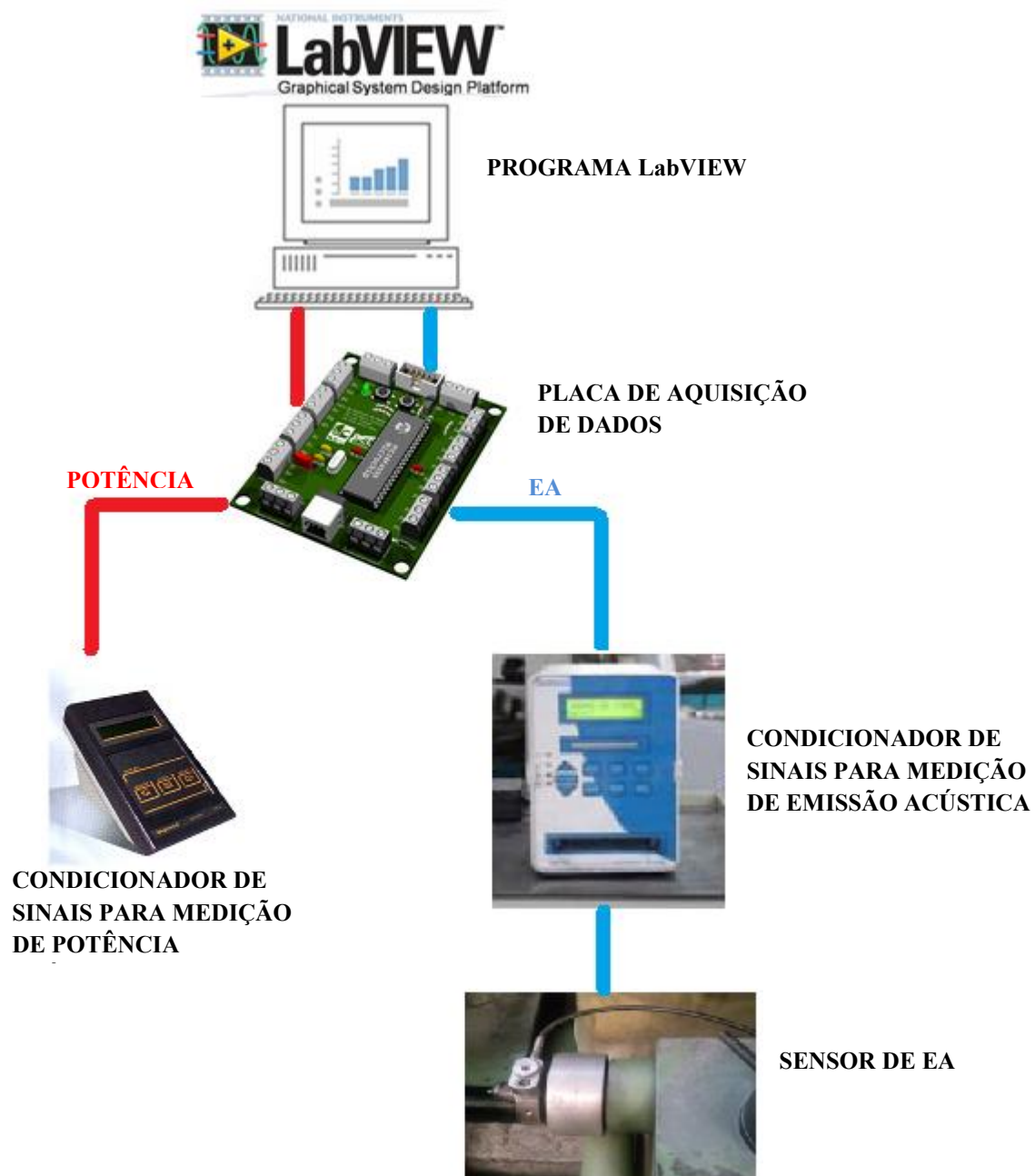


Figura 27: Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados

Para a manipulação e armazenamento dos dados foi desenvolvido no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) um programa no LabVIEW que fornece uma tela de apresentação para aquisição dos dados.

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.

4.2.3. Força tangencial de corte

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

Para isso, encontra-se disponível no LUA um módulo eletrônico, denominado Curvopower, projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem por abrasão da faculdade de Engenharia de Bauru, sob coordenação do Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, sendo utilizado para transformação dos valores de corrente elétrica e tensão (provenientes do motor) em sinais de tensões compatíveis, para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se o software LabView 7.1®, da National Instruments®.

Na figura 29 é possível verificar de forma esquemática como é feita a obtenção da força tangencial de corte.

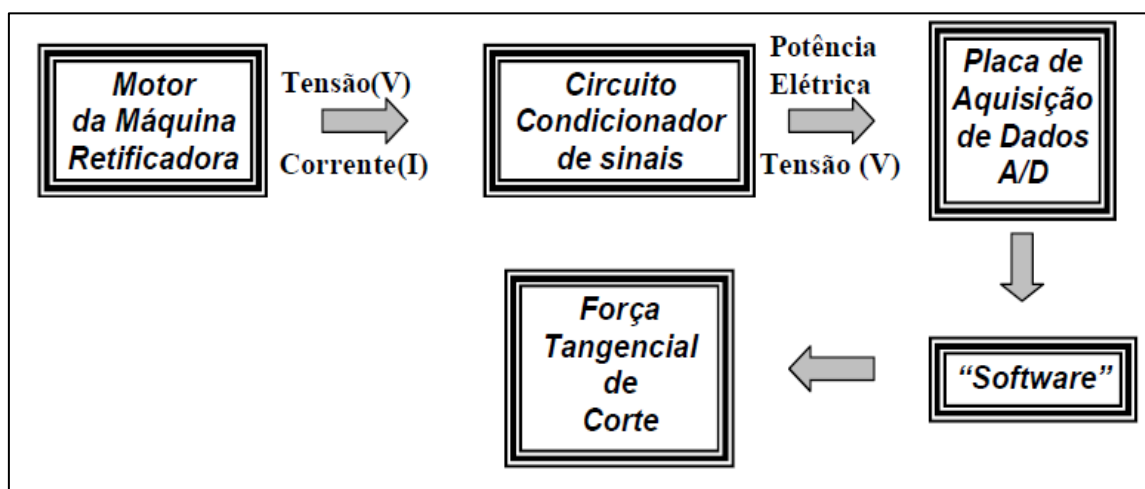


Figura 28: Esquematização da obtenção da força tangencial de corte.

4.2.4. Emissão acústica

A medição da emissão acústica foi feita com a utilização de um módulo DM12, da marca *Sensis*, com um sensor fixo que foi posicionado no cabeçote móvel da retificadora próximo do contraponto, com o intuito de detectar as possíveis variações deste sinal e sua relação com as outras variáveis de saída. A figura 30 mostra o sensor fixado no cabeçote móvel da retificadora.



Figura 29: Sensor para captação da emissão acústica

4.2.5. Circularidade

A circularidade foi obtida através da utilização de um medidor de circularidade, modelo Talyrond 31C, marca Taylor Hobson, conforme figura 31.

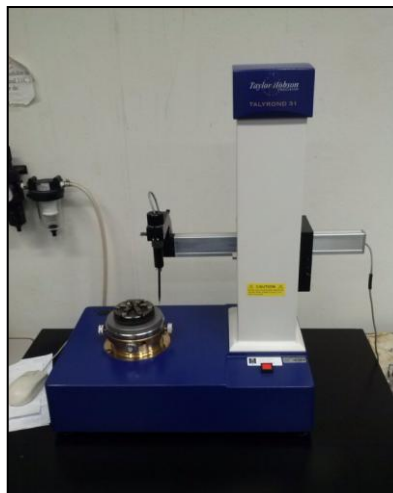


Figura 30: Medidor de circularidade utilizado

4.2.6. Rugosidade

A medição da rugosidade superficial foi obtida através de um rugosímetro Surtronic3+, da marca Taylor Hobson, conforme mostrado na figura 32, que fará a medição da rugosidade média (R_a) dos corpos de prova usinados e foram comparadas segundo a velocidade de avanço e o método de lubri-refrigeração utilizado. Cada peça foi medida 3 vezes com uma variação de ângulo de 120° entre cada medição.



Figura 31: Exemplo de operação de medição da rugosidade

4.2.7. Desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo foi medido por meio do método de impressão do perfil do rebolo desgastado em um corpo devidamente preparado para tal fim. O método consiste na retificação do corpo, retirando um volume fixo de material.

Feito isso, os desníveis existentes entre as regiões gastas e não gastas do rebolo serão repassados ao corpo retificado, que será então medido pelo rugosímetro Surtronic3+, utilizado juntamente com o software TalyMap, ambos da Taylor Hobson.

4.2.8. Microdureza

Foram realizadas aplicações de diferentes cargas a fim de se definir a carga a ser aplicada nos ensaios de microdureza. Após a definição da carga realizou-se a aplicação de 300 g de carga durante 40s obtendo-se, desta maneira, a microdureza após as usinagens.

4.2.9. Microscopia óptica

O objetivo para a realização dos ensaios de microscopia é observar se há alterações microestruturais no material, devido às diferentes condições utilizadas nos ensaios realizados. As análises de microestrutura serão realizadas no laboratório de materiais da própria Faculdade de Engenharia de Bauru, necessitando apenas de uma devida preparação dos corpos de prova.

No processo de preparação para análise metalográfica, foi utilizado o ácido com a seguinte composição: 57, 69% de HCl, 19, 23% de HNO₃, 3, 85% de HF e 19, 23% de água destilada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada experimento de retificação realizado. As variáveis de saída: potência de usinagem, emissão acústica, desgaste diametral. Para os resultados de análise da integridade estrutural foram avaliados a microestrutura, a circularidade, a rugosidade e a microdureza.

5.1. Rugosidade

Na figura 33, são apresentadas as medições da rugosidade de acordo com cada tipo de rebolo apresentadas em rugosidade média R_a de cada peça, comparando-se segundo a sua velocidade de avanço e tipo de lubri-refrigeração. A superfície de cada peça foi medida 3 vezes, com uma distância de 120° entre as posições medidas.

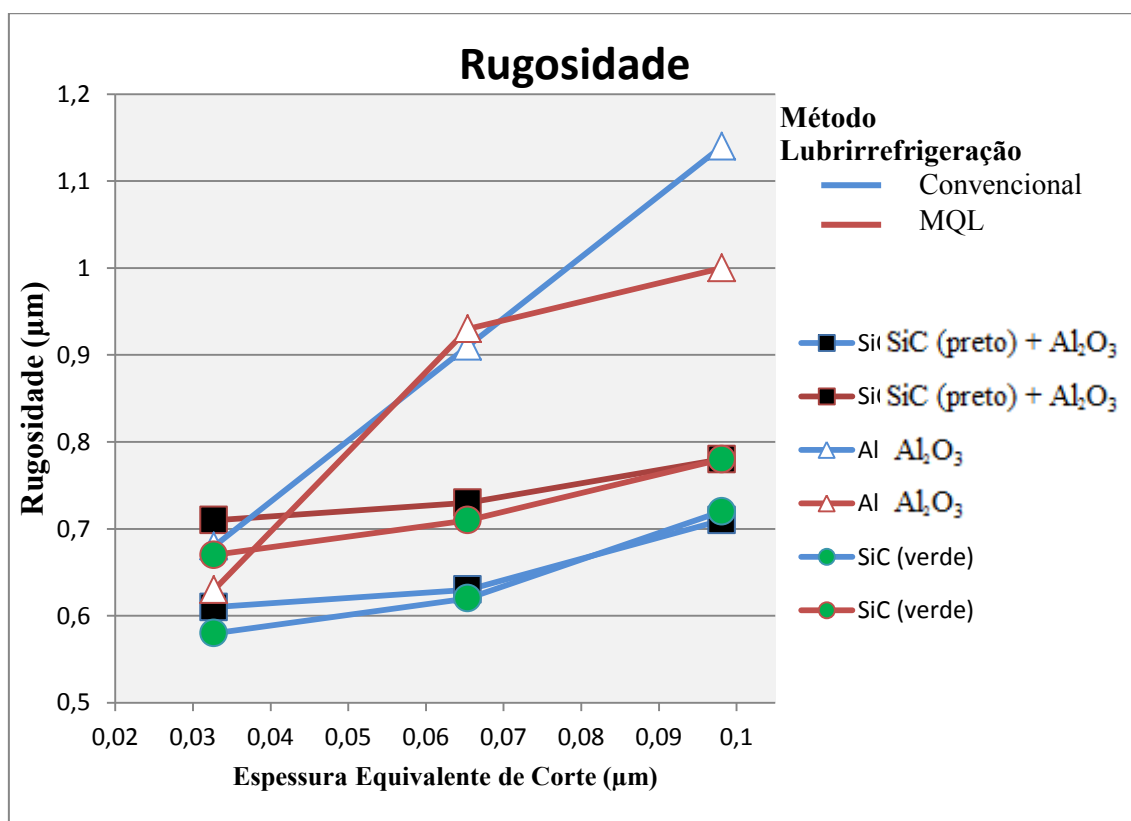


Figura 32: Comparação das medições de rugosidade

Pode-se observar inicialmente que os valores de rugosidade para os três tipos de rebolo, estão abaixo do valor caracterizado como aceitável para o processo de retificação que é de $1,6\mu\text{m}$ (Malkin, 2008). Conforme há o aumento da velocidade de

avanço, os valores médios da rugosidade aumentam a taxa de remoção de material, aumentando a estrutura do cavaco como pode ser verificado na equação utilizada por Graf (2010).

Na condição de lubri-refrigeração convencional onde se tem um maior fluxo de fluido que elimina os cavacos da área de corte com maior eficiência na refrigeração, esta condição é importante para exatidão geométrica, dimensional e para a baixa rugosidade na peça, como podemos observar.

É possível notar que com o aumento da espessura equivalente de corte a situação de corte torna-se mais severa elevando um pouco os valores de rugosidade.

Isso ocorre pelo fato de que na retificação com MQL, embora a quantidade de fluido utilizado seja substancialmente menor do que na retificação com refrigeração convencional, a forma de aplicação é mais eficiente. A explanação para isto esta no fato de que no MQL, a velocidade de mistura ar-óleo entra na região de corte com a mesma velocidade periférica do rebolo, assim acontece a quebra da barreira aerodinâmica do ar em torno do rebolo, facilitando assim a sua penetração. Isto não ocorre na convencional, uma vez que o desvio de jato do fluido impede a sua penetração na área de contato rebolo-peça. A porosidade natural do ligante vitrificado também contribui para o alojamento dos cavacos, facilitando o fluxo do MQL. Assim, o fluido de MQL sendo aplicada na mesma velocidade periférica do rebolo, a penetração do mesmo na zona de contato rebolo/peça é tão eficiente quanto à utilização do fluido convencional a baixas velocidades de aplicação com alta vazão.

Segundo Attanasio (2006), a condição convencional tem um maior fluxo de fluido e elimina os cavacos da zona de corte mais eficientemente. A eficiência da refrigeração é importante para a exatidão geométrica, dimensional e para a baixa rugosidade na peça. Sendo assim este método apresenta uma efetividade muito boa quando se trata de rugosidade.

5.2. Circularidade

A figura 34 apresenta os valores dos desvios de circularidade expressos em micrometros (μm) em função do tipo de rebolo, espessura equivalente de corte e o método de lubri-refrigeração.

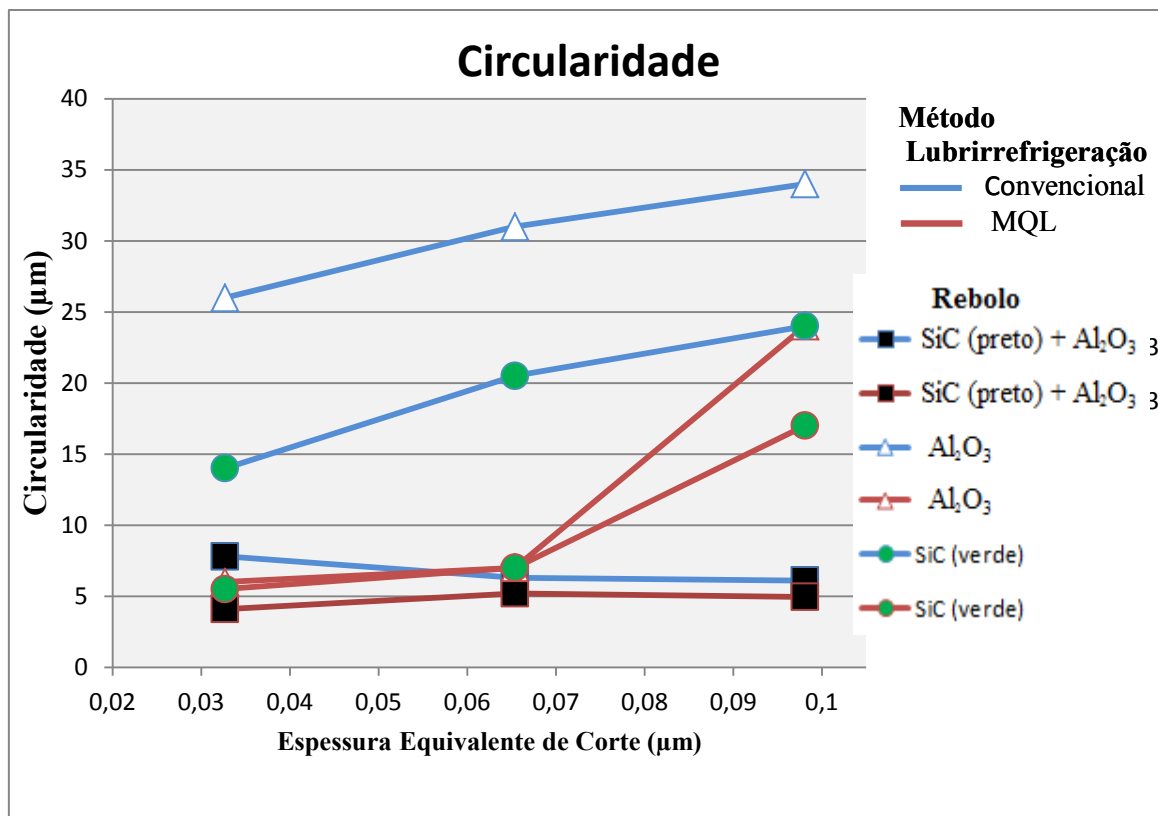


Figura 33: Comparação das medições de circularidade

No processo de retificação o desgaste do rebolo está diretamente ligada ao tipo de lubrificação utilizada, no caso do rebolo convencional de carbeto de silício preto com óxido de alumínio branco o método de lubrificação MQL apresentou os melhores valores de circularidade. Segundo Minke (1999), os elevados atritos gerados durante o processo de retificação (principalmente entre a peça e o rebolo), podem ser considerados um fator de extrema importância para o aparecimento dos erros de circularidade, sendo que para a redução destes atritos, um fluido com boa capacidade lubrificante, além da refrigerante é recomendável, a fim de se melhorar a qualidade final da peça retificada.

Já com a utilização dos rebolos de óxido de alumínio branco e carbeto de silício verde, analisando de forma geral os gráficos, observa-se uma tendência de aumento de desvio de circularidade em proporção do aumento da velocidade de avanço. Maiores velocidades de corte ocasionam maiores taxas de remoção de material e espessuras equivalentes de corte, fato que altera a rigidez do processo, aumentando o seu desvio de circularidade. Com a utilização desses dois rebolos é possível notar que com a utilização do MQL, os erros de circularidade também aumentam conforme o

aumento da velocidade de avanço, porém sempre com valores abaixo dos aquisitados nos ensaios utilizando lubri-refrigeração convencional.

De acordo com Fusse (2005), os erros de circularidade relacionam-se com as condições de retificação, à forma de aplicação de fluido de corte, às solicitações mecânicas e à energia térmica empregada no processo. Assim, como a aplicação da técnica MQL promove uma baixa lubrificação no contato peça- ferramenta, aumentando a força de corte atuante no processo em relação à lubrificação convencional, há um maior teor de energia térmica e força de corte envolvida no processo, influenciando positivamente à redução do desvio de circularidade.

5.3. Desgaste diametral do rebolo

Em relação ao desgaste diametral dos rebolos, a figura 35 mostra os dados obtidos em função da espessura equivalente de corte e do método de lubri-refrigeração utilizado. É possível observar que com a utilização da lubri-refrigeração por MQL o desgaste diametral do rebolo diminui consideravelmente.

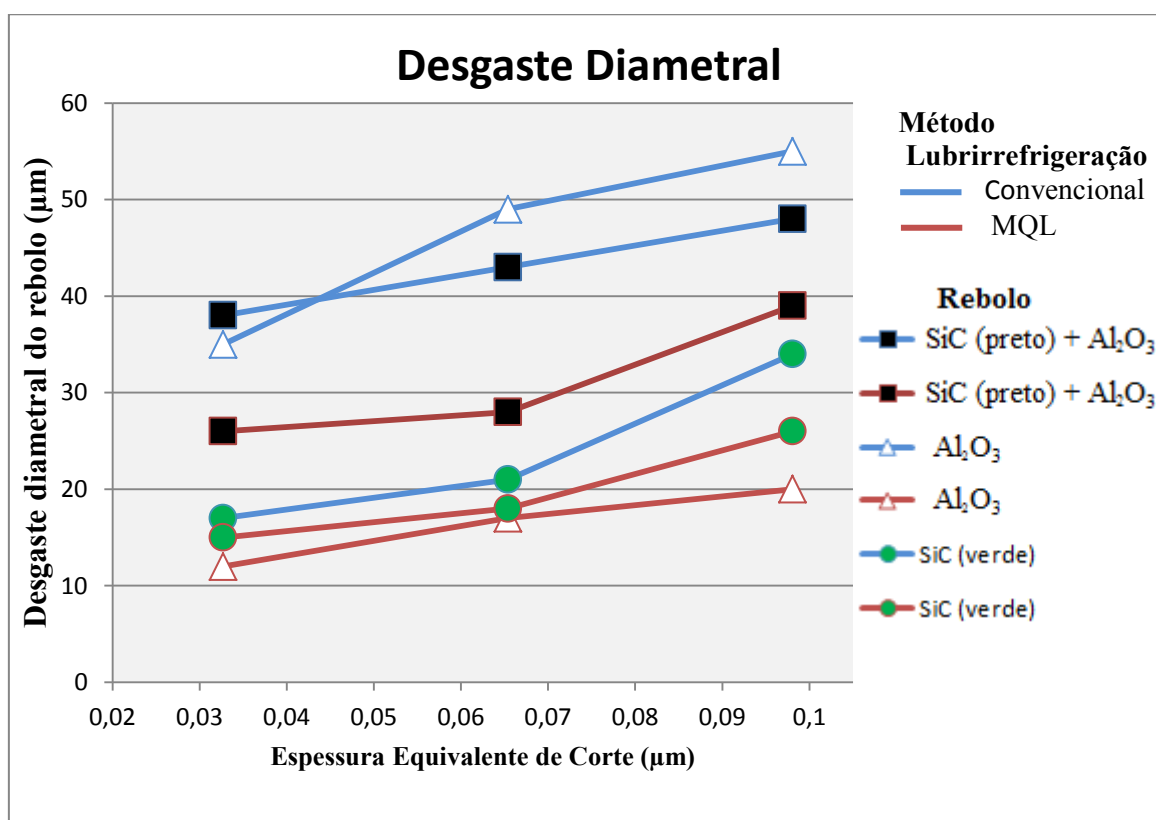


Figura 34: Comparação das medições de desgaste diametral

O desgaste do rebolo é diretamente ligado à lubrificação utilizada, possibilitando que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo fixado ao rebolo (Iceri, 2012).

Pode-se verificar que quando são utilizados ambos os processos de lubrificação, a tendência do comportamento do desgaste diametral do rebolo é o mesmo; ou seja, há o aumento desta variável conforme a espessura de corte equivalente aumenta.

Com o aumento da espessura de corte equivalente, há também um aumento no atrito na região rebolo/peça, o que, segundo Malkin (2008) é o principal fator de desgaste do rebolo.

Observa-se que os valores de desgaste são coerentes com os valores de potência, ao se comparar ensaios com mesma velocidade de avanço, porém com fluidos diferentes, pois onde há maior desgaste, os níveis de potência são menores, pois os grãos não permanecem por muito tempo no rebolo, ou seja, se desprendem facilmente, o que reduz a potência aquisitada.

Os valores de desgaste com a utilização do MQL são menores devido ao melhor efeito lubrificante deste, que reduz o atrito na região de contato entre peça e rebolo, diferentemente do método convencional, que por sua vez possui melhor efeito refrigerante do que lubrificante, não sendo tão efetivo na redução de atrito e atuando melhor na remoção de calor. Segundo Malkin (2008), o desgaste diametral do rebolo é ocasionado pela deterioração térmica e da elevada sollicitação mecânica a que o rebolo é submetido. Portanto, quanto menor a dissipação térmica da região de corte, maior é a perda de resistência do ligante, consequentemente, maior o desgaste do rebolo. Nos processos de retificação onde foram utilizados os rebolos de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco e o rebolo de carbeto de silício verde, a técnica MQL foi mais eficiente na redução do desgaste em comparação com a técnica convencional, além do padrão esperado de aumento de desgaste com o aumento do avanço, que naturalmente gera um maior atrito na região de contato ferramenta-peça, acarretando num aumento do desgaste sofrido pelo rebolo.

Para Diniz (2013), se o desgaste (ou perda diametral) do rebolo é o mecanismo que predomina, depois de um certo tempo de usinagem, deve ser reposicionado para evitar que a peça saia da sua faixa de tolerância. Além disso, o rebolo nunca perde a diâmetro de uma forma homogênea (torna-se oval), o que gera

desvios de forma na peça. Neste caso, mesmo que ainda esteja bastante agressivo, o rebolo precisa ser dressado, para ter restituída a sua forma original.

De acordo com Malkin (2008) há três principais mecanismos de desgaste do rebolo que são: por atrito, pela fratura dos grãos abrasivos e do aglomerante. Destes, o desgaste por atrito, na maioria das vezes é o mais importante, pois controla as forças de corte e a taxa de fratura do aglomerante, embora resulte em uma pequena contribuição na quantidade de desgaste volumétrica total do rebolo.

5.4. Potência de corte na retificação

Neste item são apresentados os resultados da potência de retificação (W) em função dos tipos de rebolos e das condições de lubri-refrigeração utilizadas. Através da manipulação e conversão dos dados obtidos em tempo real durante os ensaios, construíram-se gráficos para as potências de corte conforme podemos observar na figura 36.

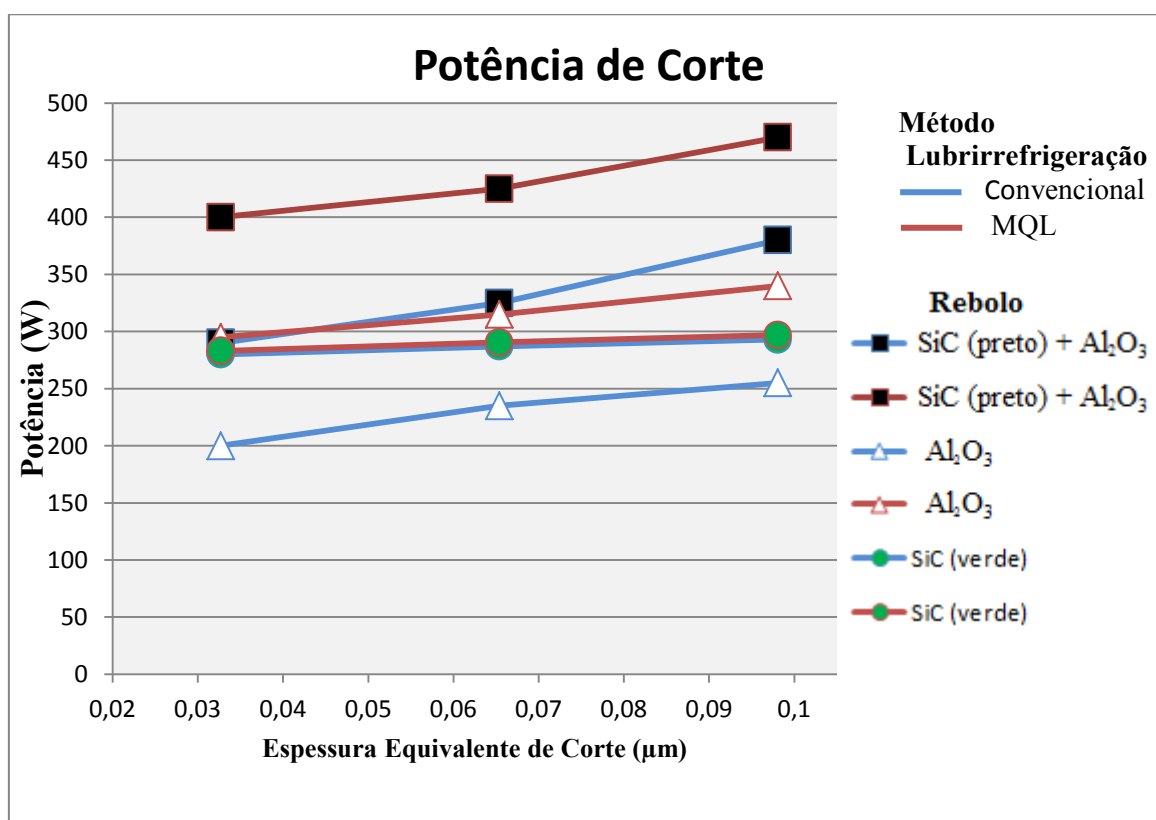


Figura 35: Resultados de potência de corte pela espessura equivalente

No ensaio utilizando o rebolo de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco, e o método de lubri-refrigeração MQL notou-se que houve uma maior componente tangencial contrária à rotação do rebolo, aumentando, assim a potência de usinagem.

Já nos ensaios onde foram utilizados o rebolo de óxido de alumínio branco e o rebolo de carbeto de silício verde, nas condições dos ensaios realizados, não houve alterações dos valores de velocidades relacionadas diretamente com a Potência, sendo que a única variável que foi alterada durante os ensaios foi a força tangencial de corte. Assim, é de se esperar que com o aumento da espessura equivalente de corte, ocorra o aumento da força de corte tangencial devido ao atrito, proporcionando um aumento na potência, este comportamento é observado em ambos os tipos de lubri-refrigeração. Entretanto, se o rebolo sofre um maior desgaste, a taxa de formação de arestas de corte é muito grande, sempre deixando uma área de contato de grão com a peça pequena, diminuindo a força de corte envolvida no processo (King & Hahn, 1992), o que naturalmente causa uma menor potência envolvida.

5.5. Emissão acústica

Na figura 37, são mostrados os resultados da emissão acústica (RMS) em Volts (V) em função das condições de lubri-refrigeração.

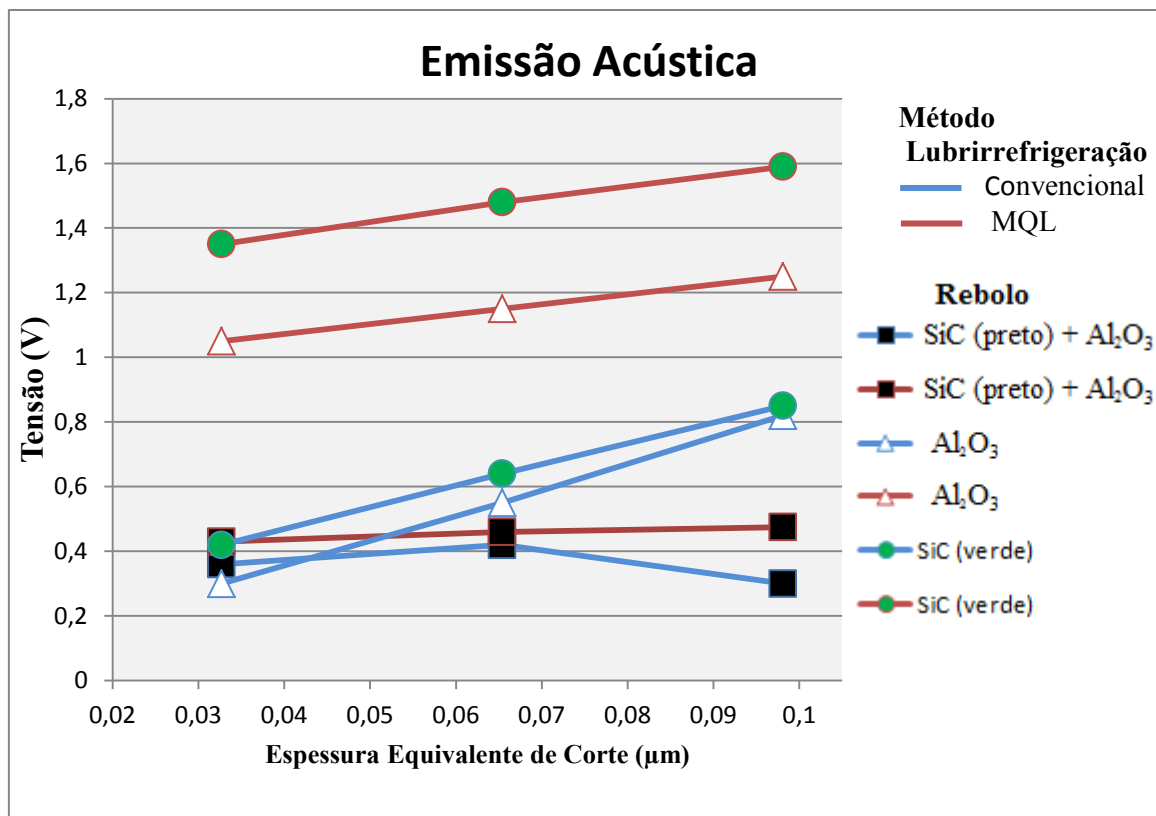


Figura 36: Comparação da emissão acústica

De acordo com Babel (2013), a emissão acústica engloba características referentes a fenômenos como a formação de cavacos, atrito, fratura de ligante e a transição de fase termomecânica ativa. A emissão acústica pode ser definida como ondas de tensão elásticas, geradas pela liberação de energia de deformação dentro do material (Liu, 1991).

De uma forma geral, na utilização dos três tipos de rebolos é notada a maior liberação de energia na lubrificação com MQL, devido a fatores tais como a formação de cavaco e a menor dissipação de temperatura pela pouca refrigeração do óleo. Entretanto, é perceptível o decréscimo da emissão acústica com o aumento da V_f para o MQL e o seu respectivo aumento para a refrigeração convencional, fator esse que ocorre devido à influência do atrito que é reduzido de acordo com o padrão exibido pelo gráfico de potência envolvida no processo.

Tanto nos ensaios onde foi utilizado o método convencional de lubrificação, como nos ensaios onde foi utilizado o MQL, há um aumento dos valores de emissão acústica conforme a velocidade de avanço aumentou.

É possível verificar que há maior liberação de energia na lubrificação com MQL, devido a fatores tais como a formação de cavaco, a menor dissipação de

temperatura pela pouca refrigeração do óleo e a menor ação de lubrificante que o MQL tem em comparação ao método convencional. Entretanto, é perceptível o acréscimo da emissão acústica com o aumento da espessura equivalente de corte para o MQL e seu respectivo aumento para a refrigeração convencional, fator esse que ocorre devido à influência do atrito que é reduzido.

5.6. Análise metalográfica

Para detectar possíveis variações microestruturas nas peças retificadas utilizando-se os três tipos de rebolos, foi feita análise metalográfica. Os corpos de prova foram submetidos aos devidos ataques químicos para avaliações microscópicas. Foi tirada uma fotografia da microestrutura no interior da peça (figura 38), sem retificação, para fins de comparação com as fotos da superfície analisada.

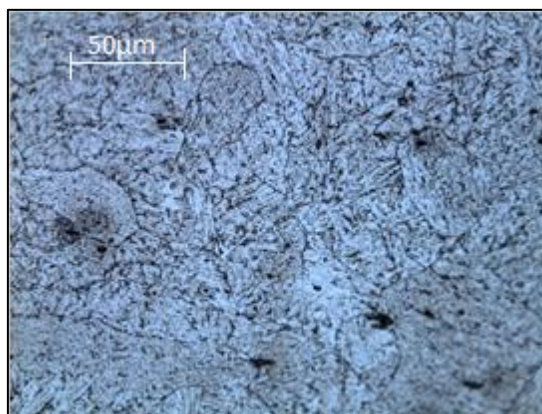
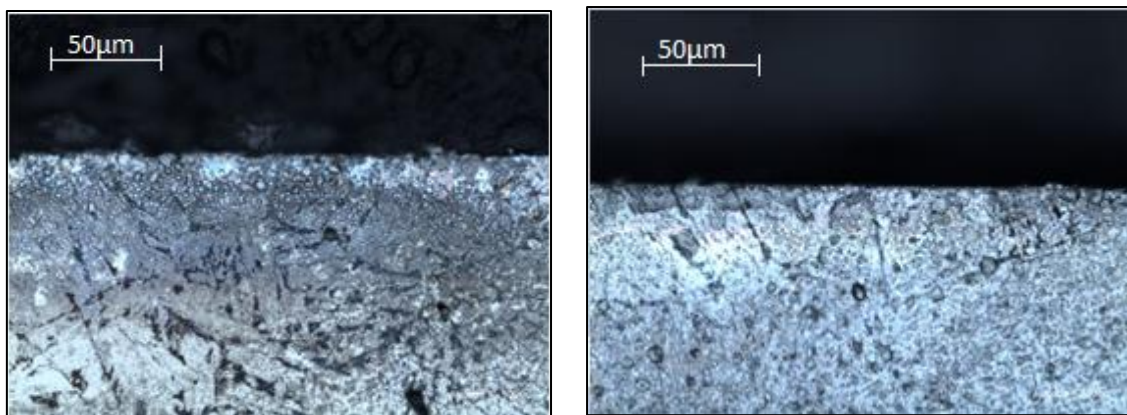


Figura 37: Fotografia da estrutura na região central sem retificação.

É possível verificar que a microestrutura apresentada pelo aço VP50 fornecido é homogênea.

As figuras a quais representam metalografias em diferentes condições de lubri-refrigeração para diferentes espessuras de corte equivalente após o processo de retificação com cada um dos três rebolos são apresentadas a seguir.

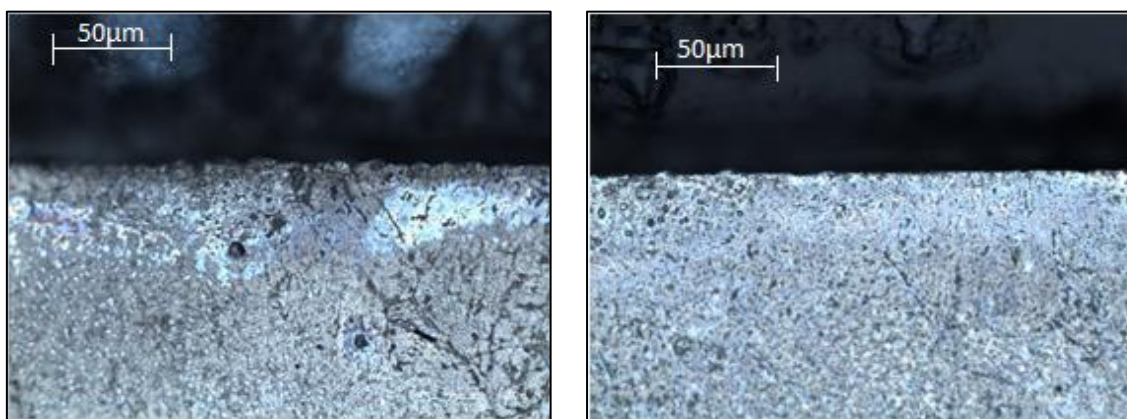
As figuras 39, 40 e 41 representam metalografias do corpo de prova após o processo de retificação com o rebolo convencional de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco.



(a)

(b)

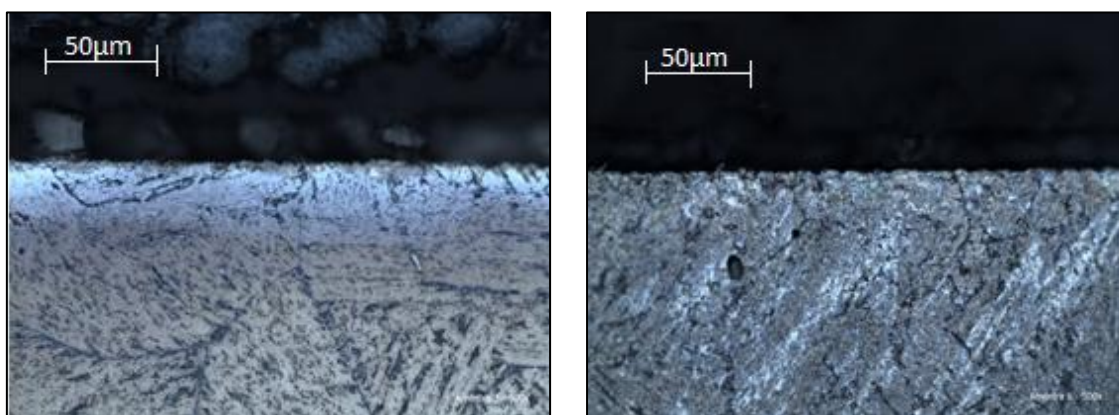
Figura 38: Micrografia dos ensaios com $v_f = 0,25\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL



(a)

(b)

Figura 39: Micrografia dos ensaios com $v_f = 0,50\text{mm/min}$, ampliada (a) Convencional, (b) MQL



(a)

(b)

Figura 40: Micrografia dos ensaios com $v_f = 0,75\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL

Fazendo uma análise geral, não foi encontrada nenhuma evidência que demonstre que houve algum dano térmico nas amostras, isso mostra que o conjunto rebolo mais os dois tipos de refrigeração usados, foram eficientes para evitar qualquer tipo de queima.

Por outro lado, é observável a formação de algumas inclusões na superfície, aparecendo em maior ou menor quantidade em quase todas as superfícies analisadas, essas inclusões podem ter surgido de uma provável reação entre os diversos elementos presentes no aço VP50, que são C, Si, Mn, Mo, Ni, Al, Cu, S, durante o processo de retificação. A figura 42 mostra o perfil destacado dessas inclusões formadas.

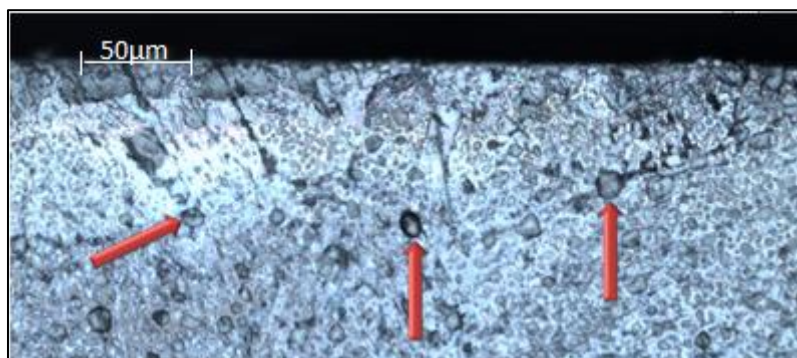


Figura 41: Destaque de inclusões na superfície da amostra

As figuras 43, 44 e 45 representam metalografias do corpo de prova após o processo de retificação com o rebolo de óxido de alumínio branco.

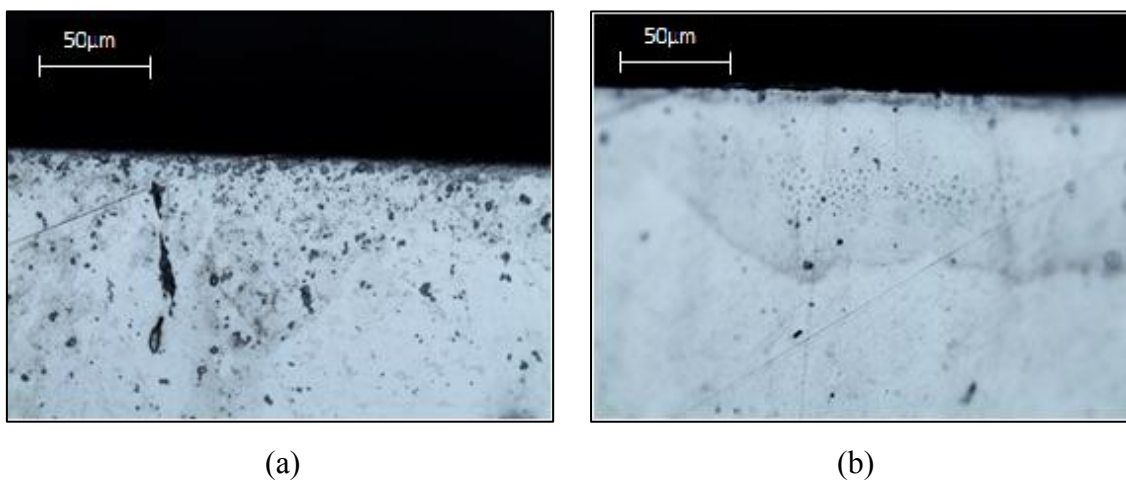


Figura 42: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,25\text{mm/min}$, ampliada (a) Convencional, (b) MQL

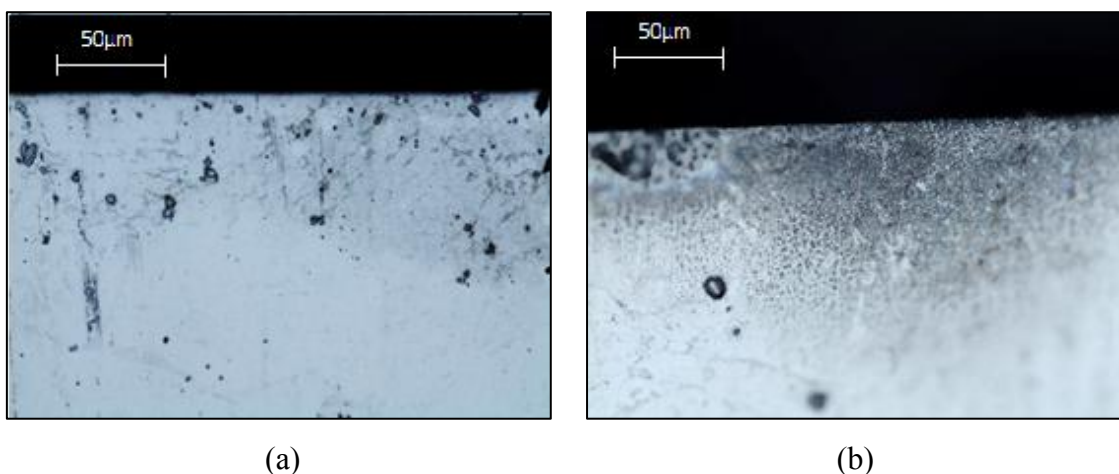


Figura 43: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,50\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL

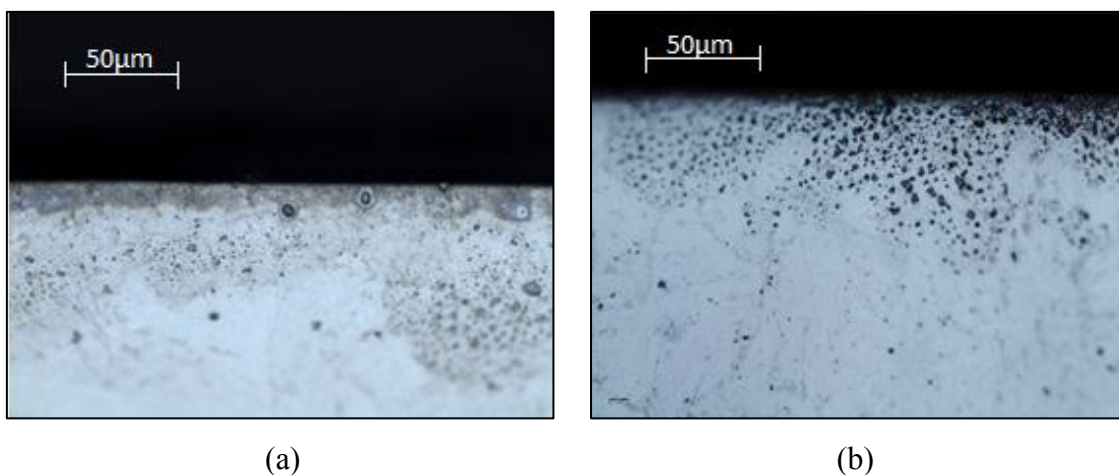


Figura 44: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,75\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL

Após análise da metalografia do processo de retificação nos corpos de prova utilizado nos três tipos de rebolo, é possível afirmar que não houve dano térmico, apesar do rebolo de óxido de alumínio possuir uma baixa condutividade térmica, a refrigeração em ambos os métodos foram suficientes para evitar qualquer tipo de queima.

As figuras 46 e 47 representam metalografias do corpo de prova após o processo de retificação com o rebolo de carbeto de silício verde.

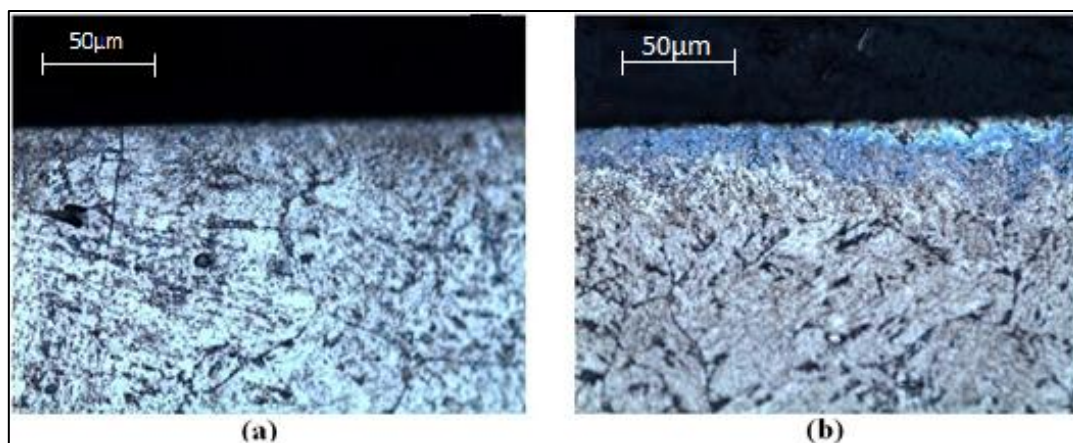


Figura 45: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,25\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL

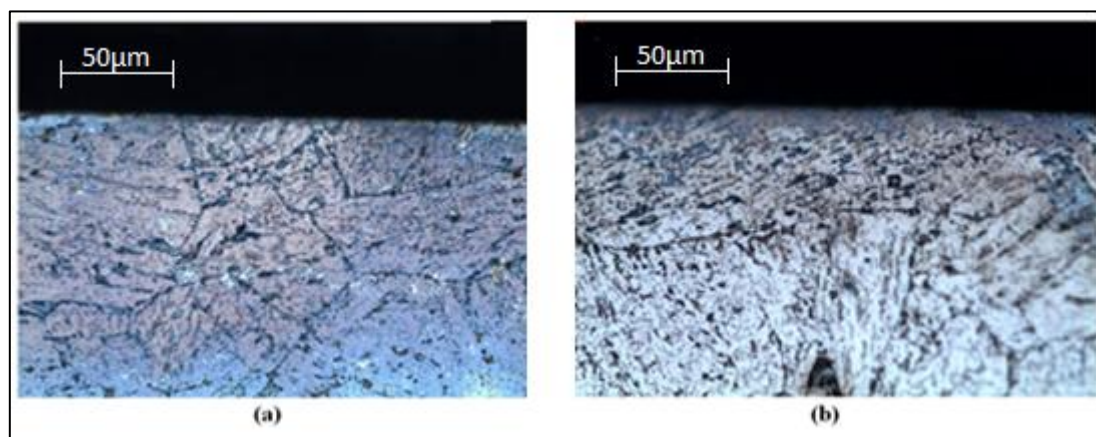


Figura 46: Micrografia dos ensaios com $V_f=0,75\text{mm/min}$, ampliada. (a) Convencional, (b) MQL

Pode-se verificar nas figuras dos corpos de prova que foram retificados com o rebolo de carbeto de silício verde que não ocorreu variação significativa provocada pela operação de retificação. Assim, pode-se afirmar que o processo de retificação não provocou alteração na estrutura da superfície do material.

5.7. Microdureza

As medições de microdureza foram convertidas para a escala Rockwell C por ser amplamente utilizada, e apresentar maior facilidade de compreensão dos resultados. Nas figuras 48, 49 e 50 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de microdureza nas dezoito amostras retificadas, sendo seis com cada um dos três tipos de rebolo utilizados.

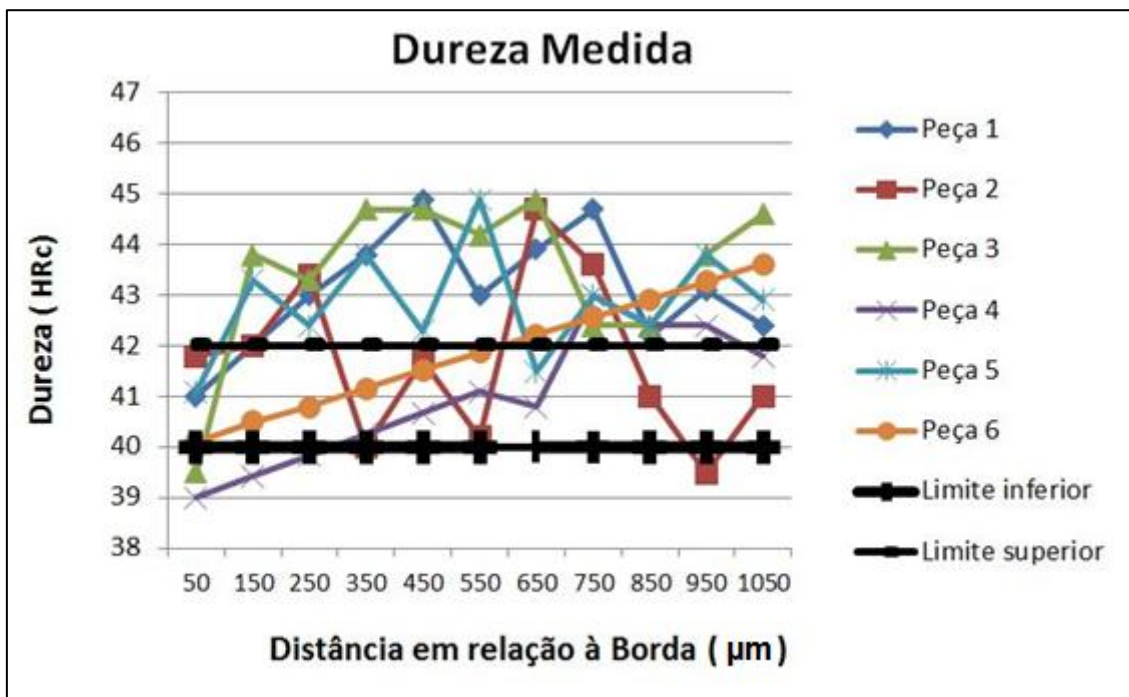


Figura 47: Resultado das medições de microdureza para todos os ensaios retificados com o rebolo convencional de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco

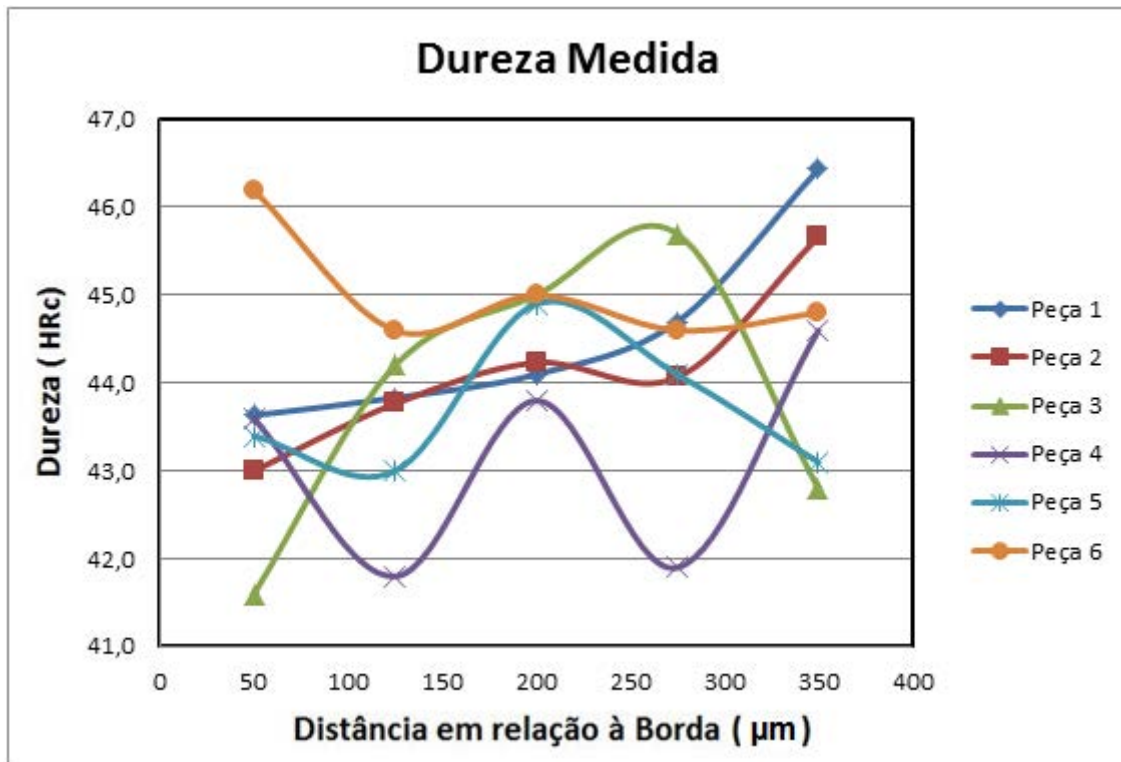


Figura 48: Resultado das medições de microdureza para todos os ensaios retificados com o rebolo de óxido de alumínio branco

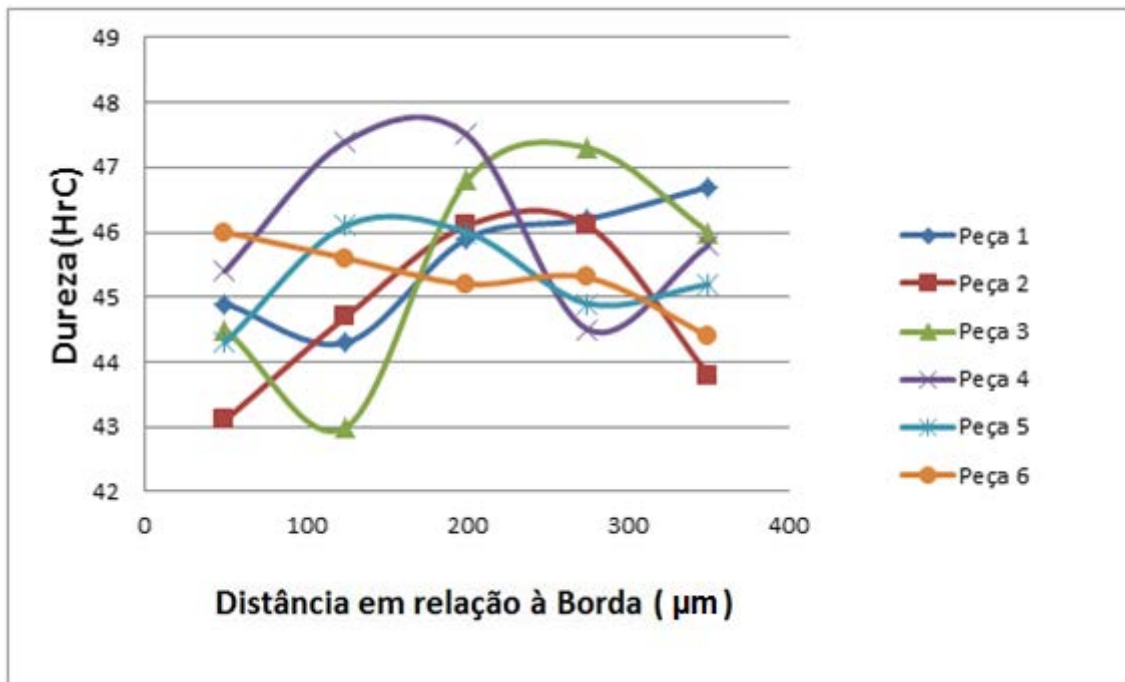


Figura 49: Resultado das medições de microdureza para todos os ensaios retificados com o rebolo de carbeto de silício verde

A Villares Metals, fornecedora do aço VP50, nos informa que a dureza deste aço deve estar numa faixa de 40-42 HRc, porém é nítido observar que os valores obtidos de dureza estão acima da faixa informada.

6. CONCLUSÕES

Analisando os dados obtidos nos ensaios realizados com os corpos de prova do aço VP50, aplicação da lubrificação convencional e a técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL), quanto à utilização dos rebolos de carbureto de silício verde, óxido de alumínio branco e carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco, pode-se observar que:

A qualidade superficial obtida atingiu os níveis aceitáveis de rugosidade característicos do processo, destacando os valores obtidos com a utilização dos rebolos de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco e carbureto de silício verde.

Quanto à circularidade dos rebolos após o processo de retificação, o rebolo de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco obteve os menores valores de variação da circularidade.

O rebolo de carbureto de silício verde apresentou uma melhor resistência ao desgaste em relação aos outros rebolos analisados. Nos três tipos de rebolo é possível verificar que a potência e o desgaste diametral seguem perfis indiretamente proporcionais de comportamento, para ambos os métodos de lubri-refrigeração e todas as velocidades de mergulho.

Após a retificação dos corpos de prova com os três tipos de rebolos, verificou-se em todos que não houve dano na superfície retificada, embora tenhamos verificado que houve um leve aumento da dureza do material em sua superfície. Complementarmente, não foi detectada a queima do material. Com base nos dados coletados e fazendo uma análise comparativa, pode-se apontar que para o processo de retificação do aço VP-50, o rebolo de carbureto de silício verde com a utilização de lubri-refrigeração convencional apresentou uma melhor performance geral dentro dos parâmetros analisados.

6.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise da influência da temperatura na lubri-refrigeração por MQL, ou seja, verificar se o lubri-refrigerante mantém suas propriedades durante o processo devido à alta temperatura.

7. BIBLIOGRAFIA

AGARWAL, S., VENKATESWARARAO, P. **Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, p. 68–78.

ALFARES, M., ELSHARKAWY, A. **Effect of grinding forces on the vibration of grinding machine spindle system.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40 (2000) 2003–2030.

ALVES, M. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada.** Bauru: Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2005. 167 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial).

ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. **Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding.** Journal of materials processing technology, Vol. 204 (2008), p. 269–278.

ANON, H.S.E. **Warnings for grinding coolants, Metalworking Production.** 147 (5) (2003).

ATTANASIO, A., GELFI, M., GIARDINI, C., REMINO, C. **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear.** Wear, Vol. 260, n.3 (2006) p. 333–338.

AZIZI, A., REZAEI, S.M., RAHIMI, A. Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance. **Internacional Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 47, number 9-12 (2009), p. 1053-1063.

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

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; SERNI, P. J. A.; DOTTO, F. R. L. **“In-process grinding monitoring through acoustic emission”**. Journal of Brazilian Society of Mechanic Science & Engineering. Vol.28, No.1, 2006, p. 118-124.

BLENKOWSKI K., **Coolants and lubricants: part 1 - the truth**, Manufacturing Engineering March (1993) p. 90–96.

BRINKSMEIER, E., BROCKHOFF, T. **Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process**. Annals of the CIRP, vol. 45, 1997, p. 283-286.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMAN, M. **“Friction, cooling and lubrication in grinding”**. CIRP Annals. Vol. 48, No.2, 1999, p. 581-598.

BROOKES, C. A. Diamond in perspective: a review of mechanical properties of natural diamond. **Diamond and related materials**. Vol. I, pp 13-17, 2010.

CAI, R., ROWE, W.B. **Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44 (2004), p. 1391–1402.

CARVALHO, M.V., FREITAS, D.F - **“Fim-de-vida das ferramentas no processo de furação do aço VP50IM – 32 e 40 HRc Em Relação Ao Aço DIN 1.2711 ”**. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2005.

CHEN, X., ROWE, W.B., Analysis and simulation of the grinding process, Part I: Generation of the grinding wheel surfacel, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 36, No. 8, pp. 871-882, 1990. 71

CHOI, H.Z., LEE, S.W., JEONG, H.D. **The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 127 (2002) 155–158.

CHOI, T.J., SUBRAHMANYA, N., LI, H., SHIN Y.C. - Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 48 (2008), p. 61–72.

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.

DEMIRCI, I., MEZGHANI, S., MANSORI, N. E. **On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms.** Springer Science-Business Media, LLC 2007.

DHAR, N., ISLAM, S., KAMRUZZAMAN, M. **Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel.** G.U. Journal of Science 20(2): 23-32 (2007).

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 8º ed. São Paulo. Editora Artliber, 2013.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., 2003, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, Artliber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição.

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

FUSSE, R. Y.; BIANCHI, E. C.; FRANÇA, T. V.; CATAI, R. E.; SILVA, L. R. e AGUIAR, P. R. **Erros geométricos na retificação do aço SAE HVN-3.** Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora, ano XL, nº464, pp. 150-163, setembro, 2004.

FREITAS, D.R., CARVALHO, M.V. **Fim-de-vida das ferramentas no processo de furação do aço vp50im – 32 e 40 HRc em relação ao aço din 1.2711.** XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. Paper CRE05-CM30

GAO, ROBERT X., Monitoring Systems for Grinding Processes, **Springer Series in Advanced Manufacturing**, pp. 83-107, 2007.

GE, P.Q., LI, J.F., LU, C.H., LIU, Z.C. **Performance evaluation and action mechanism analysis of extreme pressure additives used for oil-based cutting fluids**. Key Engineering Materials 250 (2003) 281–286.

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

GRAF, W., - **Handbook Cylindrical Grinding**, Winterthur Schleiftechnik AG, Switzerland, 2010.

GUO, C., MALKIN, S. **Energy Partition and Cooling During Grinding**. Journal of Manufacturing Processes Vol. 2/No. 3, 2000.

GUO, C., SHI, Z., ATTIA, H., MCINTOSH, D. **Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels** Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007.

HADAD M.J., TAWAKOLI T., SADEGHI M.H., SADEGHI B. “Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process”. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 54-55 (2012), 10-17.

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

HARIMKAR, S. P., SAMANT, A. N., KHANGAR, A. A., DAHOTRE, N. B. **Prediction of Solidification Microstructures During Laser Dressing of Alumina-Based Grinding Wheel Material**, J. Phys. D: Appl. Phys., 39 1642–1649 (2006).

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

HECKER, R.L., LIANG, S.Y., WU, X.J.; - Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 33 (2007), p. 449–459.

HEISEL, U., LUTZ, D., WASSMER, R., WALTER, U. **The Minimum Quantity Lubricant technique and its application in the cutting process**. Machines and metals magazine, Brazil, No.386, Febr., 1998, p. 22-38.

HEIZEL, C., BLEIL, N. **The Use of the Size Effect in Grinding for Work-hardening**. Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007.

HOFF, M.L. **Cutting fluids: necessary nuisance to productivity tool**. Society of Manufacturing Engineers. MR (MR02-302), 2002, pp. 1–6.

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

HWANG, T. W., EVANS, C. J., MALKIN, S. **An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels**. Annals of the CIRP Vol. 49/1/2000.

ICERI, D. M. et al. **Comparação entre os métodos de aplicação de fluido de corte convencional e otimizado na retificação plana de cerâmicas**. Cerâmica, Vol. 58, (2012), p. 84–89.

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

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

JACKSON, M.J., KHANGAR, A., CHENC, X., ROBINSON, G.M., VENKATESH , V.C., DAHOTRE N.B. **Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels.** Journal of Materials Processing Technology 185 (2007) 17–23.

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.

JEDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W. **Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools.** Proc. 32nd Int. MATADOR Conf, Manchester, UK, 1997.

KAJORNCHAIYAKUL, J. **Abrasive machining of ceramics: assesment of near-surface characteristics in high speed grinding.** 2000. 208 f. Tese (Doutorado) – University of Connecticut, Estados Unidos, 2000.

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

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

KLOCKE, F., MERBECKS, T.. **Characterization of Vitrified CBN Grinding Wheels.** 4th Int. Machining and Grinding Conf., SME,Michigan, 2001.

KÖNIG, W. **Retificação, brunimento e lapidação.** Tradução de Walter Weingaertner. Florianópolis: UFSC, 1980. 342 p. Título original: Fertingungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen.

KRAMER, N. **In-Process Identification of Material-Properties by Acoustic Emission Signals.** Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007.

KRUEGER, M.K., YOON, S.C., GONG, D., **New Technology in Metalworking Fluids and Grinding Wheels Achieves Tenfold Improvement in Grinding Performance**. Presented at the Coolants/Lubricants for Metal Cutting and Grinding Conference, 2000.

LI, Z.C, LIN, B., XU, Y.S., HU, J. **Experimental studies on grinding forces and force ratio of the unsteady-state technique**. Journal of Material Processing Technology 129 (2002) 76-80.

LIAO, T. W., TING, C. F., QU, J., BLAU, P. J. A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 47, pp. 580–592, 2007.

LIU, C. H.; ADRIAN CHEN, C.; CHEN, C. A.; YIN-TIEN WANG. **“Grinding force control in an automatic surface finishing system”**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 170, pp.367-373, 2005.

MACHADO, A. R., DINIZ, A. E., **Advantages and disadvantages of the use of the cutting fluids**. Machining Congress 2000, São Paulo, SP, Brazil, 2000.

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

MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2 ed. Industrial Press, 2008.

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

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B. & INASAKI, I., **Handbook of machining with grinding wheels**. 1a Ed. Boca Raton, FL: 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.

MESQUITA, R. A., BARBOSA, C. A., **Desenvolvimento de aço com usinabilidade melhorada e aços endurecíveis por precipitação para moldes de plástico**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais v.1 n.4, 2005

MINKE, E. **Contribution to the role of coolants on grinding process and work results**. Technical Paper Society of Manufacturing Engineers. MR (MR99-227), 1999, pp. 1–18.

NGUYEN, T.A., BUTLER, D.L. **Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1321–1328.

NGUYEN, T., ZHANG, L.C. **An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding**. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 224–230.

Catálogo da empresa NORTON ABRASIVOS, Disponível em: < <http://www.norton-abrasivos.com.br/bear-tex.aspx>>. Acesso em 26 de novembro de 2014.

NOVASKI, O., RIOS, M., Introdução teórica e vantagens de uso na usinagem de aços-liga. **Revista Máquinas & Metais**, Ano 40, nº 460, p. 214-223, maio 2004.

OBIKAWA, T., KAMATA, Y., SHINOZUKA, J. **High-speed grooving with applying MQL**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1854–1861.

OLIVEIRA, J. F. G. **Análise da ação do macro efeito de dressamento de rebolos no desempenho do processo de retificação**. Tese de Doutorado – USP, São Carlos, SP, Brasil, 1988.

PAWLAK, Z., KLAMECKI, E. B., RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P. G.; KOKOWSKI, A. **The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids.** Tribology International, 38,1, 2004.

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

PLEIFER, T., EVERSHEIM, W., KÖENIG, W., WECK, M. **Manufacturing Excellence: The Competitive Edge**, Chapman & Hall, London, 1994.

RAMESH, K., HUANG, H. **The Effects of Grinding Wheel Speed on Burr Creation and Surface Quality**, Machining Technology Group, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore, 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.

RAMESH, K., YEO, S.H., ZHONG, Z.W, SLIM, K.C. **Coolant shoe development for high efficient grinding.** Journal of material process technology 114(2001)240-245.

RANGAWALA, S., DORNFELD, D. **A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting, I: energy analysis.** Int. J. Mech. Sci. 33 (6) (1991) 471-487.

RAVINDRA, H.V., SRINIVASA, Y.G., KRISHNAMURTHY, R. **Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting.** Wear 212 (1997) 78-84.

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

SADEGHI M.H., HADDAD M.J., TAWAKOLI T., EMAMI M. **Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2009) 44:487–500.

SALEH, T., BISHWAS, I., RAHMAN, M., Efficient dressing of the wheel in ELID grinding by controllable voltage with force feedback. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 46, p. 123-130, 2009.

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

SHAJI, S., RADHAKRISHNAN, V. **Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method**, Journal of Materials Processing Technology 141 (2003) 51–59.

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

SILVA, L.R., BIANCHI, E.C., FUSSE, R.Y., CATAL, R.E., FRANC, T.V., AGUIAR, P.R. **Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant – MQL in grinding**. Int. J. Mach. Tools Manuf. 47(2007)412–418.

SKERLOS, S., HAYES, K. **Vegetable-based Cutting Fluids: A New Dimension in Research**. [Http://www.engn.umich.edu/alumni/engineer/03FW/research/holography/index.html](http://www.engn.umich.edu/alumni/engineer/03FW/research/holography/index.html). 2003.

SOARES, D. D., OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais**. Revista Máquinas e metais, Ano XXXVIII, nº 436, maio, 2002, p. 140- 157.

SOKOVIC M., MIJANOVIC K. **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes**, Journal of Materials Processing Technology 109 (2001) 181-189.

SOUSA, R. M. e et al **.Retificação de cerâmica de alumina relacionada com diferentes técnicas de lubri-refrigeração: convencional e mínima quantidade de lubrificação**.Cerâmica, 2011

SREEJITH P.S., NGOI, B.K.A. **Dry machining: Machining of the future**. Journal of Materials Processing Technology 101 (2000) 287-291.

STÄBLER, D., SCHÖNWALD, M., SEFRIN, H., WOLF, M. **Hazard Evaluation at the Dry Tooling of Metallic Materials**. Final Project Report of the Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft. 2003.

STANFORD, M., LISTER, P.M. **“Future role of metalworking fluids”**, Industrial Lubrification Tribology, Vol. 54, No.1, pp. 11-19, 2002.

STANFORD, M., LISTER, P.M. **Future role of metalworking fluids**, Industrial Lubrification Tribology, Vol. 54, No.1, 2007,p. 11-19.

SVIRSHCHEV, V.I., VOL'NOV, D.N., KROKHIN, A.N. **Reducing the Surface Roughness in Grinding**, Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, No. 5, pp. 513–514. © Allerton Press, Inc., 2008.

TAWAKOLI, T., WESTKAEMPER E., RABIEY M. **Dry grinding by special conditioning**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2007) 33:419–424.

TAWAKOLI, T., HADAD, M.J., SADEGHI, M.H., DANESHI, A., STÖCKERT, S., RASIFARD, A. **An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding International**. Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 924–932.

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

VILLARES METALS - Catálogo de Aços para Moldes. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/Cat_Acos_Moldes.pdf>. Acessado em: 10/10/2012.

WANG, Z., WILLET, P., DEAGUIAR, P.R., WEBSTER, J. **Neural network detection of grinding burn from acoustic Emission**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 283–309.

WEBSTER, J., TRICARD, M., **Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 53, 2004.

WEBSTER, J. A., Coolant Calculus: **Directing coolant into the right place at the right speed, in the right quantity**. Cutting Tool Technology, Vol 60-2, 2008, p. 58-66.

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

WEBSTER, J., DONG, W.P., LINDSAY, R.; **Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process**, Annals of the CIRP Vol. 45/7/1996, 1996.

XU, X.P., YU, Y.Q., XU, H.J. **Effect of grinding temperatures on surface integrity of a nickel-based superalloy**, Journal of Materials Processing Technology 129 (2002) 359-363.

YOUNG P.; BYRNE G.; COTTERE M. **Manufacturing and the Environment**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (1997) 13:488-493.