



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Evanilton José Alves Barbosa

**COMPORTAMENTO DO FLUIDO DE CORTE INTEGRAL
COMPARATIVAMENTE COM FORMULAÇÕES BIODEGRADÁVEIS NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

Belo Horizonte

Junho de 2015

Evanilton José Alves Barbosa

**COMPORTAMENTO DO FLUIDO DE CORTE INTEGRAL
COMPARATIVAMENTE COM FORMULAÇÕES BIODEGRADÁVEIS NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva - CEFET/MG

Belo Horizonte

Junho de 2015

B238c Barbosa, Evanílton José Alves.
Comportamento do fluido de corte integral comparativamente com formulações biodegradáveis no processo de retificação / Evanílton José Alves Barbosa. - 2015.
120 f. : il.; tabs. ; grafs. –
Orientador: Leonardo Roberto da Silva.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015.

Bibliografia.

1. Retificação e polimento. 2. Fluidos de corte. 3. Óleos vegetais. 4. Rugosidade. 5. Microestrutura. 6. Desgaste mecânico I. Silva, Leonardo Roberto da. II. Título.

CDD: 671.35



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"COMPORTAMENTO DO FLUIDO DE CORTE INTEGRAL

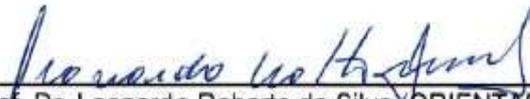
COMPARATIVAMENTE COM FORMULAÇÕES BIODEGRADÁVEIS NO

PROCESSO DE RETIFICAÇÃO "

Autor: Evanilton José Alves Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Jalon de Morais Vieira
Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais

Belo Horizonte, 26 de Junho de 2015.

À minha esposa Valdete, meus filhos Rangel, Larissa e Samuel, minha mãe Lourdes, meu pai José, a toda minha família que dá sentido à minha vida e a todos que contribuíram para minha vitória.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar disposição, saúde, sabedoria e iluminar-me com sua força suprema para superar todos os obstáculos na realização deste trabalho. A Ele dedico toda honra louvor e glória.

A minha mãe, primeira e maior professora da minha vida. A minha esposa que me ajuda a transformar sonhos em realidade. A meu pai, referência de vida, exemplo e amizade. A toda minha família pelo amor, carinho, compreensão e apoio.

Ao meu orientador, Leonardo Roberto da Silva, pelos ensinamentos, dedicação, apoio, paciência e acompanhamento constante.

A professora Elaine Carballo S. Corrêa, pelos conhecimentos passados, pelo apoio, carinho e dedicação.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais em especial ao atleticano Airton, a Ivete, Rogério da Manutenção e ao professor Romero pela ajuda e disposição constante para viabilização de diversos ensaios.

Aos amigos Helane, Hugo, Cintia, Izabela e Felipe, pela ajuda constante nos ensaios realizados.

A todos que, de alguma forma, direta ou indireta, colaboraram na realização deste trabalho e que, embora não citados aqui, não deixam de merecer meu agradecimento.

RESUMO

Os processos de usinagem convencional têm como objetivo a remoção do excesso de material da superfície da peça, por meio da ação de uma ferramenta de corte sobre o material, para obtenção de um produto com geometria, dimensões e acabamento predeterminados em projeto. O processo de retificação é a etapa final de fabricação, e as exigências sobre este processo são de dimensões com tolerâncias reduzidas e baixas rugosidades. A remoção do excesso de material ocorre pela abrasão peça/rebolo. O rebolo em função de suas características construtivas, quando em contato com o material gera um calor excessivo que pode causar danos térmicos à peça, comprometendo sua integridade superficial, podendo causar prejuízos, redução da vida útil do produto e riscos na utilização do componente mecânico. Para reduzir a geração de calor, torna-se necessário a utilização de fluidos de corte, cujo objetivo principal é refrigerar e lubrificar a interface peça/rebolo, visando a redução dos danos térmicos. Porém, estes fluidos podem prejudicar a saúde do trabalhador, o ambiente e a qualidade do produto. Desta forma, este trabalho visa avaliar o comportamento de um fluido de corte integral à base de óleo mineral parafínico em comparação com formulações biodegradáveis no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho no aço ABNT 4340, temperado e revenido com dureza média de 52 HRc. Os parâmetros de saída avaliados foram a integridade superficial (Rugosidade, Microestrutura e Microdureza) e desgaste do rebolo. Os resultados mostram a viabilidade do uso de óleos vegetais como fluido de corte no processo de retificação, principalmente na condição combinada (Matriz Mix 1 – 50% de óleo mineral e 50% de óleo de Soja), com melhor desempenho e na condição pura (Soja 100%), com resultados satisfatórios aos apresentados pelo fluido de corte integral.

Palavras-chave: Fluidos de corte, processo de retificação, integridade superficial, desgaste do rebolo, óleos vegetais, formulações biodegradáveis.

ABSTRACT

The conventional machining processes have as objective the removal of the excess material from the surface of the piece, through the action of a cutting tool over the material to obtain a product with geometry, dimensions and predetermined finishing in project. The grinding process is the final stage of manufacture, and the requirements on this process are dimensions with reduced tolerances and low roughness. The removal of excess material occurs by abrasion piece/wheel. The grinding wheel, due of their constructive characteristics, when in contact with the material generates an excessive heat, which can cause thermal damage to the piece, compromising its integrity surface and may cause injuries, reduced product life and risks in the use of mechanical component. To reduce the heat generation, becomes necessary the use of cutting fluids, whose primary purpose is to cool and lubricate the piece/wheel interface, aiming the reduction of thermal damage. However, these fluids may harm the health of workers, the environment and product quality. Thus, this study aims to analyze the behavior of an integral cutting fluid, made of paraffinic mineral oil, compared to biodegradable formulations in external cylindrical grinding process of plunge in steel ABNT 4340, hardened and tempered with medium hardness of 52 HRc. Output parameters evaluated were superficial integrity (Roughness, Microstructure and Microhardness) and wear of the grinding wheel. The results show the feasibility of the use of vegetable oils as cutting fluid on grinding process, mainly in the combined condition (Matrix Mix 1 – 50% Mineral oil and 50% Soy oil), with better performance and pure condition (100% Soy), with satisfactory results to the integral cutting fluid.

Keywords: cutting fluids, grinding process, superficial integrity, wear of the grinding wheel, vegetable oils, biodegradable formulations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo.....	20
Figura 2 – Dureza de materiais abrasivos.....	25
Figura 3 – Mecanismo de desgaste do rebolo.....	30
Figura 4 - Exemplo de especificação de um rebolo.....	31
Figura 5 - Ilustração do processo de remoção de material por retificação.	32
Figura 6 – Ciclo convencional de retificação	36
Figura 7- Ciclo de três fases.....	37
Figura 8 – Influência do acabamento superficial na resistência à fadiga	52
Figura 9 – Ilustração do processo de medição da rugosidade Ra.....	54
Figura 10 - Perfis de superfícies diferentes que podem apresentar a mesma rugosidade.....	55
Figura 11 - Campos de abrangência das técnicas de microscopia	59
Figura 12 - Ilustração dos processos de (MO) e (MEV)	60
Figura 13 - Corpos de prova A e B para os experimentos de retificação e desgaste do rebolo.....	66
Figura 14 - Imagem lateral (A) e frontal (B) do dressador.	71
Figura 15 - Bocal de lubri-refrigeração	74
Figura 16 - Procedimento para avaliação do desgaste do rebolo.	76
Figura 17 - Montagem para medição da rugosidade.....	77
Figura 18 - Amostras embutidas para análise da microestrutura (A) e medição da microdureza (B).....	78
Figura 19 - Corpos de prova fixados no dispositivo do Microscópio Eletrônico de Varredura.	79
Figura 20 – Microdurômetro com micrômetros acoplados.	81
Figura 21 - Procedimento para medição de microdureza.....	82
Figura 22 - Vista lateral da amostra. (O arco acima da superfície plana é somente ilustrativo, pois foi removido no polimento).....	83
Figura 23 - Rugosidade (R_t) com diferentes fluidos nas três condições de usinagem.....	88
Figura 24 - Rugosidade (R_a) com diferentes fluidos nas três condições de usinagem.....	90
Figura 25 - Desgaste diametral do rebolo nas três condições de usinagem. ...	92

Figura 26 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo Mineral nas 3 condições de usinagem (1000X).....	96
Figura 27 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Soja nas 3 condições de usinagem (1000X).	97
Figura 28 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Milho nas 3 condições de usinagem (1000X).....	98
Figura 29 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Soja 5 nas 3 condições de usinagem (1000X).	99
Figura 30 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Milho 5 nas 3 condições de usinagem (1000X).	100
Figura 31 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com Matriz Mix 1 nas 3 condições de usinagem (1000X).....	101
Figura 32 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com Matriz Mix 2 nas 3 condições de usinagem (1000X).....	102
Figura 33 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de duas amostras (1000X). Amostra A - Amostra com tratamento térmico e sem retificação. Amostra B - Amostra sem tratamento térmico e sem retificação.	103
Figura 34 - Microdureza x Profundidade da sub superfície na condição de usinagem 1 para os diferentes tipos de fluidos.	106
Figura 35 - Microdureza x Profundidade da sub superfície na condição de usinagem 2 para os diferentes tipos de fluidos.	107
Figura 36 - Microdureza x Profundidade na condição de usinagem 3 para os diferentes tipos de fluidos.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala de Mohs.....	22
Tabela 2 – Classificação da granulometria em “mesh”	28
Tabela 3 – Classificação da estrutura do rebolo	29
Tabela 4 - Propriedades físico – químicas dos óleos vegetais de soja e milho	47
Tabela 5 – Rugosidade X Qualidade de trabalho X Dimensão	53
Tabela 6 - Composição química do aço ABNT 4340 em (%) por peso.	66
Tabela 7 - Rebolo utilizado nos ensaios experimentais	67
Tabela 8 - Fluidos utilizados nos testes de retificação	68
Tabela 9 - Condições de usinagem utilizadas	73
Tabela 10 - Temperatura do fluido e dos corpos de prova	86
Tabela 11 – Rugosidade média (R_t).....	88
Tabela 12 - Análise comparativa dos fluidos de corte nas três condições de usinagem.....	91
Tabela 13 - Análise comparativa do desgaste diametral médio (μm) do rebolo para as três condições de usinagem e avaliação do desgaste na condição 3.	94
Tabela 14 – Microdureza média das amostras utilizando diversos fluidos nas 3 condições de usinagem.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	= Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Al ₂ O ₃	= Óxido de alumínio;
ASTM	= <i>American Society for Testing and Materials</i> ;
CBN	= Nitreto cúbico de boro;
DIN	= <i>Deutsches Institut für Normung</i> ;
EP	= Extrema pressão;
HRc	= Dureza Rockwell C;
HV	= Dureza Vickers;
ISO	= <i>International Organization for Standardization</i> ;
MCI	= Microscopia de Campo Iônico;
MET	= Microscopia Eletrônica de Transmissão;
MEV	= Microscopia Eletrônica de Varredura;
MO	= Microscopia Óptica;
Nm	= nanometro;
NIST	= <i>National Institute of Standards and Technology</i> ;
PCD	= Diamante policristalino;
pH	= Potencial Hidrogeniônico;
SiC	= Carbetto de silício;

LISTA DE SIMBOLOS

a	= Profundidade de corte (mm);
a_d	= Profundidade de dressagem (mm)
b	= Largura de retificação (mm);
cp	= Corpo de prova;
G	= Relação G (material usinado/rebolo consumido);
l_r	= Comprimento de amostragem (mm);
l_n	= Comprimento de avaliação (mm);
n_w	= Rotação da peça (RPM);
n_s	= Rotação da ferramenta (RPM);
P	= Pressão (Pa);
Q	= Vazão (L/min);
Q_w	= Taxa de remoção de material;
R_a	= Rugosidade Média (μm);
R_t	= Rugosidade total ou máxima (μm);
R_z	= Rugosidade parcial (μm);
V_w	= Velocidade periférica da peça (m/min);
V_s	= Velocidade periférica do rebolo (m/s);
V_f	= Velocidade de mergulho (mm/min);
Z_w	= Volume de metal removido (mm^3);
Z_s	= Volume de rebolo gasto (mm^3);
Δl	= Variação de comprimento (mm);
Δt	= Variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$);
t_s	= Tempo de centelhamento (s).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO.....	16
2.1 Objetivos específicos	16
3. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	17
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 Ferramentas de corte abrasivas (rebolos).....	19
4.1.1 Materiais abrasivos (artificiais e sintéticos)	22
4.1.2 Ligantes.....	26
4.1.3 Dureza do rebolo	27
4.1.4 Granulometria.....	27
4.1.5 Estrutura.....	28
4.2 Dressagem	29
4.3 Seleção da ferramenta abrasiva.....	30
4.4 Processo de retificação	31
4.4.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho.....	34
4.4.2 Desgaste do rebolo	38
4.5 Fluidos de corte.....	40
4.5.1 Fluidos de corte emulsionáveis em água	42
4.5.2 Fluidos de corte integral puro e aditivado.....	43
4.5.3 Óleos vegetais.....	45
4.5.4 Gases	49
4.5.5 Pastas e lubrificantes sólidos	49
4.6 Integridade superficial	49
4.6.1 Danos térmicos	49
4.6.2 Rugosidade	50

4.6.3 Alterações subsuperficiais (microestrutura e microdureza)	56
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
5.1 Corpos de prova	65
5.2 Características do rebolo.....	66
5.3 Fluidos de corte: Óleos vegetais e aditivos utilizados no processo de retificação.....	67
5.3.1 Fluido de corte integral mineral	68
5.3.2 Óleos vegetais (Soja 100% e Milho 100%)	69
5.3.3 Óleos vegetais aditivados e combinados (Soja 5, Milho 5, Mix 1 e Mix2)	69
5.3.4 Aditivos.....	70
5.4 Dressagem.....	70
5.5 Condições de usinagem	71
5.6 Procedimentos experimentais	74
5.7 Temperatura da superfície da peça.....	76
5.8 Medição da rugosidade	76
5.9 Medição do desgaste do rebolo	77
5.10 Preparação das amostras para ensaios de microestrutura e microdureza	78
5.11 Análise da microestrutura.....	79
5.12 Medição da microdureza	80
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
6.1 Temperatura na superfície da peça.....	85
6.2 Rugosidade	87
6.3 Desgaste diametral do rebolo.....	92
6.4 Análise microestrutural.....	95
6.5 Análise da microdureza	105
7. CONCLUSÃO.....	110

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, voltada para o acabamento final do produto e com grande aplicação no campo industrial. A remoção de material ocorre pela ação de uma ferramenta de corte denominada rebolo que em contato com a peça, remove um dado volume de material e gera um acabamento superficial com redução da rugosidade e irregularidades superficiais provocadas por processos anteriores. O processo sofre influência de fatores como velocidade de corte, velocidade de avanço, fluidos de corte, dentre outros e a qualidade do produto depende rigorosamente do controle destes parâmetros (OLIVEIRA; ALVES, 2006).

As características físicas da ferramenta de corte, constituída por grãos abrasivos e elemento ligante, quando em contato com o material pode gerar alto calor na interface peça/rebolo, comprometendo a integridade superficial do material. Conforme Bianchi et al., apud Paula, (2007, p.8) quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavaco, fazendo com que o número de grãos ativos seja maior e a espessura do cavaco removido menor, diminuindo assim a rugosidade, no entanto, forças de corte e desgaste do rebolo podem gerar maior aquecimento devido ao maior contato peça/rebolo, e causar danos térmicos como a queima e tensões residuais. Segundo Chen et al., (2000) pesquisas anteriores mostram que o controle da temperatura de retificação contribui para uma redução ou eliminação completa de tensões residuais no material.

Problemas devido ao excesso de aquecimento podem ser minimizados com utilização de uma lubri-refrigeração eficiente por meio de fluidos de corte que minimizam a geração de calor e contribuem com o aumento da vida útil da ferramenta abrasiva. Deve-se tomar cuidado no manuseio, tratamento e seleção de fluidos, pois podem causar danos à saúde humana, ao ambiente e elevar o custo de produção. Investimentos em equipamentos de proteção e de tratamentos para descarte de produtos no ambiente são exigências das leis ambientais. Metodologias de produção ambientalmente corretas que atendam às

demandas tecnológicas e ambientais são as melhores alternativas (ALVES et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2011).

Segundo Runge; Duarte, (1990) o tratamento dos fluidos contribui para a eficácia dos mesmos no processo, pois assegura suas propriedades, aumenta a vida útil e reduz custos adicionais devido a redução do descarte e redução na aquisição de novos fluidos.

Em 2009, estimou-se que cerca de 39 milhões de toneladas de fluidos de corte foram utilizados em máquinas ferramentas ao redor do planeta. Para esta década, prevê-se um aumento projetado de 1,2%. Deste montante, aproximadamente, 85% são óleos à base de petróleo. Trata-se de um consumo elevado, que potencializa os riscos ao meio ambiente e aos seres humanos na ausência de tratamento, descarte adequado e equipamentos de segurança (PUSAVEC; KRAJNIK; KOPAC, 2010).

O Brasil possui grande interesse na fabricação de fluidos de corte de base vegetal, em função de benefícios ambientais e por ser um dos maiores produtores de óleos vegetais do mundo, principalmente o óleo de Soja. Características como biodegradabilidade, dentre outras são fatores que favorecem a utilização (FOFANA; HEMMATJOU; FARZANEH, 2010).

Visando atender às exigências tecnológicas e ambientais, que favoreçam a saúde do trabalhador e custos satisfatórios de produção, torna-se fundamental o desenvolvimento de pesquisas com seleção de fluidos de características biodegradáveis para análises comparativas de qualidade dos produtos fabricados.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento do fluido de corte integral em comparação com formulações biodegradáveis no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho a partir da caracterização da peça retificada, visando avaliar a viabilidade dos fluidos de corte vegetais de soja e milho no estado puro, com e sem aditivos e misturados na mesma proporção com o fluido de corte integral.

2.1 Objetivos específicos

- Analisar possíveis danos causados na integridade superficial da peça provocados por solicitações térmicas e mecânicas com utilização do fluido de corte integral e formulações biodegradáveis;
- Avaliar o desempenho das formulações biodegradáveis no processo de retificação com variação das condições de usinagem;
- Avaliar a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial da peça e no desgaste do rebolo;
- Estudar os mecanismos de caracterização microestruturais dos materiais;
- Identificar o comportamento no desempenho e estabilidade dos óleos vegetais aditivados e dos óleos vegetais e mineral misturados nas mesmas proporções.

3. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A retificação é um processo de usinagem que gera um gradiente elevado de temperatura, fator que causa dependência de fluidos para refrigerar e lubrificar a região de corte agindo na redução do calor e eliminação de possíveis danos térmicos ao produto. Os fluidos possuem constituintes em sua composição que dificultam o tratamento, favorecem a contaminação e agredem o ambiente, caracteriza-se então uma ineficiência na lubri-refrigeração podendo causar danos à saúde humana, ao ambiente e elevar os custos de produção.

Visando a melhoria nas condições de trabalho, com atendimento às leis ambientais, benefícios à saúde do trabalhador e maior competitividade da indústria com atendimento às exigências do mercado consumidor, avaliou-se comparativamente o desempenho de fluidos de corte vegetais e mineral na usinagem por abrasão do aço ABNT 4340 endurecido, pelo processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com variações de parâmetros, como: Avanço de corte e tempo de centelhamento, dentro de padrões praticados na indústria Metal-mecânica.

Após os testes, realizou-se a caracterização do produto retificado, comprovando a viabilidade do uso de fluidos vegetais em relação ao fluido mineral com atendimento aos requisitos técnicos e melhor desempenho ambiental.

A pesquisa busca contribuir com a indústria Metal-mecânica e com o meio ambiente, por meio da conscientização dos profissionais do setor e da apresentação dos fluidos de corte de base vegetal como insumos alternativos em relação aos comumente utilizados, no sentido de proporcionar melhorias tecnológicas, ambientais e de promoção da saúde humana.

Iniciei minha vida profissional trabalhando com usinagem mecânica, onde tinha muito contato com fluidos lubrificantes de base mineral, principalmente os fluidos de corte (emulsões) pois são muito utilizados neste tipo de processamento. Após alguns anos de trabalho neste seguimento, participei de um processo seletivo em outra empresa, onde atuaria como Instrutor de formação profissional. Fui

aprovado em todos os testes, porém no exame médico foi constatado baixa de leucócitos. Segundo o médico da empresa, uma das causas, poderia ser o contato excessivo durante um longo período com óleo de base mineral que tem influência relativa em cada pessoa. Este fato não inviabilizou a atuação profissional desejada, pois nesta nova função não teria contato com estes produtos. Fato semelhante ocorreu com meu irmão que trabalhava como Mecânico de Manutenção em indústria do setor Metal Mecânico e teve que se adaptar a uma nova função, recebeu treinamento profissional pela empresa e hoje trabalha como eletricista.

Desta forma, minha principal motivação é contribuir com o meu semelhante na conquista de um ambiente mais saudável e digno para o exercício das atividades profissionais e melhoria da qualidade de vida.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

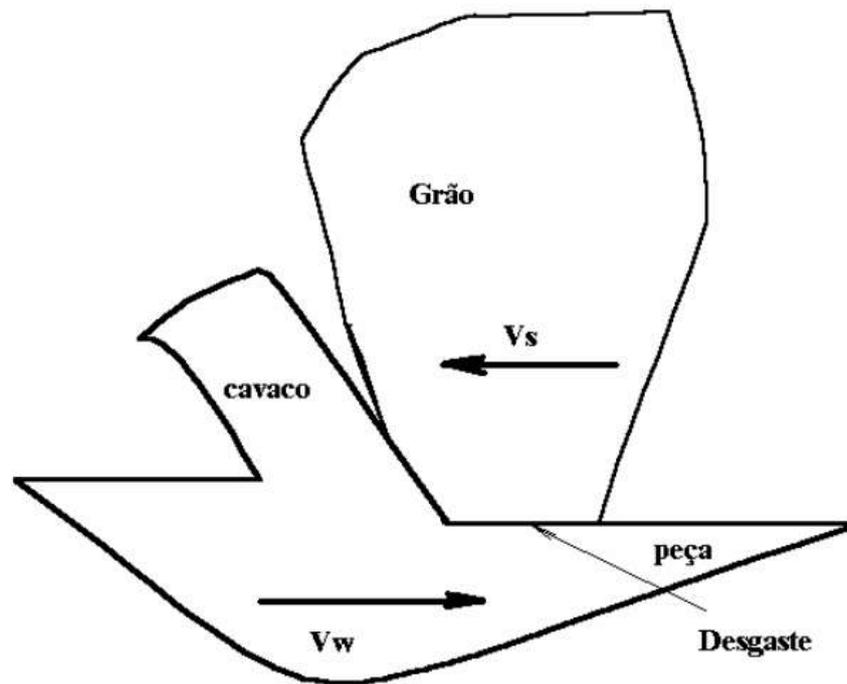
Esta revisão bibliográfica visa apresentar e analisar os temas mais relevantes no processo de retificação, no que se refere a ferramentas de corte abrasivas, parâmetros do processo, qualidade do produto retificado e fluidos refrigerantes. Descreve o processo de retificação cilíndrica de mergulho, técnicas de análise microestrutural e acabamento superficial. Destaca a importância da seleção adequada de fluidos de corte para o controle da temperatura, os riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

4.1 Ferramentas de corte abrasivas (rebolos).

Ferramentas de corte abrasivas possuem arestas cortantes geometricamente indefinidas, a remoção de material ocorre pela ação dos grãos abrasivos de alta dureza, que atuam soltos ou unidos por um ligante. Além da alta dureza, os grãos abrasivos são termicamente estáveis, resistindo a altas temperaturas e quimicamente estáveis diante das altas temperaturas e pressões de corte na presença de ar, fluido de corte e do material que está sendo usinado. Na retificação os grãos abrasivos são unidos por um ligante formando o rebolo (STEMMER, 1992, p. 271).

A remoção de cavaco na retificação, ocorre pela ação dos grãos abrasivos, onde cada um se configura como uma ferramenta de corte com arestas geometricamente não definidas, ângulos de ataques distintos e geralmente desfavoráveis ao processo para remoção dos cavacos. A Figura 1 ilustra a formação do cavaco no processo de retificação (HELLMEISTER, 2004).

Figura 1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo.



Fonte: Hellmeister, 2004 (adaptada).

O rebolo é a ferramenta abrasiva utilizada nos processos de retificação. A qualidade do produto retificado está intimamente ligada à sua seleção que deve levar em conta fatores como: O material e tamanho do grão abrasivo, a dureza e estrutura do rebolo e o tipo de material aglomerante (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

O tamanho dos grãos abrasivos, componente mais resistente do rebolo, exerce influência significativa sobre as forças de corte, taxa de remoção, acabamento superficial, entre outros fatores (WEBSTER; TRICARD, 2004).

Rebolos superabrasivos são mais duráveis devido às suas propriedades mecânicas, porém apresentam dificuldades para serem reperfilados, enquanto os rebolos convencionais são mais adequados para indústrias que trabalham com baixos estoques e no processo *just-in-time*. O processo de retificação é afetado consideravelmente pelas propriedades do rebolo, como:

- Proporção de grãos, ligante e poros;
- Tipo de grão abrasivo, geometria e material ligante;

- Tipo e quantidade de materiais de preenchimento e aditivos;
- Tipo de mistura realizada na fabricação, temperatura, tempo e pressão de sinterização.

Em regime de processo, o comportamento do rebolo tem influência direta na rugosidade, desvio de perfil e danos térmicos na peça usinada. A previsão do resultado no processo depende do conhecimento de dados corretos das características do rebolo e dos parâmetros operacionais (WEINGAERTNER; BENINI; MACIEL, 2014).

Os rebolos trazem em seus rótulos, informações sobre o material abrasivo, a granulometria, dureza, porosidade e o ligante empregado. Não indica a distribuição estatística dos grãos em sua estrutura. Este fator aliado a possíveis erros nos parâmetros do processo podem originar defeitos nos produtos que somente serão identificados posteriormente à fabricação de um lote de peças podendo ocasionar prejuízos (WEINGAERTNER; BENINI; MACIEL, 2014).

Conforme Webster; Tricard (2004), os abrasivos são materiais compósitos constituídos basicamente dos elementos: Al_2O_3 , SiC e por superabrasivos, como CBN e diamante. Os elementos são unidos por meio de uma resina e os abrasivos possuem poros que podem ser naturais ou artificiais, cuja finalidade é permitir a penetração do fluido de corte e facilitar o escoamento tanto do fluido como do material removido durante o processo de retificação. O rebolo deve ter boa precisão dimensional, resistência mecânica e resistência a agentes químicos. Vários métodos são habitualmente utilizados para caracterização dos grãos abrasivos, os quais incluem testes de friabilidade, dureza, resistência à abrasão e ensaios de desgaste.

A melhoria dos processos de usinagem, necessitam de parâmetros operacionais que atendam aos requisitos de qualidade e custo, portanto se faz necessário a identificação da produtividade da ferramenta de corte, que pode ser entendida como o tempo útil de retificação entre os processos de dressagem, o volume de material removido entre os processos de dressagem ou ainda o número de peças por dressagem (MALKIN, 1989).

4.1.1 Materiais abrasivos (artificiais e sintéticos)

Os minerais que formam os abrasivos têm sua dureza definida de forma comparativa pela escala de Mohs, que vai de 1 a 10 conforme representado na Tabela 1, onde um material qualquer na escala risca todos que o antecedem e é riscado por todos que estão em uma posição superior na escala. Para determinação da dureza, utiliza-se o método Knoop, onde uma ponta de diamante lapidada na forma piramidal é utilizada fazendo uma impressão na amostra, sob cargas que podem variar de 25 a 300 gramas e a dureza é determinada pelo valor da diagonal em relação à carga aplicada (STEMMER, 1992, p. 272 - 273).

Tabela 1 - Escala de Mohs

Dureza	Mineral	Composição Química
1	Talco	$Mg_3 (Si_4 O_{10}) (OH)_2$
2	Gesso	$CaSO_4, 2H_2O$
3	Calcita	$CaCO_3$
4	Fluorita	CaF_2
5	Apatita	$CA_5 (F, Cl, OH) (PO_4)_3$
6	Feldspato	$K Al Si_3O_8$
7	Quartzo	SiO_2
8	Topázio	$Al_2 (SiO_4) (F, OH)_2$
9	Corindon	Al_2O_3
10	Diamante	C

Fonte: STEMMER, 1992, p. 272 (adaptado).

Segundo Stemmer, (1992, p. 273) os abrasivos se dividem em naturais e artificiais. Os abrasivos naturais são: Pedra de arenito, quartzo, esmeril natural, corindon natural, pedra pome, granada, diamantes e tripoli.

A pedra de arenito ou silex e o quartzo, são relativamente macios (dureza Knoop $K_{100} = 820$), são utilizados para afiação de ferramentas agrícolas. O esmeril natural é constituído por 70% de Al_2O_3 . Corindon natural é constituído principalmente de óxido de alumínio cristalino (80 a 95% de Al_2O_3) que lhe assegura alta dureza ($K_{100} = 2050$). Pedra pome, pedra porosa de origem vulcânica usada principalmente para polimento de madeiras, ossos, etc. Granadas, são minerais bastante duros ($K_{100} = 1360$), são utilizados principalmente em lixas para madeiras. Diamante é o material abrasivo de maior dureza, cerca de 80% possuem manchas e impurezas, são muito pequenos e utilizados em operações de polimento, lapidação, retificação e afiação de ferramentas de metal duro (STEMMER, 1992, p. 273).

Os abrasivos artificiais surgiram da necessidade de produção de peças em série com tolerâncias dimensionais mais reduzidas e melhor acabamento superficial, fabricados por meio de processos de retificação, substituindo os abrasivos naturais com qualidades diversificadas e com altas porcentagens de impurezas. Os principais abrasivos artificiais são o Óxido de alumínio cristalino (Corindon), Carboneto de silício, Carboneto de boro, Nitreto cúbico de boro e Diamante sintético (STEMMER, 1992, p. 274).

Óxido de Alumínio Cristalino extraído da bauxita e fabricado principalmente por processo de fundição, é destinado à retificação de aços carbono, aços liga, aços rápidos, bronze duro, ferro fundido nodular e maleável, de acordo com o teor de impurezas, distingue-se como regular, médio e extra. Em função dos processos de fabricação, tem suas propriedades alteradas o que interfere diretamente em sua aplicação (STEMMER, 1992, p. 274).

A ferramenta abrasiva de óxido de alumínio sinterizado denominada rebolo, quando selecionada adequadamente destaca-se como uma grande vantagem competitiva, em função de possuir menor custo e possibilitar boas taxas de

remoção volumétrica com forças reduzidas e menor temperatura na superfície de trabalho durante a retificação. A estrutura cristalina do abrasivo é extremamente fina, o que favorece a qualidade do produto retificado. Este abrasivo é uma alternativa viável em relação ao rebolo de CBN (WEBSTER; TRICARD, 2004).

O tamanho do grão abrasivo do cristal de Óxido de Alumínio, está relacionado a dureza e a força de corte para um mesmo volume de material removido, grãos abrasivos de menor dimensão exercem menor esforço de corte. A dureza do cristal de Al_2O_3 varia com a temperatura e pode atingir valores próximos à dureza do cristal de SiC para uma dada variação de temperatura (KRELL; BLANK apud WEBSTER; TRICARD, 2004).

O Carboneto de Silício é um produto sintético, obtido por fusão em forno elétrico de uma mistura de areia de sílica e coque, possui elevada dureza, ($K_{100} = 2450$ a 3000), alta condutividade térmica e boas características de fratura. Produto muito estável quimicamente e suas propriedades como abrasivo variam de acordo com o tipo e porcentagem de impurezas e a posição dentro do forno em que foi obtido, apresenta-se em duas qualidades distintas, destacadas pelas cores verde e preta, ambos apresentam a mesma dureza, porém o preto é mais tenaz. O carboneto de silício de cor verde é destinado à afiação de ferramentas de metal duro, já o carboneto na cor preta tem sua aplicação voltada para a retificação de ferro fundido cinzento e coquilhado, aço inoxidável, metais não ferrosos e materiais não metálicos como borracha, couro, granito, vidro, etc (STEMMER, 1992, p. 277 - 279).

Diamante sintético: Material que se destaca pela elevada dureza ($K_{100} = 5000$ a 7000), dependendo da orientação do cristal. Possui boa condutibilidade térmica e tem sua aplicação voltada para retificação de metal duro, quartzo, cristal, pedras preciosas, mármore, granito e materiais cerâmicos. Avanços tecnológicos possibilitaram sua aplicação na retificação de materiais dúcteis não ferrosos (STEMMER, 1992, p. 279-280).

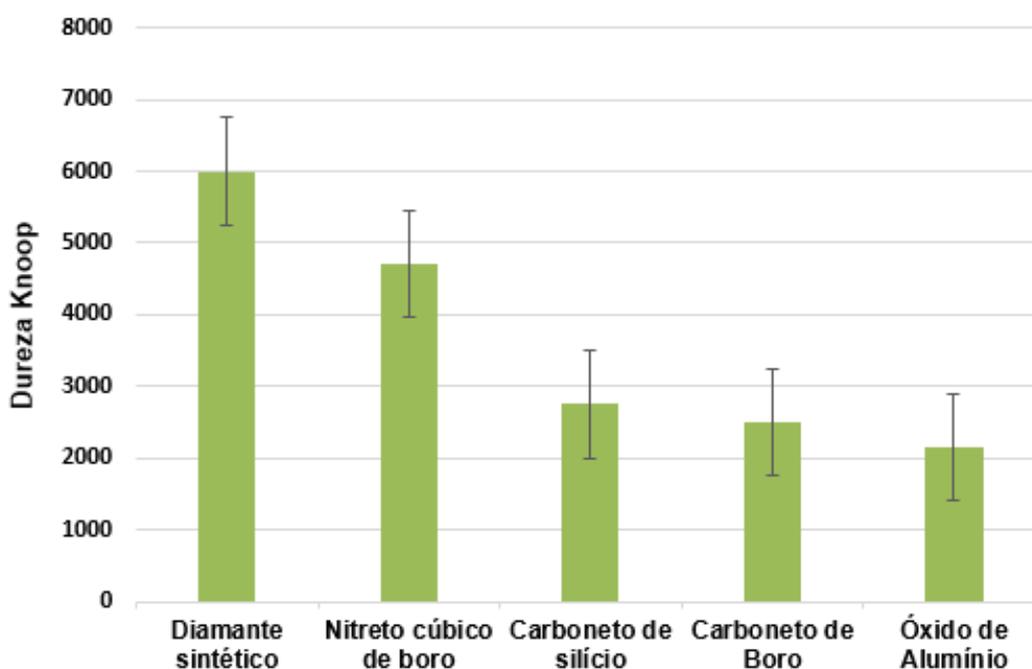
Nitreto Cúbico de Boro - CBN: Possui elevada dureza, $K_{100} = 4700$ que independe de orientação cristalográfica. O abrasivo é estável sob pressão atmosférica até 2000°C e tem sua aplicação voltada para a retificação de materiais de alta dureza, como o aço rápido e aço liga temperados. O Carboneto de Boro é um abrasivo muito duro, usado sob a forma solta para lapidação (STEMMER, 1992, p. 279).

Kane (2002) descreve as principais aplicações dos abrasivos artificiais:

- O diamante é utilizado na retificação de materiais não ferrosos, como o metal duro, a cerâmica, a porcelana, a pedra, o vidro, etc.
- O CBN (Nitreto cúbico de boro) utilizado principalmente em materiais ferrosos como o ferro fundido e aços de elevada dureza.
- O Carboneto de Silício é indicado para materiais de alta dureza, metálicos e não metálicos.
- Óxido de Alumínio (Al_2O_3): Indicado para retificação de materiais de alta resistência a tração como os metais ferrosos e materiais similares.

A Figura 2 ilustra de forma comparativa a dureza de alguns materiais abrasivos.

Figura 2 - Dureza de materiais abrasivos.



Fonte: STEMMER, 1992 (adaptada).

4.1.2 Ligantes

O elemento ligante tem a função de unir os grãos abrasivos e podem ser orgânicos e inorgânicos. A seguir serão apresentadas as características destes elementos, (STEMMER, 1992, p. 282-284).

Ligante Inorgânico Cerâmico (V): Constituído basicamente de argila, caulim, quartzo e feldspato, este ligante confere aos rebolos, muita agressividade dos grãos abrasivos, em virtude da estrutura porosa, inelasticidade pela dureza vítrea do ligante, insensibilidade ao calor e ao frio, porém sensível a choques térmicos. Possui alta estabilidade frente a ácidos, água, fluidos de corte, óleo, gases, etc. É o ligante mais utilizado nos abrasivos, com velocidade recomendada na faixa de 23 a 33 m/s que depende da dureza e geometria do rebolo.

Ligante Inorgânico Silicioso (S): Constituído por silicato de sódio e pequena quantidade de argila, possui como vantagem, maior facilidade na fabricação dos rebolos, porém apresenta pouca porosidade e pequena dureza, são utilizados onde não tem exigências de grandes esforços com pequena geração de calor.

Ligante Inorgânico de Magnesita (O): É um dos ligantes inorgânicos mais antigos, conhecido como cimento de Sorell. É constituído por oxiclreto de magnésio. A liga endurece lentamente a temperatura ambiente, é muito sensível a humidade e a reação é dificilmente controlável podendo ocorrer fissuras. É utilizado em processos suaves de retificação a seco, como afiação de pequenas ferramentas.

Ligante Inorgânico Metálico (M): Ligante inorgânico destinado à confecção de rebolos com abrasivos de diamantes sintéticos e abrasivos de nitreto cúbico de boro. Esses rebolos são utilizados na retificação de cerâmica e retificação eletrolítica. A confecção do rebolo ocorre por sinterização do pó de bronze ou metais nobres, deposição galvânica de metal sobre um suporte coberto de abrasivo e infiltração do esqueleto poroso de abrasivo por um metal de baixo ponto de fusão.

Goma Laca (E): Ligante orgânico utilizado com abrasivo de óxido de alumínio em rebolos de corte, destinado a cortes leves.

Borracha (R): Ligante orgânico usado em rebolos elásticos de alta velocidade, possibilita a fabricação de rebolos de corte abaixo de 0,8 mm de espessura.

Resinoide (B): Ligante orgânico desenvolvido a partir de resinas sintéticas, sendo as mais usuais as resinas fenólicas do tipo termofixas. Possuem importância para obtenção de propriedades como resistência à flexão, estabilidade térmica, eliminação de vazios. Ligante empregado na maioria dos rebolos de alta velocidade em esmerilhadoras e em rebolos de corte. O ligante é atacado por soluções alcalinas. Permitem velocidades de 50 a 60m/s em rebolos normais e 80 a 100m/s para rebolos reforçados com telas de fibras de vidro ou anéis de aço interno.

4.1.3 Dureza do rebolo

A dureza do rebolo representa a capacidade de retenção dos grãos abrasivos. Depende do ligante, tamanho dos grãos, espaços vazios e da espessura/volume do ligante que unem os grãos. A força de reação dos grãos durante o trabalho deve ser capaz de mantê-los firme no rebolo enquanto possuírem boas condições de corte e incapaz de mantê-los quando desgastados. A dureza ideal é aquela em que o rebolo se afia, soltando os grãos desgastados e se renovando, sem a necessidade de uma operação denominada dressagem, que consiste na remoção de partículas desgastadas do rebolo por meio de uma ferramenta denominada dressador (STEMMER, 1992, p. 284).

4.1.4 Granulometria

As dimensões dos grãos do rebolo, bem como sua uniformidade, são características fundamentais nos processos de retificação. A norma americana ANSI Standard B 74.12-1977 "*Specification for Size of Abrasive Grain*", especifica o tamanho dos grãos em "*mesh*", que representa o número de fios por

polegada quadrada da peneira na qual foram retidos no processo de seleção. A classificação granulométrica dos grãos pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da granulometria em “mesh”

Classe	Granulometria					
	400	500	600	800	1000	1200
Finíssimo	400	500	600	800	1000	1200
Muito fino	150	180	220	280	320	
Fino	70	80	90	100	120	
Médio	30	36	46	54	60	
Grosso	14	16	20	24		
Muito grosso	6	8	10	12		

Fonte: STEMMER 1992, p. 281 (adaptada).

4.1.5 Estrutura

Refere-se ao espaçamento entre os grãos, não tendo relação direta com a densidade ou porosidade. A estrutura pode ser aberta ou fechada, uma estrutura fechada possui um maior número de arestas cortantes enquanto na estrutura aberta tem-se maior espaço para alojamento de cavaco e o rebolo tem maior durabilidade. O tipo de estrutura está relacionado com o material, acabamento e tipo de trabalho, sendo que o material mole e dúctil requer uma estrutura aberta, material duro requer estrutura fechada (STEMMER, 1992, p. 285).

A estrutura representa a concentração volumétrica de grãos no rebolo. Quanto maior a quantidade de grãos, melhor o acabamento, menor o espaço para alojamento de cavacos e maior o aquecimento. Quanto menor a quantidade de grãos, pior o acabamento, maior espaço para alojamento de cavacos e menor geração de calor. A classificação da estrutura do rebolo é representada por um número, conforme apresentado na Tabela 3 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Tabela 3 - Classificação da estrutura do rebolo

Estrutura	Identificação
Fechada	1 a 4
Média	5 a 7
Aberta	8 a 12

Fonte: DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999, (adaptada).

4.2 Dressagem

Os rebolos após a operação de retificação, podem apresentar irregularidades superficiais, gumes cegos e poros impregnados de cavacos. Isto contribui para redução da qualidade superficial, maior atrito de contato, maior geração de calor e conseqüentemente redução da capacidade de corte do rebolo. Torna-se necessário restabelecer a agressividade do rebolo por meio da operação de dressagem com ferramentas denominadas dressadores (SOUZA, 2009).

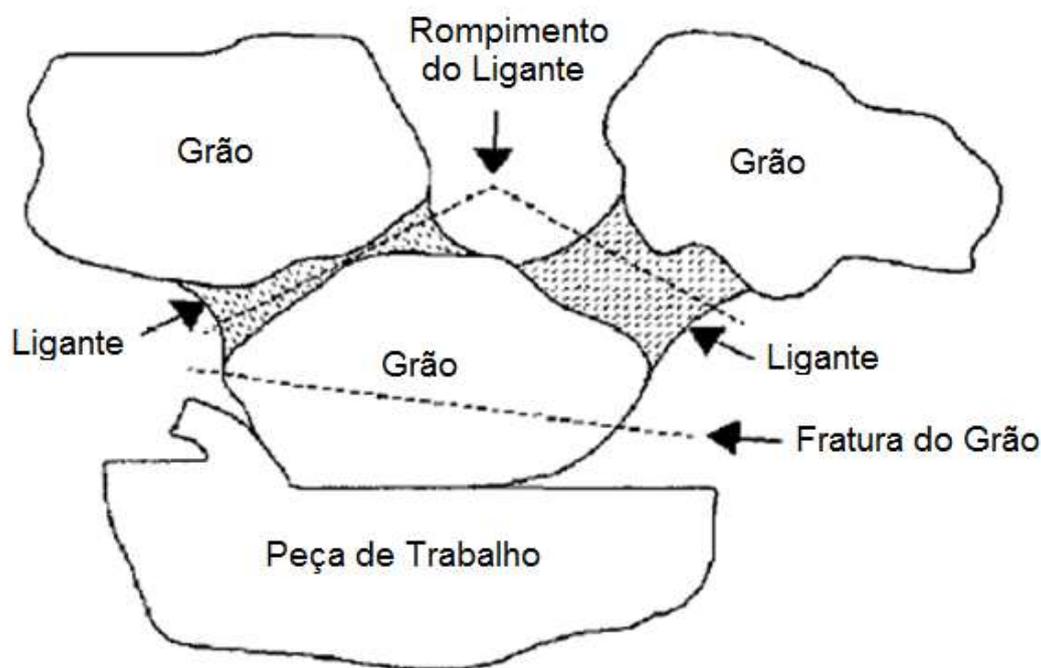
Os dressadores podem ser fixos ou rotativos. As ferramentas fixas, são presas à mesa da retificadora por meio de dispositivos próprios e possui deslocamento lateral com velocidade de avanço constante, que são acionados após as operações de referenciamento (contato inicial) e profundidade da dressagem, para que ocorra o perfilamento do rebolo. Na dressagem de rebolos convencionais são utilizadas ferramentas de diamantes. (SOUZA, 2009).

Segundo Oliveira; Bottene; França (2010), a característica superficial do rebolo, está associada as características do dressador, a profundidade e velocidade de dressagem. O desgaste do rebolo depende de parâmetros operacionais que dificultam o seu controle, portanto, devem ser ajustados durante a vida útil da ferramenta para assegurar uma produtividade constante. A determinação do momento exato da dressagem reduz o tempo desta operação e evita a remoção excessiva de material, influenciando diretamente no custo da produção.

A superfície do rebolo desempenha um papel fundamental na interação com o produto retificado. O contato está associado a fatores que levam em conta o número de arestas cortantes existentes na superfície da ferramenta, os parâmetros de corte, a porosidade, o tamanho do grão e as condições de dressagem, que podem promover a redução da força de retificação e assegurar qualidade ao produto retificado (HECKER; RAMONEDA; LIANG, 2003).

O desgaste do abrasivo ocorre basicamente pela fratura do grão, rompimento do ligante e por atrito. A ruptura do aglomerante ou do abrasivo é consequência de forças de ação muito elevadas no contato peça/rebolo, que atuam sobre os grãos. Nos dois casos (fratura e desgaste), o rebolo expõe outros grãos abrasivos, se renovando automaticamente. A fixação e ação dos grãos sobre a peça de trabalho pode ser observada na Figura 3 (MALKIN, 1989).

Figura 3 - Mecanismo de desgaste do rebolo.



Fonte: MALKIN, 1989 (adaptada).

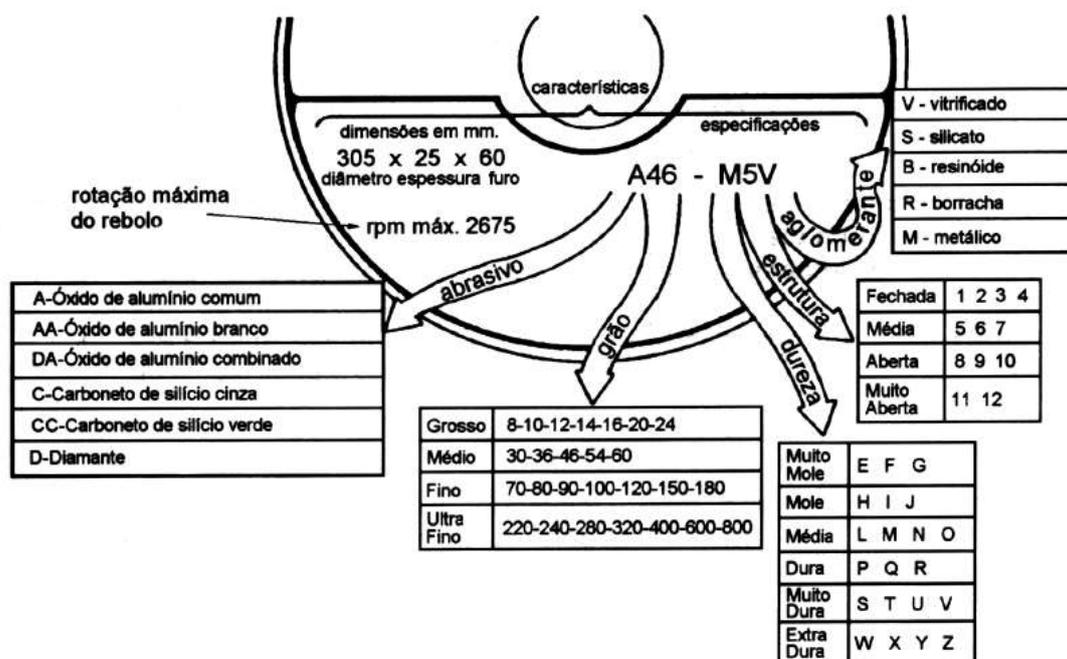
4.3 Seleção da ferramenta abrasiva

A seleção da ferramenta abrasiva, depende basicamente, do processo de retificação, do material e da rugosidade que se deseja obter. A Figura 4 ilustra a

especificação de um rebolo com abrasivos convencionais de óxido de alumínio comum, segundo as normas ABNT NBR 15230, DIN 69100, ISO/R 525-1966, as quais são bastante semelhantes, e que levam em conta o material abrasivo, o tamanho do grão, a dureza, a estrutura e o tipo de aglomerante. No exemplo, foi especificado o rebolo: A46 - M5V que representa a seguinte ferramenta abrasiva:

- Rebolo: Óxido de Alumínio comum;
- Grão: médio;
- Dureza: Média;
- Estrutura: Média;
- Aglomerante: vitrificado.

Figura 4 - Exemplo de especificação de um rebolo.



Fonte: STEMMER, 1992 (adaptada).

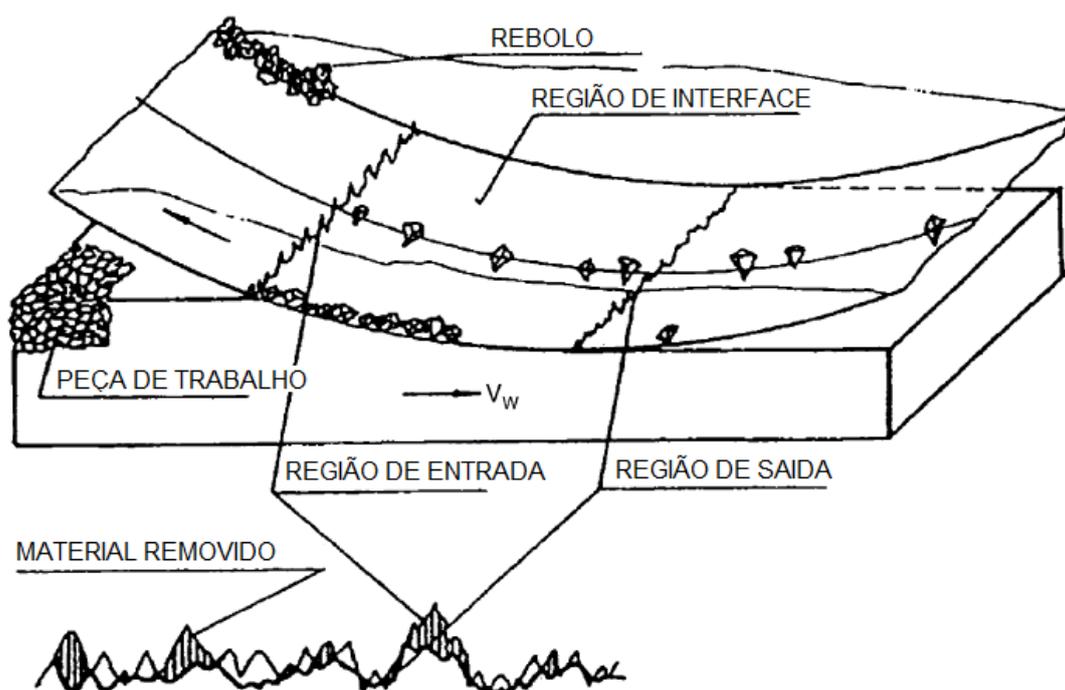
4.4 Processo de retificação

A retificação é um processo complexo de usinagem onde a ferramenta possui uma geometria de corte indefinida, constituída por grãos abrasivos distribuídos aleatoriamente na superfície do rebolo. A remoção de material ocorre pela ação individualizada de cada grão que remove uma dada quantidade de material e

atribui um acabamento na superfície da peça (KOPAC; KRAJNIK, 2006). A Figura 5 ilustra o processo de remoção de material por retificação.

O processo de retificação ocorre devido à interação de grãos abrasivos na superfície de um rebolo com o material da peça a ser retificada e a qualidade da retificação está intimamente associada à microtopografia ativa da superfície do rebolo que é determinada pelo processo de dressagem e pelo desgaste da ferramenta ocorrido no contato peça/rebolo. A abrasão, a microfratura e a remoção dos grãos abrasivos da liga são responsáveis pela alteração na microtopografia do rebolo (FUJITA et al., 2006).

Figura 5 - Ilustração do processo de remoção de material por retificação.



Fonte: KOPAC; KRAJNIK, 2006 (adaptada).

Segundo Pereira; Diniz (2011), a retificação se destaca entre os processos de usinagem pelos altos níveis de exigência de rugosidade, tolerância dimensional e geométrica que podem ser alcançados. Representa a etapa final do processo e possui alto valor agregado. A retificação necessita de uma criteriosa seleção de parâmetros e insumos para alcance de boa produtividade.

Conforme Guermandi et al. (2009), a velocidade de avanço determina a taxa de remoção volumétrica de material, sendo que maiores velocidades de avanço aumentam as forças de corte, a emissão acústica, reduz os tempos de usinagem e aumenta os danos térmicos no material processado.

Segundo Ramesh et al., apud Oikawa et al. (2009), o desempenho de um rebolo é avaliado pela relação entre o volume de metal removido (Z_w) e o volume de rebolo gasto (Z_s) conhecido como relação G . A Equação 1 representa esta relação. Fatores como a velocidade de corte, profundidade de corte, processo de perfilamento e a rugosidade interferem nesta relação.

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (1)$$

Durante a retificação, a taxa de remoção de material (Q_w) é determinada pela penetração do rebolo na peça (a), pela velocidade de avanço entre a peça e o rebolo (V_w) e pela largura de retificação (b), conforme representado na Equação 2. (FUJITA, et al., 2006).

$$Q_w = a \cdot V_w \cdot b \quad (2)$$

Segundo Stemmer (1992, p. 293) o rebolo não deve trabalhar ou ficar parado mergulhado em líquido, para que o mesmo não absorva o líquido que pode causar vibrações e até mesmo a sua quebra.

As operações de acabamento representam uma fase crítica e cara, pois requerem trabalho intenso, preciso e estima-se que essas operações muitas das vezes exigem 15% do custo total de fabricação (GORANA et al. apud LIMA, 2013).

A remoção de material em retificação ocorre em forma de cavacos finos e é realizada por grande quantidade de arestas de corte distribuídas e orientadas ao acaso na superfície de corte do rebolo. Contudo, a remoção desse material é acompanhada por um alto consumo de energia, com a presença da deformação plástica, atrito e geração de energia calorífica causando altas temperaturas localizadas na zona de

usinagem. Isso resulta em vários danos térmicos para a superfície da peça, na forma de fissuras, distorções, tensões residuais e incerteza dimensional e geométrica. Esses efeitos indesejáveis são acompanhados pela aderência de partículas da peça (cavacos) nos poros do rebolo (Bianchi et al., 2001, p. 80).

De acordo com Almeida et al. (2012), durante a usinagem as ferramentas aquecem e sofrem desgastes, exigindo trocas constantes das arestas de corte. O calor gerado aquece as peças usinadas podendo provocar efeitos indesejáveis como alteração nas dimensões pretendidas e geração de tensões residuais que podem comprometer sua utilização. Para minimizar estes problemas, torna-se necessário a utilização de fluidos de corte para refrigerar e lubrificar a região de corte.

Os fluidos de corte além de refrigerar e lubrificar a região de corte retiram os cavacos e limpam os poros do rebolo, porém devem ser manuseados com cuidados especiais, pois podem agredir a saúde humana e o ambiente, tornando-se necessária a proteção do trabalhador e o descarte adequado do fluido, o que eleva os custos de fabricação (OLIVEIRA et al. 2011).

Segundo Canton et al. (2011), a energia no processo de retificação é utilizada na formação do cavaco, deformações e atrito. Nas temperaturas de pico, o material da peça chega a aproximar-se da temperatura de fusão, mas como o processo dura um período curtíssimo de tempo e tais temperaturas estão localizadas nos planos de cisalhamento, o cavaco não chega a fundir, porém ocasiona variações microestruturais e metrológicas na qualidade final do produto.

A operação de retificação no aspecto ambiental se configura como um processo ineficiente, pois necessita de grande volume de fluidos de corte que causam problemas à saúde humana e ao ambiente (FERNANDES et. al., 2004).

4.4.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho

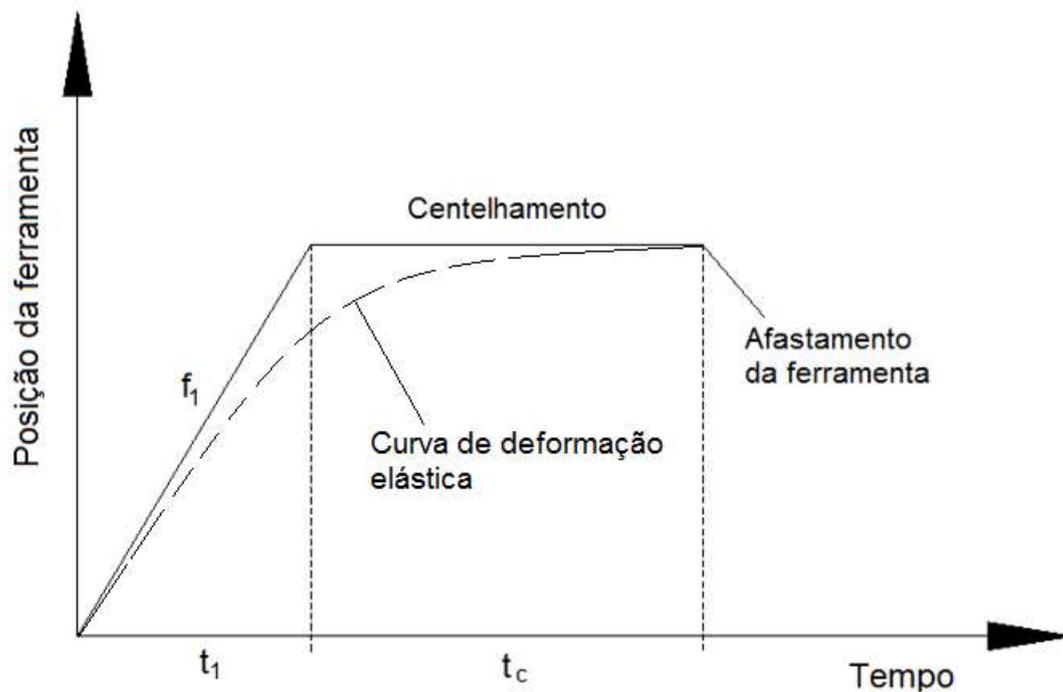
No processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo em alta velocidade periférica é conduzido à superfície de uma peça também em rotação,

porém com sentido contrário. A usinagem é realizada por meio de avanço constante até atingir a profundidade desejada, após esta etapa é dado um tempo de centelhamento para compensar a deformação elástica e atingir a dimensão desejada. Inicialmente o rebolo tem sua superfície preparada visando atender as exigências de acabamento e tolerância geométrica (MALKIN; CHIU, 1993).

A retificação cilíndrica externa de mergulho é realizada quando a espessura do rebolo é maior do que o comprimento a ser retificado, não sendo necessário o movimento longitudinal da mesa. Neste caso utiliza-se o avanço radial do rebolo que se processa sobre a peça de forma contínua (MELLO, 2011).

Conforme Pereira; Diniz (2011), o ciclo convencional de retificação cilíndrica externa de mergulho, apresenta avanço constante do rebolo sobre o material e tempo de centelhamento para que ocorra a compensação elástica do sistema máquina/ferramenta/material. Este ciclo garante melhor acabamento superficial no início da vida da ferramenta, porém desgasta mais a ferramenta, quando comparado com o ciclo de três fases. A Figura 6 ilustra o ciclo convencional de retificação cilíndrica de mergulho. As letras f_1 , t_1 e t_c , representam respectivamente, o avanço da ferramenta sobre o material, o tempo em que ocorre o avanço e o tempo de centelhamento.

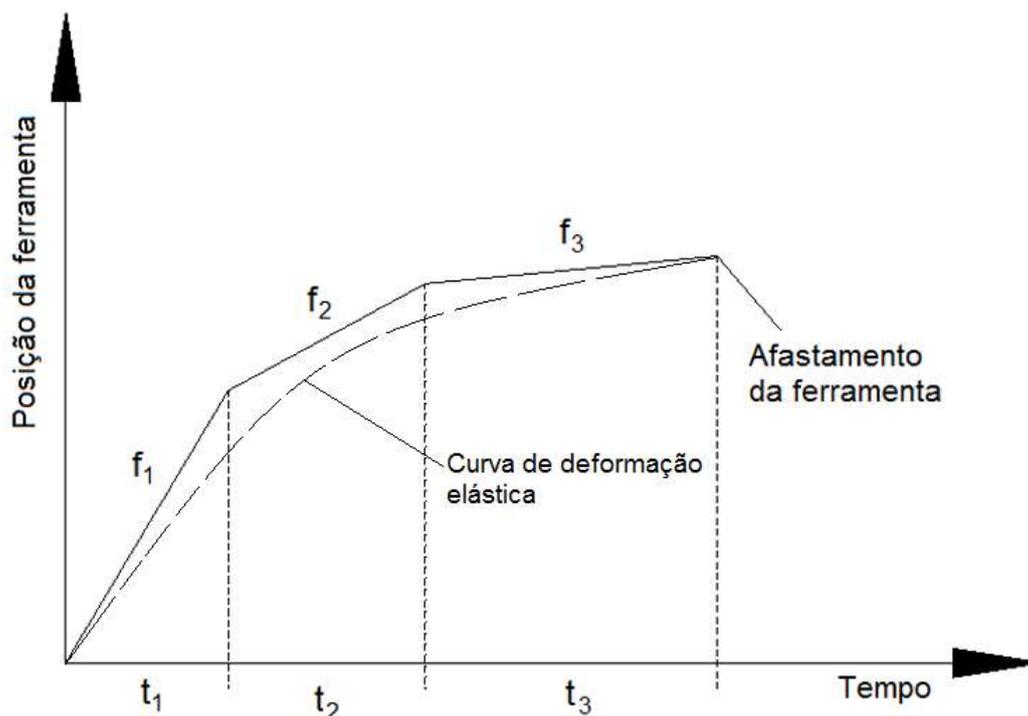
Figura 6 - Ciclo convencional de retificação



Fonte: PEREIRA; DINIZ, 2011 (adaptada).

Os ciclos de três fases apresentam três avanços de mergulho distintos, que reduzem gradativamente até atingir a dimensão final da peça, sendo avanços de desbaste, semi - acabamento e acabamento. Neste processo a compensação elástica ocorre devido à redução gradativa do avanço que se processa até atingir um valor igual a zero e a dimensão final alcançada. As etapas de contato inicial do rebolo com o material (referenciamento) e afastamento do rebolo ao final da retificação, fazem parte do processo. A Figura 7 ilustra o ciclo de três fases (PEREIRA; DINIZ, 2011).

Figura 7- Ciclo de três fases



Fonte: PEREIRA; DINIZ, 2011 (adaptada).

Segundo Hassui; Diniz (2003), o ciclo convencional possui uma velocidade de mergulho constante do abrasivo sobre o material e um tempo de centelhamento para que ocorra a recuperação elástica, conhecido também como *spark out*, que é devido à falta de rigidez do sistema máquina/peça/ferramenta. Esta falta de rigidez propicia o surgimento de deformações elásticas ocasionando um atraso do avanço real em relação ao teórico e que consequentemente causa um atraso dimensional que é corrigido no tempo de centelhamento.

O ciclo convencional de retificação cilíndrica externa de mergulho, ocorre em 6 etapas, que se processa inicialmente com a aproximação/contato entre o rebolo e a peça, onde o rebolo toca ligeiramente o material, contato de referência (t₁). Em seguida o rebolo avança sobre o material e devido às forças de corte ocorre a deformação elástica do conjunto máquina/peça/ferramenta, fazendo com que haja um atraso do posicionamento real entre o rebolo e a peça (t₂). Na terceira etapa (t₃), ocorre a remoção de material com alimentação real em função do avanço programado. Na quarta etapa (t₄), devido ao atraso da posição real ocorrido na etapa 2, o rebolo é mantido em contato com o material, porém com

velocidade de mergulho igual a zero e por um determinado tempo para que ocorra a compensação elástica e o material atinja a dimensão esperada com bom acabamento superficial, boa tolerância dimensional e geométrica. Na quinta etapa (t5) ocorre a retração da ferramenta. A etapa 6 é destinada a retirada da peça (HASSUI; DINIZ, 2003).

4.4.2 Desgaste do rebolo

O desgaste volumétrico do rebolo em relação ao volume de material removido é infinitamente maior em relação aos processos de usinagem que utilizam ferramentas de geometria definida. O desgaste inicia na preparação do rebolo, onde é feita a correção de sua superfície por meio da dressagem, procedimento necessário, que gera alto desgaste da ferramenta abrasiva. Em menor proporção ocorre o desgaste na retificação, que se acentua gradativamente devido a imperfeições que vão se acumulando e pode levar o rebolo a condições precárias de trabalho, caso não ocorra intervenção no tempo adequado para que se faça uma nova dressagem da ferramenta (GRAHAM; VOUTSADOPOULOS, 2003).

O desgaste total do rebolo, pode ser expresso em função da relação G , que representa o volume de material removido em relação ao volume de material gasto do rebolo. A melhoria desta relação deve ser cuidadosamente avaliada, pois pode gerar forças de corte excessivas, aumento de temperatura e levar a ocorrência de danos térmicos. Um fator favorável, é a escolha correta do fluido de corte. As operações de retificação com rebolos de óxido de alumínio e carboneto de silício, geralmente apresentam o maior desgaste na operação de dressagem (MALKIN, 1989).

O desgaste superficial do rebolo ocorre por abrasão e fratura pelo contato deslizante com o produto retificado, e está associado ao tipo de rebolo, a dureza do material retificado e a parâmetros do processo que estabelecem pressões de corte responsáveis pela intensidade de fricção no contato peça/rebolo, podendo levar à quebra e/ou desgaste do abrasivo e rompimento do aglomerante. O estabelecimento de uma atmosfera lubri-refrigerante contribui com a redução do desgaste e o risco de fratura (LAL; MATSUO; SHAW, 1973).

Na retificação, o desgaste se caracteriza como a perda de material devido ao contato deslizante pela ação da adesão, abrasão, fadiga de superfície e fratura. O desgaste do rebolo resulta do atrito e fratura dos grãos abrasivos. A deformação plástica, a decomposição e reações químicas tem efeito significativo neste mecanismo de desgaste. O aspecto químico por meio da ação da atmosfera exerce influência sobre o desgaste do rebolo de óxido de alumínio e o uso de um gás ativo como o HCl, na presença de vapor de água, reduz a fricção e aumenta a taxa de corte na retificação sobre pressão constante (LAL; MATSUO; SHAW, 1973).

O controle das variáveis de entrada por meio de emissão acústica de ondas elásticas em frequências ultrassônicas geradas pelo processo, representa um sinal rico em informações. Os sensores possuem sensibilidade para detectar eventos em escala microscópica e possibilitam um sinal claro em ambientes com altos níveis de ruídos, capazes de prever vibrações e queima das peças, possibilitando o controle da topografia do rebolo e assegurando o grau de acabamento requerido. (LEE et al., apud WEINGAERTNER; BENINI; MACIEL, 2014).

O controle do desgaste do rebolo representa o controle da qualidade da retificação. O desgaste está relacionado com variáveis de entrada, como velocidade, avanço e profundidade, que exercem grande impacto nos resultados, porém estas variáveis são flexíveis e podem ser facilmente ajustadas. A topografia do rebolo define os valores que estas variáveis podem assumir e os níveis de qualidade que podem ser alcançados pela retificação (WEINGAERTNER; BENINI; MACIEL, 2014).

A intensidade do sinal está relacionada com o estado de superfície do rebolo. Testes realizados, comprovaram a variação do sinal acústico, apresentando para a condição desgastada menor intensidade devido a ferramenta abrasiva possuir menos gumes cortantes em função da perda por desgaste, quebra, ou desprendimento, gerando menos impactos. O sinal acústico, contribui na definição do momento adequado para realização da dressagem e na

manutenção de uma topografia adequada à qualidade exigida no processo de retificação (WEINGAERTNER; BENINI; MACIEL, 2014).

O comportamento do material retificado, é caracterizado pela sua resistência à ruptura, limite de elasticidade ou resistência à flexão e dureza. Durante a formação do cavaco, materiais dúcteis, tais como os metais são primeiramente sujeitos à deformações elásticas, em seguida, o material começa a ceder e a deformação plástica tem lugar. Estes fatores estão associados à complexidade na definição do desgaste do rebolo (TONSHOFF et al., 1992)

4.5 Fluidos de corte

Fluidos de corte são composições complexas, que possuem em sua constituição agentes químicos que variam em função da operação a ser executada e do metal a ser trabalhado (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004, p. 10).

Graças às pressões exercidas por agências de proteção ambiental e de saúde, quanto ao controle de processos e insumos industriais, que levem em conta a produção, utilização, reaproveitamento e o descarte adequado, a qualidade dos fluidos de corte tem melhorado suas propriedades, apresentando-se menos nocivos ao homem e ao meio ambiente. Os fluidos têm melhorado a capacidade de lubrificação e refrigeração, oferecem menos riscos à saúde do trabalhador e apresentam menos problemas de armazenamento (MACHADO et al., 2009, p. 157).

As principais funções dos fluidos de corte são lubrificação, refrigeração, proteção contra a corrosão do sistema máquina, peça, ferramenta e remoção dos cavacos da zona de corte (MACHADO et al., 2009, p.158).

Devido ao desenvolvimento tecnológico, uma grande demanda de produtos sintéticos é lançada no mercado para os quais não existem testes toxicológicos adequados e como é complexa a tarefa de monitorá-los, alguns órgãos ambientais recomendam atitudes preventivas (OLIVEIRA; ALVES, 2006, p. 29).

Os fluidos na retificação devem atender aos requisitos de refrigeração e lubrificação de acordo com necessidades específicas de cada operação levando em conta a área de contato peça/rebolo (MACHADO et al., 2009, p. 340).

Segundo Stemmer (1992, p. 292), cerca de 84% do calor gerado na retificação vai para a peça, 4% para os cavacos e 12% para o rebolo. A retificação pode então provocar grandes solicitações térmicas, produzindo problemas como pontos macios (por sobre-aquecimento), pontos duros por aquecimento e resfriamento rápido, áreas manchadas e queimadas, trincas e deformações.

Altas temperaturas podem gerar problemas indesejáveis como a queima, irregularidades geométricas e alterações metalúrgicas. Para DINIZ; MARCONDES; COPPINI, (1999) em média, 85% do calor gerado vai para a peça, 5% para o cavaco e 10% para o rebolo.

A remoção de material na retificação é acompanhada de um elevado consumo de energia e grande parte desta energia é convertida em calor que causa elevadas temperaturas na região de corte, podendo comprometer a integridade superficial da peça e levar a um desgaste acentuado do rebolo (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004, p. 9).

Segundo Machado et al. (2009, p. 340), fluidos de corte com alto poder lubrificante apresentam viscosidade elevada, dificultando o acesso à interface peça/rebolo.

A eficiência do processo de lubri - refrigeração está associada com a velocidade do fluido que deve ser igual ou superior a velocidade do rebolo, de forma a assegurar a entrada na interface e poros do rebolo ao longo da região de contato (SALMON apud MACHADO et al., 2009, p.340).

Para Lima (2012) a indústria tem exigido de um fluido de corte características como anticorrosão, além das necessidades de lubrificação e refrigeração.

Os fluidos de corte são agrupados em quatro tipos básicos: Fluidos de corte solúveis em água (emulsionáveis convencionais, emulsionáveis semi-sintéticos e soluções), Óleos de corte ou Fluidos de corte integral puro ou aditivado, Gases, Pastas e Lubrificantes sólidos (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004, p. 11).

4.5.1 Fluidos de corte emulsionáveis em água

Segundo Muniz (2008, p. 34), fluidos de corte aquosos são baseados em substâncias químicas que formam soluções estáveis com a água e possuem boas características anticorrosivas e refrigerantes. Os tipos mais simples são sais orgânicos dissolvidos em água. Esses fluidos formulados a partir da água e óleo de base mineral que não se misturam, mas formam uma fase oleosa dispersa na fase aquosa (emulsão), podem ter suas propriedades melhoradas com adição de aditivos e a porcentagem do óleo e da água na emulsão é definida em função das necessidades de lubrificação e refrigeração. As emulsões podem apresentar problemas como a formação de precipitados que se depositam nas máquinas e peças, estes precipitados interferem na filtragem, favorecem o crescimento bacteriano, causando odor ao fluido e podendo causar a quebra da emulsão.

A contaminação bacteriana nas emulsões pode causar indiretamente a corrosão em função do consumo dos inibidores de corrosão e/ou pela presença de subprodutos e suas reações como os ácidos orgânicos (BYERS apud LIMA, 2012).

Os fluidos de corte solúveis em água transformam-se em misturas quando diluídos. As misturas variam entre emulsões e soluções, que dependem da constituição básica do fluido concentrado (óleo mineral ou sais orgânicos e inorgânicos), da presença e do nível de emulgadores no concentrado. O poder de lubrificação e refrigeração estão associados à taxa de diluição e a constituição do concentrado. Nas emulsões, o óleo mineral está disperso na água em forma de gotículas devido à presença de emulgadores que separam o óleo mineral em minúsculas partículas, mantendo-as dispersas por meio de cargas repulsivas, evitando a coalescência das mesmas. Apresentam maior poder refrigerante e

menor capacidade de lubrificação em relação ao óleo integral e necessitam cuidados especiais em relação à qualidade da água, controle de micro-organismos, pH e à concentração da emulsão (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004, p. 13).

Segundo Bianchi; Aguiar; Piubeli (2004, p. 13), os fluidos semi - sintéticos são combinações de fluidos sintéticos e emulsões em água. Estes fluidos sintéticos contém uma pequena porcentagem de óleo mineral emulsionável, o qual é adicionado a fim de propiciar uma emulsão estável, translúcida e composta de minúsculas gotículas de óleo. Estes fluidos possuem baixa lubricidade, porém possibilitam um melhor controle de oxidação. Os fluidos sintéticos são soluções químicas constituídas de sais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água sem a presença de óleo mineral. Permitem rápida dissipação do calor, bom controle dimensional, excelente poder detergente, visibilidade da região de corte, facilidade de preparo e elevada resistência à oxidação. As principais desvantagens são o baixo poder lubrificante, formação de compostos insolúveis e espuma.

4.5.2 Fluidos de corte integral puro e aditivado

Fluidos de corte integral puro ou aditivado são todos aqueles de base mineral e vegetal que são utilizados em operações de usinagem sem adição de água. São disponíveis em grande variedade, desde o óleo mineral até compostos especiais e podem ser classificados como ativos (aqueles que reagem com a superfície do material, escurecendo-a em função do enxofre acrescentado para facilitar a usinagem) e inativos (os que não reagem com a superfície do material). Os óleos minerais puros situam-se numa faixa de viscosidade que possibilita boa infiltração e molhabilidade, sendo adequados para usinagem leve (FERRARESI, 1977, p. 527 - 529).

Os óleos minerais de base parafínica, são conhecidos como óleos integrais, apresentam excelente poder lubrificante e baixa capacidade de refrigeração em relação às emulsões. Possuem em sua composição, compostos aromáticos policíclicos que podem causar sérios danos à saúde, como câncer e/ou

dermatite. Estes compostos são destruídos por meio de forte hidrogenação durante o processo de fabricação (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004, p. 12).

Óleos integrais, apresentam excelentes propriedades lubrificantes, controle anti-ferrugem e longa vida útil. No entanto o poder de refrigeração é baixo quando comparado às emulsões (SILVA apud FERNANDES, 2007).

Os óleos minerais são hidrocarbonetos obtidos a partir do refino do petróleo e suas propriedades dependem do comprimento da cadeia, da estrutura molecular e do grau de refino. A base dos óleos minerais pode ser parafínica, naftênica ou aromática. Entretanto, o fluido utilizado é geralmente de base parafínica que deriva do refino do petróleo com alto teor de parafinas (ceras), originando excelentes fluidos lubrificantes. São óleos encontrados em maior abundância por isto apresentam menor custo, possuem elevada resistência a oxidação e mantem sua viscosidade constante em ampla faixa de temperaturas (MACHADO et al., 2009, p. 162).

Os óleos minerais podem ser utilizados puro ou aditivados, os aditivos agem melhorando a viscosidade, reduzindo a formação de espuma protegendo o sistema contra a corrosão e oxidação. Estes óleos mesmo na condição aditivada, são extremamente aderentes à superfície do material (NOVASKI; RIOS apud FERNANDES, 2007).

Segundo Kuram et al., (2013), aditivos são adicionados aos fluidos em função de variações de temperaturas provenientes dos processos de usinagem, que podem alterar a estabilidade dos fluidos de corte, comprometendo sua eficiência e vida útil.

O óleo mineral também chamado de integral devido a utilização no estado puro ou aditivado, existe em grande variedade em relação a viscosidade e níveis de aditivação, podem ser ativos ou inativos dependendo da formulação e aplicação, possuem bom poder lubrificante e são destinados a operações que não requerem alto poder refrigerante. O óleo mineral no estado puro se configura como um óleo inativo, enquanto os óleos ativos são os óleos minerais aditivados.

Quando combinado com enxofre, forma o óleo mineral sulfurado com melhor redução de atrito. A combinação com enxofre e soda formam o óleo mineral sulfoclorado, resultando em um produto anti - solda (MUNIZ, 2008).

Os óleos minerais devem ser acondicionados em reservatórios que assegurem uma temperatura controlada, da ordem de 21°C a 24°C e passar periodicamente por processo de filtração para impedir a contaminação por outros fluidos, eliminar impurezas provenientes do processo e assegurar eficiência e vida útil (RUNGE; DUARTE apud CATAI, 2004).

4.5.3 Óleos vegetais

Atualmente os óleos vegetais tem surgido como uma alternativa aos óleos minerais, por serem renováveis, menos tóxicos e facilmente biodegradáveis (NORRBY; MATTHEW et al., apud MORAIS, 2014).

Óleos vegetais são obtidos de sementes de frutas e nozes, com auxílio de processos de prensagem, extração com solventes e passam por processos de refinação (BENNION; FENNEMA, apud ALUYOR; KESSINGTON; MUDIACHEOGHENE, 2009).

Óleos vegetais são compostos à base de triglicerídeos, constituídos pela reação de moléculas de glicerol com três moléculas de ácidos graxo de cadeia longa, ligadas aos grupos hidroxilas. O triglicerídeo fornece propriedades lubrificantes desejáveis, enquanto as grandes cadeias de ácidos graxos polares fornecem filmes lubrificantes que interagem fortemente com a superfície metálica, reduzindo o atrito e desgaste (FOX; STACHOWIAK apud KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS 2013).

Existe uma grande quantidade de óleos vegetais extraídos a partir de sementes de plantas oleaginosas, como a soja, o milho, caroço de algodão, ervilha, girassol, coco e outros. O óleo de Soja, classificado como um óleo de ácido linoleico, tem grande importância mundial devido ao aumento das aplicações no

mundo moderno (ALUYOR; KESSINGTON; MUDIAKEOGHENE, 2009; ERHAN et al., apud ALUYOR; KESSINGTON; MUDIAKEOGHENE, 2009).

Dentre as diversas oleaginosas utilizadas na produção dos óleos vegetais, a soja se destaca como uma das mais utilizadas mundialmente. O Brasil é o segundo maior produtor de soja do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos (USDA, apud MORAIS, 2014).

As crescentes preocupações com os impactos ambientais, tem favorecido o desenvolvimento de novas tecnologias para fabricação de produtos industriais a partir de fontes renováveis. Os óleos vegetais são um exemplo de alternativa adequada em substituição aos óleos minerais (CAMPANELLA et al., 2010).

Nos últimos anos, a Europa vem mostrando crescente preocupação com a preservação ambiental, em consequência tem aumentado consideravelmente o consumo de lubrificantes biodegradáveis à base de óleos vegetais no continente (IHRIG, A.; KORFF. J; FESSENBEKER, A. apud ZEMAN et al., 1995).

Óleos vegetais quando aplicados na ciência da tribologia em processos industriais, são utilizados como fluidos refrigerantes nos processos de fabricação mecânica por usinagem e como lubrificantes em componentes mecânicos que possuem movimentos relativos. Estes óleos antes de recentes desenvolvimentos eram utilizados basicamente como aditivos para fluidos de base mineral e em misturas (ALUYOR; KESSINGTON; MUDIAKEOGHENE, 2009).

A grande capacidade de lubrificação dos óleos vegetais, devido ao índice de viscosidade, que representa praticamente o dobro da viscosidade dos óleos minerais e de possuir pequena variação com o aumento da temperatura, tornam vantajosas sua utilização como aditivos aos óleos minerais e como óleos lubrificantes em equipamentos industriais. Na Tabela 4 pode ser observada algumas propriedades dos óleos vegetais de Soja e Milho (HONARY apud ALUYOR; KESSINGTON; MUDIAKEOGHENE, 2009).

Tabela 4 - Propriedades físico – químicas dos óleos vegetais de soja e milho

Propriedades	Óleo de Soja	Óleo de Milho
Viscosidade cinemática	29,5	32,3
Índice de viscosidade (cSt)	219	206
Ponto de fulgor (°C)	338	329
Índice de saponificação (mg KOHg-1)	189	189
Índice de Acidez total (mg KOHg-1)	0,20	0,22
Índice de lodo (gl2.g-1)	144	142

Fonte: MORAIS 2014, (adaptada).

A biodegradabilidade dos óleos vegetais se destaca como o fator de maior relevância para utilização deste produto, atingindo valores da ordem de 70 a 100%. O desafio é a melhoria de desempenho nas aplicações industriais, especificamente com relação à sua estabilidade oxidativa e pontos de fluidez (ALUYOR; KESSINGTON; MUDIACHEOGHENE, 2009).

Os óleos vegetais apresentam índice de viscosidade mais elevado em relação ao óleo mineral, no entanto a estabilidade térmica e oxidação são limitadas (ABDALLA; PATEL apud KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS 2013).

As moléculas dos óleos vegetais são homogêneas, longas, fortes e bipolares (possuem cargas elétricas opostas nas extremidades) que favorecem a adesão da molécula na superfície metálica do material criando uma forte película lubrificante densa e homogênea com maior capacidade de absorver pressão. Ao contrário das moléculas dos óleos minerais que tem maiores variações de tamanho, são apolares e portanto, formam um alinhamento aleatório ao longo da superfície metálica, fornecendo uma camada lubrificante fraca (KRAHENBUHL; WOODS apud KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS 2013).

As propriedades dos óleos vegetais são determinadas em função da composição de ácidos graxos, que podem apresentar proporções variadas de ácido linoleico e de ácido graxo saturado de cadeia longa, afetando o seu desempenho (ZEMAN et al., 1995).

A estabilidade termo-oxidativa é uma propriedade de difícil controle nos óleos vegetais, técnicas de refino e antioxidantes ambientalmente amigáveis devem ser utilizados para controle (ZEMAN et al., 1995).

Óleos vegetais apresentam propriedades satisfatórias de lubricidade, possuem bom ângulo de contato de lubrificação, bom índice de viscosidade, alto ponto de fulgor e baixa volatilidade. No entanto podem apresentar susceptibilidade à degradação oxidativa e propensão à hidrólise em meio ácido. Aditivos podem ser incorporados aos óleos vegetais para melhoria e manutenção de propriedades (HWANG; ERHAN; HWANG et al., apud CAMPANELLA et al., 2010).

A soja é um produto destinado principalmente à alimentação humana e animal, com grande valor econômico. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de soja e atualmente sua aplicação tem tomado dimensões crescentes na indústria, devido a vantagens na utilização como fluido de corte. A presença em sua composição de alto conteúdo de ácidos graxos, capacidade de formação de cristais de fácil filtragem e alto índice de iodo, favorecem a hidrogenação produzindo variedades de gorduras plásticas e refino com baixas perdas (SILVA; GIOIELLI apud MORAIS 2014).

O óleo de Soja possui em média: 15% de gordura saturada, 54% de ácido linolênico, 8% de ácido α -linolênico (ω 3) e 23% de gordura monoinsaturada (CARCEL apud MORAIS 2014).

O milho ocupa a segunda maior posição mundial na produção de cereais, ficando atrás da soja. Os Estados Unidos têm uma produção aproximada de 90% do que se produz no mundo (USDA apud MORAIS 2014).

4.5.4 Gases

O ar atmosférico O_2 é o gás mais comum utilizado para refrigeração em função da disponibilidade e custo. Gases como o argônio, hélio e nitrogênio são utilizados em alguns casos visando evitar a oxidação. Já o CO_2 , que possui ponto de ebulição abaixo da temperatura ambiente, pode ser comprimido, elevando-se assim seu ponto de ebulição e injetado na região de corte. Os gases de um modo geral possuem baixa capacidade de refrigeração, portanto são pouco empregados (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004, p. 14).

4.5.5 Pastas e lubrificantes sólidos

Os lubrificantes sólidos mais utilizados são o grafite, o bissulfeto de molibdênio, alguns tipos de pastas, sabões e ceras. São empregados diretamente sobre a peça e/ou ferramenta (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004, p. 14).

4.6 Integridade superficial

A integridade superficial de uma peça usinada é caracterizada por alterações superficiais que alteram a textura da superfície (rugosidade), sua geometria e aspectos sub-superficiais de características mecânicas ou metalúrgicas devido a fatores como deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas que são fatores inerentes aos processos de usinagem (MACHADO, 2009, p. 297).

4.6.1 Danos térmicos

O processo de retificação requer uma grande quantidade de energia na remoção de material, que é transformada em calor e se concentra na região de corte gerando altas temperaturas. Essas temperaturas são dependentes do estado de afiação do rebolo e demais parâmetros do processo, podem causar danos térmicos ao produto retificado, como a queima superficial. As adesões de partículas metálicas aos grãos abrasivos do rebolo geram mais calor, aumentam as forças de retificação causando desgaste do rebolo e a deterioração da

qualidade superficial da peça, podendo ocorrer ainda a retêmpera e o surgimento de tensões residuais. A aplicação de fluidos de corte tem como uma das funções a remoção do calor excessivo (EBBRELL et al.; MALKIN, apud GUERMANDI et al., 2009).

Segundo Bianchi et al. (2001), um dos tipos mais comuns de danos térmicos é a queima superficial, que se agrava devido a adesão de partículas metálicas à superfície do rebolo aumentando a geração de calor. O aquecimento excessivo causa a re-austenitização do material, provocando a retêmpera que origina a formação de martensita não revenida, em função do aquecimento à temperatura de austenitização e resfriamento rápido sem posterior alívio de tensões, resultando no aumento da microdureza superficial. Para aços retificados que não ocorrem a queima, a microdureza superficial, tende a reduzir em função da temperatura não atingir a temperatura de austenitização.

4.6.2 Rugosidade

A rugosidade ou textura primária é formada pela ação da ferramenta de corte que atua na superfície do material e se encontra superposta ao perfil de ondulação. Esta ondulação representa um conjunto de irregularidades repetidas em comprimento de ondas bem maiores que o comprimento da rugosidade, causada por imprecisões dos equipamentos e conhecidas como desvios macrogeométricos (NOVASKI, 2005, p. 55).

Segundo Machado et al. (2009, p. 278), a rugosidade é composta de irregularidades microgeométricas resultantes da ação inerente ao processo de corte com influência direta da máquina ferramenta, propriedades do material da peça, geometria, material da ferramenta e operação de usinagem. Ondulações e falhas representam erros de fabricação, a rugosidade, por sua vez, é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada.

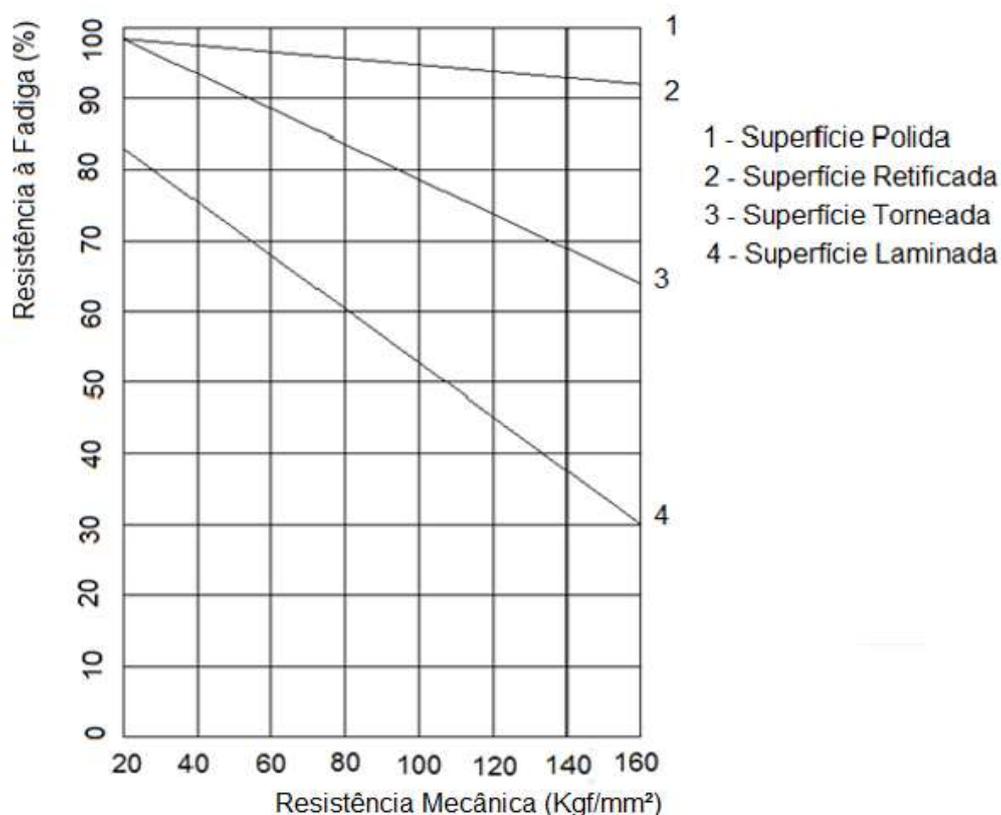
Para que se obtenha a rugosidade desejada, além dos parâmetros de retificação, é necessário o controle dos parâmetros de dressagem (XIÃO; MALKIN, 1996).

Ondulações são irregularidades superficiais geométricas, maiores que as irregularidades conhecidas como rugosidade e podem ser causadas por vibrações, flexões da ferramenta e/ou peça, devido à força de usinagem, temperatura, fixação da peça ou ferramenta e geometria da peça. Já as falhas são interrupções na topografia típica de uma superfície, que podem ocorrer por inclusões, trincas, bolhas e durante o processo de usinagem (MACHADO et al., 2009, p. 277).

A importância do acabamento superficial aumenta com a precisão de ajuste entre peças a serem acopladas, sendo fundamental em situações onde houver atrito, desgaste, corrosão, aparência, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades ópticas, escoamento de fluidos e superfícies de medição, devendo nestas situações haver a especificação do acabamento por meio da rugosidade (AGOSTINHO et al., 2009, p.192).

A Figura 8 relaciona o comportamento da resistência à fadiga em função da variação da resistência mecânica para um grupo de superfícies de materiais que apresentam acabamento superficial com diferentes graus de rugosidade devido ao processo de fabricação. Ficou evidenciado que quanto melhor o acabamento superficial menor será a alteração no módulo de resistência à fadiga. No entanto segundo Abrão apud Pereira; Diniz (2011), temperaturas superiores a 1000°C atingidas nos processos de retificação podem causar a perda de propriedades mecânicas como a redução do limite de resistência à fadiga.

Figura 8 - Influência do acabamento superficial na resistência à fadiga



Fonte: AGOSTINHO et al, 2009, p. 193 (adaptada).

A rugosidade é afetada por um elevado número de variáveis podendo então ser avaliada por parâmetros de amplitude, de espaço e híbridos, onde os parâmetros de amplitude são determinados em função das alturas dos picos e profundidade dos vales, sem se preocupar com o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície. Os parâmetros de espaçamento, consideram as variações/irregularidades ocorridas ao longo do perfil ou superfície e os híbridos são definidos pela combinação dos parâmetros de espaçamento e amplitude (MACHADO et al., 2009, p. 301).

A rugosidade é medida basicamente pelo sistema da linha média (M) e pelo sistema da linha envolvente (E). No sistema da linha média, considera-se uma linha paralela a direção geral do perfil de modo que a soma das áreas superiores ou positivas (picos) seja igual à soma das áreas inferiores ou negativas (vales), no comprimento de amostragem (AGOSTINHO et al., 2009, p. 202-203).

A NBR 6405 define os termos e parâmetros necessários para medição da rugosidade no sistema (M), pelo método de apalpamento com utilização de aparelhos eletromecânicos (NBR 6405, 1985).

O parâmetro R_a representa a média aritmética dos valores absolutos entre os valores medidos dentro do percurso de medição em relação à linha média (NOVASKI, 2005, p. 60).

A Tabela 5 relaciona a relação entre a seleção da rugosidade, qualidade de trabalho e dimensão da peça.

Tabela 5 - Rugosidade X Qualidade de trabalho X Dimensão

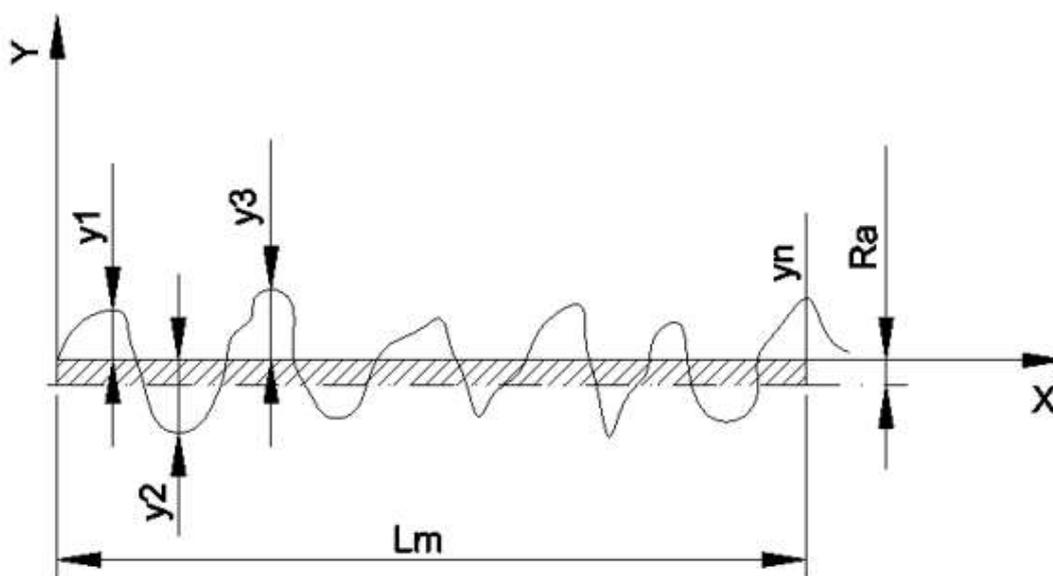
Ra (μm) X Qualidade de Trabalho (IT) X Dimensão (mm)					
Qualidade Trabalho	Até 03	Acima de 03 até 18	Acima de 18 até 80	Acima de 80 até 250	Acima de 250
IT 06	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2
IT 07	0,3	0,5	0,8	1,2	2
IT 08	0,5	0,8	1,2	2	3
IT 09	0,8	1,2	2	3	5
IT 10	1,2	2	3	5	8
IT 11	2	3	5	8	11
IT 12	3	5	8	12	20
IT 13	5	8	12	20	-
IT 14	8	12	20	-	-

Fonte: AGOSTINHO et al, 2009, p. 213 (adaptada).

O parâmetro R_a cuja unidade de medida é o micrômetro (μm), tem seu valor definido com base na linha média, na profundidade e altura da rugosidade (y_1 a

y_n) dentro do campo de medição (L_m), conforme apresentado na Figura 9. Esta grandeza pelo fato de ser uma média, não dá indicação direta do estado da superfície, mas é facilmente medida e é o sistema adotado pela norma brasileira para avaliação da rugosidade (AGOSTINHO et al., 2009, p. 204).

Figura 9 - Ilustração do processo de medição da rugosidade R_a .

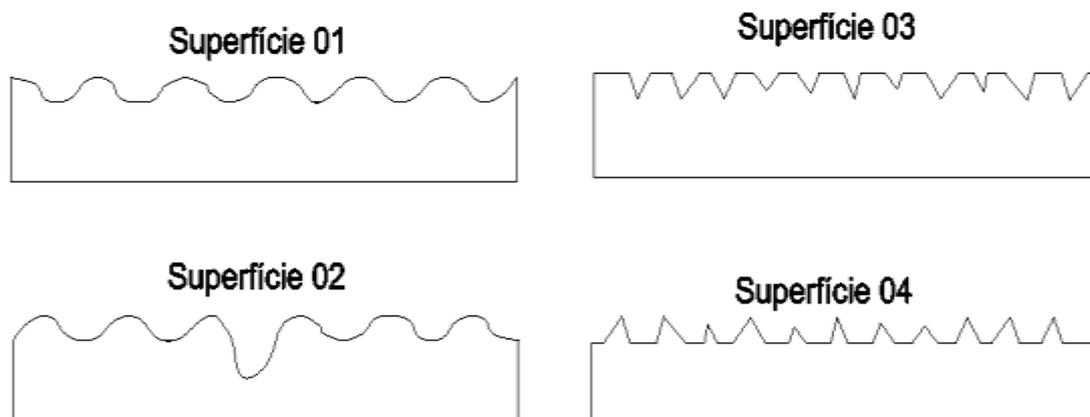


Fonte: AGOSTINHO et al., 2009 (adaptada).

Conforme Machado et al. (2009, p. 282) o parâmetro R_a , isoladamente não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar valores de rugosidade (R_a) bem próximos, com desempenhos em serviços distintos. Na Figura 10 pode-se observar perfis de superfícies diferentes que podem apresentar a mesma rugosidade R_a .

Na avaliação superficial do aço ABNT 4340 endurecido, usinado pelo processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, com utilização de refrigeração convencional e fluido de corte mineral/integral dentre outros, desenvolvidos neste trabalho, foram adotados os parâmetros de amplitude, (R_a e R_t).

Figura 10 - Perfis de superfícies diferentes que podem apresentar a mesma rugosidade.



Fonte: MACHADO et al., 2009 (adaptada).

As taxas de avanço (velocidade de mergulho) empregadas na retificação, afetam diretamente os resultados de rugosidade, apresentando os maiores valores para os maiores avanços utilizados (GUERMANDI et al., 2009).

O parâmetro R_t (altura total do perfil), é definido como a soma da profundidade do maior vale com a altura do maior pico no comprimento de avaliação. Em casos onde é necessário especificar a altura máxima da rugosidade, este parâmetro deve ser empregado, pois é diretamente influenciado por qualquer defeito ou irregularidade na superfície (MACHADO et al., 2009, p. 281 e p. 283).

O parâmetro de medição R_z , representa a altura das irregularidades dos 10 pontos, sendo a diferença entre a média dos 5 pontos de maior altura, subtraído da média dos 5 vales de maior profundidade a partir de uma linha de referência situada abaixo do perfil analisado e dentro do campo de avaliação (AGOSTINHO et al., 2009, p. 204).

“Inúmeros outros parâmetros são definidos para medir a rugosidade, entretanto, a escolha do parâmetro a ser utilizado dependerá muito da aplicação da peça” (MACHADO et al., 2009, p. 284).

O comprimento de amostragem é definido segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), como sendo o comprimento na direção do eixo X usado para identificar as irregularidades do perfil. O comprimento de avaliação é o comprimento na direção do eixo X usado para estabelecer o perfil sob avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. Normalmente recomenda-se um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem (MACHADO et al., 2009, p. 282).

4.6.3 Alterações subsuperficiais (microestrutura e microdureza)

As estruturas cristalinas dos metais é aquela na qual os átomos estão situados em um arranjo que se repete de forma periódica ao longo da estrutura do material. Na solidificação ocorre a formação de um padrão tridimensional repetitivo e algumas propriedades dos sólidos cristalinos dependem da estrutura cristalina do material (CALLISTER, 2002, p.21).

A microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, pelas proporções e pela forma como estão distribuídas e arrançadas. Depende de variáveis como elementos de liga presentes, suas concentrações e o tratamento térmico da liga. Para análise da microestrutura, devem ser selecionadas amostras, preparadas por meio de lixamento, polimento e ataque químico apropriado. A avaliação da microestrutura pode ser realizada por meio da microscopia eletrônica de varredura – MEV (CALLISTER, 2002).

A microestrutura dos metais geralmente possui algum tipo de defeito, originado em processos primários de fabricação, tais como discordâncias, falhas de empilhamento, vazios, trincas, defeitos puntiformes e de constituintes microestruturais, como fases e inclusões, entre outros. Estas anomalias podem ser agravadas em processamentos mecânicos durante a criação de um produto, em função de solicitações mecânicas e térmicas impostas ao material podendo ocasionar sua perda (AMBRÓSIO FILHO; PADILHA, 2004).

Solicitações térmicas e mecânicas originadas por meio da ação da ferramenta abrasiva sobre o material, são influenciadas pelo tipo de fluido de corte, forma

de aplicação do fluido, velocidade, vazão e geometria do bocal. Estas solicitações podem causar alterações na microestrutura do material (LIMA, 2013).

A queima superficial da peça induzida pelo processo de retificação, contribui para a ocorrência de adesão de partículas metálicas na superfície do rebolo, tendo como consequência o aumento das forças de corte, a deterioração da qualidade superficial e aumento do desgaste do rebolo. A queima é acompanhada de um processo de re-austenitização do material fazendo com que ocorra a retêmpera, com formação de martensita não revenida, resultando no aumento da microdureza superficial (MALKIN, 1989).

Na retificação, o aumento excessivo de temperatura proveniente do processo se configura como o principal fator que pode comprometer a integridade superficial de uma peça retificada, ocasionando a perda ou redução da resistência ao desgaste, à corrosão, à nucleação e propagação de trincas e à aceleração do processo de fadiga (ALVES, 2005).

Durante a usinagem, devido a parâmetros do processo, a sub superfície do material sofre modificações. Essas alterações devem ser conhecidas para que sejam avaliadas em função da aplicação do produto, principalmente em componentes sujeitos a altas tensões, tensões alternadas, sob altas temperaturas e em ambientes corrosivos. As principais alterações observadas em operações de usinagem são de natureza mecânica ou metalúrgica (MACHADO et al., 2009, p. 313).

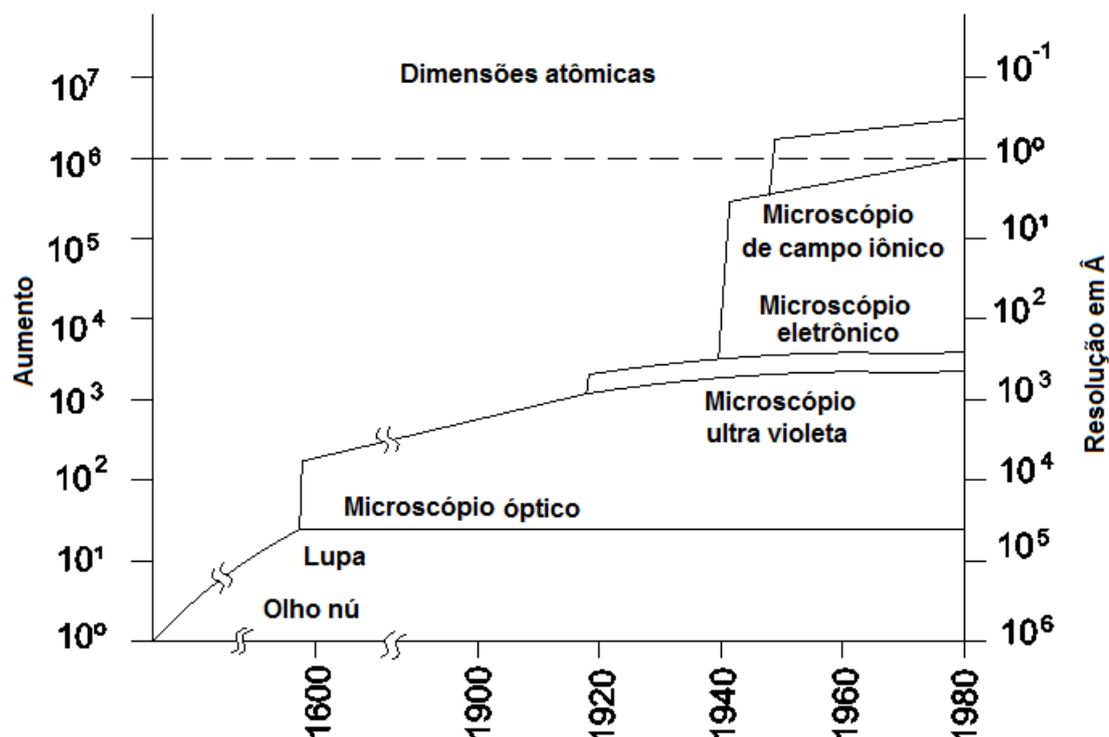
A sub-superfície do material pode sofrer alterações de natureza mecânica, como deformação plástica, alterações de microdureza, trincas, tensões residuais e alterações de natureza metalúrgica, como recristalização e transformação de fases, conforme descrito abaixo (MACHADO et al 2009, p.313).

- Deformação plástica: São deformações que afetam a sub superfície do material e pode ser identificada pelas estruturas metalúrgicas que se alongam na direção do fluxo de deformação.

- Microdureza: A microdureza do material pode sofrer alterações significativas em função das alterações metalúrgicas. A temperatura atingida na superfície do material, associada a velocidade de resfriamento, pode levar à formação de martensita não revenida, elevando a microdureza.
- Trincas: Micro ou macro trincas podem ocorrer na usinagem, principalmente em materiais frágeis com utilização de processos convencionais de usinagem.
- Tensões residuais: Podem ser causadas devido a esforços de tração ou compressão pela ação da ferramenta de corte que atua sobre o material.
- Recristalização: A recristalização pode ocorrer devido a deformações plásticas ocorridas no material, quando acompanhadas de aumento de temperatura superior a temperatura de recristalização.
- Transformação de fase: Altas temperaturas impostas ao material, podem promover a transformação de fase. No caso dos aços, pode ocorrer a formação de martensita frágil e martensita não revenida.

As propriedades dos materiais são determinadas pelas suas microestruturas, ou seja, em função dos defeitos e constituintes microestruturais. No estudo dos materiais, destacam-se a microscopia óptica (MO), a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a microscopia eletrônica de transmissão (MET) e com menor aplicação a microscopia de campo iônico (MCI). Geralmente estas técnicas são complementares na análise de materiais, uma vez que cada uma tem seu campo específico de atuação conforme ilustrado na Figura 11 (AMBRÓSIO FILHO; PADILHA; 2004, p. 85).

Figura 11 - Campos de abrangência das técnicas de microscopia



Fonte: AMBRÓSIO FILHO; PADILHA; 2004 (adaptada).

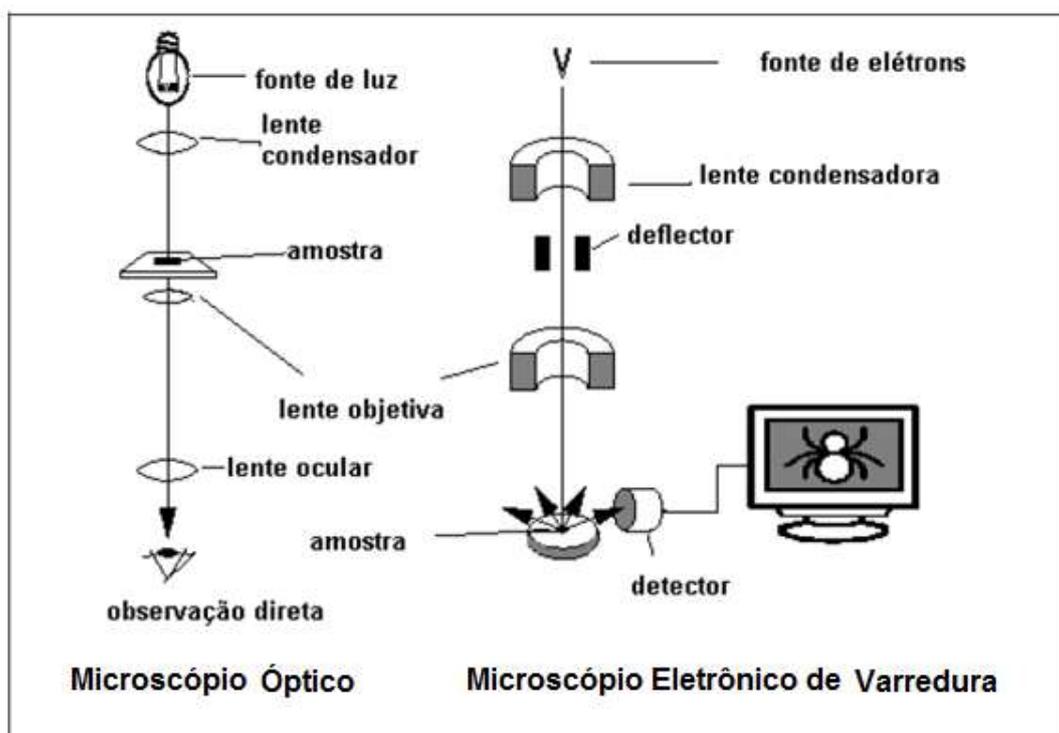
“A microscopia óptica permite a análise de grandes áreas, além de ser de utilização simples, rápida e pouco dispendiosa” (AMBRÓSIO FILHO; PADILHA, 2004, p. 86).

Na microscopia óptica (MO), o mecanismo é constituído basicamente por uma fonte de iluminação e um sistema de lentes que faz com que o contraste da imagem seja resultado da diferença de refletividade da luz nas diversas regiões da microestrutura. Em materiais opacos como os metais, somente a superfície pode ser observada, a qual deve ser bem preparada para que os detalhes da microestrutura possam ser observados. Devido a limitação na ampliação da imagem, que pode alcançar um valor máximo da ordem de 2000 vezes, pequenos detalhes estruturais não são possíveis de serem observados por esta técnica (PICCOLI, et al., 2006).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar do feixe de fótons utilizados na microscopia óptica, isto elimina problemas

relacionados com a fonte de luz branca. Os elétrons possuem comprimentos de onda extremamente curtos e são submetidos a uma voltagem suficientemente alta. Devido as suas cargas podem ser focalizados por campos eletromagnéticos e serem capazes de formar imagens. A Figura 12 apresenta de forma comparativa os processos de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007, p. 9 - 10).

Figura 12 - Ilustração dos processos de (MO) e (MEV)



Fonte: DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007, p. 9.

O princípio da microscopia eletrônica de varredura, consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro e explorar a superfície de uma amostra, emitindo um sinal por meio de um detector a uma tela catódica. O sinal da imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal absorvido é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação. A maioria dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido, operando numa faixa de tensão de 1 a 50 kV. O feixe é acelerado pela alta tensão criada entre o filamento e o anodo, em seguida, focalizado sobre a amostra por uma série de três lentes eletromagnéticas com um spot menor que 4 nm. O feixe interagindo com a

amostra produz elétrons e fótons que coletados por detectores adequados são convertidos em um sinal de vídeo (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007, p. 11).

Os sinais de maior interesse na microscopia eletrônica para formação de imagem, são os elétrons secundários e os retroespalhados. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção de imagens de alta resolução. Os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição (PICCOLI, et al., 2006).

A microscopia eletrônica de varredura se configura como a técnica mais adequada na análise de fenômenos que ocorrem em escala micrométrica ou sub-micrométrica. Esta técnica permite alcançar aumentos muito superiores aos alcançados pela microscopia óptica. Baseia-se na irradiação de um fino feixe de elétrons sob a área ou micro volume a ser analisado. O resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra resulta em radiações de elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios X característicos, elétrons Auger, fótons, etc. Através da captação dessas radiações, podemos obter informações sobre a topografia da superfície, composição, cristalografia, etc (PICCOLI, et al., 2006).

Segundo Dedavid; Gomes; Machado, (2007, p. 10) a microscopia eletrônica de varredura pode fornecer informações sobre a morfologia, identificação de elementos químicos e características microestruturais de uma amostra sólida.

A técnica (MEV) pode alcançar resolução superior a 1nm. (NAGATANI et al. apud DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007, p. 10).

“A microscopia eletrônica de varredura por apresentar excelente profundidade de foco, permite a análise de superfícies irregulares, como superfície de fratura” (AMBRÓSIO FILHO; PADILHA, 2004, p. 87).

O processo de usinagem causa alterações nas camadas subsuperficiais no material. A identificação dessas alterações é fundamental para componentes

que trabalham a altas tensões, sob tensões alternadas, a altas temperaturas e em ambientes corrosivos. Essas alterações podem ser de origem mecânica ou metalúrgica, como deformação plástica, rebarbas, alterações de microdureza, trincas, tensões residuais, recristalização e transformação de fases (JUNEJA e SWKHON; DROZDA e WICK; VON TURKOVICH e FIELD; FIELD et al. apud MACHADO, 2009, p. 313).

A dureza é uma propriedade mecânica que representa a resistência ao risco ou à formação de uma marca permanente em um material, quando pressionado por outro ou por marcadores padronizados. Os métodos mais aplicados são a utilização de penetradores com formatos padronizados, que são pressionados contra a superfície do material sob condições específicas de pré-carga e carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica. A dureza do material é obtida em função de informações obtidas a partir da geometria da impressão deixada no material (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2010, p. 65).

Baseado nas definições de dureza e aplicações dos componentes mecânicos, os ensaios se dividem em três tipos principais, por penetração, por choque e por risco, sendo os métodos por penetração e choque os mais usuais na Metalurgia e Mecânica. Dentre os métodos citados, na avaliação da microdureza destacam-se os ensaios de microdureza Vickers (HV) e o Knoop (HK). Os valores encontrados possibilitam analisar o comportamento da superfície em função de um processo de fabricação (SOUZA, 1982, p. 104).

“Alterações microestruturais são inevitavelmente acompanhadas de alterações de dureza, que podem ser detectadas por meio de ensaios Vickers ou Knoop, nos quais empregam-se cargas geralmente inferiores a 100 g.” (MACHADO et al, 2011, p. 321-322).

Segundo GARCIA; SPIM; SANTOS (2010), o ensaio Vickers relaciona a carga aplicada com a área superficial da impressão. O penetrador de diamante tem a forma de uma pirâmide de base quadrada com um ângulo de 136° entre as faces opostas e é aplicável a todos os materiais metálicos com qualquer dureza, em

especial aos materiais com durezas elevadas e corpos de prova muito finos, pequenos e irregulares. A forma da impressão é um losango regular, cujas diagonais devem ser medidas por um microscópio acoplado à máquina de teste.

Os ensaios de microdureza Vickers e Knoop são baseados em pequenos penetradores que são forçados contra a superfície do material sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. O tamanho da impressão define a dureza do material, sendo que quanto maior for a impressão, menor dureza terá o material, devido à baixa resistência imposta a ação do penetrador (PAULA, 2007).

Os valores de microdureza dependem de um controle mais rigoroso da intensidade de força aplicada em relação aos ensaios de dureza. O local de realização do ensaio deve ser especificado. Os valores de dureza encontrados, somente poderão ser comparados se for aplicada a mesma carga e num mesmo intervalo de tempo para a força aplicada. O tempo de aplicação da carga geralmente varia de 10 a 15 segundos. A superfície de medição deve ser polida e formar um ângulo de 90° com o eixo do penetrador. As cargas são menores que 1,0kgf (PAULA, 2007).

As impressões deixadas nos corpos de prova, são extremamente pequenas, não causando a inutilização do material, o ensaio se aplica a materiais de qualquer espessura. Deve-se tomar cuidados especiais com os valores de cargas que alteram os valores reais de dureza, com valores de cargas inferiores a 300gf, devido a recuperação elástica do material que dificulta a medida das diagonais e executar a aferição da máquina de ensaios (PAULA, 2007).

O ensaio de microdureza deixa uma impressão microscópica no material, por meio da aplicação de uma carga inferior a 1,0kgf. A carga pode atingir um valor mínimo de 10gf. A superfície deve ser preparada para possibilitar uma boa visualização da impressão deixada no material e leitura das diagonais para identificação da dureza correspondente (GÂMBARO, 2006).

A microdureza Knoop (HK), utiliza um penetrador de ponta de diamante cuja forma é uma pirâmide alongada, fazendo com que ocorra uma diagonal maior que a outra na impressão sobre o material numa relação de 7/1. A dureza Knoop aumenta na medida em que a carga diminui abaixo de 200gf até 20gf, enquanto a microdureza Vickers diminui com a aplicação de cargas extremamente baixas (PAULA, 2007).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve o procedimento experimental desenvolvido, bem como os materiais e equipamentos utilizados. A pesquisa foi desenvolvida nos Laboratórios de Processos de Retificação, Caracterização e Metalografia do curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. Foi utilizada uma retificadora cilíndrica universal, marca TosHostivar, com potência equivalente a 9 kW.

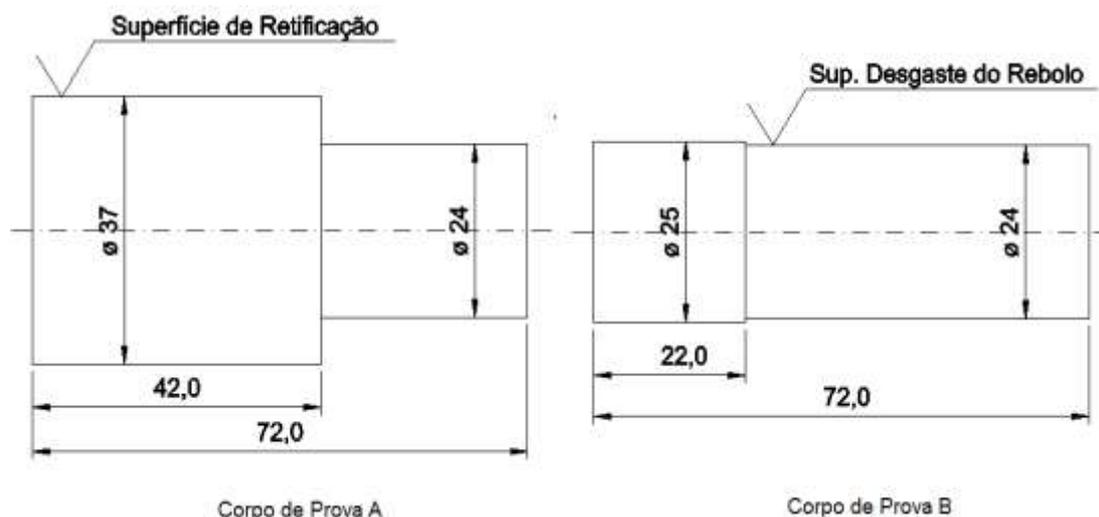
5.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados no desenvolvimento deste trabalho para comparação do desempenho dos fluidos de corte, foram fabricados em aço ABNT 4340. Trata-se de um aço liga de alta temperabilidade, com boa combinação entre resistência e tenacidade, empregado na fabricação de dispositivos e peças sujeitas a cargas altas e periódicas, em peças aeronáuticas, eixos virabrequins e em muitas outras aplicações.

Os corpos de prova foram torneados, em seguida as peças foram submetidas a tratamento térmico e passaram a apresentar uma dureza média de 52 HRc. Após estas etapas, foram destinadas aos ensaios de retificação. Para os testes, foram preparados 63 corpos de prova de retificação, sendo 9 corpos de prova por fluido e 3 para cada condição de usinagem. Foram preparados mais 2 corpos de prova, totalizando 65 amostras, onde um passou pelo processo de torneamento (sem têmpera e sem retificação) e o outro além do torneamento passou pelo processo de têmpera, porém não foi retificado. Estes dois corpos de prova foram utilizados posteriormente para análises comparativas de microestrutura e microdureza.

Os corpos de prova para avaliação do desgaste do rebolo foram confeccionados em aço ABNT 1020 e preparados por meio de retificação da superfície onde seria feita a impressão da região desgastada do rebolo, sendo um corpo de prova de desgaste para cada três corpos de prova de retificação, representando a preparação de 31 corpos de prova de desgaste. As dimensões dos corpos de prova A (retificação) e B (desgaste) para os experimentos de retificação e desgaste do rebolo podem ser observadas na Figura 13.

Figura 13 - Corpos de prova A e B para os experimentos de retificação e desgaste do rebolo.



Fonte: O autor.

A composição química do aço ABNT 4340, pode ser observada na Tabela 6. Essas informações foram obtidas por meio do certificado de análise do material, fornecido pela empresa Açocon, no momento da compra do material.

Tabela 6 - Composição química do aço ABNT 4340 em (%) por peso.

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,38	0,70	0,007	0,35	0,001	0,78	1,74	0,24	0,015
Cu	Co	V	Fe					
0,05	0,01	0,01	Balanço					

Fonte: VILLARES METALS, 2013

5.2 Características do rebolo

Os experimentos foram realizados com utilização de um Rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) com as dimensões: $\varnothing 350 \times \varnothing 127 \times 50,8$ mm - FE 38A60KV.

A seleção do rebolo, levou em conta fatores como: O tipo, tamanho de grão, a dureza, o ligante, a porosidade e a estrutura. O rebolo selecionado é do tipo reto, com grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3) de granulometria média, grau de dureza

macio e ligante vitrificado. A porosidade e estrutura do rebolo, obedeceram relações próprias para construção dos abrasivos. O rebolo é apropriado para operações com aços de alta resistência e elevada dureza. As características da ferramenta abrasiva podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Rebolo utilizado nos ensaios experimentais

Dimensões	Ø350 x Ø127 x 50,8 mm
ART	Tipo reto
FE	Fermentaria
38 A	Rebolo de óxido de alumínio, indicado para aços sensíveis a queima
60	Granulometria média
K	Dureza (Macio)
V	Liga vitrificada

Fonte: SOUZA, 2009, (adaptada).

5.3 Fluidos de corte: Óleos vegetais e aditivos utilizados no processo de retificação

Os fluidos utilizados se constituíram em 7 matrizes, designadas em função da característica vegetal ou mineral, do estado puro ou aditivado e da combinação dos fluidos. Os óleos vegetais e mineral sem aditivos foram identificados pelo nome do óleo e seu percentual, ou seja, Soja, Milho e Mineral. As formulações aditivadas foram designadas como Soja 5 e Milho 5. As misturas das formulações aditivadas, óleos de Soja 5 e Milho 5 com o óleo Mineral em quantidades iguais foram identificadas como Mix 1 e Mix 2 respectivamente. Todos os óleos foram submetidos a técnicas de caracterização e ensaios de

retificação para avaliação das propriedades físico-químicas, mecânicas e térmicas para seleção e definição das matrizes, as quais foram desenvolvidas por (MORAIS, 2014) e aplicadas no desenvolvimento deste trabalho. As características dos fluidos podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Fluidos utilizados nos testes de retificação

Fluidos de corte	Características / Composição
Mineral / Integral	(Óleo mineral de base parafínica)
Soja	(Soja 100%)
Milho	(Milho 100%)
Soja 5	(5% Liovac 580) – (1% Liovac PLO) – (0,1% Naugalube 438 – L) (93,9% óleo de soja)
Milho 5	(5% Liovac 580) - (1% Liovac PLO) - (0,1% Naugalube 438 – L) (93,9% óleo de milho)
Mix 1	(50% óleo de Soja 5) – (50% óleo mineral)
Mix 2	(50% óleo de Milho 5) – (50% óleo mineral)

Fonte: MORAIS, 2014 (adaptada).

5.3.1 Fluido de corte integral mineral

O fluido de corte integral utilizado foi o Mecafluid 14SC da marca Petronas Lubrificantes do Brasil de base parafínica contendo aditivos sulfoclorados inativos indicados para operações de corte em geral. Este fluido apresenta boas propriedades lubrificantes, anticorrosivas e longa vida útil. O poder de lubrificação deste óleo é afetado por volta de 150°C (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). O fluido foi utilizado na condição pura e misturado com os óleos aditivados: Soja 5 e Milho 5, formando as matrizes Mix 1 e Mix 2.

5.3.2 Óleos vegetais (Soja 100% e Milho 100%)

Os óleos vegetais (Soja-*Glycinemax* e Milho-*Zeamays*) do fabricante Campestre foram utilizados sem nenhum tratamento adicional. A definição destes óleos se deu em função de processos de caracterização e testes práticos de retificação, cujos parâmetros de saída (rugosidade e desgaste do rebolo) foram analisados comparativamente com o óleo mineral, apresentando respostas satisfatórias à sua utilização como fluido de corte no processo de retificação (MORAIS, 2014).

O processo de caracterização inicialmente levou em conta propriedades físicas que foram avaliados em testes de retificação com análises que levaram em conta a temperatura, formação de fumaça, formação de espuma, odor e rugosidade. Em seguida foram avaliados o Índice de acidez, índice de iodo, índice de saponificação, índice de refração, ponto de fulgor, viscosidade, densidade, corrosão a lâmina de cobre e rugosidade. Os resultados podem ser observados em (MORAIS, 2014).

5.3.3 Óleos vegetais aditivados e combinados (Soja 5, Milho 5, Mix 1 e Mix2)

Amostras de óleos vegetais foram aditivadas com agentes antioxidantes, refrigerantes e de extrema pressão e submetidas a testes de retificação e ensaios de caracterização para seleção da melhor matriz para aplicação como fluido refrigerante no processo de retificação. As amostras foram utilizadas nas condições: aditivadas e combinadas com óleo Mineral nas mesmas proporções (MORAIS, 2014).

Os testes de retificação avaliaram propriedades físicas como: Temperatura, teor de fumaça, odor, espuma, rugosidade e desgaste do rebolo. Os ensaios de caracterização físico-química, avaliou-se os parâmetros: Índice de acidez, índice de iodo, índice de saponificação, índice de refração, ponto de fulgor, viscosidade a 40°C, densidade a 25°C e corrosão a lâmina de cobre (MORAIS, 2014).

Os resultados dos testes foram favoráveis às matrizes: Soja 5, Milho 5, Mix 1 e Mix 2, dentre outras que foram submetidas aos testes. Estas matrizes foram consideradas alternativas viáveis ao fluido de corte integral (MORAIS, 2014).

Neste trabalho o desempenho das matrizes é demonstrado de forma comparativa.

5.3.4 Aditivos

Os aditivos possuem funções específicas que dependem do processo de usinagem utilizado, dentre eles temos os agentes Antioxidantes (AO) que evitam a oxidação lipídica, os agentes Refrigerantes (AR) substâncias poliméricas naturais ou sintéticas, indicadas para formulações de óleos de corte com objetivo de aumentar a oleosidade e reduzir o resfriamento e os agentes de Extrema Pressão (EP) Indicados em operações mais severas (grandes pressões de corte) onde se faz necessário uma lubricidade adicional, de forma a reduzir o contato metal-metal (HILSDORF et al., 2004).

Os aditivos utilizados na formulação dos fluidos Soja 5 e Milho 5, foram os de extrema pressão (EP): LIOVAC 580 e o agente refrigerante (AR): LIOVAC PLO, fornecidos pela MIRACEMA-NUODEX. O antioxidante (AO): NAUGALUBE 438-L foi fornecido pela CHEMTURA. O LIOVAC PLO apresenta sua especificação técnica como triglicerídeo de origem animal–CAS–8016-28-2 e o LIOVAC 580 apresenta-se como óleo animal sulfurizado–CAS–61790-49-6 (MORAIS, 2014).

5.4 Dressagem

A operação de dressagem do rebolo foi realizada antes de cada teste de retificação, com o fluido correspondente às três condições de usinagem, que seriam realizadas logo após a dressagem. Foi utilizado um dressador conglomerado, com múltiplas pontas, para assegurar uma melhor regularidade da microtopografia do rebolo. A Figura 14 ilustra a fixação e as características do dressador nas posições A e B.

Figura 14 - Imagem lateral (A) e frontal (B) do dressador.



A



B

Fonte: O autor

A operação foi realizada com uma velocidade longitudinal da mesa de 2,7mm/s, num total de 10 passes, retirando 0,05mm em cada passe, totalizando 0,5mm na operação. Após os 10 passes, repetiu-se 2 passes livres sem retirada de material, visando assegurar maior regularidade superficial do rebolo. A vazão do fluido de corte sofreu alteração em função das diferenças de viscosidades, que devido a potência da bomba, não foi possível o ajuste necessário para uma vazão comum a todos os fluidos.

As vazões utilizadas nos processos de dressagem e retificação para os óleos: Mineral, Mix 1 e Mix 2 foi de 12,4 L/min. Para os óleos: Soja 100% e Soja 5, a vazão foi de 10,0 L/min e para os óleos de Milho 100% e Milho 5, a vazão foi de 11,6 L/min. Os procedimentos de dressagem do rebolo foram mantidos constantes em todas as operações, não influenciando nos parâmetros de saída.

5.5 Condições de usinagem

As condições de usinagem estabelecidas resultaram em solicitações de corte distintas, devido principalmente à velocidade de avanço e tempo de duração de cada ciclo, que influenciam na pressão de corte e geração de calor. Estas variações permitiram fazer um acompanhamento de forma comparativa da capacidade do fluido na estabilização dos parâmetros de saída apresentados

para cada condição de trabalho, em relação ao seu próprio desempenho e em relação ao desempenho dos outros fluidos.

Dentre os ciclos pré-definidos, estabeleceu-se um ciclo de referência, cujos parâmetros eram idênticos aos utilizados industrialmente (condição 3), visando assegurar uma melhor conclusão sobre a eficácia dos óleos utilizados.

Os ensaios foram realizados nas 3 condições de usinagem descritas na Tabela 9. A variação dos parâmetros possibilitou identificar o comportamento dos fluidos pelos valores/alterações obtidas nos valores de rugosidade, desgaste do rebolo, microdureza e microestrutura. A velocidade de corte e a rotação da peça, foram definidas respectivamente em 30m/s e 110 rpm e mantidas constantes em todas as operações. A principal variação entre as condições predefinidas, foi o sobremetal removido em cada ciclo.

Tabela 9 - Condições de usinagem utilizadas

Parâmetros	Condição 1	Condição 2	Condição 3
Velocidade de mergulho	1,2 mm/min	0,8 mm/min	1,2 mm/min
Tempo de <i>spark out</i>	10 segundos	10 segundos	5 segundos
Número de ciclos	6	9	36
Tempo de cada ciclo	60 segundos	60 segundos	10 segundos
Sobre metal	1,2 mm ao final de cada ciclo	0,8 mm ao final de cada ciclo	0,2 mm ao final de cada ciclo
Vazão do fluido Integral / Mix 1 / Mix2	12,4 L/min	12,4 L/min	12,4 L/min
Vazão do fluido Soja 100% e Soja5	10,0 L/min	10,0 L/min	10,0 L/min
Vazão do fluido Milho 100% e Milho5	11,6 L/min	11,6 L/min	11,6 L/min

Fonte: O autor.

As condições de usinagem atribuem ao rebolo, solicitações/esforços de corte característicos que se estabelecem em função da redução ocorrida no diâmetro em cada ciclo. A redução total no diâmetro dos corpos de prova foi de 7,2mm. Porém cada condição de usinagem estabelece uma solicitação em função dos parâmetros utilizados, com a condição 1 apresentando a maior solicitação de corte, seguida pelas condições 2 e 3.

A definição dos ciclos foi baseada em parâmetros de corte empregados na indústria e a variação dos ciclos buscou estabelecer dados de corte com diferentes pressões de corte para avaliação do comportamento das propriedades dos corpos de prova em função da ação de cada fluido diante de situações

adversas. A condição 3 se configura como a mais importante por representar melhor a realidade da indústria.

5.6 Procedimentos experimentais

Inicialmente foi realizada a limpeza do reservatório de fluido de corte e em seguida afixados imãs nas laterais, no fundo, no filtro metálico perfurado que fica próximo ao bocal de entrada de fluido que sai da máquina com impurezas, e próximo à saída do fluido que sai do reservatório para a mangueira de sucção. Os imãs foram distribuídos uniformemente nas regiões, com maior concentração na entrada e saída do fluido, visando obter uma boa absorção dos resíduos metálicos provenientes do processo de retificação.

Após a fixação dos imãs, o reservatório foi preenchido com fluido de corte até atingir o volume de 100 litros, o qual era controlado por meio de uma escala de medição fixada no reservatório. Após cada etapa de retificação, o fluido era retirado, o reservatório e os imãs eram limpos, para preenchimento com um novo fluido. Durante a retificação o jato de fluido de corte foi conduzido para a interface peça/rebolo pelo bocal original da retificadora, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Bocal de lubri-refrigeração



Fonte: O autor

O corpo de prova de retificação foi submetido a um pré-controle dimensional, limpeza e lubrificação dos furos de centro para fixação à máquina. A fixação foi realizada com auxílio de um acessório conhecido como arrastador. A temperatura do fluido e da peça era controlada no início e final de cada teste por um termômetro digital infravermelho do fabricante Minipa, modelo MT-390.

Iniciada a operação de retificação, foram observadas as etapas de contato inicial (referenciamento), usinagem e tempo de centelhamento até a remoção completa do sobremetal. Finalizado o processo, o rebolo foi recuado e a peça retificada dava lugar a outro corpo de prova.

Os ensaios foram realizados pelo processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, onde o rebolo com largura superior à da região a ser retificada, avança sobre o material com uma dada velocidade de mergulho durante um tempo, conforme definidos para cada ciclo. Ao final de cada condição de usinagem, todas as peças ficaram com um diâmetro final de 29,8mm. Durante a operação, parte do rebolo não teve contato com o material da peça, viabilizando assim a medição comparativa do desgaste do rebolo para cada lote de 3 peças retificadas com um mesmo fluido.

O desgaste do rebolo, foi avaliado com auxílio de um corpo de prova fabricado em aço ABNT 1020, que foi preparado inicialmente por meio de retificação no diâmetro de avaliação para eliminação de erros geométricos de forma. O material foi fixado à máquina entre pontas com auxílio de um arrastador e pintado parcialmente para facilitar a visualização do momento exato do contato peça/rebolo. A retificadora foi colocada em operação e estabeleceu-se o contato, que se intensificou com avanço gradativo, até causar a impressão da parte desgastada e da parte não desgastada do rebolo, com a eliminação total da tinta pintada na superfície da peça. A Figura 16 ilustra o corpo de prova de desgaste fixado na retificadora.

Figura 16 - Procedimento para avaliação do desgaste do rebolo.



Fonte: O autor.

5.7 Temperatura da superfície da peça

As temperaturas dos fluidos e dos corpos de prova de retificação foram controladas em todos os testes com medições realizadas antes e após a retificação com utilização de um termômetro digital da marca Minipa. A temperatura dos fluidos apresentou variação e dispersão menor que os valores observados para os corpos de prova em todas as condições de usinagem. Estes resultados eram esperados em função do volume total de fluido e da troca térmica do fluido com o ambiente.

5.8 Medição da rugosidade

A medição da rugosidade foi realizada em conformidade com a norma JIS B 0601 - 2001, com utilização dos parâmetros de amplitude (R_a e R_t). Foi utilizado um rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SJ-301, com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8mm. Inicialmente a amostra foi limpa com utilização de flanela e algodão umedecidos em álcool, e posicionados sobre um calço paralelo com uma ranhura em forma de “V”, limpo e isento de irregularidades que se apoiava sobre uma bancada de granito. O rugosímetro foi previamente

calibrado em um padrão próprio do fabricante que acompanha o aparelho. Foram realizadas quatro medições equidistantes a 90° em cada corpo de prova retificado para definição da rugosidade média da amostra para cada fluido em cada condição de usinagem. Posteriormente foram calculados a média e o desvio padrão dos valores obtidos e, finalmente, a média e o desvio padrão finais. A Figura 17 ilustra a montagem para medição da rugosidade.

Figura 17 - Montagem para medição da rugosidade.



Fonte: O autor

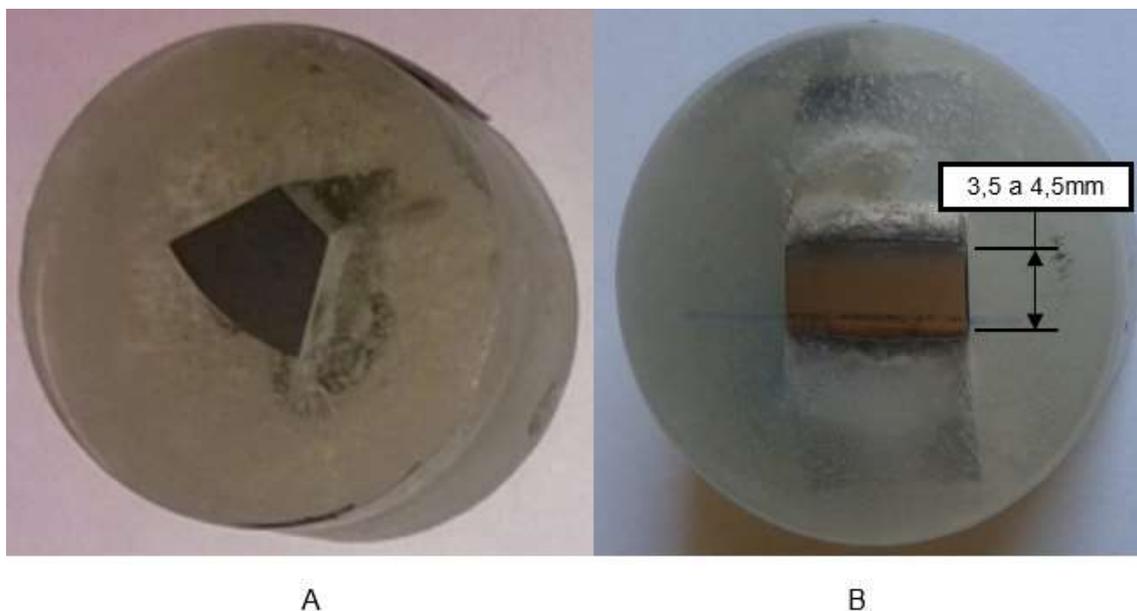
5.9 Medição do desgaste do rebolo

A superfície cilíndrica do rebolo de largura igual a 50,8 milímetros, após a retificação de três corpos de prova, ficou com 42 milímetros desta região desgastada (região de contato com o corpo de prova de retificação). Para avaliação do desgaste, foi feita a impressão da superfície total do rebolo no aço ABNT 1020 (corpo de prova do desgaste). A medição do desgaste foi realizada com base no parâmetro P do rugosímetro Mitutoyo (SJ 301), que mede o desnível entre planos e o procedimento foi o mesmo adotado para medição da rugosidade. Posteriormente foram calculados a média e o desvio padrão dos valores obtidos, e finalmente, a média e o desvio padrão finais.

5.10 Preparação das amostras para ensaios de microestrutura e microdureza

A preparação das amostras foi realizada no laboratório de Metalografia do departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG e teve como objetivo proporcionar uma imagem satisfatória da microestrutura obtida por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e possibilitar a medição da microdureza “Vickers”. Uma amostra de cada condição de retificação foi selecionada e submetida a processos de corte, embutimento e lixamento com lixas de granulometrias de 320, 400 e 600 respectivamente. Em seguida foram polidas com pasta de diamante para polimento metalográfico com partículas de dimensões de $3\mu\text{m}$ e $9\mu\text{m}$. As amostras foram atacadas com Nital 3% e a estrutura foi avaliada inicialmente no microscópio óptico com ampliação de 400 vezes para então serem submetidas ao MEV. A Figura 18 ilustra as amostras embutidas para análise da microestrutura e medição de microdureza.

Figura 18 - Amostras embutidas para análise da microestrutura (A) e medição da microdureza (B)



Fonte: O autor

5.11 Análise da microestrutura

Com o objetivo de verificar os possíveis danos na sub-superfície do material causados pelas solicitações térmicas e mecânicas ocorridas para cada condição de lubri-refrigeração investigada (Mineral Integral, Soja 100%, Milho 100%, Soja 5, Milho 5, Mix 1 e Mix 2), foi realizada uma análise microestrutural utilizando microscopia eletrônica de varredura. Neste ensaio foram utilizadas 23 amostras, sendo 3 amostras por fluido (uma para cada condição de usinagem), uma amostra com tratamento térmico e sem retificação, outra sem tratamento térmico e sem retificação para melhor análise das alterações microestruturais.

Após a preparação e pré-avaliação com o microscópio óptico, as amostras foram limpas com álcool e algodão, fixadas em um dispositivo e levadas ao microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu, modelo SSX 550 Superscan, onde foram realizadas ampliações de 1000 vezes. A Figura 19 ilustra os corpos de prova fixados em dispositivo próprio para geração das imagens.

Figura 19 - Corpos de prova fixados no dispositivo do Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: O autor

5.12 Medição da microdureza

A medição de microdureza das peças retificadas foi realizada com o auxílio do Microdurômetro Vickers da marca Shimadzu modelo HMV2. As amostras preparadas para medição apresentavam um plano com comprimento entre 3,5mm a 4,5mm conforme Figura 18, amostra (B). A carga aplicada em cada teste foi de 300gf por um período de 15s. Durante os ensaios foram realizadas 10 medições em duas regiões distintas das amostras, de forma a obter valores de microdureza em diferentes profundidades na sub-superfície da amostra.

As linhas teóricas de medições foram estabelecidas a uma distância de 3,0mm das extremidades e as impressões com 0,1mm a partir da face inicial do plano criado no polimento e de uma medição para outra. As distâncias entre um ponto de medição e outro foram obedecidas para que a medição de uma dureza não interferisse no resultado de outra medição em função do encruamento gerado pela micro-deformação. Os deslocamentos foram realizados com auxílio de dois instrumentos de medição, denominados Micrômetros, que ficam acoplados ao Microdurômetro conforme pode ser observado na Figura 20.

Os procedimentos para medição de microdureza foram realizados em conformidade com a norma ABNT NBR NM ISO 6506-1: 2008 que descreve a metodologia de ensaio.

Figura 20 - Microdurômetro com micrômetros acoplados.



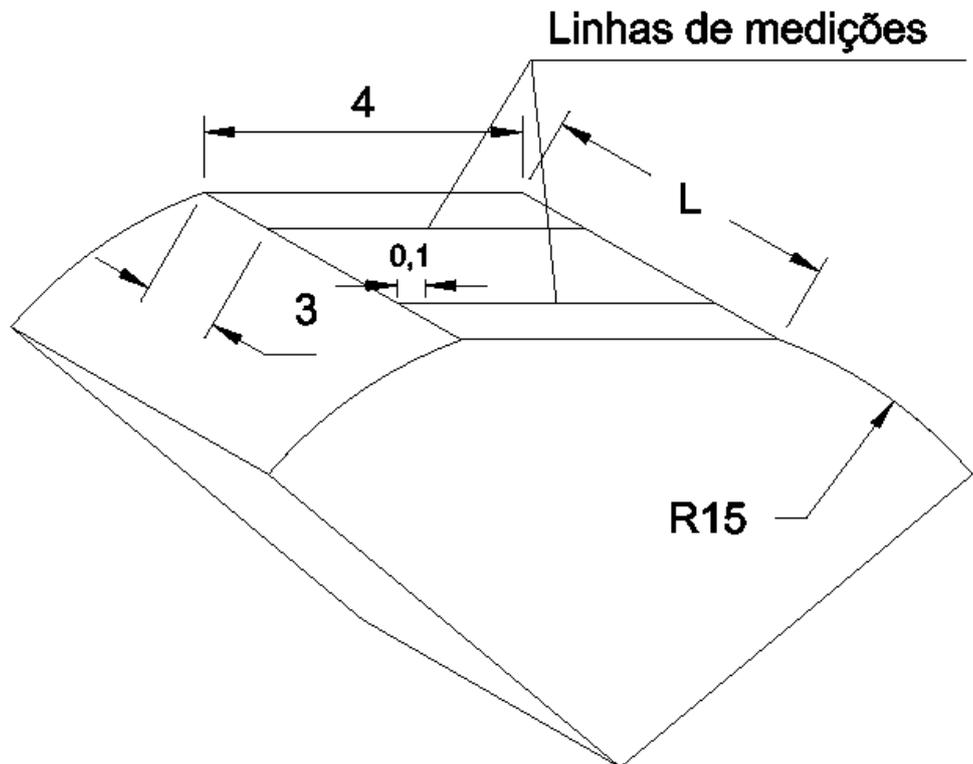
Fonte: O autor

As medições de microdureza foram realizadas devido a exposição térmica que foi submetido o corpo de prova. As altas temperaturas e a forma como ocorre a dissipação de calor influenciam diretamente na definição da estrutura granular do material, pois apresentam as características de um tratamento térmico. A microdureza está intimamente relacionada com estas variações que atingem principalmente a sub-superfície do material. Os resultados de microdureza estão diretamente relacionados com a influência do fluido no controle da variação térmica do corpo de prova.

A Figura 21 ilustra simbolicamente as duas linhas, onde foram realizadas as medições de microdureza com variação da profundidade nas camadas sub-superficiais em relação à superfície retificada. As dimensões representadas

estão em milímetros, (L) representa o comprimento em que a amostra foi cortada, com dimensão variando de 10 a 12mm e (R) representa o raio da amostra.

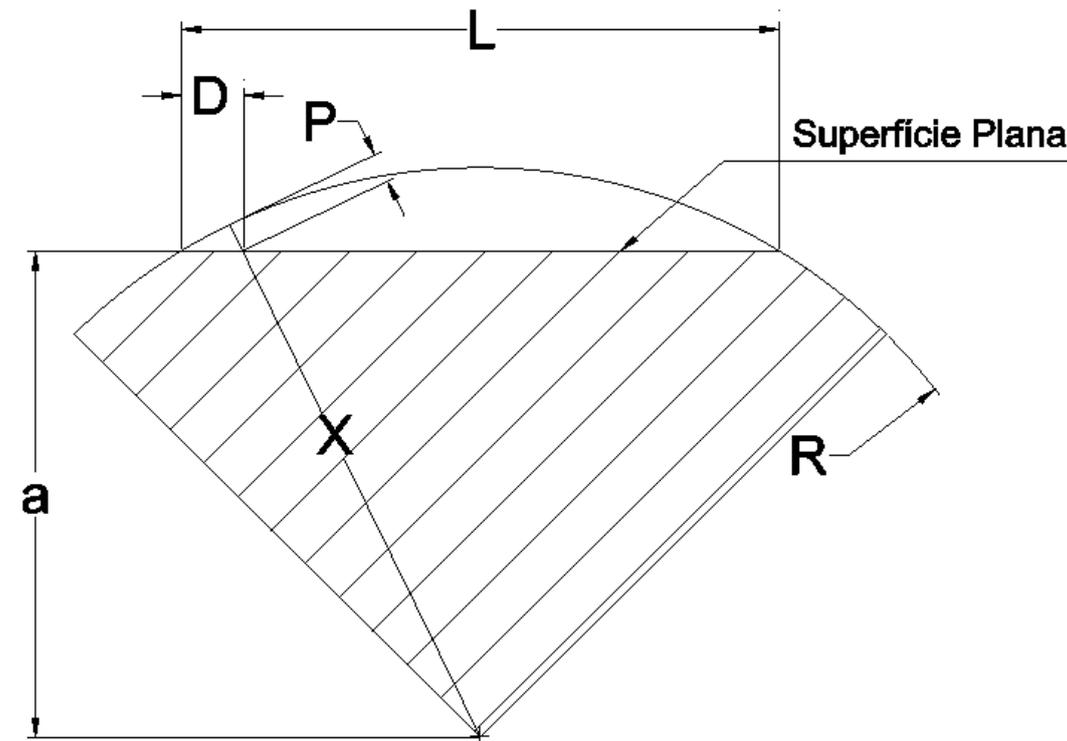
Figura 21 - Procedimento para medição de microdureza



Fonte: O autor

A variação da profundidade entre o plano de medição da microdureza e a superfície cilíndrica (removida pelo processo de lixamento), aumenta à medida que se aproxima para o centro do plano. A Figura 22 ilustra o procedimento utilizado para cálculo da variação da profundidade dos pontos de medição da microdureza ao longo das linhas de medição e destaca o corpo de prova pela região hachurada. A variação da profundidade permitiu verificar o comportamento da microdureza.

Figura 22 - Vista lateral da amostra. (O arco acima da superfície plana é somente ilustrativo, pois foi removido no polimento).



Fonte: O autor

Na Figura 22, (P) representa a profundidade onde foi realizada a primeira medição de microdureza e (D) a distância entre a borda (extremidade do plano de medição) e o primeiro ponto no plano de medição.

Pelo Teorema de Pitágoras, tem-se a Equação 3:

$$a^2 = R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (3)$$

A letra (a), representa um segmento de reta que sai do vértice inferior (centro da amostra de retificação que gerou a calota esférica) e vai até o centro da superfície plana. A letra (R) é o raio da amostra. Encontrado o valor de (a), calculam-se as distâncias entre o centro da amostra ou vértice inferior da calota esférica até os pontos de medição da microdureza (superfície plana), representado pela letra (X) por meio da Equação 4.

$$X^2 = a^2 + \left(\frac{L}{2} - D\right)^2 \quad (4)$$

Finalmente é possível calcular a altura de cada um dos dez pontos de medição da microdureza no plano, por meio dos valores encontrados para cada (X) em função da distância D utilizada em cada posicionamento através da Equação 5.

$$P = R - X \quad (5)$$

As profundidades de medições encontradas tiveram variações de 13,0µm a 100,3µm, para o primeiro e o último ponto de medição. Esta variação ocorreu devido as constantes especificadas na pesquisa que adotou os valores de raio da amostra igual a 15mm, largura do plano de medição igual a 4mm, deslocamento inicial (aresta do plano de medição e primeiro ponto) e entre cada ponto de medição igual a 0,1mm. Os valores foram calculados com auxílio das Equações 3, 4 e 5.

Os corpos de prova selecionados para medição de microdureza, foram os que apresentaram valores de rugosidade mais próximos da rugosidade média em cada condição de usinagem, sendo um corpo de prova para cada condição, totalizando 21 amostras do total de 63 amostras de retificação. Uma amostra que passou pelo processo de têmpera e que não foi retificada, foi preparada para comparação dos resultados com as outras amostras, totalizando 22 amostras para medição de microdureza.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados das variáveis de saída, aborda considerações quanto ao desempenho individual de cada fluido e permite uma análise comparativa sobre os resultados apresentados, destaca a eficácia dos testes, a importância da pesquisa para a sociedade e busca despertar nas indústrias para o uso de alternativas ecologicamente corretas.

6.1 Temperatura na superfície da peça

A variação térmica na superfície de um corpo de prova de retificação, representa dentre outros fatores, a eficácia do fluido no controle da temperatura. Durante os experimentos realizados, foram observadas e anotadas variações nas temperaturas iniciais dos fluidos e corpos de prova em função da temperatura ambiente, com influência dos horários em que foram realizados os experimentos.

As medições de temperatura foram realizadas no início e ao final dos testes. Os resultados apresentados na Tabela 10, representam a média de três medições realizadas nos corpos de prova para cada condição de usinagem. Os testes para cada condição foram realizados em dias distintos para que o conjunto máquina e fluido tivessem suas temperaturas estabilizadas em função do aquecimento gerado no processo e não interferissem na temperatura da etapa seguinte.

A avaliação do controle da temperatura levou em conta a variação térmica (Δt) do fluido e do corpo de prova. A agressividade de cada condição e o volume de material removido, contribuem para aumento da geração de calor. Os óleos não apresentaram grandes variações de temperatura. O volume utilizado (100L), a temperatura ambiente e o contato com a máquina/reservatório, favoreceu a baixa alteração. O óleo Mineral/Integral, apresentou a melhor estabilidade térmica, com a melhor média nas condições de usinagem utilizadas, seguido pelo óleo de Milho e óleo de Soja.

Tabela 10 - Temperatura do fluido e dos corpos de prova

Fluido	Condição de Usinagem (C)	T _i e T _f do fluido		Δt do fluido	T _i e T _f do corpo de prova		Δt corpo de prova
Mineral	C ₁	25,4	30,4	5,0	25,0	34,8	9,8
	C ₂	24,0	28,5	4,5	24,8	31,7	6,9
	C ₃	23,9	30,8	6,9	26,1	34,0	7,9
Soja	C ₁	20,3	27,3	7,0	21,7	34,0	12,3
	C ₂	24,1	29,8	5,7	25,8	35,3	9,5
	C ₃	25,9	32,0	6,1	26,7	34,8	8,1
Milho	C ₁	27,5	32,9	5,4	30,4	45,3	14,9
	C ₂	27,5	34,0	6,5	28,5	44,1	15,6
	C ₃	28,6	34,4	5,8	29,6	46,8	17,2
Soja 5	C ₁	24,4	31,5	7,1	26,1	39,2	13,1
	C ₂	25,3	32,1	6,8	26,5	39,5	13,0
	C ₃	25,1	32,8	7,7	27,8	41,3	13,5
Milho 5	C ₁	26,8	33,4	6,6	29,8	40,2	10,4
	C ₂	28,0	35,0	7,0	29,9	41,7	11,8
	C ₃	28,1	35,1	7,0	30,6	42,5	11,9
Mix 1	C ₁	26,8	33,2	6,4	28,3	42,0	13,7
	C ₂	25,0	31,0	6,0	26,6	39,0	12,4
	C ₃	25,2	32,2	7,0	27,3	38,3	11,0
Mix 2	C ₁	26,2	32,8	6,6	28,6	42,0	13,4
	C ₂	27,8	34,1	6,3	30,6	41,0	10,4
	C ₃	27,4	34,1	6,7	30,0	37,7	7,7

Fonte: O autor

A condição de usinagem 1 de um modo geral, apresentou a maior variação térmica para o corpo de prova em todos os fluidos utilizados, enquanto a condição 2 e condição 3, apresentaram resultados com maior aproximação. O óleo Mineral integral apresentou o melhor poder de refrigeração com os menores resultados na variação de temperatura das peças retificadas. Em seguida o óleo de Soja, Matriz Mix 2 e Matriz Mix 1. O óleo de Milho apresentou a maior variação térmica. A condição 3, apesar de apresentar menor agressividade, possui o menor tempo de centelhamento, fator que favorece o aumento de temperatura devido ao maior contato na remoção do excesso de material.

A variação da temperatura tem relação direta com o controle dimensional do produto, uma vez que causa a dilatação linear do corpo de prova, resultando em uma dimensão superior em relação a dimensão real na temperatura de referência (20°C). A dilatação média calculada com base no coeficiente de dilatação linear do aço, que é igual a $1,1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e nas variações de temperatura dos corpos de prova obtidos nos experimentos foi de 0,004 mm. Estas alterações podem comprometer a dimensão final do produto, uma vez que o controle é realizado pelo operador quando a peça ainda está aquecida.

6.2 Rugosidade

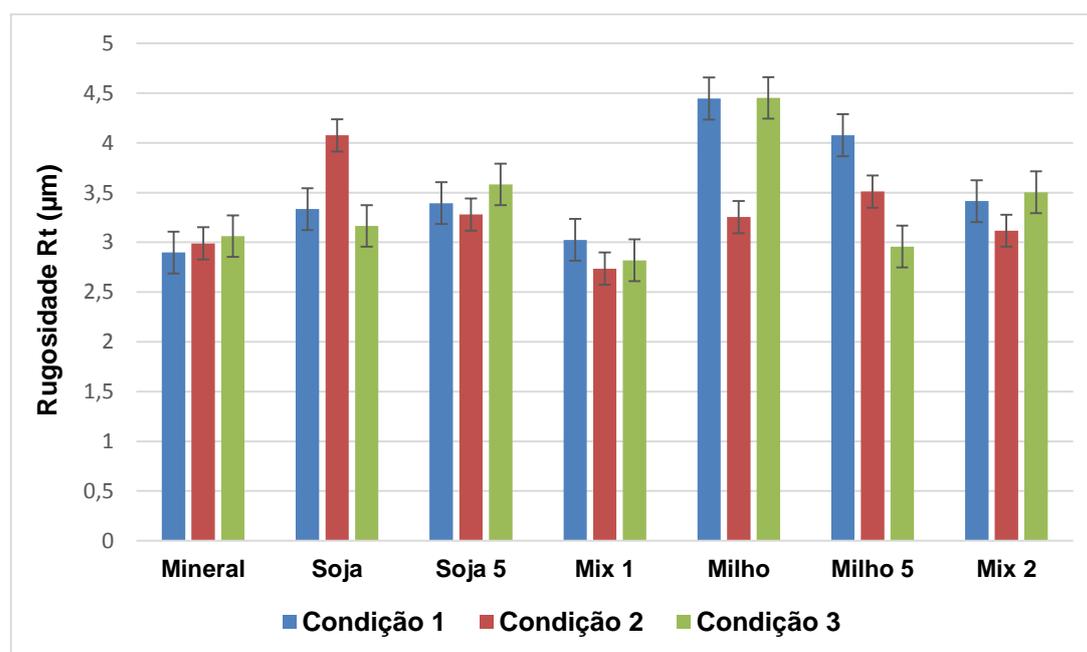
O parâmetro de rugosidade R_t (altura total do perfil) apresentou alterações médias nos corpos de prova, com as menores variações para o óleo Mineral/Integral e Matriz Mix 1 em todas as condições. Estes resultados representam o desnível entre o maior pico e menor vale ocorridos no processo, sendo vantajosos os menores valores alcançados. A Tabela 11 apresenta os valores médios da rugosidade (R_t) nas condições de usinagem utilizadas e a Figura 23 ilustra de forma comparativa as variações ocorridas.

Tabela 11 - Rugosidade média (R_t)

Óleo	Rugosidade R_t (μm)		
	C1	C2	C3
Mineral	2,90	2,99	3,06
Soja	3,33	4,07	3,16
Soja 5	3,39	3,28	3,58
Matriz Mix 1	3,02	2,74	2,82
Milho	4,44	3,25	4,45
Milho 5	4,07	3,51	2,96
Matriz Mix 2	3,41	3,12	3,5

Fonte: O autor

Figura 23 - Rugosidade (R_t) com diferentes fluidos nas três condições de usinagem.



Fonte: O autor

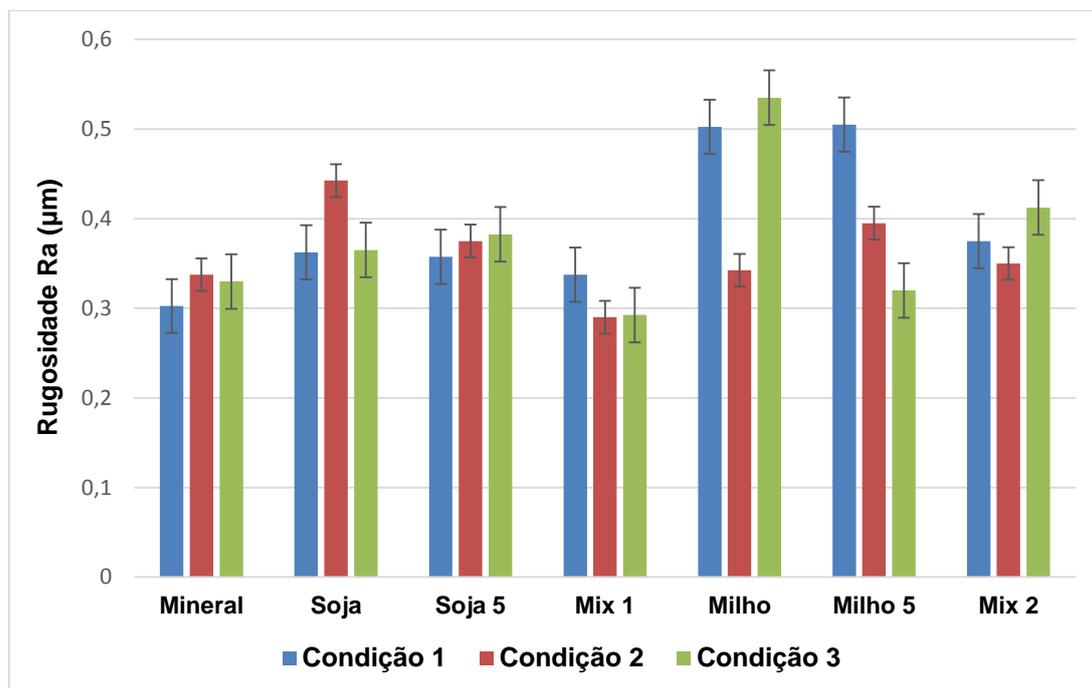
O campo de rugosidade R_a usualmente empregado na indústria metal mecânica na retificação situa-se entre 0,2 a 1,6 μm e as tolerâncias dimensionais da ordem de IT4 a IT7 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). Os valores observados mantiveram-se dentro da faixa aceitável.

A pesquisa buscou avaliar a influência das condições de usinagem na integridade superficial, desgaste do rebolo e o comportamento dos fluidos de corte em cada condição, por meio da avaliação dos parâmetros de saída para cada taxa de remoção de material. A condição de usinagem 1 ($V_f = 1,2 \text{ mm/min}$) possui a maior taxa de remoção de material com 5.763,24 mm^3/ciclo . O ciclo é de 60 segundos e o tempo de centelhamento de 10 segundos, exerce a maior solicitação mecânica (pressão de corte) sobre o rebolo em relação às outras condições de usinagem, apresentando o maior gradiente de temperatura sobre o corpo de prova.

Na condição de usinagem 2 ($V_f = 0,8 \text{ mm/min}$), a taxa de remoção de material é de 3.863,33 mm^3/ciclo . O ciclo tem duração de 60 segundos e 10 segundos de centelhamento, apresenta menor solicitação mecânica sobre o abrasivo em relação a condição 1, com menor variação térmica.

A condição de usinagem 3 ($V_f = 1,2 \text{ mm/min}$), possui uma taxa de remoção de material de 973,31 mm^3/ciclo . O ciclo tem duração de 10 segundos e tempo de centelhamento de 5 segundos, representa a menor solicitação mecânica do rebolo, e a menor variação térmica da peça. Esta condição possui maior influência na avaliação dos fluidos por se tratar de uma condição de trabalho mais próxima da realidade praticada pela indústria. A Figura 24, representa a variação da rugosidade (R_a) dos corpos de prova para cada fluido utilizado nas três condições de usinagem.

Figura 24 - Rugosidade (R_a) com diferentes fluidos nas três condições de usinagem.



Fonte: O autor

Os resultados apresentam variações dentro de uma faixa aceitável industrialmente, com os melhores desempenhos para os óleos Mix 1, Mineral, Soja 5, Soja e Mix 2. A Tabela 12 apresenta para as três condições de usinagem, a rugosidade média, a dispersão dos resultados e o desempenho na condição 3. A matriz Mix 1, apresentou a melhor média de resultados nas três condições e o melhor desempenho na condição 3, superando o óleo Mineral/integral. O óleo de Soja obteve um resultado médio aproximadamente igual ao Soja 5 e Mix 2, porém com melhor desempenho na condição 3. O óleo de Milho apresentou o pior desempenho na avaliação geral e na condição 3.

Tabela 12 - Análise comparativa dos fluidos de corte nas três condições de usinagem.

Óleos	Mineral	Soja	Milho	Soja 5	Milho 5	Mix 1	Mix 2
R _a (Média - µm)	0,32	0,38	0,53	0,38	0,40	0,31	0,38
Dispersão máxima da rugosidade	0,04	0,06	0,05	0,01	0,18	0,04	0,05
Desempenho condição 3	Óleo de Referência	-10%	-50%	-12%	Igual ao mineral	+10%	-17%

Fonte: O autor

Os resultados da Tabela 12, confirmam o melhor desempenho da Matriz Mix 1 em relação aos fluidos pesquisados, com destaque na condição 3, cujo desempenho foi 10% superior ao óleo Mineral/Integral que apresentou o segundo melhor resultado. Os óleos de Soja e Soja 5 basicamente tiveram o mesmo desempenho, seguidos pelos óleos Mix 2 e Milho 5 que apresentaram resultados satisfatórios. Apesar dos testes de rugosidade de alguns óleos apresentarem valores superiores em relação ao óleo Mineral, os fluidos apresentaram valores dentro dos campos usualmente empregados pela indústria Metal-Mecânica.

Resultados de rugosidade foram apresentados por (Lima et al. 2014), na retificação cilíndrica externa de mergulho com variação das condições de usinagem e utilização de fluido de corte Mineral/Integral e emulsões. Os valores médios de rugosidade foram superiores aos apresentados neste trabalho, comprovando o maior poder lubrificante dos fluidos de corte integral.

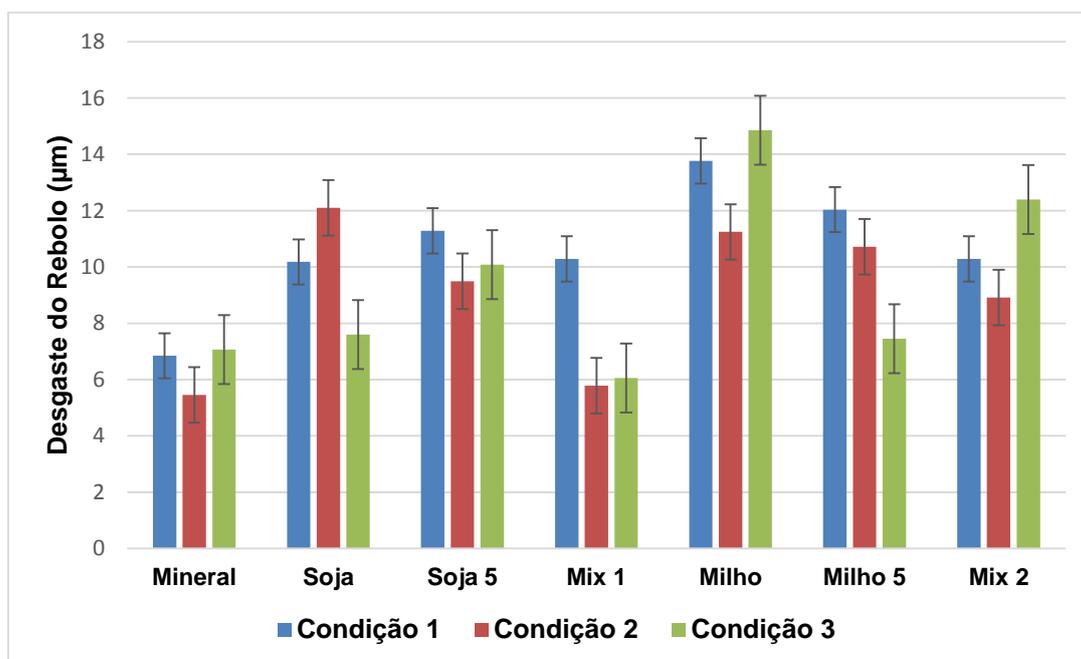
Na avaliação geral dos fluidos, deve-se levar em conta o risco em potencial que cada fluido apresenta ao meio ambiente, tomando como base o ciclo completo de vida do produto e a avaliação do impacto que pode ocorrer em cada estágio. Os pontos principais a serem considerados são: Saída de energia, resíduos, reuso e capacidade de reciclagem (OLIVEIRA; ALVES, 2006).

Alguns óleos vegetais, em especial o óleo de Soja, apresenta-se com grande potencial de utilização como fluido refrigerante, em função de atender especificações técnicas demandadas pelo setor industrial e se enquadrar dentro do conceito de usinagem limpa (BARBOSA et al, 2014).

6.3 Desgaste diametral do rebolo

Após a usinagem dos corpos de prova de retificação, procedeu-se a fixação do corpo de prova do desgaste na retificadora, para que fosse feita a impressão do perfil desgastado do rebolo no corpo de prova. Neste procedimento duas regiões do rebolo usinaram o material, a região desgastada pela retificação e a outra que não teve contato com o corpo de prova retificado, portanto não desgastada durante a retificação. Em seguida o material foi retirado da máquina e preparado para medição do desgaste, que ocorreu de forma comparativa em função das duas regiões do rebolo impressas no material. A Figura 25 apresenta o comportamento do desgaste diametral do rebolo para as três condições de usinagem.

Figura 25 - Desgaste diametral do rebolo nas três condições de usinagem.



Fonte: O autor.

Na condição de usinagem 1, os óleos: Soja, Mix 1 e Mix 2 apresentaram resultados semelhantes de desgaste, com diferença aproximada de $3,50\mu\text{m}$ favorável ao óleo mineral. Os demais tiveram desempenho inferior com maior desgaste da ferramenta abrasiva. Apesar dos valores observados no gráfico, o desempenho pode ser considerado satisfatório, pois o desgaste do rebolo nesta condição é relativo a uma alta taxa de remoção de material, que corresponde a usinagem de três peças com remoção de um volume total da ordem de $95.192,50\text{mm}^3$. Não representa uma condição praticada industrialmente e apresenta menores prejuízos ambientais devido às características de biodegradabilidade.

A condição de usinagem 2, apresenta praticamente os mesmos resultados para o óleo Mineral e para a Matriz Mix 1, com ligeira vantagem para o óleo Mineral. Os demais óleos tiveram desempenho bem inferior na análise comparativa com o óleo de referência.

A condição de usinagem 3 apresenta resultados satisfatórios para os óleos de base vegetal, com exceção do Milho na condição pura e combinado com o Mineral (Mix 2), apresentando os piores resultados nesta condição. Os demais fluidos situam-se numa faixa de $7,00\mu\text{m}$ (Mix 1) a $10\mu\text{m}$ (Soja 5), sendo o melhor desempenho para a Matriz Mix 1.

O comportamento do desgaste médio do abrasivo para as três condições de usinagem e a dispersão entre os valores máximos e mínimos encontrados nas medições, pode ser observado na Tabela 13. A análise leva em conta a comparação do desempenho dos óleos em relação ao óleo Mineral/Integral, com maior relevância para a condição 3, onde a análise do desgaste é avaliada comparativamente em termos percentuais.

Tabela 13 - Análise comparativa do desgaste diametral médio (μm) do rebolo para as três condições de usinagem e avaliação do desgaste na condição 3.

Óleos	Mineral	Soja	Milho	Soja 5	Milho 5	Mix 1	Mix 2
Desgaste médio diametral (μm)	6,50	10,00	13,50	10,33	10,17	7,60	10,27
Dispersão máxima do desgaste	1,50	5,00	3,00	3,00	4,50	4,30	4,50
Desgaste condição 3	Óleo de Referência	+7%	+215%	+40%	+7%	-10%	+80%

Fonte: O autor.

Os resultados apresentados na Tabela 13, mostram equilíbrio na qualidade dos fluidos Mineral e Matriz Mix 1 na avaliação geral, consolidando estes dois fluidos como os que melhor contribuíram para a redução do desgaste da ferramenta abrasiva. O Soja e Milho 5 com desempenhos semelhantes apresentaram resultados satisfatórios. Os baixos desempenhos dos óleos Soja 5 e Matriz Mix 2 apontam para uma necessidade de melhoria na qualidade de aditivação destes fluidos. O óleo de Milho na condição pura mostrou-se ineficiente na avaliação geral.

Na condição 3, a Matriz Mix 1 apresentou a melhor relação G, uma vez que os resultados apresentados correspondem a um mesmo volume de material removido para cada uma das condições de usinagem utilizadas.

O fluido de corte representa grande influência para o desgaste do rebolo, alterando significativamente a relação G (volume do material removido / volume de rebolo desgastado). Testes de retificação realizados nas mesmas condições de usinagem e mesmo material com fluidos de cortes distintos apresentaram desgastes diferentes na ferramenta abrasiva para cada fluido utilizado (OLIVEIRA; ALVES 2006).

Na avaliação do desgaste do rebolo realizada por Alves (2009), na retificação com rebolo de CBN e utilização de óleo solúvel de base vegetal e emulsão com diferentes velocidades de mergulho, o maior desgaste ocorreu para a menor velocidade de mergulho. Nos testes aqui realizados, não observamos esta relação. Acreditamos que as diferenças dos insumos utilizados e parâmetros de corte não favorecem esta relação.

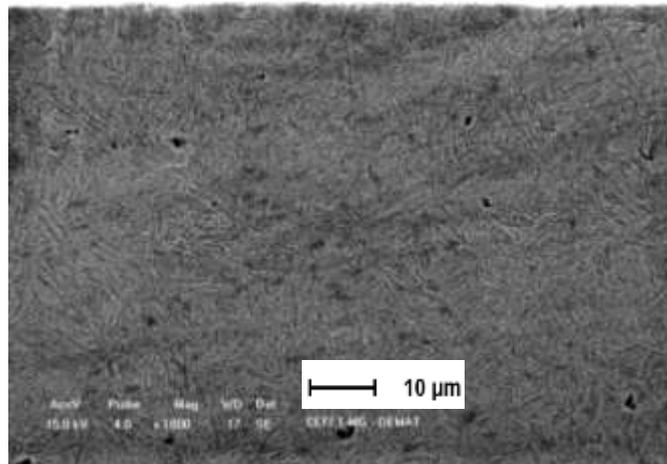
O comportamento do desgaste do rebolo está relacionado com a vazão do fluido de corte e pressão de trabalho. Quando a vazão e pressão são maiores, temos um maior valor da relação “G”, que representa menor desgaste do abrasivo. Bianchi et al. (2001), apresentou resultados de desgaste do rebolo devido a variação de pressão e vazão na retificação plana do aço VC 131 endurecido com utilização de um rebolo de óxido de alumínio.

6.4 Análise microestrutural

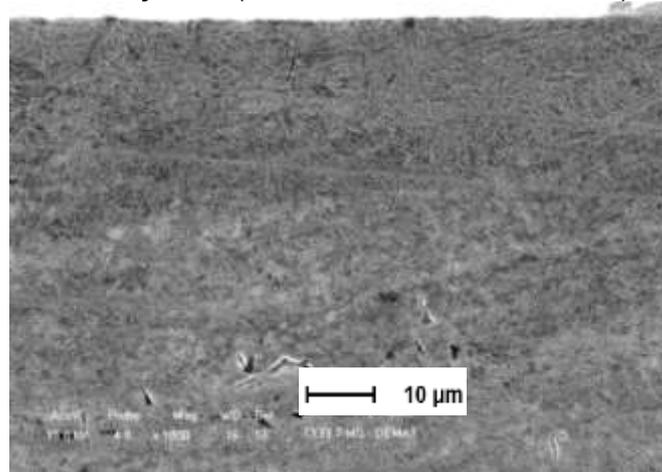
As Figuras 26 a 32 apresentam a microestrutura das amostras geradas por microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 1000X das amostras retificadas com os óleos Mineral/Integral, Soja, Milho, Soja 5, Milho 5, Mix 1 e Mix 2, nas três condições de usinagem utilizadas. Esta análise tem por objetivo, identificar possíveis danos e alterações causadas na sub-superfície do material, devido ao processo de fabricação através das solicitações térmicas e mecânicas geradas no processo que podem ser agravadas por meio de parâmetros de corte, volume de material removido, ineficiência na lubri-refrigeração, tipo de rebolo, qualidade superficial do rebolo e erros operacionais. Os danos ou alterações microestruturais podem comprometer a integridade superficial e a resistência mecânica da peça.

Figura 26 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo Mineral nas 3 condições de usinagem (1000X).

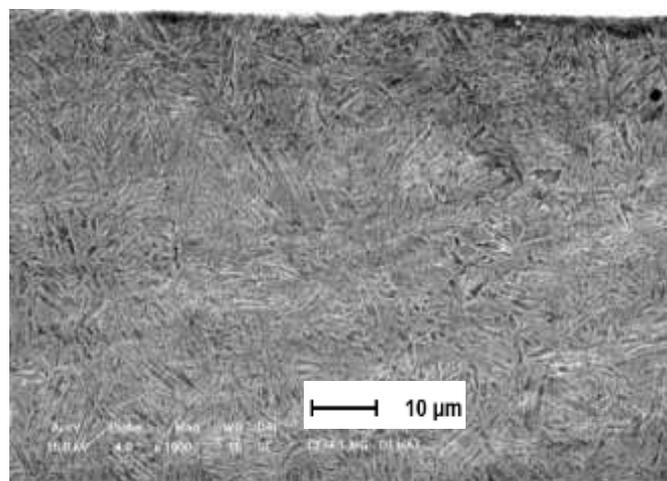
Condição 1: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 2: ($V_f = 0,8 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



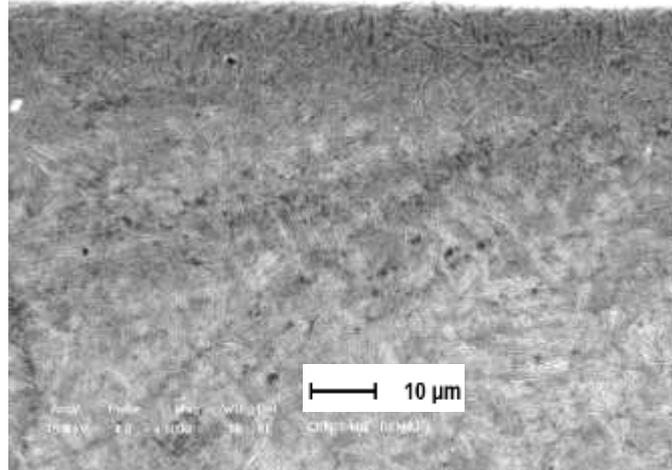
Condição 3: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 5\text{s}$)



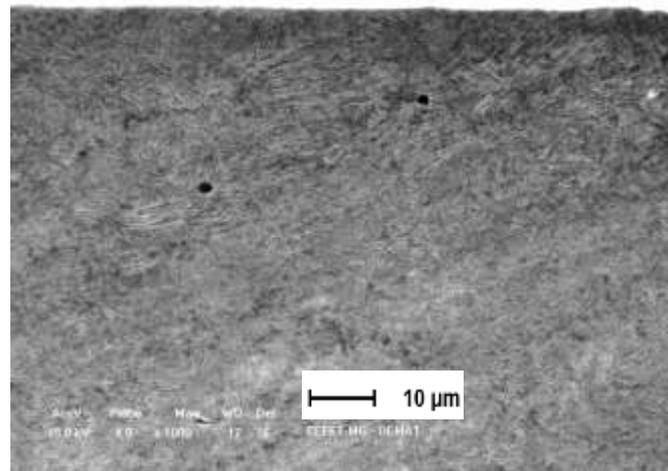
Fonte: O autor

Figura 27 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Soja nas 3 condições de usinagem (1000X).

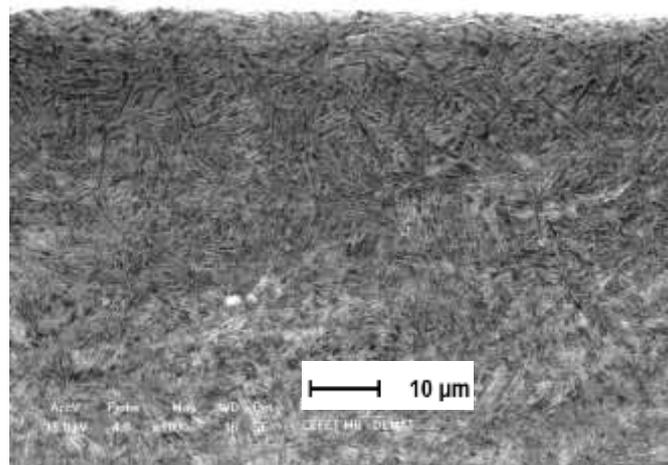
Condição 1: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 2: ($V_f = 0,8 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



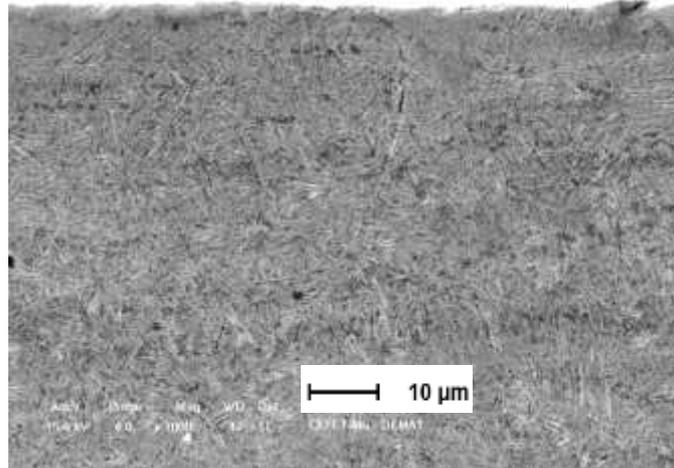
Condição 3: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 5\text{s}$)



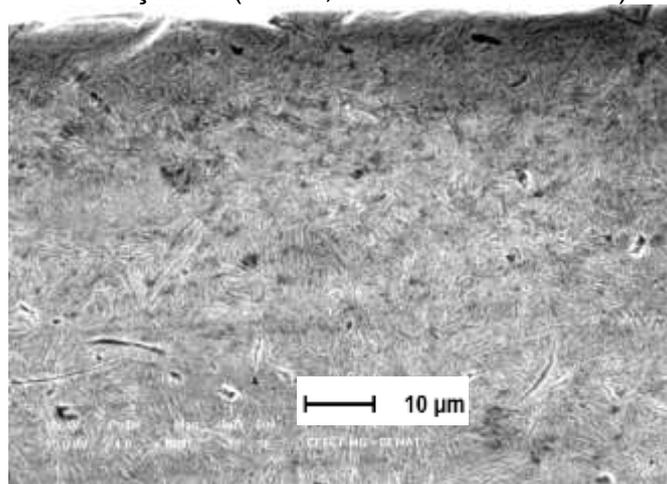
Fonte: O autor

Figura 28 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Milho nas 3 condições de usinagem (1000X).

Condição 1: ($V_f = 1,2$ mm/min – $t_s = 10$ s)



Condição 2: ($V_f = 0,8$ mm/min – $t_s = 10$ s)



Condição 3: ($V_f = 1,2$ mm/min – $t_s = 5$ s)

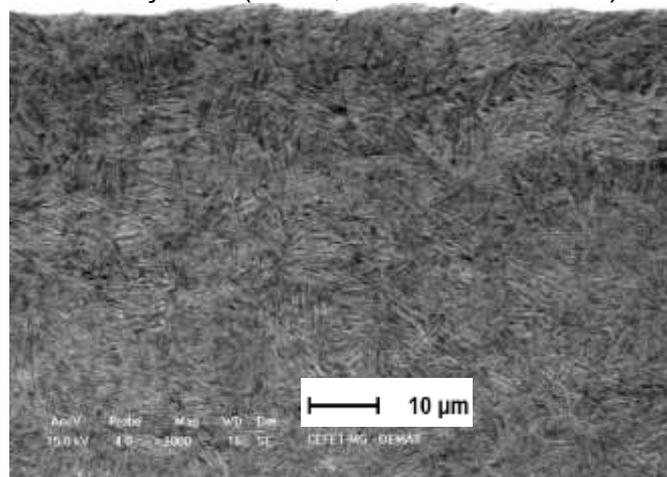
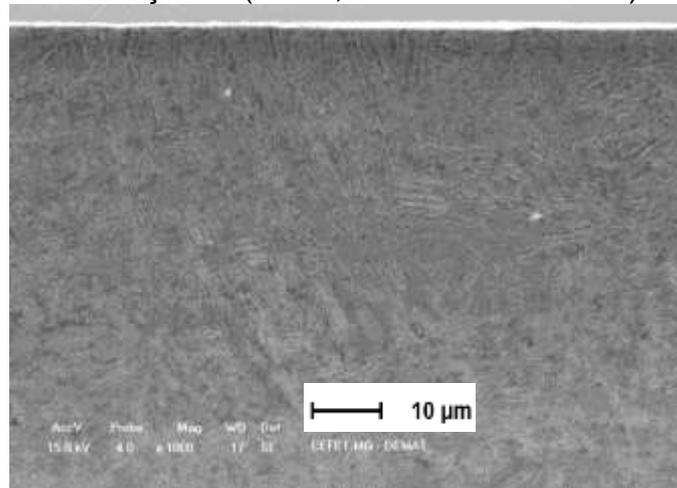
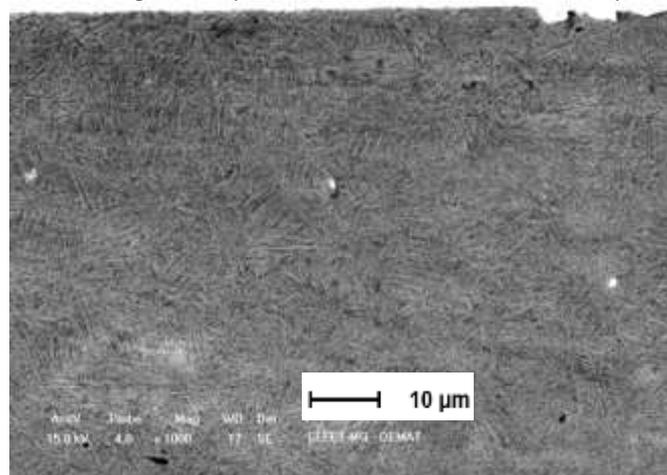


Figura 29 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Soja 5 nas 3 condições de usinagem (1000X).

Condição 1: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 2: ($V_f = 0,8 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 3: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 5\text{s}$)

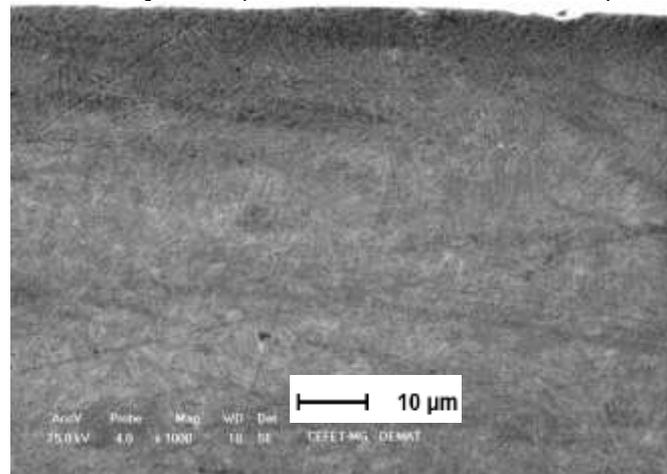
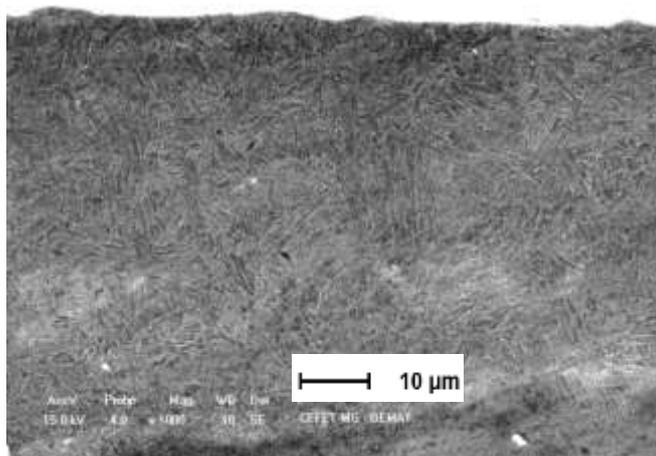
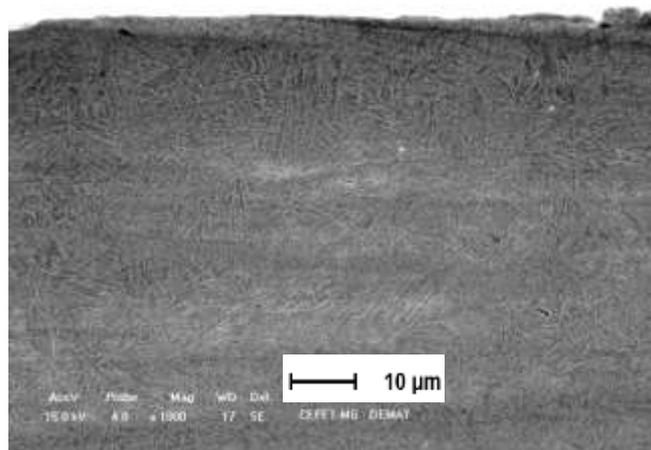


Figura 30 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com óleo de Milho 5 nas 3 condições de usinagem (1000X).

Condição 1: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 2: ($V_f = 0,8 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 3: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 5\text{s}$)

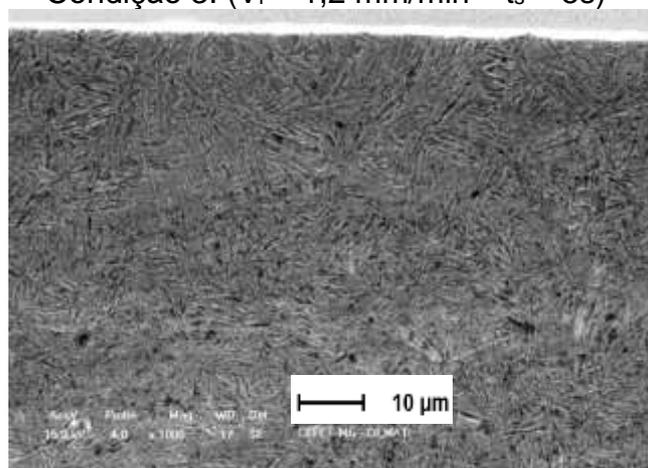
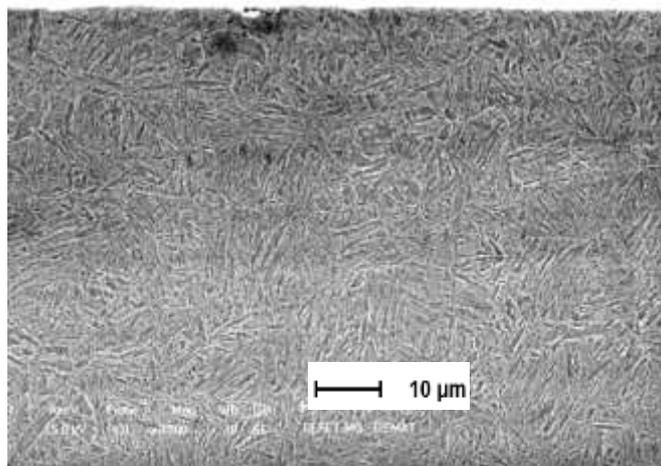
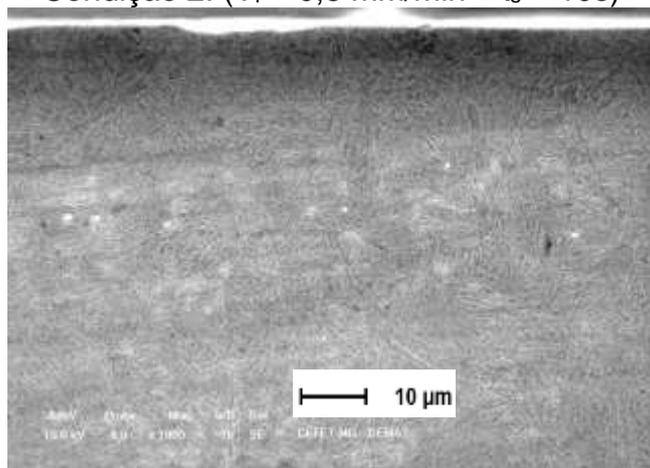


Figura 31 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com Matriz Mix 1 nas 3 condições de usinagem (1000X).

Condição 1: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 2: ($V_f = 0,8 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 3: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 5\text{s}$)

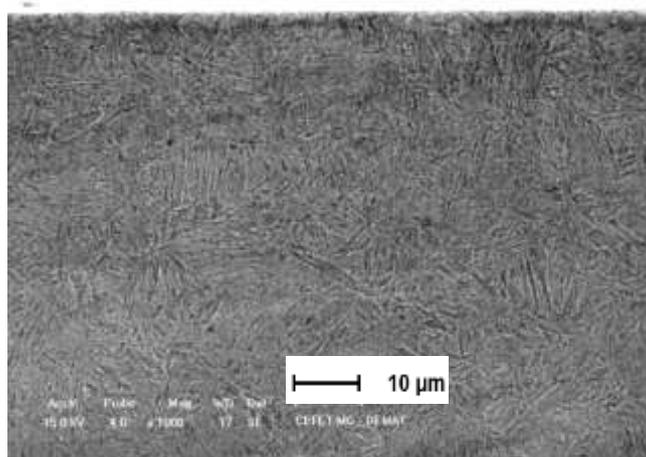
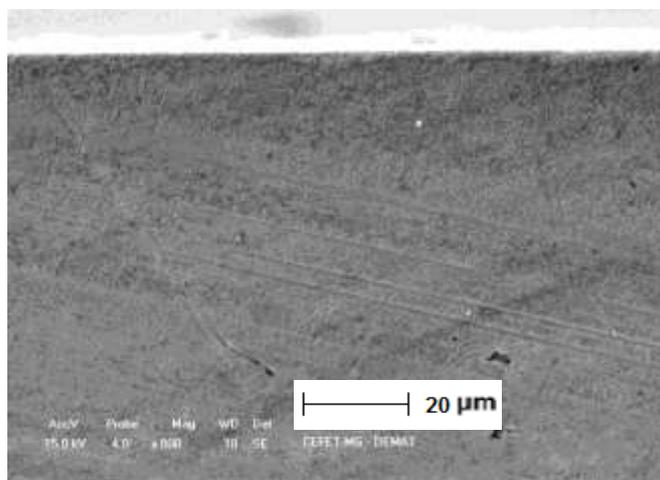
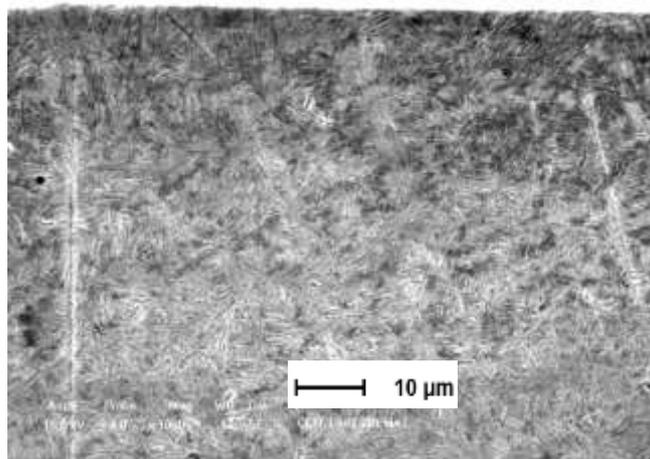


Figura 32 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de amostras retificadas com Matriz Mix 2 nas 3 condições de usinagem (1000X).

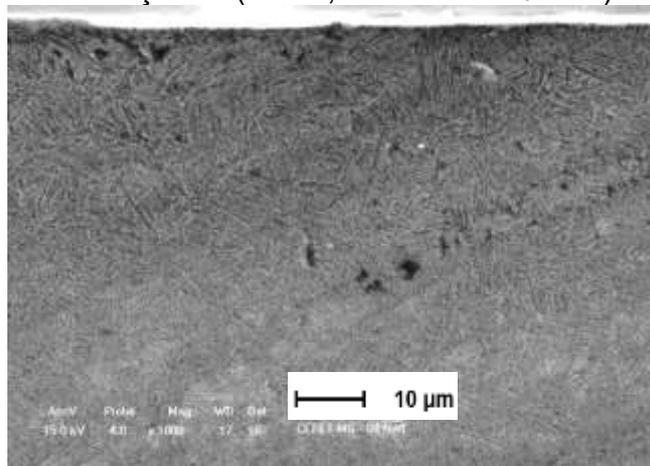
Condição 1: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 2: ($V_f = 0,8 \text{ mm/min} - t_s = 10\text{s}$)



Condição 3: ($V_f = 1,2 \text{ mm/min} - t_s = 5\text{s}$)

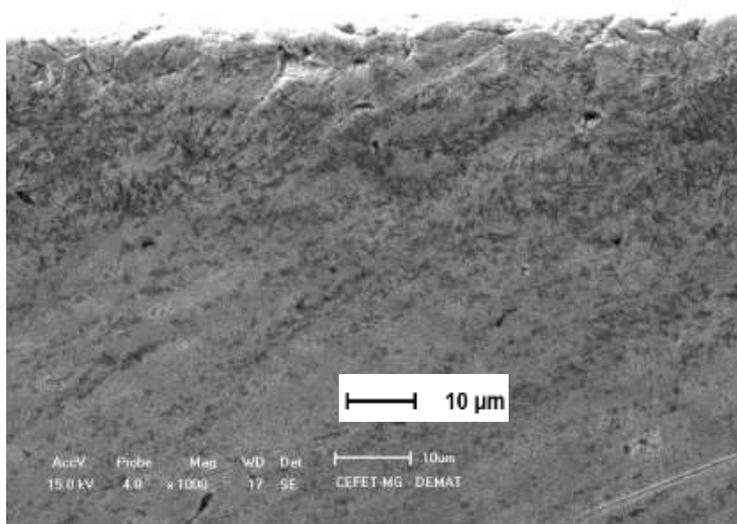


Fonte: O autor

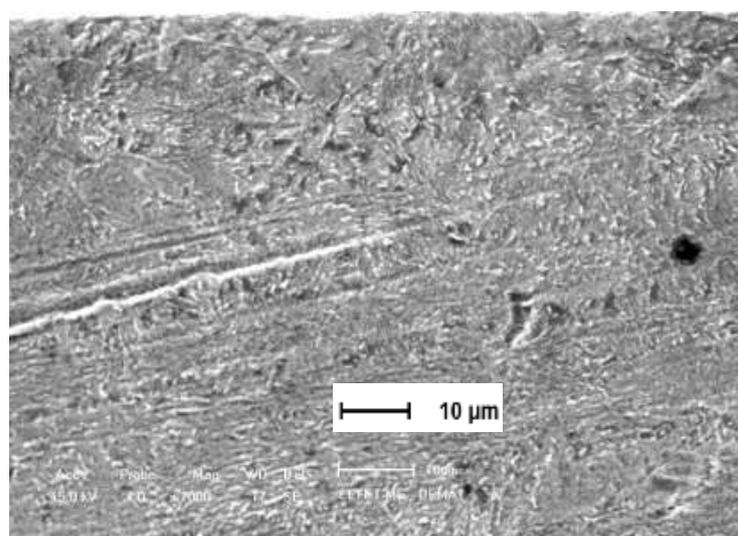
A Figura 33 ilustra a micrografia de duas amostras, sendo uma endurecida e outra que não passou pelo processo de tratamento térmico. Estas amostras não foram retificadas e as imagens foram geradas para análises comparativas com as demais que foram endurecidas e retificadas.

Figura 33 - Micrografia Eletrônica de Varredura da sub-superfície de duas amostras (1000X). Amostra A - Amostra com tratamento térmico e sem retificação. Amostra B - Amostra sem tratamento térmico e sem retificação.

Amostra A



Amostra B



Fonte: O autor

Os corpos de prova analisados foram submetidos a solicitações térmicas e mecânicas originando pressões de trabalho e temperaturas de corte peculiares para cada condição de usinagem. A ação dos fluidos de corte, principalmente relativo a refrigeração, apresentou resultados satisfatórios para o controle da temperatura, evitando grandes variações que pudessem originar o surgimento de danos térmicos no material. As variações observadas, não foram suficientes para comprometer a estrutura do material, conforme comprovado nas micrografias analisadas, onde não se observa danos microestruturais como a queima, microtrincas, alterações de fases ou outras anomalias nos corpos de prova retificados.

Resultados semelhantes foram encontrados por GUERMANDI et al. (2009) na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT D6 endurecido, com variação da velocidade de mergulho e variação do fluido de corte. A presença de martensita é identificada em todas as amostras, evidenciando a elevada dureza dos corpos de prova e a eficiência dos fluidos de corte utilizados.

Também foram alcançados resultados semelhantes por Silva et al. (2007) no trabalho sobre estudos comparativos de processos de refrigeração convencional com utilização de fluidos tradicionais e processo MQL na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 endurecido, com utilização de um reboło de óxido de alumínio (Al_2O_3), onde não ocorreram alterações significativas na microestrutura da sub-superfície do material.

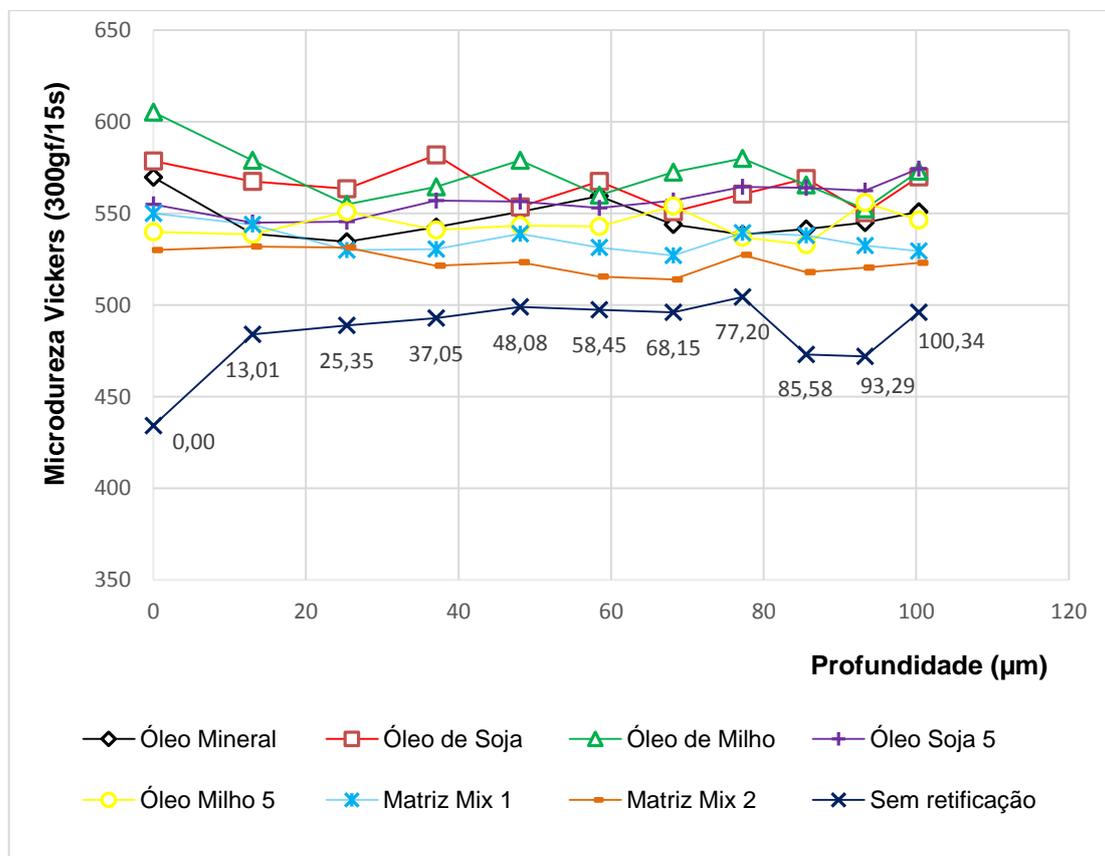
Em relação à amostra tratada e sem retificação, nota-se ligeira alteração da microestrutura, apresentando aparentemente menor proporção de martensita. Estas alterações de certo modo são esperadas, pois o processo de retificação gera altas temperaturas na interface peça/reboło acompanhado de resfriamento, atribuindo dureza superficial ao produto retificado. Nos ensaios de microdureza estas alterações foram observadas. Conclui-se, portanto, que os fluidos apresentaram comportamento satisfatório na redução da temperatura, evitando o comprometimento da microestrutura da peça retificada.

6.5 Análise da microdureza

As alterações térmicas ocorridas no processo de retificação, com a geração de calor na remoção do excesso de material, seguido de resfriamento rápido pela ação dos fluidos de corte, se configura como um tratamento térmico que atribui dureza superficial ao material. A temperatura alcançada e o modo de resfriamento são determinantes na definição da microestrutura e microdureza obtida.

A Figura 34 ilustra os valores de Microdureza x Profundidade da sub superfície para a condição de usinagem 1. Os dados da amostra sem retificação, apresentado nesta condição, é representado também nas outras figuras para facilitar a comparação em todas as condições. Observa-se que os valores de microdureza da amostra sem retificação, apresenta valores inferiores a microdureza de todas as amostras retificadas, comprovando a influência no aumento da dureza superficial e sub superficial pelo processo de retificação. Nesta condição ocorre pouca dispersão entre os resultados, com os maiores valores de microdureza alcançados nos corpos de prova trabalhados com óleos de Milho e Soja e os menores valores para as Matrizes Mix 2 e Mix 1.

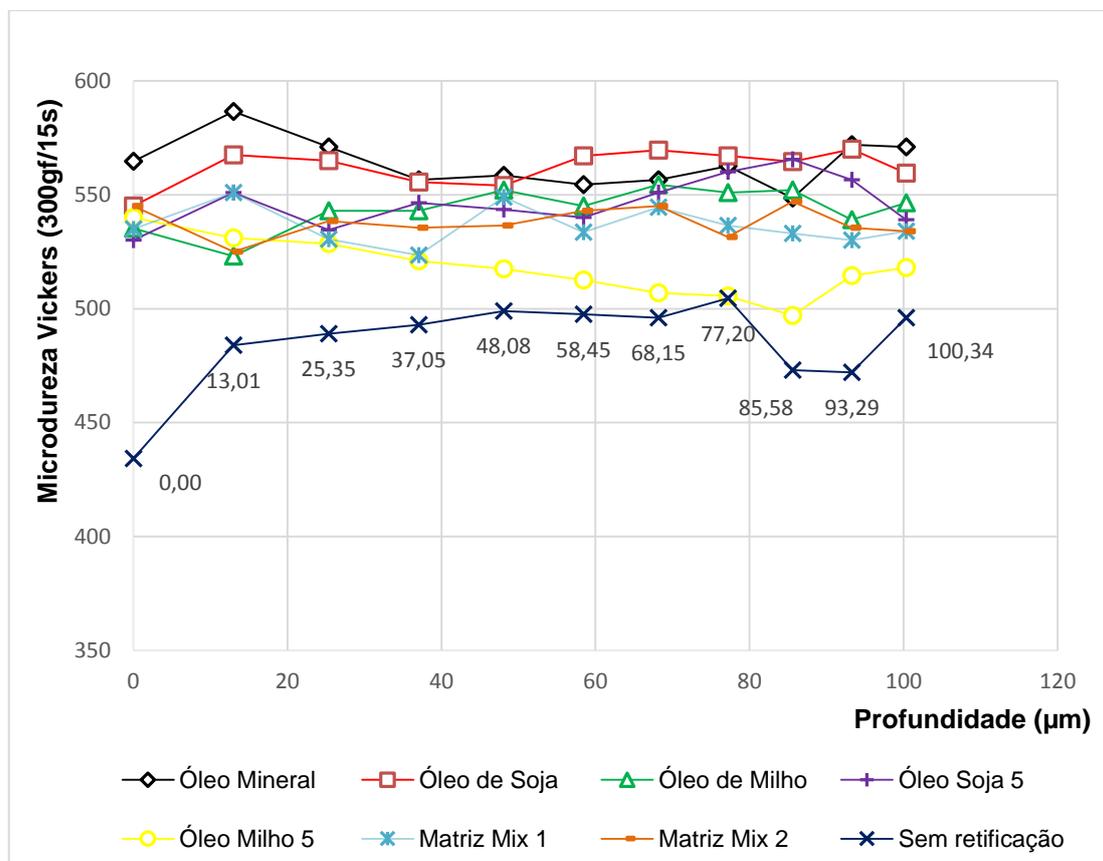
Figura 34 - Microdureza x Profundidade da sub superfície na condição de usinagem 1 para os diferentes tipos de fluidos.



Fonte: O autor

A Figura 35 ilustra os valores de Microdureza x Profundidade da sub superfície na condição de usinagem 2 com uma maior dispersão entre os resultados e com os maiores valores de microdureza para os óleos de soja e mineral, e o menor valor para o óleo de milho.

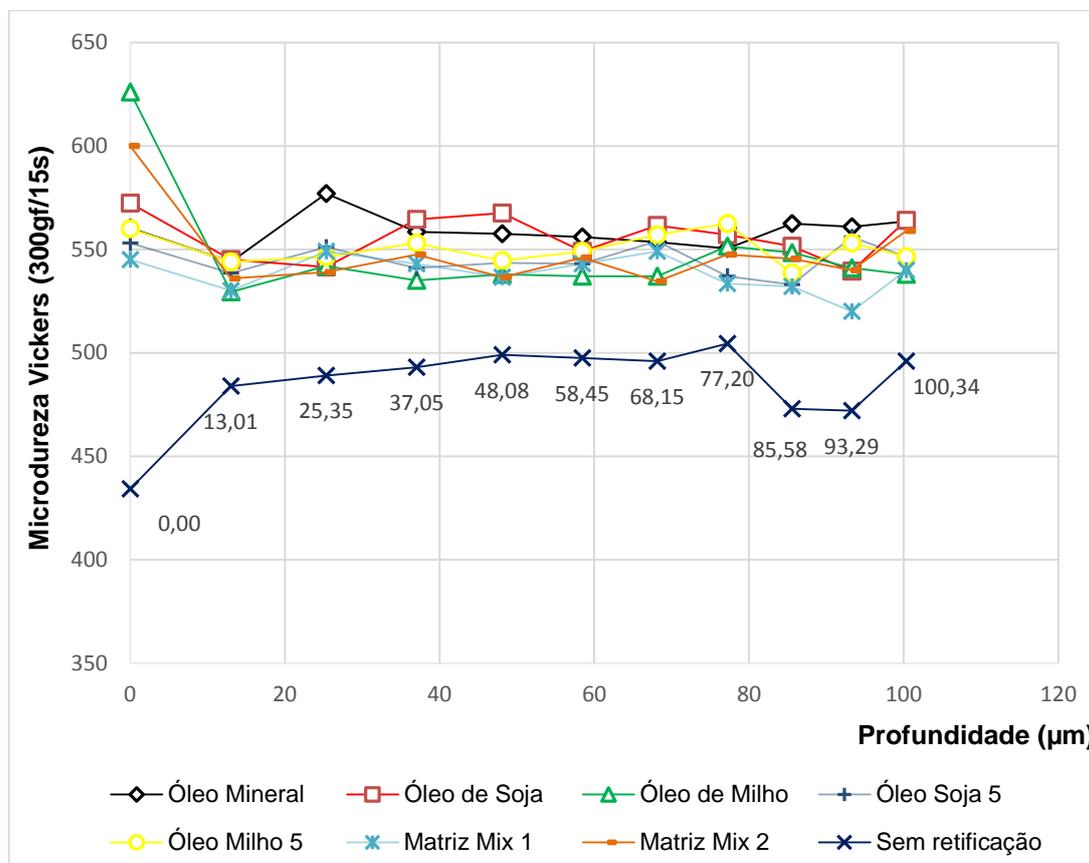
Figura 35 - Microdureza x Profundidade da sub superfície na condição de usinagem 2 para os diferentes tipos de fluidos.



Fonte: O autor

A condição de usinagem 3, apresentou a menor variação térmica e os valores mais baixos de temperatura nas peças retificadas, estes resultados refletiram na microdureza que apresentou valores mais próximos em relação as outras condições de usinagem. A Figura 36, apresenta o comportamento da Microdureza em função da Profundidade da sub superfície na condição de usinagem 3.

Figura 36 - Microdureza x Profundidade na condição de usinagem 3 para os diferentes tipos de fluidos.



Fonte: O autor

Os resultados de microdureza representados comprovam o aumento da dureza superficial e sub superficial das amostras retificadas, para todos os fluidos e em todas as condições de usinagem quando comparados com uma amostra temperada, e que não passou pelo processo de retificação. A dureza média das amostras para cada condição de usinagem e tipo de fluido utilizado pode ser observado na Tabela 14. Os valores médios de microdureza obtidos e a variação que representa a diferença entre o maior e o menor resultado de microdureza nas três condições, descreve a influência dos fluidos no processo de retificação, relativamente ao controle e estabilidade da temperatura.

Comportamento similar foi observado em um processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 endurecido, com variações nas condições de usinagem empregadas e utilização de fluido Mineral/Integral e fluido recuperado. Na avaliação da microdureza analisada comparativamente

com um corpo de prova não retificado, observa-se o aumento no valor da microdureza em todas as condições de usinagem (LIMA et al., 2013).

Tabela 14 - Microdureza média das amostras utilizando diversos fluidos nas 3 condições de usinagem.

Óleos	Mineral	Soja	Milho	Soja 5	Milho 5	Mix 1	Mix 2
Média Microdureza Condição 1	544,65	563,50	568,10	557,95	544,35	534,15	522,70
Média Microdureza Condição 2	563,75	563,95	544,90	548,75	515,25	536,55	537,15
Média Microdureza Condição 3	558,40	554,10	539,75	544,35	549,45	537,60	543,15
Média Geral Microdureza Condição 1, 2 e 3	555,60	560,52	550,92	550,35	536,35	536,10	534,33
Desvio padrão experimental	± 9,85	± 5,56	± 15,10	± 6,94	± 18,45	± 1,77	± 10,51

Fonte: O autor

7. CONCLUSÃO

Em geral, a matriz Mix 1, obteve um desempenho médio superior ao óleo Mineral/Integral em todas os testes realizados. Na análise micrográfica ambos os fluidos apresentam evidências de presença de martensita nas mesmas proporções. Os valores de microdureza ficaram próximos aos valores do óleo Mineral/Integral e com a menor variação dentre os valores de todos os fluidos analisados, apresentando controle e estabilidade da temperatura, contribuindo para obtenção de uma superfície e sub superfície mais homogênea do corpo de prova.

Os testes com óleo de Soja apresentaram resultados de microdureza com valores próximos aos alcançados pelo óleo Mineral e com uma menor variação dos resultados. Na rugosidade e desgaste, obteve um desempenho ligeiramente inferior ao óleo Mineral e na análise micrográfica obteve o mesmo desempenho. Deve-se levar em conta nos testes com o óleo de Soja e Soja 5, a menor vazão utilizada, devido a ineficiência do sistema que impossibilitou a regulagem para a mesma vazão de trabalho utilizada para os outros fluidos, influenciando na capacidade de lubri-refrigeração dos corpos de prova.

O óleo de Milho apesar de apresentar resultados não muito satisfatórios para a rugosidade e desgaste, mostrou evidências claras de possibilidades de aplicação na condição aditivada (Milho 5) onde atingiu sua melhor performance, porém na condição pura e Matriz (Mix 2), não obteve bom desempenho.

Com base nos resultados obtidos e considerando a qualidade de fatores para o meio ambiente e promoção da saúde humana. A pesquisa aponta para uma possível alternativa em substituição ao óleo Mineral/Integral, para a Matriz Mix 1 e óleo de Soja.

O óleo de Soja, além dos fatores técnicos, apresenta melhor resposta no aspecto ambiental e humano, fator que o credencia como diferencial altamente competitivo, aliado aos resultados apresentados.

Na condição de usinagem 3, que representa uma simulação da aplicação industrial, a Matriz Mix 1 apresenta o menor valor de rugosidade (R_a), menor valor de rugosidade (R_t), menor valor de desgaste do rebolo e um dos menores valores de variação de temperatura, além de apresentar resultados favoráveis de microestrutura e microdureza. Os resultados favorecem a aplicação da Matriz Mix 1 como fluido refrigerante.

Nesta mesma condição de usinagem, o óleo de Soja apresentou bom desempenho, ficando atrás da Matriz Mix 1 e do óleo Mineral, demonstrando eficiência na lubri-refrigeração em função dos resultados de controle de temperatura, níveis de desgaste do rebolo e valores de rugosidades alcançados. Os resultados de microestrutura e microdureza também foram favoráveis. O óleo de Soja pelos resultados apresentados se destaca como a terceira opção, porém com melhor resposta para o meio ambiente e promoção da saúde humana.

Apesar dos fluidos vegetais apresentarem maiores valores de viscosidades comparado à viscosidade do óleo mineral, os valores de rugosidades não apresentaram em geral resultados melhores que os do óleo mineral. Acredita-se que não ocorreu uma penetração eficiente do óleo vegetal na interface peça/rebolo, em função da menor vazão utilizada.

Na análise que envolve o custo de aquisição dos fluidos, pode-se afirmar que o óleo de Soja tem custo competitivo em relação ao Mineral/Integral, devido à grande oferta que temos deste produto em nosso país e ser de fonte renovável.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa sugere uma nova análise, que envolva o custo da produção, aplicação de novos aditivos nos testes de retificação com óleos de Soja e principalmente com óleo de Milho, buscando a aplicação deste fluido no processo de retificação, por meio dos seguintes temas:

- Avaliar o desempenho de óleos vegetais aditivados de Soja e Milho comparativamente com as emulsões nas operações de usinagem com ferramentas de geometria definida.
- Estudar a vida útil dos fluidos vegetais de Soja e Mix 1, nos processos de retificação comparativamente com o fluido Mineral/Integral.
- Avaliar comparativamente o custo do tratamento ambiental para a recuperação e descarte dos fluidos Mix 1 e Mineral/Integral.
- Realizar testes com novos aditivos nos óleos vegetais no sentido de melhorar a eficácia nos processos de retificação.
- Realizar testes com percentuais diferentes dos mesmos aditivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Princípios de Engenharia de Fabricação Mecânica: Tolerâncias Ajustes e Análises de Dimensões**. 10. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2009. 296p.

ALMEIDA, D. O.; et al. Influência do fluido de base vegetal nas forças de corte do aço ABNT 1050. **Máquinas e Metais**, São Paulo – SP, v. 48, n. 560, p. 120 – 135, set. 2012.

ALUYOR, E. O.; KESSINGTON, O. O.; MUDIACHEOGHENE. Biodegradation of vegetable oils: a review. **Scientific Research and Essay**, v. 4, n. 6, p. 543-548, Jun. 2009.

ALVES, M. C. S. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia industrial - UNESP, Bauru, SP.

ALVES, M. C. S.; et al. Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho. **Metalurgia e Materiais**, Ouro Preto - MG, p. 65 a 71, janeiro a março – 2009.

AMBRÓSIO FILHO, F.; PADILHA, A. F. **Técnicas de análise microestrutural**. 1 ed. São Paulo, SP. Hemus, 2004 190p.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI STANDARD B 74.12** Specification for Size of Abrasive Grain. United States of American, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405: Rugosidade Superficial**. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Rugosidade Superficial**, (2002).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15230:** Ferramentas abrasivas. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 6506-1:** Metodologia de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

BARBOSA, E. J. A.; et al. Manufatura ecologicamente correta: Comportamento dos fluidos de base vegetal no processo de retificação do aço ABNT 4340 endurecido comparativamente com fluido de corte mineral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 21, novembro, 2014. Cuiabá, MT. **Anais...** Cuiabá, CBECIMAT, 2014.

BIANCHI, E. C.; et al. Estudo da influência da pressão e vazão do fluido de corte no processo de retificação. **Revista Ciência e Tecnologia**, v.8, n.18, p. 79-85, dez. 2001.

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação**. Ed. 2004, São Paulo – SP - Brasil. Editora Artliber, 110p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 5ed. Salt Lake City, Salt Lake City, LTC editora, 2002 589p.

CAMPANELLA, A.; et al. Lubrificants from chemically modifie vegetable oils. **Bioresourse Techonology**, journal homepage: [http: / /ees.elsevier.com/cirp/default.asp](http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp), (2010).

CANTON, B.; et al. Adição de água à MQL para retificar cerâmicas com rebolos diamantados. **Máquinas e Metais**, São Paulo – SP, p. 126 – 135. Julho, 2011.

CATAI, E. C.; et al. Estudo dos métodos otimizados de aplicação de fluidos de corte no processo de retificação. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 22 p. 7-18, dez. 2004.

CHEN, X.; ROWE, W. B.; MCCORMACK D. F. Analysis of the transitional temperature for tensile residual stress in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v.107, p. 216-221, nov. 2000.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura**: Aplicação e preparação de amostras. Porto Alegre, RS. EDIPUCRS, 2007. 60p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 69100**: Bonded Abrasive Products; Designation, Types, Dimensional Letters, Materials. Berlim, 1988.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 1ª edição, 1999, 242p.

FERNANDES, U. B.; et al. Análise da Influência do tempo de centelhamento na retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos VC – 131. In: **SIMPEP, XI**, 2004, Bauru, SP.

FERNANDES, U. B. **Análise de métodos de lubri – refrigeração aplicados no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho em aços endurecidos**. 2007. 163f. Tese (Doutorado) – Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru – SP.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 11 ed. São Paulo, Edgard Blucher. 1977. 527-529p.

FOFANA, I.; HEMMATJOU, H.; FARZANEH, M. Low temperature and moisture effects on polarization and depolarization currents of oil paper insulation, **Electric Power Systems Research**, v. 80, p. 91-97, 2010.

FUJITA, H.; et al. Contribuição ao estudo da retificação abrasiva de materiais cerâmicos. **Cerâmica: Associação Brasileira de cerâmica**, Bauru – SP, v. 52, n. 324. p. 269 a 275. 2006.

GÂMBARO, L. S. **Proposta de processamento de fabricação de peças cilíndricas por meio da tempera por retificação**. Santa Barbara D'Oeste, 2006. 117p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, 2006.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 1. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010. 247p.

GRAHAM, W; VOUTSADOPOULOS, C. M. Fracture wear and grinding wheels. **International Journal of Machine Tools Design and Research**, v.18, p. 95-103, Nov. 2003.

GUERMANDI, L. G.; et al. A velocidade de avanço do rebolo e suas consequências na retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos. In: **XIV SEMANA DE ENGENHARIA, 2009**. (Encontro). São Paulo – SP. 2009

HASSUI, A; DINIZ, A. E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, v.43, p. 855-862, jun. 2003.

HECKER, R. L.; RAMONEDA, I. M.; LIANG, S. Y. Analysis of Wheel Topography and Grit Force for Grinding Process Modeling. **Journal of manufacturing processes**, v.5 n. 1, 2003.

HELLMEISTER, C. F. L. T. **Monitoramento da dressagem na retificação através do sinal puro de emissão acústica**. Julho 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia industrial, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, SP.

HILSDORF, J. W.; BARROS, N. D.; TASSINARI, C. A.; COSTA, I. **Química Tecnológica**. 1ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 340p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/R 525**: Produtos abrasivos. Nova York, 1966.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS B 0601**: Rugosidade superficial. 2001.

KANE, D. **Análise da integridade superficial na retificação dupla face de anéis de pistão de aço inoxidável ISO 6621- 3 MC 66 nitretado**. 2002. 115f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2002.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding: A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v.175, p. 278-284, 2006.

KURAM, E.; et al. Effects of blended vegetable-based cutting fluids with extreme pressure on tool wear and force components in turning of Al 7075-T6. **Lubrication Science**, v. 25, p. 39-52. 2013.

KURAM, E.; OZCELIK, B.; DEMIRBAS, E. Environmentally Friendly Machining: Vegetable Based Cutting Fluids. **Green Manufacturing Processes and Systems, Materials Forming, Machining and Tribology**. Berlim – Germany, 2013.

LAL, G. K.; MATSUO, T.; SHAW, M. C. An Investigation of the wear of abrasive grains by rubbing on ferrous and non-ferrous surfaces. **Wear**, Lausanne, v.24, p.279-293, Jan. 1973.

LIMA, E. A vida pode aumentar, dependendo da formulação. **Máquinas e Metais**, São Paulo – SP, n. 560, p. 154 – 165, set. 2012.

LIMA, H. V. **Análise do comportamento do fluido de corte recuperado/reformulado no processo de retificação**. 2013. 117f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Belo Horizonte – MG. março de 2013.

LIMA, H. V.; et al. Desempenho dos tipos comercial e recuperado no processo de retificação. **Máquinas e Metais**, nº 580, São Paulo, SP, p. 56 – 69, maio 2014.

MACHADO, A. R.; et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2009. 372p.

MALKIN, S.; CHIU, N. Computer simulation for cylindrical plunge grinding. **Annals of the CIRP**. v.42, p.383-387, Jan. 1993.

MALKIN, S. **Grinding Technology**: Theory and applications of machining with abrasives. 1ª ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.

MELLO, N. **Retificação e afiação**: princípios de retificação e afiação na indústria metal mecânica. 1. ed. São Paulo: Copyright. 2011. 322p.

MORAIS, H. L. O. **Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluido de corte integral utilizando óleos vegetais e minerais no processo de retificação**. 2014. 138f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Belo Horizonte – MG, agosto, 2014.

MUNIZ, C. A. S. **Novas formulações de fluido de corte**: Otimização, propriedades e recuperação do óleo usado. 2008. 177f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2005. 120p.

OIKAWA, M. H.; et al. Análise de diferentes parâmetros do processo de retificação de cerâmicas avançadas. **Máquinas e Metais**, São Paulo – SP, p. 60 - 83, agosto, 2009.

OLIVEIRA, J. D.; et al. Aprimoramento das condições de lubri-refrigeração na retificação de aços endurecidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Caxias do Sul, 2011. **Anais...** Caxias do Sul: ABCM, 2011. p. 1-13.

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. Novos fluidos de corte adequados ao desempenho mecânico da retificadora e ao meio ambiente. **Máquinas e Metais**, São Paulo – SP, p. 28 – 43, Jan. 2006.

OLIVEIRA, J. F. G.; BOTTENE, A. C.; FRANÇA, T. V. A novel dressing technique for texturing of ground surfaces. **Annals - Manufacturing Technology**, journal homepage: <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp> n. 59 (2010). P. 361–364.

PAULA, W. C. F. **Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais**. 2007. 168f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP.

PEREIRA, W. X.; DINIZ, A. E. Sinais de vibração ajudam a entender deformação e recuperação elástica. **Máquinas e Metais**, São Paulo – SP, p. 98-111, Abril, 2011.

PICCOLI, R.; et al. Características das principais técnicas analíticas aplicadas à caracterização de materiais. In: CONGRESSO ANUAL - CBECIMat, 17. 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CEBECIMat, 2006. p. 289 – 300.

PUSAVEC, F.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p.174-184, 2010.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias: produção, manutenção e controle**. Cotia, SP: Triboconcept Edições Técnicas, 1990, 323p.

SILVA, L. R.; et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant - MQL in grinding. **Journal of Machine Tools and Manufacture**, n. 47, p. 412 – 418, 2007.

SOUZA, A. G. O. **Monitoramento da dressagem no processo de retificação**. 2009. 72f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, São Paulo, SP.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**: Fundamentos Teóricos e Práticos. 5 ed. São Paulo - SP: Editora Edgard Blucher, 1982. 286p.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Ed. Elsevier. Rio de Janeiro – RJ. 2005, 801p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos, Abrasivos. 2ª ed. Florianópolis – SC Editora UFSC, 1992. 314p.

TONSHOFF, H. K.; et al. Modelling and simulation of grinding processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 41, n. 2, p. 677-688, 1992.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, journal homepage: [http: / /ees.elsevier.com/cirp/default.asp](http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp), (2004).

WEINGAERTNER, W. L.; BENINI, L.; MACIEL, L. S. Emissão acústica ajuda a verificar topografia e desgaste de rebolos convencionais. **Máquinas e Metais**, São Paulo - SP, fev. 2014.

XIAO, G; MALKIN, S. On-Line Optimization for Internal Plunge Grinding. **Annals - Manufacturing Technology**, journal homepage: <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>, p. 287-292. (1996).

ZEMAN, A.; et al. Biodegradable lubricants – studies on termo-oxidation of metal-working and hydraulic fluids by differential scanning calorimetry (DSC). **Termochimica acta**, Neubiberg - Germany, 1995.