



CEFET-MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS



Dissertação

Hugo Vilaça Lima

**Análise do Comportamento do Fluido de Corte Recuperado/
Reformulado no Processo de Retificação**

Belo Horizonte
2013

Hugo Vilaça Lima

**Análise do Comportamento do Fluido de Corte
Recuperado/Reformulado no Processo de Retificação**

Dissertação apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização

Orientador: Leonardo Roberto da Silva

Co-Orientador: Renato Françoso de Ávila

Belo Horizonte

2013



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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

*“ANALISE DO COMPORTAMENTO DO FLUIDO DE CORTE
RECUPERADO/REFORMULADO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO”*

HUGO VILAÇA LIMA

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

- Aprovado em _____ de _____ de 2013
- Aprovado com modificações sugeridas pela banca em _____ de _____ de 2013
- Aprovado com ressalvas em _____ de _____ de 2013.
- Reprovado (a).

ORIENTADOR – Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva

CO- ORIENTADOR – Prof. Dr. Renato Françoso de Ávila

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Prof. Dr. Jalon de Moraes Vieira

DEDICATÓRIAS

*A minha mãe,
Neusa de Fátima Vilaça e
a minha irmã,
Natália Vilaça Lima,
pela presença e constante apoio .*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido saúde, disposição e capacidade para a realização deste sonho.

Agradeço a meu orientador Leonardo Roberto da Silva, pelo constante auxílio, paciência, amizade e pela confiança em meu potencial.

Ao meu co-orientador Renato Françoso de Ávila, pelas sugestões dadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr Claudinei Rezende Calado, que colaborou de forma direta sempre com boas sugestões.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais DEMAT, pela disponibilização dos laboratórios.

Aos alunos de iniciação científica, Felipe Amaral Oliveira e Patrícia Pereira Guimarães, pela grande contribuição que tiveram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Petronas Lubrificantes Brasil S.A, pelo fornecimento do óleo utilizado neste estudo.

Às alunas de mestrado Luciana e Halane, pelo grande apoio dado a esta pesquisa.

E a todos os professores e amigos que com conselhos e trocas de experiência contribuíram para realização desta pesquisa científica.

RESUMO

O processo de retificação é caracterizado pela sua complexidade, sendo empregado na fabricação de componentes que requerem excelente qualidade dimensional especificados em projeto. O desempenho deste processo depende muito das condições de lubri-refrigeração, que são utilizadas para amenizar os problemas que afetam a integridade das peças, como a queima, danos microestruturais e minimizar os efeitos de tensões residuais indesejáveis. Por outro lado, os fluidos de corte são uma das fontes mais problemáticas na manufatura, pois são produtos nocivos ao meio ambiente e a saúde humana, além disso, se não bem monitorados podem comprometer a eficiência do processo, uma vez que a contaminação por bactérias pode afetar a qualidade da peça. Sendo assim torna-se essencial seu acompanhamento e controle visando à redução de seu descarte, que pode ser por meio de sua recuperação ou reformulação e sempre priorizando as propriedades primárias dos fluidos que são a refrigeração e lubrificação que propiciam ao componente usinado a qualidade superficial exigida. Desta maneira, este trabalho visa analisar o comportamento dos fluidos de corte recuperado e reformulado em comparação com um fluido comercial no processo de retificação. A avaliação do desempenho dos fluidos de corte consiste na análise do seu potencial anticorrosivo, da integridade superficial da peça (rugosidade, microestrutura, microdureza) e desgaste do rebolo. Os resultados viabilizaram a reutilização do fluido de corte, pois o mesmo proporcionou manutenção na eficiência do processo quando comparado ao fluido comercial, porém com a vantagem de uma produção mais limpa e com o aumento de sua vida útil. A reformulação do fluido proporcionou um melhor desempenho do processo principalmente para redução do desgaste diametral do rebolo e para obtenção de uma superfície mais uniforme.

Palavras chave: Retificação, danos térmicos, integridade superficial, desgaste de rebolo, recuperação de fluidos de corte e reformulação de fluidos de corte.

ABSTRACT

The grinding process is characterized by its complexity, being employed in the manufacture of components requiring excellent dimensional quality specified in the project. The performance of this process depends very much on the lubrication cooling, which are used to mitigate the problems affecting the integrity of the parts, such as burning, microstructural damage and minimize the undesirable effects of residual stresses. Moreover, cutting fluids are one of the most troublesome sources in manufacture, since they are products harmful to the environment and human health, in addition, is not well monitored can compromise the efficiency of the process, since bacteria contamination can affect part quality. Thus it becomes essential monitoring and control in order to reduce their disposal, which can be through their recovery or reformulation and always prioritizing the primary properties of the fluids that are cooling and lubrication that provide the component machined surface quality required. Thus, it is intended to analyze the behavior of cutting fluids recovered and reformulated in comparison with a commercial fluid in the grinding process. Performance evaluation of cutting fluids consists in analyzing its potential corrosion, the surface integrity of the piece (roughness, microstructure, microhardness) and the grinding wheel wear. The results enabled the reuse of the cutting fluid, because it gave maintain process efficiency when compared to commercial fluid, but with the advantage of a cleaner production and increasing its useful life. The reformulation of the fluid gave a better performance of the process mainly for diametrical reduction of wear of the grinding wheel and for obtaining a more uniform surface.

Keywords: Grinding, thermal damage, surface integrity, grinding wheel wear, reuse of cutting fluids and reformulation of cutting fluids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de retificação em uma abordagem de sistema	17
Figura 2: Ilustração do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho	18
Figura 3: Representação do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho.....	19
Figura 4: Processo de formação de cavaco.....	20
Figura 5: Esquema para ilustração dos constituintes da ferramenta de corte	22
Figura 6: Curva desgaste volumétrico do rebolo em função do material removido.....	30
Figura 7: Mecanismo de desgaste.....	31
Figura 8: Esquemática do mecanismo de dressagem.....	33
Figura 9: Distribuição de calor durante o processo de retificação	35
Figura 10: Parâmetro de rugosidade R_a	39
Figura 11: Parâmetro de rugosidade R_t	39
Figura 12: Parâmetros funcionais de rugosidade.....	40
Figura 13: a) Representação topográfica em 3D da amostra b) Curva razão do material	41
Figura 14: Esquema de microscópio eletrônico de varredura	42
Figura 15: a) Penetrador de base quadrada b) Impressão na amostra	44
Figura 16: Classificação dos fluidos de corte	48
Figura 17: Classificação dos Fluidos de corte solúveis em água	49
Figura 18: Esquemática de descarte do fluido de corte	62
Figura 19: Laboratório de retificação e retificadora cilíndrica universal utilizada nos experimentos.....	63
Figura 20: Divisão do corpo de prova retificado	64
Figura 21: Corpo de prova usinado com suas respectivas seções A, B e C	65
Figura 22: Ilustração do uso de lâminas de imersão para contagem de micro-organismos.	68
Figura 23: Gabarito empregado na contagem do número de colônias.	68
Figura 24: Calibração do zero no refratômetro manual.....	70
Figura 25: Operação de dressagem.....	72
Figura 26: Medição dos parâmetros de rugosidade	75
Figura 27: Método de medição do desgaste diametral do rebolo	76
Figura 28: Representação da amostra para medição da microdureza.....	78
Figura 29: Vista lateral da amostra.....	79
Figura 30: Ilustração dos níveis de corrosão	81

Figura 31: Valores de rugosidade R_a obtidos na condição de usinagem 1 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	82
Figura 32: Valores de rugosidade R_a obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	83
Figura 33: Valores de rugosidade R_a obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$).....	83
Figura 34: Valores de rugosidade R_t obtidos na condição de usinagem 1, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	86
Figura 35: Valores de rugosidade R_t obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	86
Figura 36: Valores de rugosidade R_t obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$).....	87
Figura 37: Valores de rugosidade R_{vk} obtidos na condição de usinagem 1 com a emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	89
Figura 38: Valores de rugosidade R_{vk} obtidos na condição de usinagem 2 com a emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	89
Figura 39: Valores de rugosidade R_{vk} obtidos na condição de usinagem 3 com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$).....	90
Figura 40: Valores de rugosidade R_{pk} obtidos na condição de usinagem 1 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	91
Figura 41: Valores de rugosidade R_{pk} obtidos na condição de usinagem 2 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	92
Figura 42: Valores de rugosidade R_{pk} obtidos na condição de usinagem 3 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$).....	92
Figura 43: Valores de desgaste diametral do rebolo obtidos na condição de usinagem 1, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	93
Figura 44: Valores de desgaste diametral do rebolo obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	94
Figura 45: Valores de desgaste diametral do rebolo obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$).....	94
Figura 46: Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 1, com emprego dos ...	97
Figura 47: Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$).....	97

Figura 48: Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$).....	98
Figura 49: Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte comercial sob as diferentes condições de usinagem (1000x).....	100
Figura 50: Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte recuperado sob as diferentes condições de usinagem (1000x).....	100
Figura 51: Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte reformulado sob as diferentes condições (1000x).....	101
Figura 52: Micrografia eletrônica de varredura de amostras não tratadas e amostras não retificadas (1000x).....	101
Figura 53: Intensidade do potencial anticorrosivo dos diferentes fluidos de corte analisados	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades e aplicações dos abrasivos	25
Tabela 2: Representação do tamanho dos grãos abrasivos.....	27
Tabela 3: Representação da dureza do rebolo	28
Tabela 4: Representação da estrutura do rebolo	29
Tabela 5: Classificação dos tipos de corrosão	46
Tabela 6: Comparação das propriedades dos fluidos de corte solúveis e integral	56
Tabela 7: Composição química do aço ABNT 4340 em %.....	64
Tabela 8: Condições de usinagem utilizadas	71
Tabela 9: Matriz de experimentos para realização dos ensaios de retificação	73
Tabela 10: Expecificação do grau de corrosão segundo norma DIN 51.360	80

LISTA DE SIGLAS

Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CBN	Nitreto cúbico de boro
DIN	Deutsches Institut für Normung = Instituto Alemão para Normatização
EP	Extrema pressão
HRc	Dureza Rockwell
HV	Dureza Vickers
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PCD	Diamante policristalino
SiC	Carbeto de silício

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVEATURAS

a	Profundidade de corte (mm)
A_1	Área do pico (μm^2)
A_2	Área do vale (μm^2)
a_d	Profundidade de dressagem (mm)
A_{sd}	Área de dressagem (mm^2)
b_d	Passo de dressagem (mm)
b_{dr}	Largura real de atuação do dressador (μm)
d_s	Diâmetro do rebolo (mm)
d_w	Diâmetro da peça (mm)
f_n	Força normal (N)
f_t	Força tangencial (N)
G	Relação G
h_{cu}	Espessura de usinagem (mm)
$h_{cu\text{ eff}}$	Espessura efetiva de corte (mm)
l_c	Comprimento de contato (mm)
l	Comprimento de amostragem (mm)
l_n	Comprimento de avaliação (mm)
n	Ângulo da direção efetiva de corte
n_s	Rotação do rebolo (rpm)
n_w	Rotação do rebolo (rpm)
R_a	Rugosidade média (μm)
q_c	Fluxo de calor para cavaco
q_f	Fluxo de calor para o fluido
q_g	Fluxo de calor para o grão
q_p	Fluxo de calor para a peça
R_k	Região central do perfil (μm)
r_p	Raio da ponta do dressador (μm)
R_{pk}	Altura do pico (μm)
R_t	Rugosidade máxima (μm)
R_{vk}	Profundidade do vale (μm)
S_d	Largura do dressador (mm)
t_s	Tempo de centelhamento (s)

t_u	Penetração de início de corte (mm)
U_d	Grau de recobrimento
V_0	Retenção de volume
V_e	Velocidade efetiva de corte (m/min)
V_f	Velocidade de merfulho (mm/min)
V_j	Vazão do fluido de corte (L/min)
V_s	Velocidade de corte do rebolo (m/s)
V_w	Rotação da peça (rpm)
W_t	Ondulação teórica
Z_s	Volume do rebolo consumido (mm ³)
Z_w	Volume material retificado (mm ³)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	15
3. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	16
3.1. Caracterização do Processo de Retificação Cilíndrica de Mergulho	18
3.2. Mecanismo da Formação de Cavaco	20
3.3. Características da Ferramenta de Corte (rebolo).....	21
3.3.1. Material do grão abrasivo	23
3.3.1.2. Abrasivos artificiais ou convencionais.....	23
3.3.1.3. Superabrasivos	24
3.3.2. Ligante do rebolo.....	26
3.3.3. Granulação (tamanho do grão).....	27
3.3.4. Dureza	27
3.3.5. Estrutura.....	28
3.3.6. Desgaste diametral do rebolo	29
3.4. Dressagem.....	32
4. INTEGRIDADE SUPERFICIAL	34
4.1. Danos Térmicos	34
4.1.1. Queima	36
4.1.2. Tensões residuais.....	36
4.2. Rugosidade	37
4.2.1. Parâmetros para a quantificação da rugosidade.....	38
4.2.2. Análise tridimensional da rugosidade	40
4.3. Análise Microestrutural	41
4.4. Ensaio de Dureza	43
4.4.1. Ensaio de Microdureza Vickers.....	44
4.5. Corrosão	45

5. FLUIDOS DE CORTE	47
5.1. Classificação dos Fluidos de Corte	47
Fonte: EL BARADIE, 1996a (adaptada)	48
5.1.1. Óleo de corte puro ou integral.....	48
5.1.2. Fluidos de corte solúveis em água.....	49
5.1.2.1. Óleos emulsificantes	49
5.1.2.2. Fluidos sintéticos	50
5.1.2.3. Fluidos semi-sintéticos	50
5.1.3. Gases.....	51
5.2. Função do Fluido de Corte.....	51
5.3. Aditivos Utilizados nos Fluidos de Corte	52
5.4. Propriedades dos Fluidos de Corte	54
5.5. Aspectos de Manutenção e Controle dos Fluidos de Corte.....	57
5.5.1. Valor do pH:	57
5.5.2. Concentração do fluido.....	58
5.5.3. Qualidade da água.....	58
5.5.4. Aspecto microbiológico das emulsões	58
5.5.6. Teste de corrosão.....	59
5.6. Aspectos Ecológicos dos Fluidos e Efeitos Sobre a Saúde do Operador.....	59
6. MATERIAIS E METODOS.....	63
6.1. Montagem do Banco de Ensaio	63
6.1.1. Corpo de prova.....	64
6.1.2. Ferramenta de corte.....	65
6.1.3. Fluidos de corte utilizados nos testes de retificação	65
6.1.3.1. Monitoramento dos fluidos de corte	67
6.1.3.1.1. Análise microbiológica	67
6.1.3.1.2. Medição do pH:	69
6.1.3.1.3. Controle da concentração.....	69
6.1.4. Parâmetros de corte	70

6.1.5. Condições de dressagem	71
6.2. Execução dos Ensaios de Retificação	72
6.3. Técnicas para Caracterização do Corpo de Prova e Avaliação dos Fluidos de Corte após o Processo de Retificação	74
6.3.1. Rugosidade.....	75
6.3.2. Desgaste diametral do rebolo	75
6.3.3. Análise da microestrutura – Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	76
6.3.3.1. Preparação das amostras para realização da microscopia.....	76
6.3.4. Análise da microdureza	77
6.3.4.1. Preparação das amostras.....	78
6.3.5. Teste de Corrosão.....	80
7. RESULTADO E DISCUSSÕES	82
7.1. Rugosidade	82
7.1.1. Parâmetro de amplitude (R_a)	82
7.1.2. Parâmetro de amplitude (R_t).....	85
7.1.3. Parâmetro funcional (R_{vk})	89
7.1.4. Parâmetro funcional (R_{pk})	91
7.2. Desgaste Diametral do Rebolo	93
7.3. Microdureza	96
7.4. Análise Microestrutural	99
7.5. Resultado Potencial Corrosivo	102
8. CONCLUSÃO	104
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	107

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem caracterizado pelo contato entre a ferramenta abrasiva (rebolo) e a peça a ser retificada, sendo utilizado para obtenção de componentes de alta precisão e com baixa rugosidade. Este processo é considerado complexo, em vista do grande número de variáveis que podem afetar o resultado esperado, bastando apenas o desvio de um único parâmetro para que todo o processo seja comprometido.

Durante o processo de retificação a interação dos grãos abrasivos e da peça é intensa e se não bem monitoradas podem vir a comprometer a integridade superficial da peça. Quando esta interação ocorre, e somada à alta e constante velocidade de corte, temperaturas elevadas são geradas na interface peça/rebolo, resultando em danos térmicos como a queima e as tensões residuais. Estes fatores são determinantes para a funcionalidade e qualidade final do produto usinado (MALKIN, 1989).

Segundo Reedy e Rao (2006) a grande quantidade de calor gerada na zona de corte é um fator crítico que afeta negativamente a qualidade dos produtos usinados (precisão dimensional e qualidade superficial) de forma que seu controle é essencial para garantir a boa qualidade da superfície da peça de trabalho.

Para amenizar os problemas que afetam a integridade superficial da peça e os danos térmicos e permitir o melhor desempenho da operação, os processos de retificação têm a seu favor os fluidos de corte, que tem a capacidade de lubrificar e refrigerar e podem aumentar a vida útil da ferramenta, além de auxiliar na remoção dos cavacos (OLIVEIRA; ALVES 2007).

Para Reddy e Rao (2006) os fluidos de corte tem sido a escolha convencional para lidar com os problemas que influenciam as operações de corte, pois os mesmos podem melhorar as características tribológicas do processo, pela redução do atrito peça/rebolo e também pela dissipação do calor gerado durante a usinagem, a fim de produzir um produto com a qualidade dentro dos padrões desejados.

Embora tenham características positivas, os fluidos de corte, têm também seu lado negativo impondo necessidades de soluções alternativas, para evitar resultados desagradáveis, já que os

fluidos de corte contêm em sua composição um elevado número de componentes altamente tóxicos, sendo, portanto um potencial agressor ao meio ambiente e à saúde do operador. Dentre os principais agravantes dos fluidos estão problemas respiratórios, epidemiológicos que afetam a saúde dos operadores, além da degradação do meio ambiente pela incorreta e às vezes prematura disposição destes fluidos (OLIVEIRA; ALVES 2006).

Além disso, os fluidos de corte se não bem monitorados perdem suas propriedades que comprometem seu desempenho quando em processo, resultando em frequentes trocas, causando custos adicionais com descarte e aquisição de novos fluidos. Desta maneira a manutenção e o controle dos fluidos segundo Runge e Duarte (1990) são procedimentos que contribuem para que a quantidade a ser descartada e a frequência sejam as menores possíveis, contribuindo para o aumento da vida útil dos mesmos.

Pelos motivos citados e de acordo com Silva et al., (2011) os fluidos de corte devem ser melhor gerenciados e sua escolha deve ser feita com base no custo benefício e nas exigências ambientais. O fluido de corte precisa ser constantemente monitorado em suas propriedades e possuir características que propiciem o melhor rendimento das ferramentas, melhor acabamento das peças e durabilidade das máquinas e equipamentos.

Somado ao controle e monitoramento do fluido, El Baradie (1996b) cita que os fluidos de corte necessitam de tratamento. Uma alternativa seria sua recuperação ou mesmo reformulação com componentes menos agressivos ao meio ambiente, sendo que suas propriedades primárias devem ser no mínimo mantidas semelhantes, para que a eficiência do processo seja a mesma, embora com os benefícios de uma produção mais limpa.

Sendo assim e a fim de satisfazer às exigências ambientais tornam-se necessárias pesquisas que envolvam o tratamento ou reformulação dos fluidos de corte e a sua posterior análise nos processos de usinagem. De forma a prolongar a vida útil do mesmo sem sacrifício do seu desempenho técnico, e contribuir para redução de custos com descarte e para uma manufatura ecologicamente correta.

2. OBJETIVO

A realização deste trabalho tem como principal objetivo avaliar o comportamento do fluido de corte comercial (emulsão em água com 6% de óleo mineral) e dos fluidos de corte recuperado e reformulado no processo de retificação. Analisando a eficiência destes em manter bons níveis de produção. Para isto foi verificado o desempenho dos fluidos em relação a seu potencial anticorrosivo e quanto a algumas variáveis de saída, como à integridade superficial da peça (rugosidade, microestrutura, microdureza) e desgaste do rebolo.

Dentre outros objetivos e metas que norteiam este trabalho visando avaliar a viabilidade do fluido reduzindo o impacto ambiental e conservando a integridade superficial da peça, pode-se citar.

- Avaliar a degradação do fluido durante o processo de retificação.
- Estudar os mecanismos de caracterização microestruturais dos materiais.
- Analisar o comportamento dos possíveis danos causados na integridade superficial da peça por meio das solicitações térmicas e mecânicas quando da utilização do fluido de corte convencional, recuperado e reformulado.
- Analisar a viabilidade de reutilização do fluido de corte no processo de retificação.
- Avaliar o desempenho do fluido reformulado no processo de retificação.

Sendo assim, por meio dos resultados obtidos foi possível determinar a viabilidade do uso do fluido de corte recuperado/reformulado na operação de retificação cilíndrica de mergulho, de maneira a contribuir para redução de custos com descarte e para uma manufatura ecologicamente correta.

3. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A usinagem é o processo no qual uma ferramenta de corte remove material a partir da superfície de um corpo menos resistente, por meio de uma relativa aplicação de força e movimento (AGGARWAL et al., 2008). Dentre as operações de usinagem a retificação é um dos métodos mais tradicionais e importantes por conferir à peça a qualidade superficial e dimensional adequada, os quais de acordo com Bianchi et al., (2011) são fatores de extrema importância quanto ao desempenho gerado pelo processo.

O processo de retificação é normalmente utilizado como operação final da linha de produção de componentes de alta precisão, o que torna esta operação segundo Xiao, Malkin e Danai (1992) geralmente uma das mais caras de todo o processo de fabricação. De uma maneira geral, as operações de acabamento representam uma fase crítica e cara dos processos de produção, pois requerem um trabalho intenso e preciso por parte de seus operadores e estima-se que estas operações muitas das vezes exigem 15% do custo total de fabricação e qualquer falha durante esta etapa pode comprometer todo sistema produtivo devido o seu alto valor agregado (GORANA; JAIN; LAL, 2004).

Além disso, por apresentar um grande número de variáveis e parâmetros englobados, a retificação é considerada uma das operações mais complexas do processo de usinagem já que é difícil obter não só a reprodutibilidade, embora nas mesmas condições de usinagem, mas também a relação entre os diversos parâmetros que influenciam uns aos outros (LEE; KIM, 2001; BIANCHI; ALVES; AGUIAR, 2008). Por outro lado, estas inúmeras variáveis e parâmetros devem ser compreendidas para a devida seleção das ferramentas e dos recursos de usinagem, com o objetivo de se obter produtos que satisfaçam os padrões de qualidade e que mantenham aceitáveis os custos de produção (YOUSSEF; EL HOFY, 2008).

Segundo Vieira et al., (1999) vários benefícios que agregam valor ao processo podem estar sendo realizados ao se retificar uma peça, tais como, alívio de tensões localizadas, correção de desvios dimensionais, remoção de camadas superficiais que possam estar danificadas ou alteradas, entre outros.

Já para Kopac e Krajnik (2006) o principal objetivo das atuais operações de corte é o de maximizar a taxa de produção para limites de qualidade do produto especificados pelo mercado e simultaneamente reduzir custos de produção. Entretanto, para proporcionar o melhor rendimento destas operações o ideal é que a seleção das condições de usinagem, ferramentas de corte e fluidos de corte sejam as mais adequadas possíveis.

O processo de retificação é mostrado na Figura 1 em uma abordagem de sistema que distingue as variáveis de entrada e de saída do processo. Para Tonshoff, Frielmuth e Becher (2002) uma modelagem precisa do processo de retificação a fim de prever os resultados de saída é difícil devido à grande complexidade dos processos abrasivos que apresentam um grande número de variáveis.

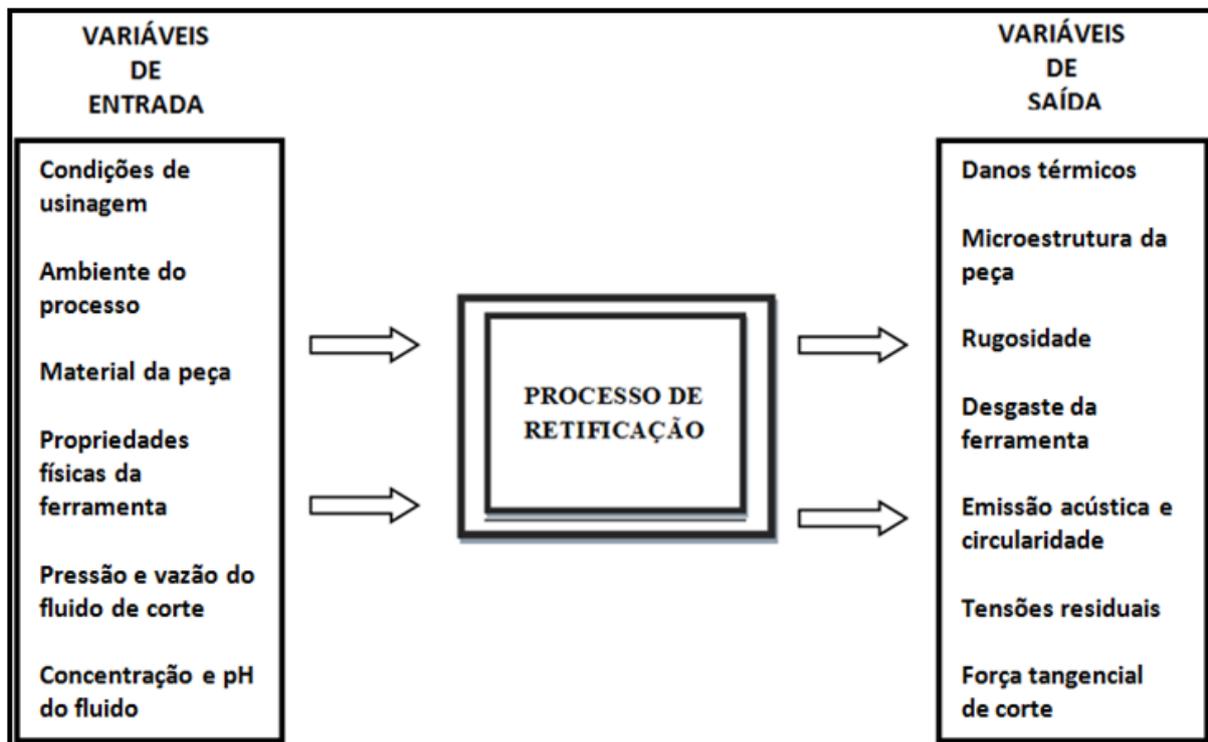


Figura 1: Processo de retificação em uma abordagem de sistema
Fonte: Tonshoff, Frielmuth e Becher, 2002 (adaptada)

As entradas do processo conforme é apontado por Tonshoff, Frielmuth e Becher (2002) são dadas pelo sistema que compreende a ferramenta de corte, com as suas propriedades físicas, as condições de usinagem, o ambiente do processo e especialmente o líquido de refrigeração e lubrificação, bem como as propriedades da peça inacabada. Demais parâmetros ou grandezas de entrada são fornecidos ao operador ou para o programa, a fim de alcançar o resultado de trabalho exigido. Já os resultados de saída do sistema são distinguidos em propriedades como

microestrutura da peça, desgaste da ferramenta abrasiva e outras características da peça que mostram o resultado final do processo.

3.1. Caracterização do Processo de Retificação Cilíndrica de Mergulho

No processo de retificação cilíndrica de mergulho o qual foi empregado no desenvolvimento deste estudo o rebolo em alta velocidade periférica é conduzido à superfície de uma peça também em rotação, porém em sentido contrário. (MALKIN; CHIU 1993). Além disso, este processo é utilizado quando a espessura do rebolo é maior do que o comprimento a ser retificado e dispensa também o movimento da mesa de tal maneira que se trabalha somente com os avanços do rebolo que se processam sobre a peça de forma contínua (MELLO, 2011).

A Figura 2 ilustra o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho constituído por: profundidade de corte a comprimento de contato l_c , correspondente ao final do ciclo de retificação, com velocidade de corte da ferramenta V_s , velocidade de mergulho V_f , rotação da peça V_w , diâmetro do rebolo d_s e diâmetro da peça d_w . Neste processo ainda estão envolvidas duas forças: F_n ou força normal à superfície de contato peça rebolo e F_t , ou força tangencial à superfície de contato. É, portanto, a correlação entre estes e outros parâmetros que caracterizam a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

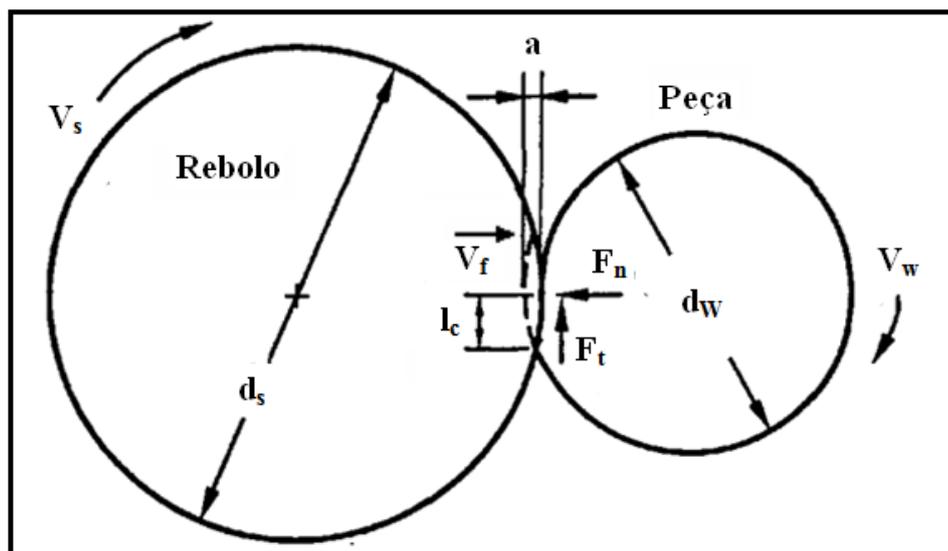


Figura 2: Ilustração do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho
Fonte: Malkin e Chiu, 1993 (adaptada)

3.1.2. Ciclo de produção da retificação cilíndrica de mergulho

A Figura 3 ilustra o ciclo da retificação cilíndrica de mergulho, bem como a sequência das tarefas, que abrange o período que vai desde a fixação da peça na máquina até a saída desta dentro das especificações preestabelecidas (MALKIN e CHIU, 1993; ARAUJO, 2010).

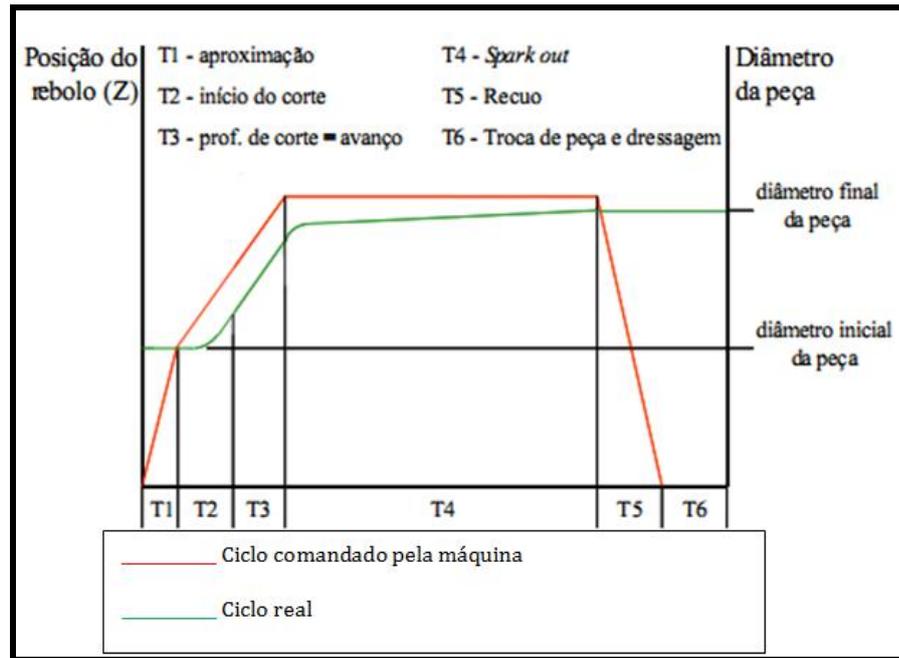


Figura 3: Representação do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho

Fonte: Malkin e Chiu, 1993 (adaptada)

A primeira fase (T1) corresponde ao início do processo de retificação onde há a aproximação do rebolo até a peça sem que haja remoção do material, A segunda fase (T2) determina o início do corte, momento onde há os primeiros avanços da ferramenta sobre a superfície da peça e as deformações elásticas na mesma. No tempo (T3) tem-se a profundidade total de corte durante o ciclo de retificação acompanhada pela remoção do material. A quarta fase (T4) corresponde à fase do centelhamento também denominada de “*spark out*”, que ocorre quando a peça chega a sua dimensão final. Nesta etapa segundo Hassui e Diniz (2003) o rebolo permanece na interface da peça por alguns segundos para a recuperação da deformação elástica que ocorreu na fase 2 e para a completa remoção do volume do material de maneira a se obter a superfície desejada. Posteriormente na fase (T5) e (T6) ocorre à retração do rebolo e a retirada da peça com possível dressagem (ARAUJO, 2010).

3.2. Mecanismo da Formação de Cavaco

O estudo do mecanismo da formação de cavaco tem proporcionado grandes avanços aos processos de usinagem, principalmente no aperfeiçoamento de arestas de corte, geração de novos e mais eficazes materiais para ferramentas, de maneira a possibilitar a usinagem dos mais variados tipos de materiais (MACHADO et al., 2009).

Sabe-se, portanto, que durante a formação do cavaco, as velocidades e as deformações que ocorrem são muito grandes (FERRARESI, 1977). Na Figura 4 está representado o mecanismo de formação de cavaco na retificação e suas respectivas fases. Ainda são demonstradas as forças envolvidas no processo, força tangencial a superfície de contato F_t , força normal à superfície de contato peça-rebolo F_n , a velocidade efetiva de corte V_e , a espessura de usinagem, h_{cu} a espessura de corte efetiva $h_{cu\text{eff}}$, a penetração de início de corte T_u , e o ângulo da direção efetiva de corte n (KONIG, 1980 citado por VIEIRA et al., 1999).

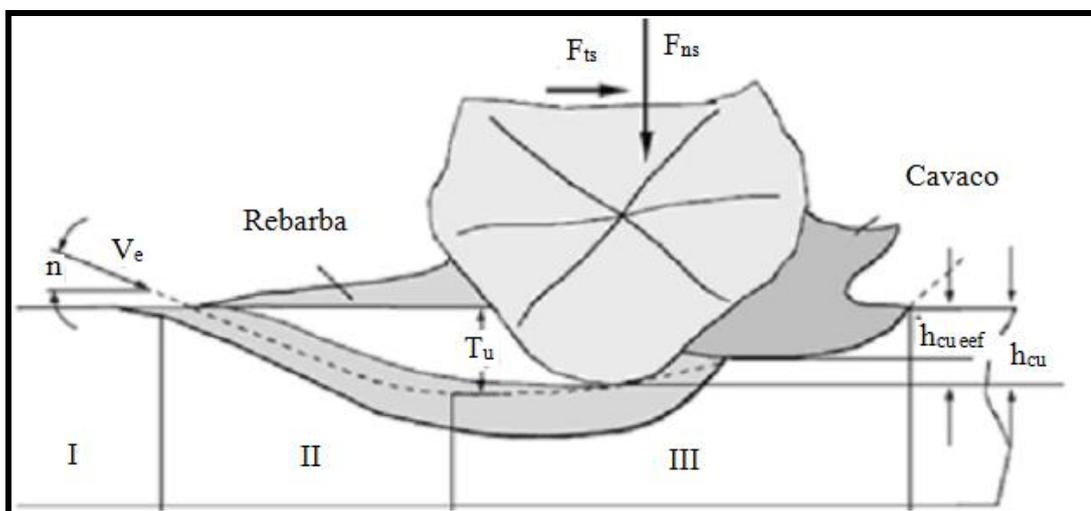


Figura 4: Processo de formação de cavaco
Fonte: Konig adaptada por Vieira et al., 1999 (adaptada)

- **Fase I**, o material pressionado contra a superfície da ferramenta sofre inicialmente deformações elásticas entre o grão abrasivo e a peça.
- **Fase II**, o material sofre deformações elásticas e plásticas, atrito entre o grão abrasivo e a peça e atrito interno entre os grãos da estrutura do material.

- **Fase III**, o material sofre deformações elásticas e plásticas, o atrito entre grão abrasivo e peça, o atrito interno do material e, finalmente, a separação do material que origina o cavaco.

Depois de formado, o cavaco é removido da região de corte por meio da porosidade do rebolo, sendo posteriormente expulso da ferramenta pela força centrífuga ou pela ação dos fluidos de corte. Entretanto se os cavacos não forem removidos de forma eficiente da região de corte, estes podem se encrustar na superfície do rebolo, o que provocará perda da força de corte da ferramenta, vibração do sistema, aumento da temperatura na região de corte e aumento da rugosidade (HASSUI 1997; FERNANDES 2007).

3.3. Características da Ferramenta de Corte (rebolo)

A ferramenta de corte capaz de dar qualidade superficial adequada à peça retificada por meio da remoção do cavaco (partículas metálicas) é conhecida como rebolo. A superfície do rebolo é constituída por grãos abrasivos, de arestas geometricamente não definidas, de elevada dureza unidas por meio de um ligante, além da presença de poros vazios (Mello, 2011).

Na Figura 5 são representados os elementos que constituem a ferramenta de corte que segundo (YOUSSEF; EL HOFY, 2008) são distinguidas por suas formas, tamanhos e características de fabricação.

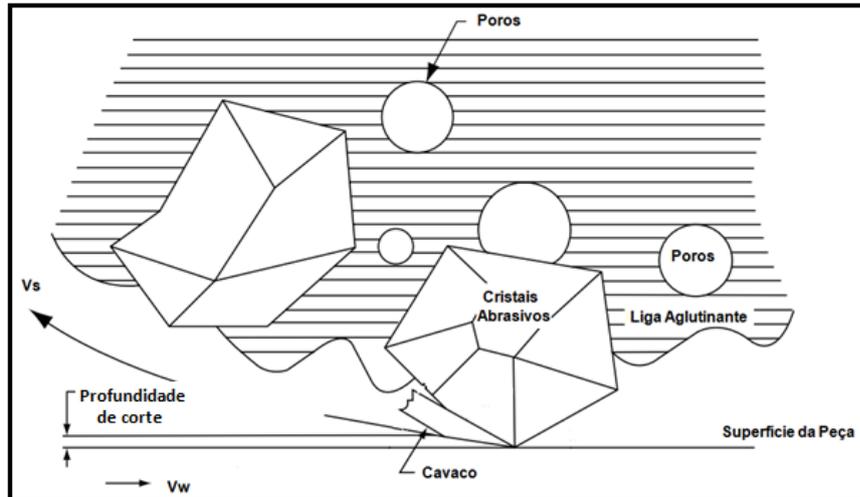


Figura 5: Esquema para ilustração dos constituintes da ferramenta de corte
 Fonte: Youssef e El Hofy, 2008 (adaptada)

O desempenho do processo de retificação está diretamente relacionado com a ferramenta de trabalho e com os diversos parâmetros que a influenciam como a força de corte, velocidade do rebolo e distribuição das arestas de corte sobre a superfície do rebolo (CHEN; LIMCHICHOL, 2006). A escolha adequada das condições de usinagem e das especificações do rebolo são apontadas por Bianchi et al., (2011) como fatores que podem otimizar a vida útil da ferramenta proporcionando maior capacidade de remoção do material.

O perfil do rebolo exerce um importante papel na interação da ferramenta e da peça durante o processo de retificação. De acordo com Hecher, Ramoneda e Liang (2003) o parâmetro de superfície mais relevante para o rebolo no processo de remoção do cavaco é a distribuição das arestas de corte, que para Oliveira, Dornfeld e Winter (1994) sofrem modificações ao longo do processo devido as irregularidades causadas pela diferença no volume de material removido e pelas forças de corte que podem variar ao longo da operação.

Segundo Paula (2007) a eficiência da ferramenta de corte é determinada pelas seguintes características: material do grão abrasivo; tipo de ligante; granulação (tamanho do grão); dureza do rebolo; e estrutura.

Além disso, a tenacidade e a friabilidade são outras duas propriedades apontadas por Fernandes (2007) que tem grande relação com o desempenho do rebolo. A tenacidade está relacionada com a energia necessária para fraturar um grão. A friabilidade está relacionada com a facilidade para se quebrar um grão abrasivo submetido a determinado esforço, segundo Youssef e El Hofy (2008) friabilidade alta indica baixa resistência a fratura.

3.3.1. Material do grão abrasivo

De acordo com Malkin (1989) os abrasivos utilizados nas ferramentas de corte podem ser naturais ou sintéticos (artificiais) mediante processos de fabricação adequados. A este grupo também podem ser introduzidos os superabrasivos como o nitreto cúbico de boro (CBN) e o diamante policristalino (PCD). Entretanto, os rebolos superabrasivos são confeccionados para aplicações especiais, de acordo com as exigências do usuário (BIANCHI et al., 1999).

3.3.1.1. Abrasivos naturais

Os abrasivos naturais são aqueles retirados da natureza tais como o esmeril, o óxido de alumínio, o coríndon e o diamante (MALKIN, 1989). Contudo estes abrasivos não são normalmente usados nos rebolos, pois não possuem resistência necessária para poder trabalhar em altas pressões, como no processo de retificação, o que inviabilizaria sua utilização quando altos níveis de agressividade forem solicitados (SOUZA, 2009).

Por outro lado, apesar de os abrasivos naturais não serem aplicados em operações onde se requer elevada força de corte, esses materiais não perderam sua aplicação, eles são comumente empregados no processamento dos abrasivos artificiais e em ferramentas específicas como lixas, por exemplo (ZANFERRARI, 2005).

3.3.1.2. Abrasivos artificiais ou convencionais

Diante da diversidade de abrasivos artificiais disponíveis no mercado, destacam-se os abrasivos de óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carboneto de silício (SiC). Os abrasivos de óxido de alumínio são, segundo Souza (2009), os que possuem maior resistência ao impacto dentre os abrasivos convencionais. Além disso, de acordo com Youssef e El Hofy (2008), esses abrasivos também têm elevada dureza (2100 Knoop) e tenacidade sendo então utilizados principalmente para retificar metais e ligas de alta resistência à tração, tais como aço, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e outros metais similares.

Um segundo tipo importante de abrasivo convencional é o carboneto de silício (SiC), que possui maior dureza do que os óxidos de alumínio (2400 Knoop), sendo conseqüentemente mais frágeis o que pode levar ao desgaste de suas arestas antes da completa remoção do material. Os rebolos fabricados a partir desses abrasivos são indicados geralmente para trabalhar materiais de baixa resistência a tração, materiais de alta dureza dentre outros (YOUSSEF; EL HOFY 2008).

3.3.1.3. Superabrasivos

Os rebolos superabrasivos foram desenvolvidos devido à crescente demanda por aços ligados e aços especiais, que requeriam para seu processamento materiais abrasivos que fossem mais resistentes do que os convencionais, a partir daí os materiais superabrasivos como o CBN e o diamante começaram a ser empregados na fabricação de ferramentas de corte para aplicações em materiais de difícil usinabilidade (ZANFERRARI, 2005).

O diamante por sua vez é o mais duro de todos os materiais e isto permite que ele seja aplicado na usinagem de componentes que possuam elevada dureza. Este superabrasivo, seja na sua forma natural ou sintética, não é recomendado para trabalhar materiais ferrosos ou que contenham ferro. Tal fato se deve a grafitização e difusão do carbono no ferro causando desgaste excessivo de diamante (ZANFERRARI, 2005).

De acordo com Youssef e El Hofy (2008) além da elevada dureza de 8000 Knoop os diamantes são friáveis, possuem resistência química elevada e têm um baixo coeficiente de dilatação térmica. Estes abrasivos são comumente empregados em operações de dressagem para correção de perfis de rebolos e recomendados para aplicação em materiais não ferrosos, não metálicos dentre outros.

Já os superabrasivos de CBN foram desenvolvidos pela General Eletric e inseridos no mercado para suprir as dificuldades encontradas pelos diamantes em usinar materiais ferrosos. Os rebolos de CBN são constituídos de um revestimento fino ligados a um material de alta

resistência mecânica por meio de um adesivo também de elevada resistência, o que os tornam capazes de trabalhar sob severas condições de usinagem (JACKSON et al., 2001).

As propriedades dos materiais de CBN são semelhantes as do diamante, a começar pela sua estrutura cristalina Hexagonal Compacta, além disso, eles possuem o segundo maior grau de dureza (4700 Knoop) abaixo apenas do diamante. Entretanto para as operações de usinagem os rebolos de CBN encontram seu maior empecilho no seu elevado custo que chega a ser de 10 a 20 vezes mais caros do que os óxidos de alumínio (YOUSSEF; El HOFY 2008).

A Tabela 1 sintetiza algumas das características dos abrasivos citados, bem como suas principais aplicações. É importante observar que rebolos de óxido de alumínio ou CBN podem ser utilizados basicamente para as mesmas aplicações, o mesmo também acontece com o carboneto de silício e o diamante (MACHADO et al., 2009).

Tabela 1: Propriedades e aplicações dos abrasivos
 Fonte: Malkin, 1989; Oliveira, 1989; Lindsay, 1995 adaptada por Machado et al., 2009

Abrasivos	Estrutura cristalina	Dureza Knoop (Kgf/mm ²)	Condutividade térmica relativa	Estabilidade térmica (°C)	Recomendado para:
Al ₂ O ₃	Hexagonal	2100	1	1750	Aços em geral, aço rápido, aço temperado e cementados, aos inoxidáveis e ligas aeronáuticas
SiC	Hexagonal	2400	10	1500	Não metálicos, vidros, ferros fundidos, carbetos de tungstênio
CBN	Cúbica	4700	35-120	1400	Aços temperados, ligas aeronáuticas e ferros de alta dureza
Diamante	Cúbica	8000	100-350	800	Cerâmicas duras, não metálicos, não ferrosos e metal duro brasado

3.3.2. Ligante do rebolo

O componente que mantém os grãos abrasivos do rebolo unidos é conhecido como ligante ou aglomerante. Este material exerce grande influência sobre a resistência da ferramenta de corte, sobre o comportamento elástico dos grãos abrasivos e sobre a vida útil do rebolo, o que conseqüentemente afetará o desempenho da operação de corte e a qualidade da superfície usinada (WANG, 2008).

De acordo com Malkin (1989) o mecanismo de ligação deve ser forte o suficiente para suportar as forças de corte, não deve possuir nenhum tipo de reação química com o fluido de corte utilizado na operação, deve resistir às elevadas temperaturas e deve suportar as forças centrífugas sem se desintegrar. Somado a isso o ligante deve oferecer também a rigidez ao rebolo e ter capacidade de reter os grãos abrasivos durante a operação de corte.

Os diferentes tipos de ligantes utilizados pelos fabricantes de rebolos são designados por meio de letras e podem ser classificados como: (MALKIN, 1989).

- Resinóide (B): É composta por resinas orgânicas, a maior aplicação desta liga é na fabricação de rebolos superabrasivos, eles possuem elevada resistência, são utilizados em operações pesadas e sob alta velocidade de corte.
- Vitrificado (V): É um ligante de argila refratária, sendo o mais utilizado para retificação de alta precisão, e encontra sua aplicação tanto em rebolos convencionais como em superabrasivos.
- Silicato (S): Com este ligante os rebolos sofrem maior desgaste do que se estivessem utilizando uma liga vitrificada. Porém encontram aplicação em processos de baixa velocidade de corte e em trabalhos de afiação de ferramenta.
- Borracha (R): Este ligante é utilizado para a confecção de rebolos que serão principalmente aplicados na retificação centerless.
- Metálicos (M): É utilizado na fabricação de rebolos superabrasivos, e podem ser produzidos a partir de ligas de bronze sintetizadas ou por meio do eletrorevestimento.

- Shelac (E): É um material orgânico natural pouco utilizado como ligante, são empregados em rebolos finos.

3.3.3. Granulação (tamanho do grão)

Os materiais abrasivos podem ser classificados de acordo com sua característica granulométrica, que representa o tamanho médio dos grãos que constituem o rebolo. O tamanho do grão abrasivo é selecionado por uma série de peneiras, que são identificadas por uma escala numérica denominada “*mesh*” (MELLO, 2011). A classificação dos abrasivos de acordo com sua escala granulométrica está representada conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Representação do tamanho dos grãos abrasivos
Fonte: Youssef e El Hofy, (2008)

GROSSO	MÉDIO	FINO	MUITO FINO
10	30	70	220
12	36	80	240
14	46	90	280
16	56	100	320
20	60	120	400
24		150	500
		180	600

A escolha do grão abrasivo é determinada pelo material a ser trabalhado e pelas necessidades do processo. Para atividades que necessitam de acabamentos melhores são utilizados rebolos de grãos abrasivos menores. Rebolos de abrasivos de tamanho grosseiro e médio são aplicados em operações de desbaste ou semi acabamento (YOUSSEF; EL HOFY 2008).

3.3.4. Dureza

Nos processos abrasivos um requisito importante é que a ferramenta de corte possua maior dureza do que o material a ser usinado, esta propriedade pode ser definida por meio do teste

de dureza Knoop (MALKIN, 1989). De acordo com Youssef e El Hofy (2008) a dureza do rebolo está relacionada à retenção dos grãos abrasivos e pode ser considerada então uma medida de resistência do ligante.

A dureza do rebolo é designada por letras que vão de A à Z, conforme está representado na Tabela 3. Onde a letra A representa materiais de menor dureza e a letra Z materiais de dureza mais elevada.

Tabela 3: Representação da dureza do rebolo
Fonte: Youssef e El Hofy, 2008 (adaptada)

Rebolos muito macios	A, B, C, D, F e G
Rebolos macios	H, I, J, e K
Rebolo com dureza media	L, M, N, e O
Rebolos duros	P, Q, R, e S
Rebolos muito duros	T, U, V, X, W, e Z

De uma forma geral, em operações de retificação pode se dizer que rebolos mais duros devem ser usados para retificar materiais macios, de outra maneira, quanto mais duro for o material a ser usinado, mais macio deverá ser o rebolo escolhido. (MELLO, 2011).

3.3.5. Estrutura

A estrutura do rebolo está relacionada com os espaços vazios entre os grãos abrasivos e como estes estão distribuídos sobre sua superfície, O rebolo pode ter estrutura mais fechada que proporciona acabamentos melhores sendo indicadas para materiais mais duros ou estrutura mais aberta que são recomendados para taxas maiores de remoção de material sendo mais adequadas para materiais macios (MELLO, 2011).

Usualmente a estrutura do rebolo é identificada por números que vão classificar o rebolo que possui uma estrutura aberta, média ou aquele que tem estrutura fechada conforme está identificado na Tabela 4:

Tabela 4: Representação da estrutura do rebolo
 Fonte: Mello 2011, (adaptada)

Estrutura	Identificação
Estrutura fechada	de 1 a 4
Estrutura média	de 4 a 7
Estrutura aberta	de 8 a 12

3.3.6. Desgaste diametral do rebolo

A qualidade dos materiais retificados é diretamente afetada pela topografia do rebolo e esta característica varia ao longo da vida útil do mesmo e pode ser influenciada principalmente pelo seu desgaste (HASSUI, 1997).

De acordo com Ferraresi (1977) a vida de uma ferramenta corresponde ao tempo em que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, ao atingir esse estágio a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Segundo Machado et al., (2009) desgastes acelerados ou frequentes levam a paradas da máquina para a troca e isso significa custos adicionais e perda da produtividade.

Segundo Malkin (1989) o desgaste do rebolo é frequentemente expressado como a perda volumétrica do material. Este desgaste de acordo com Bianchi et al., (2011) é causado por fatores mecânicos e físico químicos que por sua vez estão diretamente relacionados com a escolha adequada das condições de usinagem e das especificações do rebolo, que podem elevar sua vida útil e proporcionar maior capacidade de remoção do material.

Para Graham e Voutsadopoulos (1977); Malkin (1989) e Machado et al., (2009) o desgaste total do rebolo é determinado pela razão G , que representa o índice de volume de material usinado Z_w pelo volume de rebolo desgastado Z_s . Uma razão G baixa indica que há desgaste excessivo de rebolo e que, conseqüentemente este permanece agressivo durante a retificação. No entanto, uma razão G alta indica que a perda de grãos é menor, entretanto, ocorre perda

progressiva da agressividade do rebolo durante a operação e por, conseguinte, de sua capacidade de remoção.

De acordo com Graham e Voutsadopoulos (1977) a curva teórica que representa o desgaste volumétrico do rebolo em função do material removido da peça pode ser dividida em três regiões Figura 6.

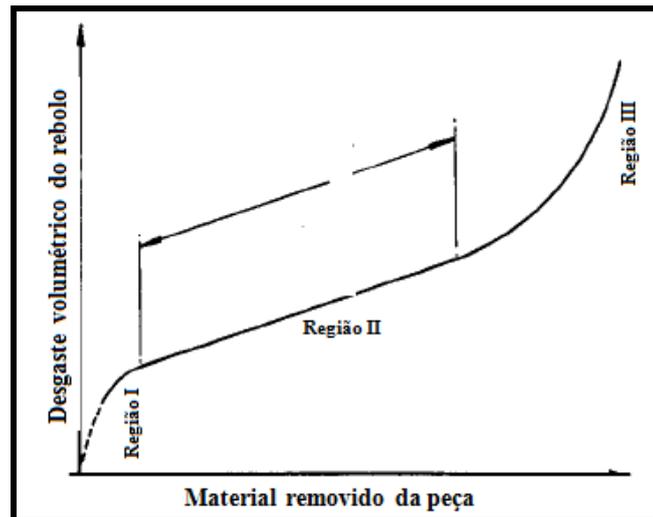


Figura 6: Curva desgaste volumétrico do rebolo em função do material removido
Fonte: Graham e Voutsadopoulos, 1977 (adaptada)

A região **I** constitui o período onde ocorre o início do desgaste diametral do rebolo, sendo o momento onde há elevada taxa de desgaste devido à remoção dos grãos abrasivos que foram parcialmente deslocados ou removidos pela operação de dressagem. A região **II** representa o período intermediário, nesse intervalo o desgaste do rebolo se torna relativamente constante e com menor magnitude, como se pode perceber pela inclinação da reta. A última região do gráfico, região **III**, representa o momento onde há um aumento na taxa de desgaste, devido principalmente à irregularidade topográfica do rebolo já adquirida ao longo do processo de usinagem, durante esta fase o corte pode se tornar insatisfatório a ponto de comprometer a qualidade superficial da peça, sendo então necessária uma nova reafiação do rebolo.

O desgaste do rebolo é um processo complexo, devido a sua distribuição aleatória dos grãos, pois sendo assim, alguns abrasivos podem se desgastar rapidamente e formar grandes planos na superfície, influenciando no comportamento do desgaste, que irão refletir sobre as forças de corte (CHEN; LIMCHIMCHOL 2006). Além disso, os danos térmicos também podem aumentar o desgaste volumétrico do rebolo, pois estes causam maior adesão dos grãos

abrasivos com as partículas metálicas da peça, originando maiores forças de corte e na deterioração da qualidade superficial da peça, podendo então levar ao aumento da perda diametral do rebolo (GOMES; CARVALHO; CAMPOS, 2009).

Para Lal, Matsuo, e Shaw (1973) três são os mecanismos de desgaste do rebolo e estes podem surgir devido à fratura do ligante ou fratura do grão e pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça conforme representado na Figura 7.

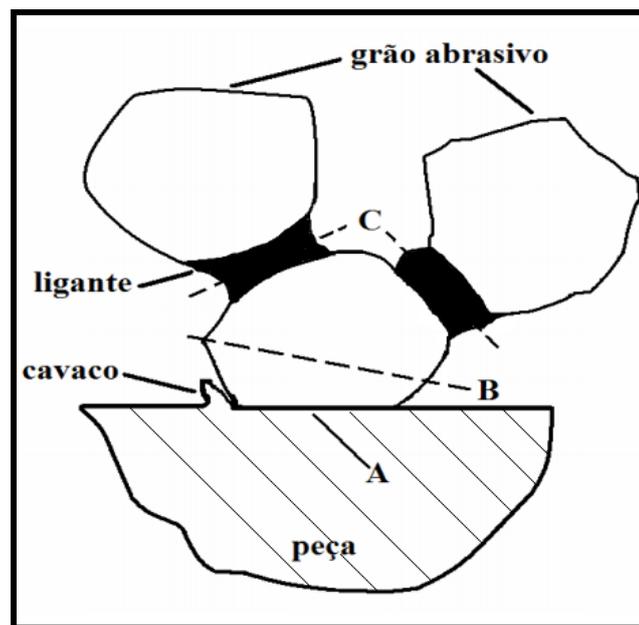


Figura 7: Mecanismo de desgaste
Fonte: Lal, Matsuo, e Shaw, 1973 (adaptada)

O atrito entre o grão e a peça (A) leva ao desgaste do rebolo pela perda de afiação e pelo aparecimento de regiões planas nos grãos. A fratura do ligante (C) ocorre pelo desprendimento integral dos grãos. Já a fratura dos grãos (B) se refere à remoção integral dos abrasivos, originando em novas arestas de corte. Embora represente pouca contribuição para perda volumétrica do rebolo o desgaste por atrito é muitas das vezes o mais importante, pois tem grande influência sobre as forças de corte e sobre a taxa de fratura do ligante (MALKIN, 1989).

3.4. Dressagem

Quando o rebolo sofre desgaste ao longo do seu período de utilização ele perde a precisão de corte, sendo necessário fazer a sua restauração de forma a recuperar sua qualidade. A operação que tem por finalidade executar a afiação da ferramenta abrasiva eliminando a superfície desgastada e restabelecendo a sua capacidade de corte é denominada dressagem (WANG, 2008).

Entretanto como em muitas situações a dressagem ocorre com a parada da máquina é de fundamental importância estabelecer o momento adequado de se fazer esta operação, evitando interrupções desnecessárias que podem levar a retirada excessiva de material do rebolo. Por outro lado, se a dressagem for retardada a operação de corte pode ocorrer sem que o rebolo esteja com sua afiação adequada o que poderia gerar danos a integridade da peça (MACHADO et al., 2009).

De acordo com Souza (2009), vários são os tipos de ferramentas denominadas como dressadores, cada uma possui sua aplicação específica de acordo com as características do material a ser dressado, dentre os tipos de dressadores podemos citar: cortadores metálicos (rosetas), bastões retificadores, rodas retificadoras, pontas simples de diamante, dressadores de diamantes múltiplos e em matriz, roletes estacionários e giratórios de diamante e rolete de esmagamento. Todos estes possuem as seguintes finalidades:

- Melhorar a concentricidade da face de trabalho do rebolo em relação a seu eixo de rotação;
- Perfilar a face de trabalho do rebolo para o restabelecimento da forma;
- Retirar os grãos abrasivos gastos para aperfeiçoar a agressividade de trabalho do rebolo.

Para que ocorra a dressagem do rebolo é necessário que o dressador possua maior dureza que o material a ser removido. Desta maneira em operações de corte o diamante é o mais indicado. A Figura 8 representa o mecanismo de dressagem com seus principais parâmetros, utilizando-se de um dressador de ponta única de diamante o qual, após a definição do valor da profundidade de dressagem a_d , se desloca longitudinalmente enquanto o rebolo gira, com velocidade constante, usando dos próprios movimentos de deslocamento e avanços da máquina em que o rebolo, está instalado (MACHADO et al., 2009; MELLO, 2011).

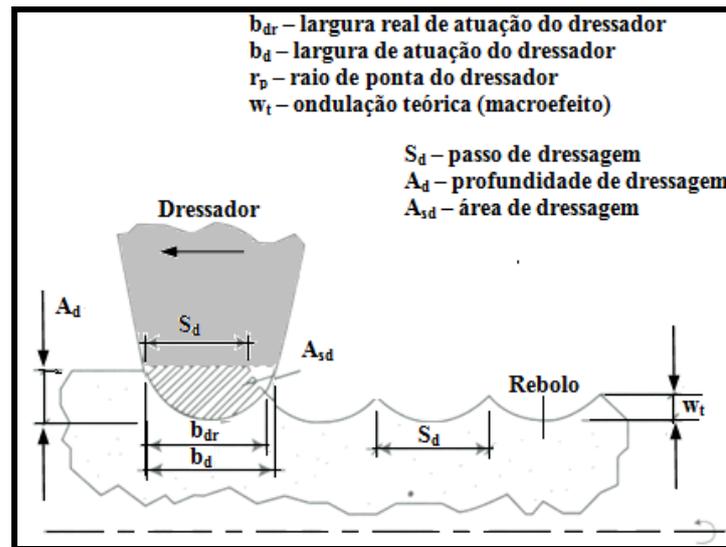


Figura 8: Esquemática do mecanismo de dressagem
 Fonte: Oliveira (1989) adaptada por Machado *et al* (2009)

De acordo com Oliveira (1988) citado por Hassui (1997) a operação de dressagem gera dois efeitos, denominados macro e micro efeitos.

- Macro efeito: é uma característica topográfica que está relacionada com o surgimento da “rosca” na superfície do rebolo devido às condições de dressagem.
- Micro efeito: é ocasionado pela fragmentação do grão abrasivo devido ao impacto entre o grão e o dressador, o que vai originar novas arestas de corte.

Segundo Machado *et al.*, (2009) a dressagem pode ser melhor quantificada em função do grau de recobrimento U_d do rebolo. Esse parâmetro estabelece a relação entre a largura do dressador S_d e o passo de dressagem b_d conforme mostrado na Equação 1.

$$U_d = b_d/S_d \quad (1)$$

Quando a relação de recobrimento é baixa o rebolo tende a ser mais agressivo, gerando forças de retificação menores e a rugosidade na superfície trabalhada tende a ser maior. Por outro lado um rebolo com alto grau de recobrimento possui menor agressividade, o que contribui para o aumento das forças de retificação, produzindo uma superfície de trabalho com melhor acabamento, embora contribua para a elevação da temperatura de retificação (HASSUI; DINIZ, 2003).

4. INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Compreende-se como integridade superficial a interação de um conjunto de propriedades de superfície que consiste basicamente de irregularidades geométricas, rugosidade da peça, danos térmicos, alterações de dureza e modificações estruturais (HOLESOVSKY; HRALA; MICHAEL 2004).

A confiabilidade e o desempenho de um produto estão diretamente relacionados com a integridade superficial alcançada durante a operação de usinagem. (ULUTAN; OZEL 2011). Segundo Shaw (1993) as características de desempenho que são geralmente sensíveis a integridade da superfície são:

- Resistência à fratura;
- Resistência à fadiga;
- Taxa de corrosão;
- Comportamento tribológico;
- Estabilidade dimensional.

De acordo com Brinksmeier (1989) a integridade de uma peça sofre influência direta dos impactos térmicos (tensões térmicas) e químicos (difusão) gerados durante as operações de corte e que podem afetar as propriedades das camadas superficiais e sub-superficiais do material trabalhado. Sendo que quaisquer modificações dos parâmetros de corte podem provocar alterações sobre as propriedades do material e como consequência influenciar no comportamento funcional do componente usinado (HOLESOVSKY; HRALA; MICHAEL 2004).

4.1. Danos Térmicos

Durante a operação de corte uma elevada concentração de energia por unidade de volume de material removido é gerada. Virtualmente toda esta energia é convertida em calor que

essencialmente fica concentrada na zona de corte, onde ocorre a interação da peça/rebolo. Isto pode conduzir a altas temperaturas e aos danos térmicos que comprometem a integridade superficial da peça usinada, e, além disso, acelera o desgaste da ferramenta de corte (MALKIN ; GUO, 2007; LI et al., 2010).

A temperatura gerada durante a retificação em consequência da energia expandida pelo processo, devido ao cisalhamento e ao atrito existente entre o grão e o cavaco formado, pode ser distribuída principalmente para a peça, rebolo, cavaco, fluido e meio ambiente conforme ilustrado na Figura 9 (LIAO, 2000).

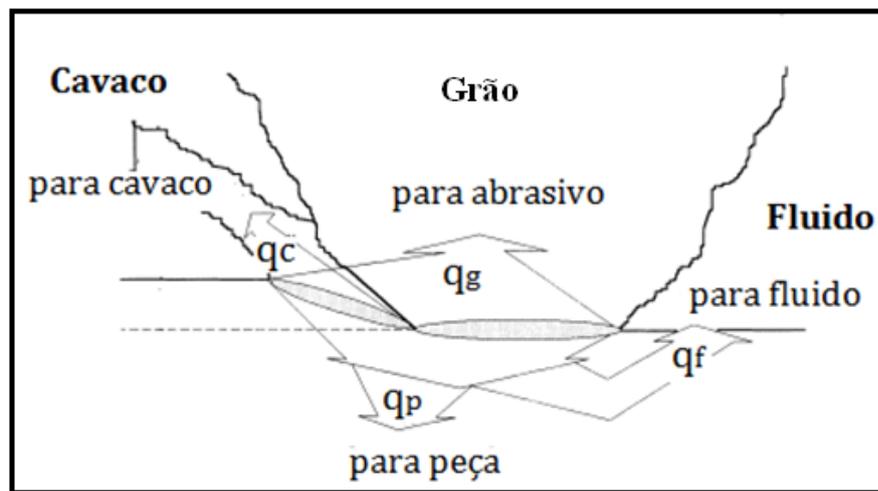


Figura 9: Distribuição de calor durante o processo de retificação
Fonte: Liao 2000, (adaptada)

Sendo q_c o fluxo de calor que vai para o cavaco, q_g o fluxo de calor que vai para o grão, q_p o fluxo de calor que vai para peça de trabalho, parte desse calor vai permanecer na peça e outra parte deverá ser removida pelo fluido de corte, quando este for aplicado de maneira uniforme sobre a peça e q_f é o fluxo de calor que vai para o fluido. De acordo com Malkin e Guo (2007) para rebolos convencionas cerca de 65 a 85% da energia mecânica total gerada é transferida para a peça.

Segundo Vieira *et al.*, (1999) a temperatura no processo de retificação pode ser superior a 1000°C ao atingir profundidades da ordem décimos de milímetros e isso pode provocar a redução da resistência à abrasão e à corrosão e acelerar o processo de fadiga da peça, o que estará comprometendo suas características de projeto e impossibilitando sua adequada aplicação.

4.1.1. Queima

Um dos tipos mais comuns de danos térmicos que ocorrem durante a operação de corte em consequência das elevadas temperaturas geradas pelo processo, é a queima, ressalta-se ainda que além de provocar a perda da qualidade superficial, a queima também gera o desgaste do rebolo devido à maior adesão entre as partículas metálicas e grãos abrasivos (BIANCHI; ALVES; AGUIAR, 2008).

A queima superficial é responsável pelas transformações microestruturais da peça e é caracterizada pela alteração na sua coloração. Segundo Malkin (1989) a queima visível é identificada na superfície da peça de trabalho pela presença de tons azulados, em decorrência da formação de uma camada de óxidos.

De acordo com Fernandes (2007) na retificação de aços temperados e revenidos, a queima gera um aumento da microdureza superficial em função da retempera do material que é uma consequência da sua reaustenitização, seguida da formação da martensita (denominada camada branca) não revenida. Estas alterações provocadas na camada superficial da peça acabam elevando sua fragilidade e deixando a peça propensa a fácil propagação de trincas.

4.1.2. Tensões residuais

As tensões residuais são definidas por Rossini et al., (2012) como tensões que permanecem no material após o seu processamento e na ausência de forças externas ou gradientes térmicos, e que podem ser geradas durante os processos de fabricação que envolvem a deformação do material, tratamento térmico, usinagem ou outras operações que transformam ou mudam as propriedades de um material.

O comportamento mecânico de peças retificadas é afetado pela tensão residual que surge com o superaquecimento da superfície da peça durante o processo de retificação. Estas tensões de acordo com Bianchi, Alves e Aguiar (2008) podem atuar sobre o material tanto na forma de tensão compressiva quanto na forma de tensão trativa.

A tensão residual é um requisito importante para a integridade superficial de componentes sensíveis a tensões e podem ser geradas principalmente por três efeitos (CHEN; ROWE; MCCORMACK, 2000).

- Tensões causadas pela expansão e contração térmica durante a operação de corte;
- Tensões devido à transformação de fase gerada pela alta temperatura de corte;
- Tensões induzidas pela deformação plástica não uniforme.

Malkin e Guo (2007) afirmam que durante a operação de corte, ao se remover o material da peça a expansão térmica da parte mais aquecida, que está próxima a superfície, é restringida pela porção mais fria do material, localizada em uma camada mais abaixo. Isto gera tensões térmicas severas capazes de transformar a deformação plástica em tensões compressivas. Após a retificação, ocorre o resfriamento da peça, o material comprimido provoca tensões residuais trativas. Porém, a fim de assegurar o equilíbrio mecânico, tensões residuais de compressão são geradas nas camadas próximas ao núcleo da peça.

Os materiais sujeitos a tensão compressiva sofrem comportamento favorável nas suas propriedades mecânicas, podendo ter elevada a sua resistência à fadiga. Por outro lado, as tensões de tração afetam a resistência mecânica, o desgaste e a corrosão do material (BIANCHI; ALVES; AGUIAR, 2008). Entretanto os danos térmicos e as tensões podem ser amenizadas quando sujeitas a adoção correta de fluidos de corte, rebolo e a uma adequada condição de corte (BIANCHI et al., 2003).

4.2. Rugosidade

A superfície de uma peça de acordo com Kopac e Bahor (1999) apresenta de uma maneira geral desvios aleatórios, irregularidades ou saliências que podem ser macro ou micro geométricos, não importando, portanto o quão lisa e brilhante seja a sua superfície ou o quanto suave tenha sido o processo de corte, uma superfície usinada não é totalmente isenta de irregularidades. Desta forma, existe sempre a necessidade de determinar os valores adequados que assegurem a obtenção das características de uma superfície.

Dentre os métodos que quantificam a integridade superficial de uma peça, a rugosidade é o procedimento mais adequado, pois além de ser rápido é um método satisfatório para determinar a qualidade do acabamento superficial (ULUTAN; OZEL, 2011). Além disso, a medição da rugosidade também é empregada nos processos de fabricação como uma variável de saída, determinante para o controle estatístico dos processos e para avaliação de sua eficiência, já que qualquer alteração no processo poderá seguramente refletir sobre os valores de rugosidade (WHITEHOUSE, 2001).

Agostinho, Rodrigues e Lirani (1981) afirma que a rugosidade pode ser caracterizada por irregularidades micro-geométricas que ocorrem durante o processo de fabricação. Sua quantificação é feita pelos parâmetros de altura e largura das irregularidades. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos e esta relacionada com a precisão de ajuste da máquina, condições de usinagem e com as tolerâncias de fabricação, que são especificadas de acordo com a aplicação da peça usinada.

4.2.1. Parâmetros para a quantificação da rugosidade

A análise superficial é afetada por um elevado número de parâmetros, que de acordo com os estudos de Dong; Sullivan; Stout (1994); e Gadelmawla et al., (2002) podem ser agrupados quanto a sua funcionalidade. Estes grupos são definidos como parâmetros de amplitude, parâmetros de espaço, parâmetros híbridos e parâmetros funcionais.

De acordo com Gadelmawla et al., 2002 os parâmetros de amplitude são os mais utilizados para caracterização topográfica dos materiais. Dentre eles o mais conhecido e utilizado para o controle da rugosidade é o parâmetro universal R_a , definido como desvio médio absoluto da rugosidade a partir da linha média sobre um comprimento de amostragem como é mostrado na Figura 10.

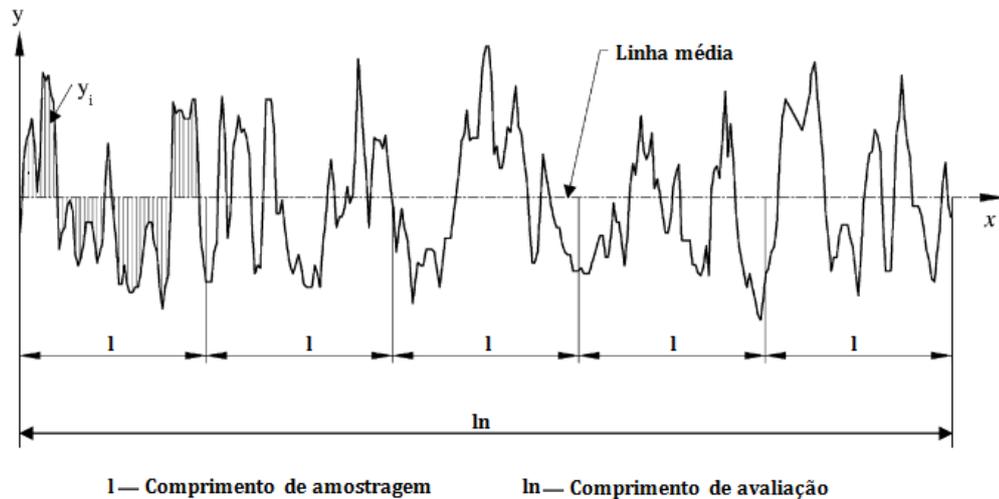


Figura 10: Parâmetro de rugosidade R_a
 Fonte : Gadelmawla et al., 2002 (adaptada)

O parâmetro R_a , embora tenha suas vantagens, quando analisado isoladamente não permite uma correta avaliação do perfil de rugosidade, pois superfícies com diferentes características podem apresentar o mesmo valor de R_a mais não o mesmo desempenho quando em serviço (MACHADO et al., 2009).

Já o parâmetro R_t ou R_{max} , é utilizado quando se pretende determinar a altura máxima da rugosidade. Este parâmetro é muito sensível aos picos mais altos e mais baixos da superfície e é, portanto definido como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil avaliado conforme está representado na Figura 11 (GADELMAWLA et al., 2002).

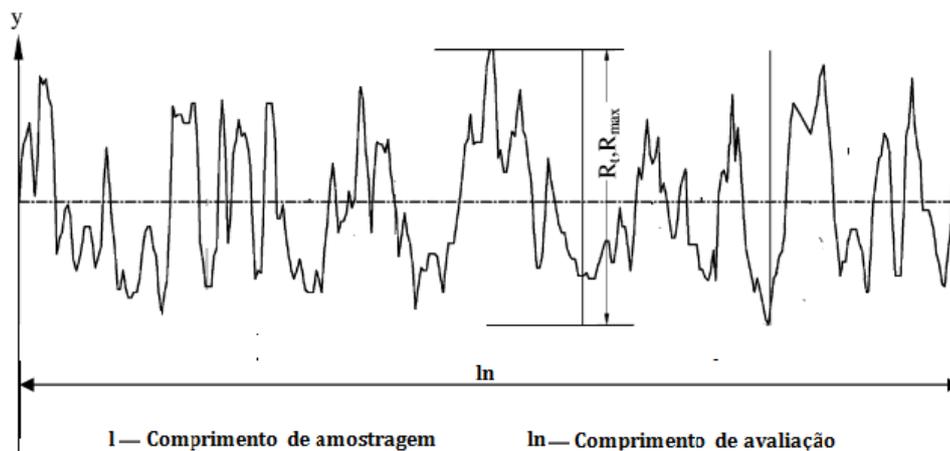


Figura 11: Parâmetro de rugosidade R_t
 Fonte : Gadelmawla et al., 2002 (adaptada)

Em aplicações de engenharia muitas das vezes as peças requerem características topográficas particulares, tais como capacidade de retenção de óleo, resistência ao desgaste e lubrificação, que são aspectos benéficos para determinados tipos de aplicações, desta forma é mais eficiente utilizar parâmetros funcionais, pois diferentemente dos demais parâmetros eles determinam as propriedades específicas de uma superfície e não dão apenas suas descrições gerais (DONG; SULLIVAN; STOUT 1994).

O valor de R_k com seus parâmetros associados servem principalmente para a avaliação funcional da superfície dos componentes e pode ser utilizada como parâmetro complementar aos parâmetros de amplitude. O valor de rugosidade R_k é determinado pela parte central do perfil, R_{vk} descreve a altura do pico (corte dos picos mais altos da superfície) e o valor de R_{pk} é a profundidade do vale, determinante para o volume de retenção de óleo V_0 . Este conjunto de parâmetros conhecido como família R_k é baseado nas 3 zonas de classificação da curva Abbot Firestone (curva razão do material) conforme está representado na Figura 12 (AVILA et al., 2005)

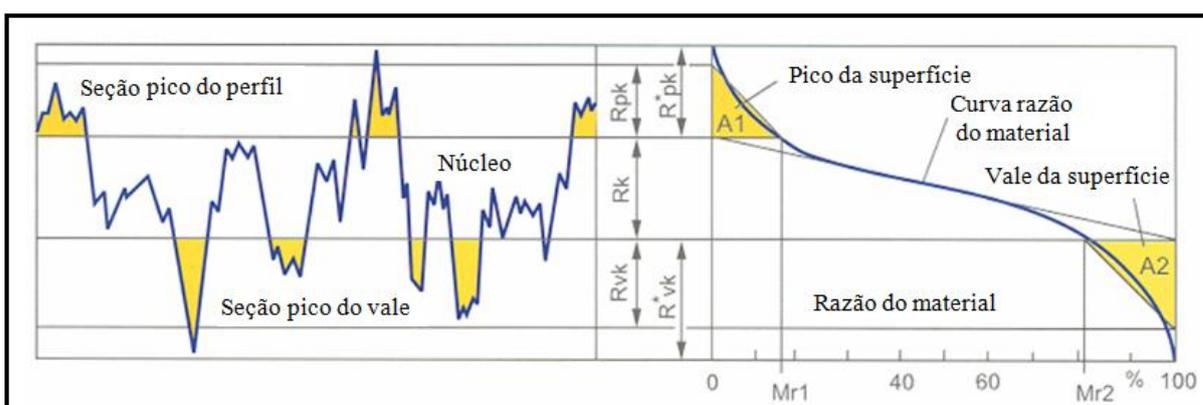


Figura 12: Parâmetros funcionais de rugosidade
Fonte: Mummery, 1992 adaptada por Avila et al, 2005

4.2.2. Análise tridimensional da rugosidade

Os parâmetros de rugosidade podem ser representados em 2 dimensões ou mesmo em 3 dimensões, a análise bidimensional da rugosidade dos materiais tem sido constantemente a mais aplicada pela engenharia por ser mais rápida e prática. Entretanto nos últimos anos, houve um crescimento para as análises tridimensionais (GADELMAWLA et al., 2002). Isto

está ligado ao fato de que o desempenho e a confiabilidade dos componentes de engenharia, podem ser aumentados com as características da superfície em 3D (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

De acordo com Dong, Sullivan e Stout (1994) os sistemas de reprodução de superfície em 3D são todos realizados por meio da medição digital. Estes sistemas representam a superfície por meio de um conjunto de dados normalmente sob a forma de uma matriz de amostras de dados igualmente espaçados em x e y do sistema cartesiano. Todos os parâmetros em 3D são definidos em uma amostragem de área que é o contrário do parâmetro em 2D que são definidos em um comprimento de avaliação consistindo de vários comprimentos de amostragem.

A Figura 13 a) apresenta a imagem topográfica para a caracterização de uma superfície que possui sulcos pontiagudos e um elevado volume de vazio que é reflectida pela grande curvatura côncava da curva Abbot Firestone (curva razão do material) representada na Figura 13 b) (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

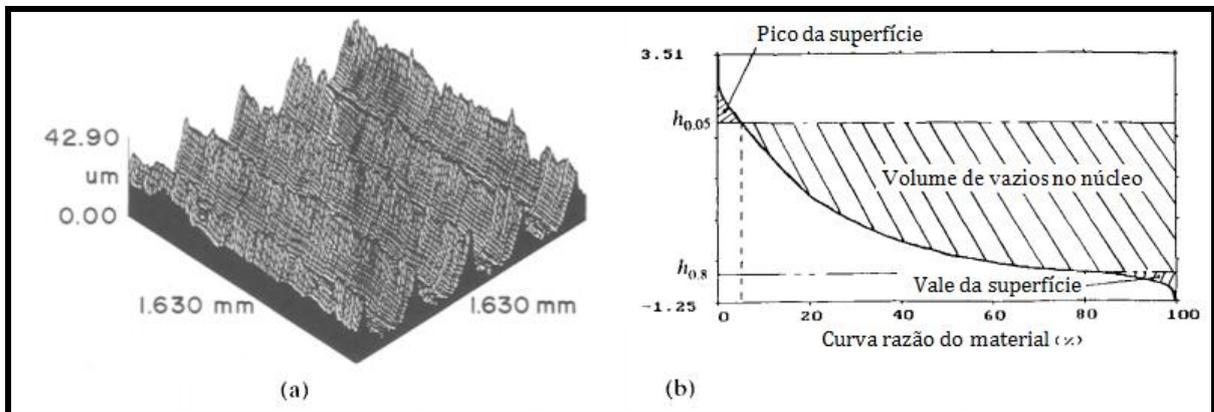


Figura 13: a) Representação topográfica em 3D da amostra b) Curva razão do material
Fonte: Dong, Sullivan e Stout 1994, (adaptada)

4.3. Análise Microestrutural

As análises microestruturais são de grande relevância para a caracterização do material usinado. Por meio deste tipo de análise é possível identificar possíveis alterações microestruturais, tais como, o aparecimento de microtrincas e/ou macrotrincas, mudanças de

fase e tensões residuais que comprometem a integridade do componente usinado. O método comumente empregado para realizar a análise da superfície de uma amostra sólida é por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (CATAI, 2006).

O Microscopia Eletrônica de Varredura é uma técnica que possui uma grande versatilidade e tem aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento, como biologia, química e engenharias. Ao se utilizar o MEV para realizar análises sobre a topografia do material, podemos obter informações sobre precipitados, fases e tamanho de grão, além de realizar análises de superfícies fraturadas. A principal característica desta técnica é seu alto poder de resolução garantindo ampliações da ordem de 10 a 300.000 vezes. Outra característica é a profundidade de foco cerca de 300 vezes maior no MEV em relação a um microscópio óptico (FERNANDES, 2007).

O Microscópio Eletrônico de Varredura, esquematizado na Figura 14, consiste basicamente de um canhão de elétrons, de uma lente condensadora e outra objetiva, de bobinas de varredura, do detector de elétrons e detector de raios-x, este último possibilita a microanálise química dos materiais (SKONG; HOLLER; NIEMAN 2002).

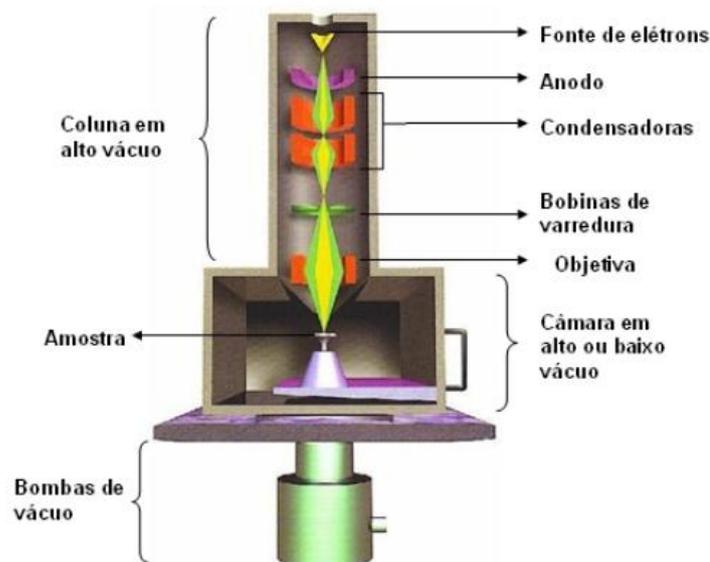


Figura 14: Esquema de microscópio eletrônico de varredura
Fonte: Fernandes, 2007 (adaptada)

Os elétrons são gerados a partir da passagem de uma corrente por meio do filamento de tungstênio, a diferença de potencial entre o anodo e o filamento provoca os elétrons

acelerados. A energia destes elétrons fica na faixa de 1-40 Kw. O feixe que sai do canhão de elétrons passa por lentes condensadoras, para redução de seu diâmetro, e por uma lente objetiva, responsável por focalizá-lo sobre a amostra. Próximo a lente objetiva se encontra dois pares de bobinas eletromagnéticas de deflexão (bobinas de varredura) que são responsáveis por fazer a varredura do feixe de elétrons sobre a amostra (FERNANDES, 2007).

A interação entre o feixe de elétrons e a superfície da uma amostra pode gerar vários tipos de sinais, incluindo elétrons espalhados, secundários e Auger, fótons de fluorescência de raios-x e fótons de varias energias (SKONG; HOLLER; NIEMAN, 2002). Na câmara da amostra existem vários detectores que estão localizados para capturar estes sinais e envia-lo ao CRT (tubo de raios catódidos) levando a formação da imagem. (FERNANDES, 2007).

4.4. Ensaio de Dureza

A Dureza é uma propriedade mecânica largamente utilizada para a caracterização e controle de qualidade dos materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas, metalúrgicas e na comparação de diversos materiais (SOUSA, 1982). Os primeiros ensaios de dureza eram baseados em minerais naturais, com uma escala construída unicamente em função da habilidade de um material em riscar outro mais macio, esta escala, um tanto arbitrária, ficou conhecida como escala Mohs que varia entre 1, material mais macio, até 10, para o diamante (CALLISTER, 2002).

Ao longo dos anos vários foram os métodos desenvolvidos para análise qualitativa e quantitativa da dureza, tais como dureza Rockwell, dureza Brinell, microdureza Knoop e Vickers (PAULA, 2007). Estas técnicas baseiam-se em pequenos penetradores que são forçados contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação (CALLISTER, 2002).

Entretanto, segundo Machado et al., (2009) durante as operações de usinagem, submetidas a determinadas condições de corte e lubri-refrigeração, as alterações microestruturais são inevitavelmente acompanhadas por alterações de dureza, sendo muitas das vezes necessário

realizar ensaios de microdureza. Neste ensaio, diferentemente das técnicas de Rockwell e Brinell, utiliza-se cargas muito menores, realizando impressões microscópicas no material e que não inutilizam a peça (SOUZA, 1982).

4.4.1. Ensaio de Microdureza Vickers

Introduzida em 1925 os ensaios de dureza Vickers estão atualmente voltados para as análises de microdureza dos materiais. Neste ensaio o penetrador com formato de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulos de 136° entre as faces opostas (Figura 15 (a)) é inserido cuidadosamente sobre a superfície plana da amostra, de modo que a forma da impressão é um losango regular (Figura 15 (b)) (SOUZA, 1982).

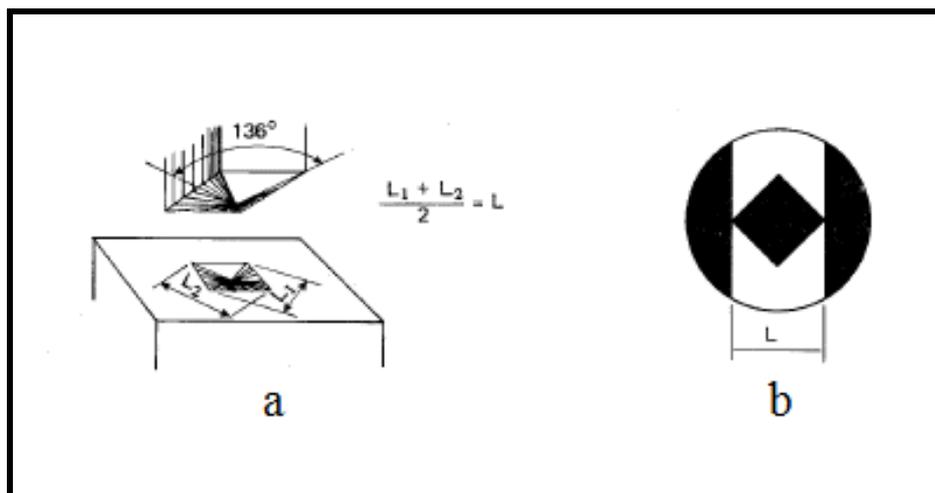


Figura 15: a) Penetrador de base quadrada b) Impressão na amostra
Fonte: Sousa 1982

A área da impressão obtida deve ser medida com precisão, e para este fim utiliza-se um microscópio acoplado ao microdurometro para a determinação das diagonais L , com precisão de cerca de 1 micrometro (SOUZA, 1982)

Especificamente para os ensaios de microdureza Vickers, é empregada uma carga menor que 1Kgf e podendo chegar a apenas 10gf, produzindo assim uma impressão microscópica no material. O ensaio porém é demorado e exige uma preparação cuidadosa do material, por meio de procedimentos metalográficos, para tornar nítida a impressão (SOUZA, 1982).

4.5. Corrosão

Segundo Saunders e Nicholls (1996) a corrosão é uma forma de degradação dos materiais, provocada pela interação do material com o meio ambiente e que muitas vezes limitam as condições do processo, já que implica na confiabilidade do produto e conseqüentemente na eficiência do sistema produtivo.

A corrosão é um processo natural e indesejável a superfície dos materiais, pois pode encurtar a sua vida útil. No processo de retificação onde o componente usinado deve possuir elevada qualidade superficial a corrosão precisa ser evitada ou ao menos controlada. Sendo que a proteção da peça contra corrosão é necessária durante sua manipulação, transporte ou estocagem que pode variar de alguns dias até mesmo alguns anos, ou mesmo até a proteção definitiva da peça e componentes de máquina (RUNGE; DUARTE 1990).

A grande parte dos ambientes é corrosiva, embora sua magnitude dependa da sensibilidade do metal ou liga, sua presença pode afetar o aspecto funcional do material, principalmente no que diz respeito a sua resistência mecânica, sua integridade dimensional e superficial e quanto a suas propriedades físicas (SAUNDERS; NICHOLLS 1996).

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na superfície de separação entre metal e meio corrosivo (GENTIL, 2011). De acordo com Jambo e Fofano (2008) os tipos de corrosão podem ser divididos basicamente quanto a sua morfologia (forma) e quanto a sua fenomenologia (processo corrosivo). Essa divisão está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Classificação dos tipos de corrosão
 Fonte: Jambo e Fofano (2008)

QUANTO A MORFOLOGIA	QUANTO A FENOMENOLOGIA
Uniforme	Galvânica
Localizada	Célula oclusa
Seletiva	Corrosão associada à erosão
Intergranular	Corrosão sob fadiga
	Corrosão sob tensão
	Corrosão atmosférica
	Corrosão microbiológica
	Corrosão pelo hidrogênio

De acordo com Jambo e Fofano (2008) em processos industriais que utilizam de sistemas de lubri-refrigeração, a atividade microbiana causa uma série de problemas de corrosão decorrente de processos eletroquímicos.

Nas operações de usinagem, em particular na retificação onde os fluidos de corte são aplicados também devido a seu potencial anticorrosivo, a corrosão pode ser induzida indiretamente pela presença de microrganismos, uma ação denominada microbiana ou microbiológica, pois os mesmos provocam o consumo dos inibidores de corrosão. Neste caso, a corrosão do material metálico processa-se sobre a influência de bactérias ou mesmo fungos e algas (LIMA, 2012).

Segundo Gentil (2011) a deterioração microbiana pode aparecer em diversos materiais, metálicos ou não metálicos e principalmente nas operações de usinagem, pois os óleos de corte utilizados nestas operações, quando deteriorados, podem ser potencialmente corrosivos, sendo necessária na maioria das vezes a utilização de biocidas para reduzir a deterioração deste óleo.

5. FLUIDOS DE CORTE

Os efeitos positivos da utilização de fluidos de corte foram verificados por Taylor em 1894, onde ao aplicar uma determinada quantidade de água na área de corte percebeu que a velocidade de corte poderia ser aumentada em 33% sem a redução da vida útil da ferramenta (AVILA; ABRÃO, 2001).

Desde então as operações de usinagem passaram por constantes evoluções. Para atender às exigências do mercado as empresas trabalham com o máximo da sua capacidade de produção, e nas operações de corte a velocidade de trabalho também é cada vez maior aumentando assim a quantidade de calor gerada na interface peça/rebolo, o que conseqüentemente dá ao fluido de corte e a sua forma de aplicação no processo uma relevante importância. Entretanto, há no mercado uma grande diversidade de óleos e fluidos de corte, de forma que alguns fatores influenciam na melhor escolha, como viscosidade, pH, custos, e demais características físico/químicas (BIANCHI et al., 2001).

5.1. Classificação dos Fluidos de Corte

Não existe hoje no mercado um único tipo de fluido que atenda todas as necessidades operacionais. O que existe são fluidos mais versáteis que podem ser aplicados em diferentes tipos de operações (CATAI, 2004). Por outro lado, Ávila e Abrão (2001) reforçam que existe uma grande dificuldade em se selecionar um fluido que atenda a uma operação em particular, já que para isto seria necessário levar em conta diversos parâmetros de usinagem, tais como velocidade de corte, material da peça etc.

Desta forma, El Baradie (1996a) traz a classificação dos três principais grupos de fluidos de corte, ou seja, fluidos solúveis em água, óleo de corte puro e gases, conforme Figura 16.

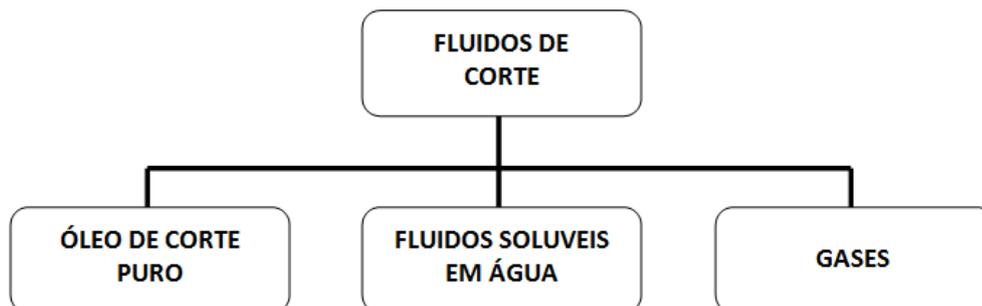


Figura 16: Classificação dos fluidos de corte
Fonte: EL BARADIE, 1996a (adaptada)

5.1.1. Óleo de corte puro ou integral

Os óleos integrais são preferencialmente empregados em operações que necessitam de boa capacidade lubrificante e estes óleos são basicamente compostos por: óleos minerais, agentes antioxidantes, agentes de extrema pressão e agentes de oleosidade. Por outro lado, apesar de sua excelente propriedade lubrificante o óleo integral possui pouca eficiência para a remoção de calor na zona de corte e são altamente inflamáveis trazendo potenciais riscos de incêndio (LI et al., 2000).

Para Gomes, Carvalho e Campos (2009) o aspecto lubrificante do óleo mineral proporciona menores forças de corte no processo de retificação, fazendo com que o coeficiente de atrito seja reduzido, esse aspecto contribui para o aumento da vida útil da ferramenta e para um melhor acabamento e integridade da superfície usinada.

De acordo com Runge e Duarte (1990) o óleo integral é utilizado como fornecido pelo fabricante, não requerendo alterações em sua composição, entretanto estes óleos se diferenciam pelo tipo de aplicação específica, já que podem ser encontrados numa ampla gama de viscosidade e aditivação.

5.1.2. Fluidos de corte solúveis em água

Os óleos solúveis segundo Runge e Duarte (1990) são óleos convencionais que formam emulsões em água, o teor de óleo mineral varia entre 50% e 85%, geralmente misturado á água na proporção de 5 a 60 partes de água para uma de óleo.

Os fluidos de corte solúveis em água encontram sua aplicação em processos que necessitam de uma maior ação refrigerante e uma moderada lubrificação. Estes fluidos são misturados com água em diferentes proporções formando misturas de emulsões e soluções. Entretanto, a relação quantidade de água e óleo é dependente da operação de usinagem executada (EL BARADIE, 1996a).

El Baradie 1996a também classificou os fluidos solúveis em água conforme está esquematizado na Figura 17.

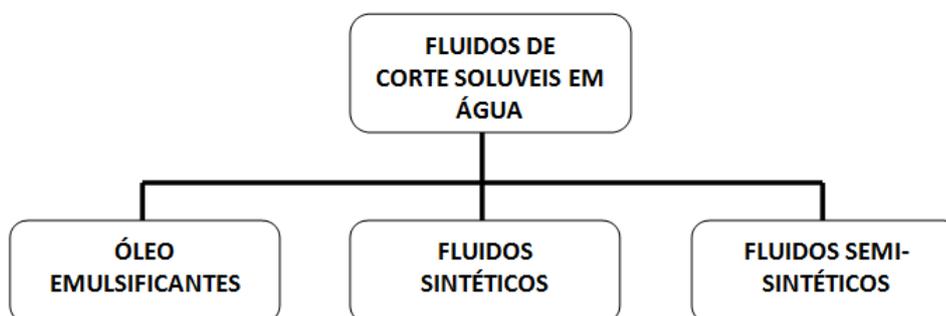


Figura 17: Classificação dos Fluidos de corte solúveis em água
Fonte: EL BARADIE, 1996a (adaptada).

5.1.2.1. Óleos emulsificantes

Os óleos emulsificantes ou emulsões são mais eficientes em praticamente todas as operações de usinagem, pois são aplicáveis a alta velocidade, baixa pressão de corte e elevada geração de calor, isto se deve a combinação das propriedades de lubrificação e com as propriedades da água que é refrigerante. As emulsões são formadas pela suspensão de gotículas de óleo em água, feita por meio da mistura do óleo com agentes emulsificantes e outros materiais. Esses

emulsificantes (tensoativos) quebram as partículas de óleo e as mantêm dispersas na água por longos períodos. Entretanto, as emulsões são mais aplicáveis para atividades que requerem maior poder de refrigeração, pois os fluidos a base de água são fracos lubrificantes (El BARADIE, 1996a).

As propriedades físico/químicas das emulsões podem ser melhoradas segundo Maia et al., (2007) pela seleção criteriosa dos aditivos, tais como biocidas, antiespumantes, emulgadores, anticorrosivos dentre outros. Contudo, as características lubrificantes e refrigerantes também podem ser alteradas por meio da concentração de água, que vai depender das necessidades do processo. De acordo com Brinksmeir (1999) a concentração de óleo em emulsões utilizadas no processo de retificação estão entre 2 e 15%.

5.1.2.2. Fluidos sintéticos

Os fluidos sintéticos são caracterizados pelo seu alto poder de remoção de calor. Segundo El Baradie (1996a) estes fluidos são compostos por materiais inorgânicos e outros aditivos dissolvidos em água sem a presença de óleo mineral. Sendo assim o aspecto lubrificante é comprometido se comparado com os demais fluidos. Entretanto, estes fluidos apresentam outras vantagens como, uma vida maior, uma vez que são menos atacáveis por bactérias e reduzem o número de trocas na máquina-ferramenta (MIRANDA, 2003).

5.1.2.3. Fluidos semi-sintéticos

Os fluidos de corte semi-sintético constituem segundo Fernandes (2007) uma categoria que visa boa capacidade de lubrificação com menor quantidade de óleo, para isto combina as características dos fluidos sintéticos e dos emulsionáveis. Dessa forma este fluido acaba influenciando na melhoria da vida do sistema de lubri-refrigeração.

De acordo com Runge e Duarte (1990) os fluidos semi-sintéticos poderiam ser chamados de óleos solúveis com baixo teor de óleo, pois apresentam teor de óleo mineral menor que os

solúveis. Outras características também são apontadas pelos autores para este tipo de fluido, as quais são:

- Melhores propriedades de umectação que óleos solúveis.
- Permitem trabalhar com velocidades mais altas e avanços maiores.
- Boa capacidade de lubrificação para aplicações.
- Baixo potencial de corrosão e de ataque bacteriano.
- Possuem usualmente melhores propriedades de decantação e limpeza do que os óleos solúveis convencionais.

5.1.3. Gases

De acordo com Silva (2000) apud Fernandes (2007) o fluido gasoso mais comum é o ar e em alguns casos também são utilizados gases como hélio e o Nitrogênio. A grande vantagem deste é a capacidade de refrigeração na região de corte, ausência de contaminantes da peça e do cavaco. Entretanto, quando o ar é usado o benefício da lubrificação do fluido é perdido.

5.2. Função do Fluido de Corte

Segundo Irani (2005), um dos principais fatores que limitam a taxa de produção do processo de retificação é a presença dos danos térmicos na zona de corte, que pode ser amenizado com a utilização dos fluidos de corte, que segundo Oliveira et al., (2011), tem a capacidade lubrificante e refrigerante, além de remover os cavacos da região de corte, desobstruindo as porosidades.

A função dos fluidos de corte para Ferraresi (1977) é introduzir aos processos de usinagem melhorias tanto de aspecto funcional, conferindo a estes um melhor desempenho, como de caráter econômico, reduzindo custos operacionais, principalmente com afiação e troca de ferramentas.

De acordo com Webster (2002) a considerável demanda pela aplicação de fluidos de corte nas operações de retificação é atribuída à necessidade de qualidade superficial e manutenção da vida útil da ferramenta. Junto a isso a aplicação dos fluidos de corte de forma eficaz na zona de atrito peça/rebolo pode segundo Monici et al., (2006) reduzir as forças de corte em cerca 50% sob determinadas condições de usinagem.

Além da refrigeração e lubrificação outras características são apresentadas por Maia et al., (2007), as quais são:

- Redução do desgaste da ferramenta.
- Melhora no acabamento da superfície.
- Proteção contra corrosão.
- Remoção das aparas da peça por ação de lavagem.
- Redução do consumo de potência (energia).

França (2005) afirma que a principal função do fluido de corte é a capacidade de refrigeração do processo. Com isto é possível que o calor produzido entre a superfície da peça e da ferramenta seja reduzido, proporcionando um aumento da vida útil da ferramenta e garantindo maior precisão dimensional pela redução das distorções térmicas ocorridas durante o processo. Entretanto, a ação da refrigeração não tem um efeito significativo no acabamento superficial da peça. Uma alternativa é o óleo lubrificante mineral que segundo El Baradie (1996a) possui características exigidas para lubrificar a interface peça e ferramenta.

5.3. Aditivos Utilizados nos Fluidos de Corte

Os aditivos são adicionados aos fluidos de corte para melhorar ou reestabelecer algumas de suas propriedades e como consequência, aperfeiçoar determinados tipos de processo de fabricação (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMAN, 1999). Segundo Sales (1994) apud Catai (2004) os aditivos adicionados aos fluidos de corte em busca de aumentar a eficiência dos mesmos, reforçando suas propriedades e conferindo lhes características necessárias às exigências das máquinas modernas são:

- Emulgadores: São responsáveis por reduzirem a tensão superficial e formarem uma película monomolecular semi-estável na interface óleo água. Estes ainda são responsáveis pela formação de emulsões de óleo na água e vice versa, sendo que os principais tipos são os sabões de ácidos graxos, as gorduras sulfatadas, sulfonados de petróleo e emulgadores não iônicos.
- Biocidas: Quando adicionados aos fluidos permitem a redução dos micro-organismos (bactérias, fungos e leveduras) em emulsões lubrificantes, evitando a rápida degradação do fluido, a quebra da emulsão, a formação de subprodutos, a ocorrência de efeitos maléficos pelo contato do homem com as emulsões contaminadas.
- Anticorrosivos: Os aditivos anticorrosivos são substâncias químicas adicionadas aos lubrificantes para evitar a corrosão da peça, ferramenta e da máquina.
- Antiespumantes: Estes aditivos têm a função principal de evitar a formação de espumas, que quando presente pode comprometer o efeito de refrigeração do fluido além de impedir a boa visualização da região de corte. Estes antiespumantes agem reduzindo a tensão interfacial do óleo de tal maneira que as bolhas menores possam se agrupar formando bolhas maiores e mais instáveis. A fim de se manter o controle das espumas, usualmente utiliza-se óleos de silicone, bem como, ceras especiais.
- Detergentes: Produtos que reduzem a deposição do lodo, lamas e borras, e são compostos organometálicos contendo magnésio, cálcio, entre outros.
- Aditivos de extrema pressão (EP): Aditivos que são utilizados geralmente na execução de operações mais severas, nas quais uma lubricidade extrema é necessária, pois os mesmos conferem aos fluidos maiores qualidades lubrificantes para que estes tolerem as altas temperaturas e elevadas pressões de corte, reduzindo o atrito peça/ferramenta. Os aditivos EP são reativos com a superfície usinada, formando compostos relativamente fracos na interface, geralmente sais que se fundem a altas temperaturas e são facilmente cisalháveis.

5.4. Propriedades dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte são susceptíveis a sofrer alterações durante sua utilização no que diz respeito a sua composição e propriedades que podem prejudicar sua funcionalidade quando em processo (RAKIC; RAKIC 2002).

Sendo assim, Runge e Duarte (1990) apontam as principais propriedades dos fluidos de corte, que caracterizam o seu desempenho durante as operações de usinagem.

- Anticorrosivas: São propriedades importantes para dar proteção a peça, a ferramenta e aos componentes da máquina operatriz contra a corrosão.
- Antiespumantes: As propriedades antiespumantes são necessárias para evitar formação de espuma persistente que possa comprometer a visão da operação ou influenciar de maneira negativa sobre as propriedades de refrigeração, com a formação de bolhas de ar na área de corte, fraca transferência de calor no reservatório entre outras.
- Antioxidantes: Estas propriedades são importantes por evitar que o fluido oxide prematuramente sob a ação das elevadas temperaturas e da forte aeração as quais é exposto.
- Compatibilidade com o meio ambiente: A compatibilidade com o meio ambiente deve ser analisada em relação à saúde do operador, pois estes ficam expostos ao fluido por longos períodos de tempo aspirando névoa ou vapores formados durante a operação da máquina. O fluido também deve ser compatível com a máquina operatriz e vice versa. Isto porque a máquina é composta por uma variedade de materiais, que não devem agredir o meio ambiente.
- Propriedade de lavagem e decantação de cavacos e impurezas: Em virtude do grande número de cavacos e impurezas geradas durante o corte, as propriedades de lavagem têm a função de remover os detritos, que devem ser rapidamente retirados para evitar a quebra da ferramenta e danos às peças. As propriedades dos fluidos de corte que influenciam sobre as

propriedades de lavagem são a viscosidade, tensão superficial e a facilidade de decantação dos cavacos.

- Alta capacidade de absorção de calor: Uma alta capacidade de absorção de calor é influenciada pela viscosidade, pelo calor específico, pela condutibilidade térmica e, para os casos de fluidos aquosos, pelo calor latente de vaporização, de modo que todos estes itens influenciam diretamente na propriedade de refrigeração do fluido.
- Alta capacidade de umectação: Esta propriedade faz com que a superfície da peça, a ferramenta e os cavacos sejam rapidamente molhadas pelo fluido e influem diretamente sobre a capacidade de refrigeração do mesmo.
- Boas propriedades antidesgaste: As boas propriedades antidesgaste reforçam as propriedades de lubrificação do óleo mineral e são proporcionadas pela graxa, aditivos e demais componentes.
- Antisolda ou Extrema Pressão (EP): Essas propriedades são necessárias quando o poder lubrificante e os aditivos antidesgaste não são tão suficientes para resistir às elevadas pressões de corte.
- Estabilidade do fluido: Esta propriedade é importante durante o processo de estocagem, para assegurar que o produto seja homogêneo ao chegar à área de corte. Os óleos de corte são sensíveis quanto à estabilidade, devido à variedade de componentes de que são formados. Contudo os óleos integrais e os fluidos sintéticos podem ser separados durante a estocagem, caso seus componentes não sejam selecionados de maneira correta.
- Ausência de odor forte: A ausência de odor é muito importante para os fluidos de corte, pois, nas operações de usinagem, grandes superfícies são expostas à atmosfera e o aquecimento durante a operação contribui para o desprendimento de odores ao meio ambiente.
- Ausência de precipitados sólidos: Para garantir uma livre circulação pelo sistema os fluidos não devem formar precipitados sólidos de qualquer natureza. Os fluidos de corte solúveis

são sensíveis a este problema na presença de água dura. Fluidos sintéticos podem formar resíduos às vezes difíceis ou mesmo serem removidos.

- Viscosidade: A viscosidade para o caso de fluidos de corte deve ser suficientemente baixa, para assegurar um jato de fluxo abundante na área de corte e permitir a rápida decantação dos cavacos e outros resíduos. Por outro lado, a viscosidade em alguns casos deve ser suficientemente elevada para maior grau de lubrificação.
- Transparência: É necessário que o fluido de corte possua transparência para poder permitir a boa observação da área de corte por parte do operador.

As propriedades dos fluidos de corte podem variar de acordo com a sua aplicação e a necessidade do processo. Entretanto, esta diferença é mais evidente quando comparamos um fluido de corte solúvel com outro integral conforme está representado na Tabela 6 (RUNGE; DUARTE, 1990).

Tabela 6: Comparação das propriedades dos fluidos de corte solúveis e integral
Fonte: Runge e Duarte, 1990 (adaptada)

Propriedade do fluido de corte	Fluido integral	Fluido solúvel (Emulsionável ou solução)
Calor específico	Baixo	Alto
Condutividade térmica	Fraca	Boa
Poder Lubrificante	Bom	Fraco
Propriedade anticorrosiva	Boas	Fracas
Decantação dos cavacos	Fraca	Boa
Bombeabilidade	Variável	Fácil
Perda por arraste	Altas	Baixas
Aceitação pelo operador	Menor	Maior

5.5. Aspectos de Manutenção e Controle dos Fluidos de Corte

A manutenção e o controle dos fluidos segundo Runge e Duarte (1990) são procedimentos que influenciam para que a quantidade a ser descartada e a frequência sejam as menores possíveis, já que o descarte seja ele feito pelo próprio usuário ou por outra empresa sempre representa um custo, que deve ser levado em consideração. Entretanto, é desejável que a formulação do fluido de corte contenha componentes que facilitem e reduzam o custo com descarte.

A conservação dos fluidos de corte e manutenção de suas propriedades deve ser feita periodicamente por meio do controle dos seguintes itens: pH, concentração, proteção anticorrosiva, e, eventualmente a contagem microbiológica. A estes itens é importante inserir o controle da qualidade da água que pode influenciar na estabilidade das emulsões. (RUNGE; DUARTE, 1990).

5.5.1. Valor do pH:

O pH em termos práticos é uma medida de acidez ou alcalinidade de uma solução aquosa. Os valores do pH de soluções recém preparadas tendem a diminuir nas primeiras horas de uso, pela absorção do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. A redução típica é de 0,5 no valor do pH (RUNGE; DUARTE, 1990).

De acordo com El Baradie (1996b) a pele humana tem um valor de pH normalmente entre 5,5 e 5,6. Soluções que tenham valores de pH superiores ou inferiores a esta podem causar irritações na pele do operador, mas a gravidade dependerá da sensibilidade de cada pessoa. Se o pH do fluido estiver abaixo de 8,5 aumenta a probabilidade de oxidação, por outro lado se o pH se elevasse bastante, acima de 9,3, aumentaria o risco de irritações na pele. O ideal para a emulsão seria um pH em torno de 9 e 9,3 entretanto o valor mais utilizado na prática é entre 8,5 e 9,3. Nas regiões onde as temperaturas são mais elevadas é aconselhável utilizar pH com valores mais altos, já que o crescimento bacteriano é promovido pelo calor.

5.5.2. Concentração do fluido

A obtenção da concentração dos fluidos é uma maneira de se medir a quantidade de óleo presente na emulsão e pode variar de acordo com o tipo de produto e especificações de produção. Sendo que limite inferior não deve ser ultrapassado, pois este se refere à concentração mínima para manter o desempenho lubrificante e anticorrosivo da emulsão. Entretanto, é recomendável manter a concentração do fluido conforme especificado pelo fabricante do produto (MUNIZ, 2008).

5.5.3. Qualidade da água

A qualidade da água é de grande importância para a formulação de emulsões. De acordo com Muniz (2008) a “água dura” pode levar a formação de compostos insolúveis, resultado da combinação de cátions e cálcio, magnésio e ferro com sabões, agentes umectantes e emulgadores, o que pode levar a quebra da emulsão. Entretanto, segundo El Baradie (1996b) a dureza da água é devido aos sais dissolvidos, tais como cálcio, magnésio e ferro, e ocasionalmente de alumínio.

5.5.4. Aspecto microbiológico das emulsões

As bactérias estão presentes nas emulsões durante as operações usualmente em todos os tipos existentes (aeróbicas, anaeróbicas e anaeróbicas facultativas). Algumas bactérias e também fungos tem como característica principal a resistência ao calor. Na indústria existem constantes fontes de contaminação que podem ser controladas por meio de algumas técnicas, dentre elas a utilização dos biocidas que são amplamente conhecidos e usados devido à sua elevada eficiência (RUNGE; DUARTE 1990).

Piubeli et al., (2008) salienta que ao utilizar do controle microbiológico podemos contribuir para a vida útil do fluido de corte e melhorar a qualidade da peça, isso se deve ao fato de que além de degradar o óleo, as bactérias provocam a corrosão das peças trabalhadas devido a

redução do pH. Por outro lado, quando se aumenta a vida útil do fluido pela eliminação ou redução da contaminação por bactérias haverá também a diminuição da sua frequência de descarte.

5.5.6. Teste de corrosão

O potencial anticorrosivo dos fluidos de corte é diretamente afetado pelo seu nível de contaminação que também resulta na redução de seu pH. Fluidos com pH muito baixo reduzem a proteção dada por eles às peças, ferramentas e componentes da máquina, pois o teor de material anticorrosivo já estará enfraquecido. Sendo assim, em casos onde o pH for reduzido a níveis inadequados, é necessário adicionar materiais que elevem o pH a níveis aceitáveis mais também materiais anticorrosivos que restabeleçam esta propriedade. (RUNGE; DUARTE 1990).

As propriedades anticorrosivas dos fluidos de corte podem segundo Runge e Duarte (1990) ser avaliadas por meio de testes com cavacos de ferro fundido, conforme a norma DIN 51.360, avaliando desta forma a habilidade de inibição de corrosão dos anticorrosivos presentes nos fluidos, tendo em vista que o ataque bacteriano causa consumo de compostos anticorrosivos.

5.6. Aspectos Ecológicos dos Fluidos e Efeitos Sobre a Saúde do Operador

Nos últimos anos as questões relacionadas ao consumo de energia, poluição do ar e resíduos industriais se tornaram foco de diversas autoridades públicas, fazendo com que o meio ambiente e a forma como cuidamos do mesmo fosse visto como o tema mais importante dentro do contexto da vida moderna, já que sua degradação afeta diretamente a humanidade (SILVA *et al.*, 2007). Dessa forma confirmando a tendência para preocupações ambientais hoje existe uma forte ênfase para o controle dos fluidos de corte utilizados no processo de usinagem tendo em vista que estes são altamente tóxicos ao meio ambiente.

O fluido de corte é um composto de grande importância para o processo de usinagem e apesar das grandes contribuições ao avanço do processo, o fluido tem uma multiplicidade de efeitos negativos, devido a sua composição química, que prejudica a saúde do operador, além de ser um grande agravante do meio ambiente (OLIVEIRA; ALVES, 2007).

Durante o processo de retificação ao avaliar os impactos gerados pela utilização do fluido de corte, Oliveira e Alves, (2006) chamam a atenção para o efeito nocivo devido seu descarte incorreto, que tem como consequência a degradação do meio ambiente, e para os efeitos devido à constante exposição dos operadores a evaporação do fluido durante o processo, que pode afetar diretamente a saúde do operador, trazendo problemas respiratórios e de pele. El Baradie (1996b) cita as principais doenças de pele que surgem por meio do contato e exposição dos operadores com os fluidos de corte, elas são: dermatite, foliculite, ceratoses dentre outros.

Além disso, a presença de alguns constituintes químicos, como por exemplo, a N-nitroamina pode elevar o risco da obtenção de câncer. Dentre a diversidade de fluidos disponíveis no mercado aquele que representa maior perigo a saúde do trabalhador é o óleo integral. Por outro lado, o que possui menor agressividade é o solúvel. Entretanto, os óleos solúveis não são totalmente isentos do risco cancerígeno já que muitos dos ingredientes presentes no óleo integral também fazem parte da composição do óleo solúvel, porém em concentrações diferentes. (OLIVEIRA; ALVES, 2007).

Ao analisar os efeitos nocivos que os fluidos trazem não só para a vida humana mais também para o meio ambiente e da necessidade de uma manufatura ecologicamente correta, os novos fluidos de corte tem que satisfazer as exigências de proteção do meio ambiente uma vez preestabelecida, seja por meio de regulamentos, normas impostas pelo Estado ou normas internacionais. Desta maneira ao se desenvolver novos fluidos de corte a qualidade deverá ser identificável tanto em termos de parametros de usinagem como parametros ecológicos. (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001).

5.7. Descarte dos Fluidos de Corte

Ao longo do processo de corte os fluidos sofrem o mecanismo de degradação, que pode ocorrer por meio da contaminação por bactérias ou mesmo pela contaminação pelos microcavacos. A contaminação bacteriológica segundo Mello (2011) leva alguns meses para se desenvolver e pode causar alergias e até mesmo infecções, além do mau cheiro típico, principalmente após um período de repouso. Em ambos os casos os fluidos de corte estarão perdendo suas propriedades o que levará a diminuição do seu desempenho quando em processo.

De acordo com Lima (2012) os fluidos de corte compatíveis com sistemas aquosos são altamente susceptíveis a contaminação microbiológica. Esta susceptibilidade á contaminação é uma das principais razões na busca por alternativas que aumentem a vida útil dos fluidos e que contribuam com outras propriedades, como controle de corrosão, manutenção do pH e controle microbiológico.

Mattos M *et al.*, (2008) citam que os fluidos de corte utilizados nas operações de usinagem ao perderem suas propriedades devem ser substituídos, contudo diante dos regulamentos rigorosos sobre a eliminação dos resíduos oleosos (considerados como resíduos perigosos) se faz necessário a redução de seu descarte. Uma opção seria reciclá-lo ou mesmo realizar a sua reformulação, desde que as propriedades do fluido sejam no mínimo mantidas semelhantes.

Já quando o descarte do fluido for indispensável este procedimento deve ser rigorosamente feito de maneira adequada. De acordo com El Baradie (1996b) todo fluido de corte solúvel em água deve sofrer uma espécie de tratamento antes de ser descartado, pois os elementos químicos contidos nesses fluidos, tais como óleos nitritos, fenóis, fosfatos e metais pesados são extremamente poluentes. Contudo, o conteúdo do óleo de corte pode ser quebrado e separado da emulsão por um tratamento, utilizando ácido ou sulfato de alumínio, de tal forma que seja possível o tratamento da fase aquosa.

Por outro lado, ao se tratar de óleos de corte integrais estes podem ser vendidos para refinação, queimados em caldeira desde que atendam aos requisitos pré-estabelecidos pela legislação vigente (DUARTE; RUNGE, 1990).

A Figura 18 apresenta um diagrama que demonstra um processo adequado para o descarte de fluidos de corte utilizados nos processos de usinagem (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001).

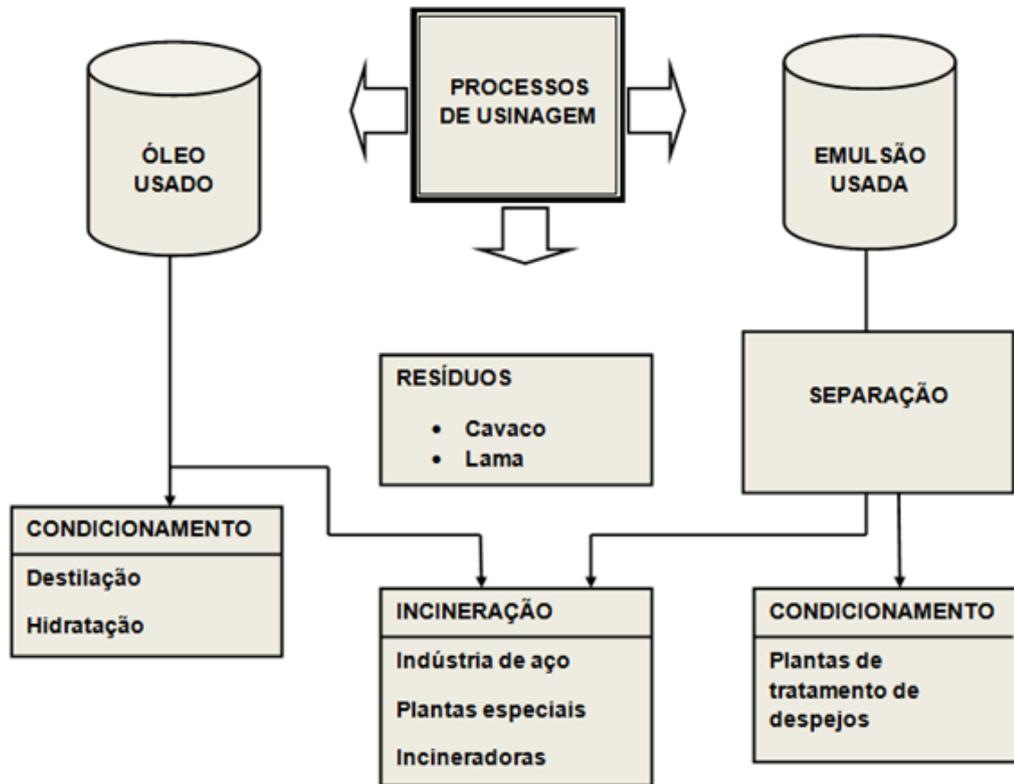


Figura 18: Esquematização de descarte do fluido de corte

Fonte: Sokovic e Mijanovic, 2001 (adaptada)

A adequada disposição de óleos e emulsões se torna cada vez mais importante. Para este fim é necessário a correta avaliação dos parâmetros ecológicos dos fluidos de corte, informações obtidas a partir da análise do ciclo de vida do fluido (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001).

6. MATERIAIS E METODOS

Este capítulo tem a finalidade de descrever todos os equipamentos e materiais utilizados, assim como também a descrição dos procedimentos e planejamentos utilizados durante a experimentação. O projeto foi executado principalmente no Laboratório de Retificação e no laboratório de Caracterização e Metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/MG, no Departamento de Química, (DEQUI), e no Laboratório Multiusuário de Caracterização Física e Química de Materiais (TECMAT).

6.1. Montagem do Banco de Ensaio

O banco de ensaios é composto basicamente por uma retificadora cilíndrica universal, da marca TosHostivar, apresentada na Figura 19, com potencia equivalente a 9kw, na qual foram realizados os experimentos.



Figura 19: Laboratório de retificação e retificadora cilíndrica universal utilizada nos experimentos

6.1.1. Corpo de prova

O corpo de prova utilizado para realização deste trabalho foi o aço ABNT 4340 temperado e revenido com dureza média de 52 HRc. Classificado como aço para beneficiamento, possui boa combinação entre resistência e tenacidade, é empregado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas altas e periódicas, em peças aeronáuticas, eixos vibrancos e em muitas outras aplicações. A composição química em percentual determinado pelo fabricante está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Composição química do aço ABNT 4340 em %

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,38	0,66	0,03	0,21	0,011	0,74	1,66	0,22	0,021
Cu	Co	V	Ti	Sn	N	H	Fe	
0,052	0,04	0,04	0,003	0,0012	0,72ppm	4,7ppm	Balanço	

Por se tratar de um corpo de prova que possui comprimento superior a largura do rebolo e para caracterizar o processo de retificação cilíndrica de mergulho, foi necessário dividi-lo em três seções (A, B e C) conforme está identificado na Figura 20.

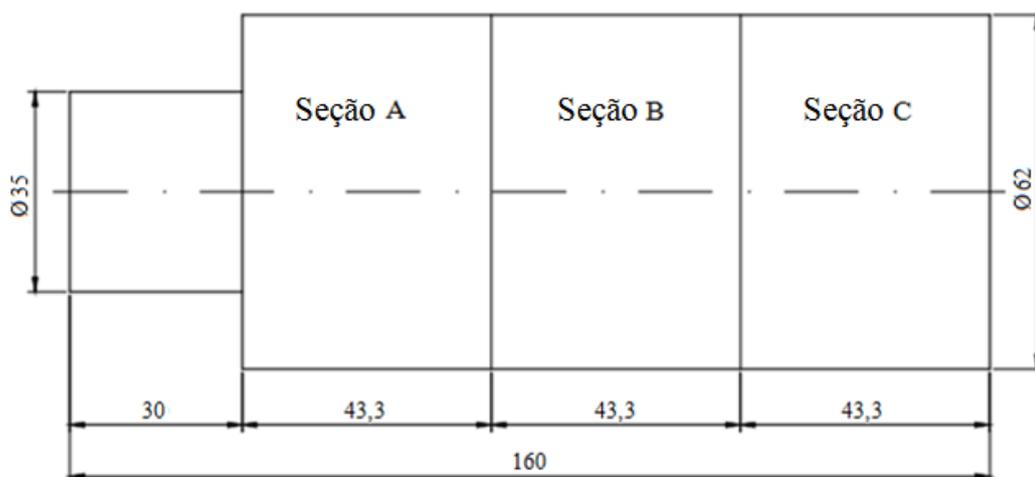


Figura 20: Divisão do corpo de prova retificado

Após a retificação do referido corpo de prova foi possível obter um produto acabado conforme representado pela Figura 21, onde as três seções (A, B e C) foram usinadas.

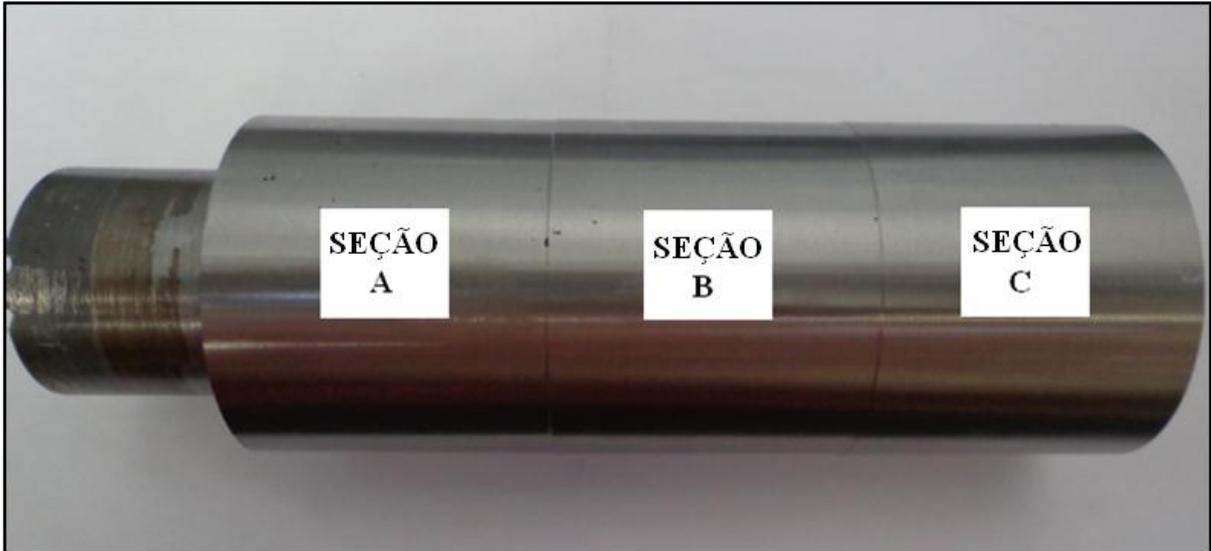


Figura 21: Corpo de prova usinado com suas respectivas seções A, B e C

6.1.2. Ferramenta de corte

O rebolo utilizado neste trabalho foi um rebolo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3), com as seguintes dimensões e características: (355,6 x 50,8 x 127 - FE 38A60KV) onde durante a usinagem foi deixado aproximadamente 7,5 mm na largura do mesmo.

Este rebolo é utilizado na retificação de aços que possuem alta resistência à tração e elevada dureza, evitando que o tratamento térmico ou têmpera sejam alterados.

6.1.3. Fluidos de corte utilizados nos testes de retificação

- Fluido de corte comercial: O fluido de corte utilizado na primeira etapa de ensaios foi uma emulsão em água com 6% de óleo mineral MECAFLUID S 1100 que possui as seguintes informações do fabricante: 70 a 85 % em peso de óleo naftênico, 1 a 5% em peso de bactericidas e 10 a 25% de aditivos (Tensoativos, sulfonatos e inibidores de corrosão).

- Fluido de corte recuperado: A segunda emulsão utilizada neste trabalho teve sua concentração mantida nos mesmos 6% de óleo em água, sendo a concentração ajustada mediante o uso de alcalinizantes e bactericidas, quando o pH atingia valor inferior a 8,5. Quanto à concentração e preparo dos alcalinizantes e bactericidas foram seguidas as especificações do fabricante.

A recuperação do fluido de corte consistiu no preparo de uma nova emulsão visando o monitoramento e ajuste periódico de seus parâmetros físico-químicos, desta forma foi possível trabalhar com o fluido de corte dentro das especificações de uso e conforme orientações do fornecedor.

Após a necessidade de seu ajuste, adicionando concentrações ideais de alcalinizantes e bactericidas, os ensaios foram executados sempre com o pH entre 8,5 e 9,3. Valores que segundo o fabricante estão dentro das condições apropriadas para o processo.

- Fluido de corte reformulado: O fluido de corte reformulado teve por base a avaliação físico-química do fluido de corte comercial e a reformulação do mesmo foi realizada pela mestrandia Luciana Isabel de Oliveira Marcelino, do mestrado de Engenharia de Materiais, de acordo com a proposta apresentada em seu projeto de pesquisa.

A reformulação foi realizada adicionando aditivo de extrema pressão (EP) a uma concentração de 6% e 10%, obtendo assim duas reformulações. Esse aditivo confere ao fluido uma maior capacidade lubrificante para que o mesmo tolere as altas temperaturas e elevadas pressões de corte. Quanto aos ensaios realizados com as reformulações, foi sempre preservado o valor do pH entre 8,5 e 9,3.

Já o critério adotado para utilização do aditivo de EP se deu a partir de pré-testes realizados também de acordo com o projeto de pesquisa da mestrandia Luciana Isabel de Oliveira Marcelino.

6.1.3.1. Monitoramento dos fluidos de corte

Para todos os fluidos de corte aplicados neste trabalho, foi realizado o controle e monitoramento de alguns parâmetros considerados de rotina, sendo eles, medições de pH, contagem microbiana e controle da concentração. As duas primeiras análises serviram principalmente para acompanhar a degradação do fluido ao longo de cada ensaio e sendo determinante para o ajuste e reformulação do mesmo. Destaca-se ainda que o pH do fluido foi acompanhado diariamente, a análise microbiana semanalmente e a concentração foi monitorada antes da execução de cada ensaio.

Além disso, para o melhor controle das propriedades e composição dos fluidos de corte e para reduzir os riscos associados à corrosão da peça e dos elementos mecânicos, foi realizada a análise do potencial anticorrosivos de cada fluido, o procedimento para essa análise será descrito na seção 6.3.5.

Vale ressaltar que o período de monitoramento dos fluidos, foi de 6 meses para o fluido comercial, 4 meses para o fluido recuperado e de 3 meses para o fluido reformulado, sendo que o tempo de monitoramento foi determinante apenas para o acompanhamento da degradação do fluido, portanto, não tendo influência sobre os resultados dos ensaios realizados, que teve como objetivo verificar o desempenho dos fluidos em processo.

6.1.3.1.1. Análise microbiológica

A análise microbiana foi realizada por meio de lâminas de imersão “*dip slide*” que consiste em uma lâmina de plástico revestida com nutrientes para microrganismos específicos, encontrada dentro de uma cápsula plástica que protege a lâmina contra infecção indesejáveis. Para usar retire a lâmina da cápsula para imergi-la no fluido. Após ser imersa no fluido a ser testado, a lâmina é recolocada na cápsula de proteção e o conjunto é levado para a estufa, onde fica por um período de 48 horas a 35 °C e posteriormente a 30°C por 72 horas, o que favorece o crescimento rápido de microrganismos. Após o período de incubação compara-se a

lâmina com o gabarito que acompanha o conjunto, dessa maneira foi possível identificar o número de colônias formadas.

Na Figura 22 é mostrada, de forma representativa, a utilização das lâminas de imersão. Em (a) ilustra a remoção da lâmina de imersão do estojo de proteção. Em (b) ilustra a imersão da lâmina debaixo do jato de fluido de corte da retificadora. O passo seguinte, conforme ilustrado em (c) consiste em colocar a lâmina de volta no estojo que foi identificado. O estojo foi colocado em estufa, como mostrado em (d) por 48h a 35°C e mais 72 h a 30°C.

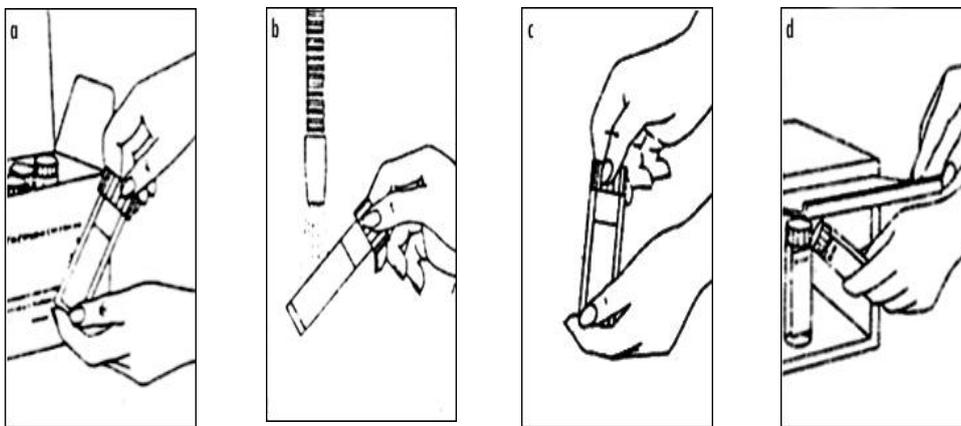


Figura 22: Ilustração do uso de lâminas de imersão para contagem de micro-organismos.

Fonte: Runge e Duarte, 1990.

Ao final do teste compara-se a lâmina com o gabarito que acompanha o conjunto, conforme ilustra a Figura 23.

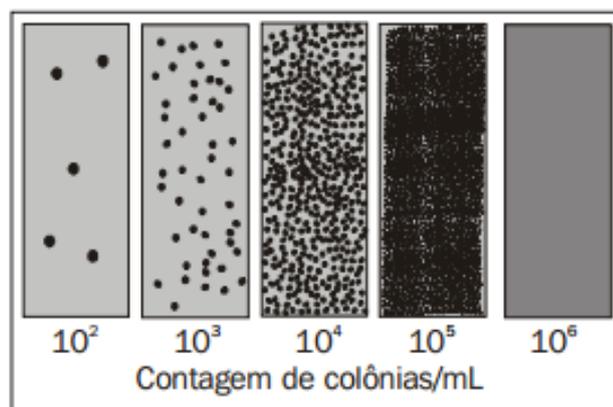


Figura 23: Gabarito empregado na contagem do número de colônias.

Fonte: Runge e Duarte, 1990.

6.1.3.1.2. Medição do pH:

O pH do fluido foi determinado por meio de um peagâmetro digital instalado no laboratório de química do CEFET MG. Inicialmente antes de cada medida o aparelho foi calibrado, mediante procedimento operacional padrão e posteriormente em um béquer de 100 ml foram adicionados 50 ml de amostra. O eletrodo foi então mergulhado na amostra durante um período de 30 segundos para estabilização da leitura. Após a realização da leitura do pH o eletrodo foi lavado com água destilada. Os ensaios foram executados com pH entre 8,5 e 9,3 exceto para o fluido comercial, o que nos permitiu realizar a comparação de um fluido (recuperado e reformulado) que teve seu pH ajustado, para os valores já estipulados, com um fluido que foi utilizado em meio ao seu processo de degradação e sem ajuste de pH.

6.1.3.1.3. Controle da concentração

Já o controle da concentração, foi executado antes da realização dos ensaios por meio de um refratômetro portátil da marca ATAGO que possui uma faixa de medição de 0 a 30% em escala Brix. Esse procedimento indicou sempre que necessário o momento de se realizar o ajuste da concentração para os 6% de óleo em água, já estipulado para cada fluido. Entretanto, antes de sua utilização foi necessária sua calibração, realizada no Laboratório de Química, do CEFET-MG.

A calibração do aparelho é realizada ajustando o valor zero do refratômetro com água corrente. Para isso a intersecção da parte escura com a parte clara deve se dar na posição de 0%Brix. Uma representação esquemática do que se observa na ocular do refratômetro durante o ajuste do zero é mostrado na Figura 24.

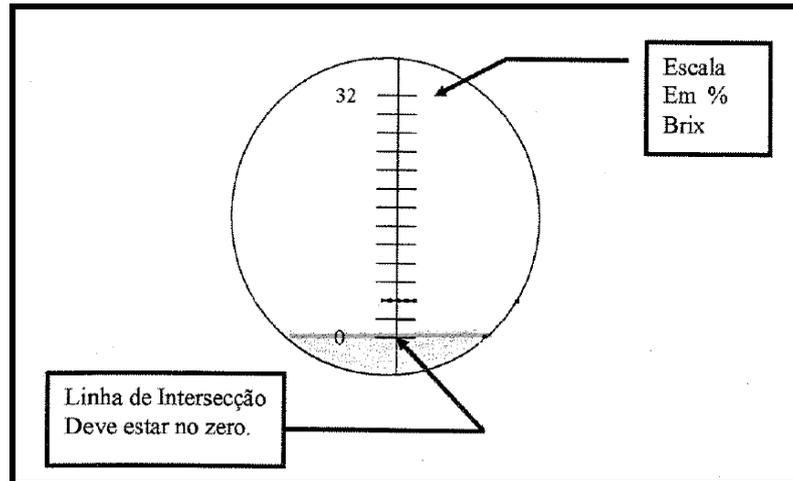


Figura 24: Calibração do zero no refratômetro manual.
Fonte: Runge e Duarte, 1990

A utilização do refratômetro na determinação da concentração de emulsões e soluções é, segundo Runge e Duarte (1990), o meio mais rápido e prático para uma boa resposta do valor de concentração de uma emulsão.

6.1.4. Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte foram determinados após a realização de testes preliminares. O objetivo desses testes foi o de obter as melhores condições de usinagem que pudessem caracterizar o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizado nas indústrias de metal-mecânica. Todos os parâmetros selecionados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Condições de usinagem utilizadas

PARAMETRO	MEDIDA
Rotação da peça (V_w)	95 rpm
Velocidade de mergulho (V_f)	1,2 e 0,8 mm/min
Tempo de centelhamento (t_s)	10 s e 5s
Vazão do fluido de corte (V_j)	16 L/min
Velocidade de corte (V_s)	30 m/s
Profundidade de corte (a)	0,02 e 0,013 mm
Velocidade de dressagem	2,7 mm/s
Profundidade de dressagem (a_d)	0,05 mm

Desses parâmetros, todos foram mantidos constantes e se alterava apenas a velocidade de mergulho, a profundidade de corte e o tempo de centelhamento ou (*spark out*). Com esta variação foi possível simular as condições de acabamento no processo de retificação, além de melhor avaliar a qualidade de lubri-refrigeração de cada fluido durante diferentes situações de corte.

6.1.5. Condições de dressagem

A operação de dressagem do rebolo foi realizada no início de cada ensaio. Foi utilizado um dressador de ponta única de diamante preso a um suporte, que faz parte dos acessórios da retificadora, conforme está representado na Figura 25.

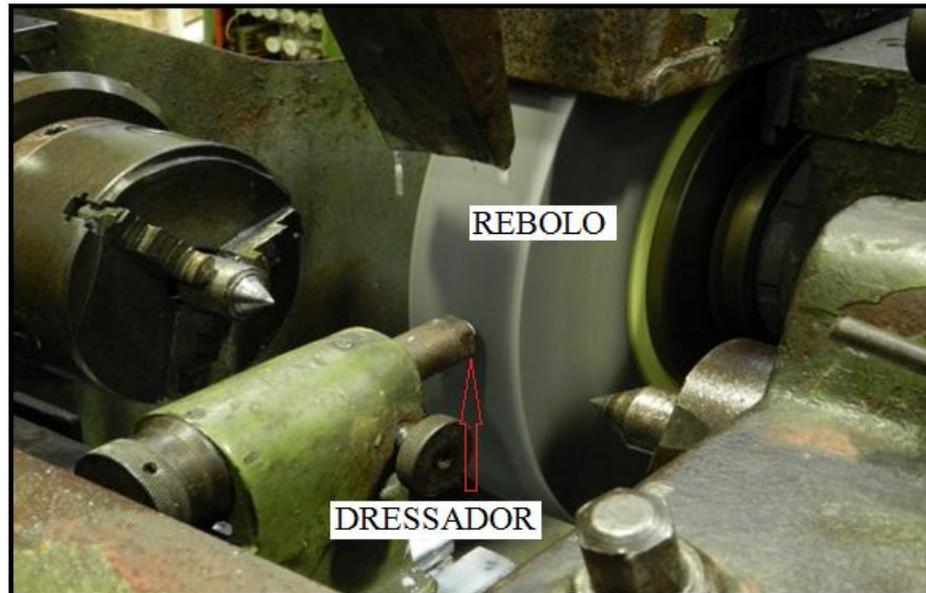


Figura 25: Operação de dressagem

Na operação de dressagem, a velocidade e a profundidade de dressagem foram mantidas constantes não influenciando as variáveis de saída do processo. A profundidade de dressagem a_d foi de 0,05mm, durante 10 passadas ao longo da periferia do rebole, no sentido de sua espessura. Sendo, portanto removido 0,5mm de material do rebole antes de cada ensaio a uma velocidade média de dressagem de 2,7mm/s. Para o melhor resultado desta operação utilizou-se o fluido de corte a uma vazão de 16 L/min

6.2. Execução dos Ensaio de Retificação

A execução dos ensaios de retificação foi realizada no Laboratório de Retificação do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/MG. A Tabela 9 sintetiza a sequência dos testes. Para cada fluido de corte empregado foram realizados ensaios sob 3 condições de corte distintas, para as análises comparativas da eficiência dos fluidos de corte emulsionável (comercial, recuperado e reformulado) no processo de retificação por meio da avaliação da integridade superficial das peças retificadas, do desgaste do rebole e do potencial anticorrosivo dos fluidos de corte.

Tabela 9: Matriz de experimentos para realização dos ensaios de retificação

FLUIDO DE CORTE/CONDIÇÃO DE USINAGEM	FLUIDO DE CORTE COMERCIAL	FLUIDO DE CORTE RECUPERADO	FLUIDO DE CORTE REFORMULADO 6% ADITIVO DE EP	FLUIDO DE CORTE REFORMULADO 10% ADITIVO DE EP
CONDIÇÃO DE USINAGEM 1	3 ENSAIOS - CDP 1, CDP 2, CP 3	4 ENSAIOS - CDP 10, CDP 13, CDP 16, 19	2 ENSAIOS – CDP 22, CDP 25	1 ENSAIO – CDP 29
SEÇÃO	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B, C
CONDIÇÃO DE USINAGEM 2	3 ENSAIOS - CDP 4, CDP 5, CP6	4 ENSAIOS - CDP 11, CDP 14, CDP 17, CDP 20	2 ENSAIOS – CDP 24, CDP 26	1 ENSAIO – CDP 30
SEÇÃO	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B, C
CONDIÇÃO DE USINAGEM 3	3 ENSAIOS - CDP 7, CDP 8, CDP 9	4 ENSAIOS - CDP 12, CDP 15, CDP 18, CDP 21	2 ENSAIOS – CDP23, CDP 27	1 ENSAIO – CDP 28
SEÇÃO	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B, C

CDP = Corpo de Prova

Como descrito na seção 6.1.1, o corpo de prova foi dividido em 3 seções, aqui denominadas pelas regiões A, B, e C, sendo que neste trabalho cada corpo de prova representa 1 ensaio, que por sua vez foi submetido a 3 condições de usinagem:

- Condição de usinagem 1: realizado utilizando uma velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e com posterior *spark out* de 10s ao final de cada ciclo.
- Condição de usinagem 2: realizada com velocidade de mergulho de 0,8mm/min e com posterior *spark out* de 10s ao final de cada ciclo.
- Condição de usinagem 3: realizada com uma velocidade de mergulho de 1,2mm/min e com posterior *spark out* de 5s ao final de cada ciclo.

Os ensaios de cada condição de usinagem foram constituídos por ciclos de retificação, os quais foram responsáveis pela penetração de 1mm do rebolo durante 7 ciclos em cada seção do corpo de prova para as condições de usinagem 1 e 2. Na condição de usinagem 3 a penetração do rebolo foi de 0,2mm durante 35 ciclos de retificação, procedimento também executado em cada seção do corpo de prova. O sobre metal de 0,2mm foi escolhido devido às condições de utilização no meio industrial, fazendo-se uma simulação do processo de fabricação. Dessa maneira em todas as condições de usinagem foi possível obter uma redução de 7mm no diâmetro do corpo de prova em cada seção. Somando as 3 seções a redução foi de 21mm, retificando assim o total de 105 peças, com sobre metal de 0,2mm.

A respeito dos fluidos de corte, foram realizados 3 ensaios por condição de usinagem para o fluido comercial, 4 ensaios por condição de usinagem para o fluido recuperado, de forma que fosse possível observar a manutenção das propriedades do fluido em um maior número de usinagem. Quanto à utilização do fluido reformulado este inicialmente foi submetido a 2 ensaios por condição de usinagem, com 6% de aditivo de EP e diante dos resultados optou-se por realizar um novo ensaio, porém com 10% de aditivo de EP, dessa maneira foi possível verificar se o aumento do percentual de aditivo de EP, nas mesmas condições de usinagem, proporcionaria um melhor desempenho do processo.

É importante destacar que para todos os ensaios, com a utilização dos diferentes fluidos de corte, foi feito um controle cuidadoso da concentração da emulsão, e sempre que necessário foi realizando a sua correção para o valor de 6% de óleo em água antes do início dos ensaios.

Ressalta-se ainda que os testes com o fluido de corte recuperado e reformulado só foram realizados após a necessidade de seu ajuste, para isso foi determinado que o fluido fosse ajustado quando o seu pH estivesse inferior a 8,5. Valor considerado pelo fabricante como fora das especificações.

6.3. Técnicas para Caracterização do Corpo de Prova e Avaliação dos Fluidos de Corte após o Processo de Retificação

A avaliação do desempenho dos fluidos de corte no processo de retificação cilíndrica de mergulho se deu por meio de algumas variáveis de saída, como integridade superficial (rugosidade, microestrutura e microdureza), desgaste diametral do rebolo e análise do potencial anticorrosivo dos fluidos de corte.

6.3.1. Rugosidade

A rugosidade foi definida pelos parâmetros de amplitude (R_a e R_t) e parâmetros funcionais (R_{pk} e R_{vk}) de acordo com as normas JIS 2001 e DIN 4776 respectivamente. Para esse fim foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo, modelo SJ-301. O comprimento de medição “*cut-off*” utilizado foi de 0,8mm. Quanto aos corpos de provas, estes foram limpos com álcool, flanela e preparados em uma superfície de apoio para melhor utilização do apalpador. A Figura 26 mostra a condição de montagem e medição.



Figura 26: Medição dos parâmetros de rugosidade

Mediu-se a rugosidade em 4 posições radiais e equidistantes a 90° aproximadamente e este procedimento foi feito para cada seção da peça retificada. Logo após foram calculados a média e o desvio padrão dos resultados, para análises comparativas.

6.3.2. Desgaste diametral do rebolo

Para medição do desgaste do rebolo foi necessário posicionar o rebolo de forma que sua extremidade esquerda ficasse fora da peça, não executando corte e nem sofrendo desgaste. Posteriormente foi utilizado um corpo de prova cilíndrico retificado de aço ABNT 1020 que

foi fixado na própria retificadora, de tal forma a obter a marcação do perfil desgastado do rebolo. Essa operação foi realizada após o fim de cada ensaio de usinagem

O desgaste pôde então ser medido, conforme Figura 27, utilizando o parâmetro P do rugosímetro Mitutoyo (SJ 301). Este parâmetro é uma representação do perfil real da superfície. Deve-se ressaltar que foram realizadas 8 medições em posições distintas de cada material onde foi “impresso” o patamar equivalente ao respectivo desgaste. Desse modo, calculou-se a média aritmética das 8 medições e depois a média das três repetibilidades de cada condição de usinagem.

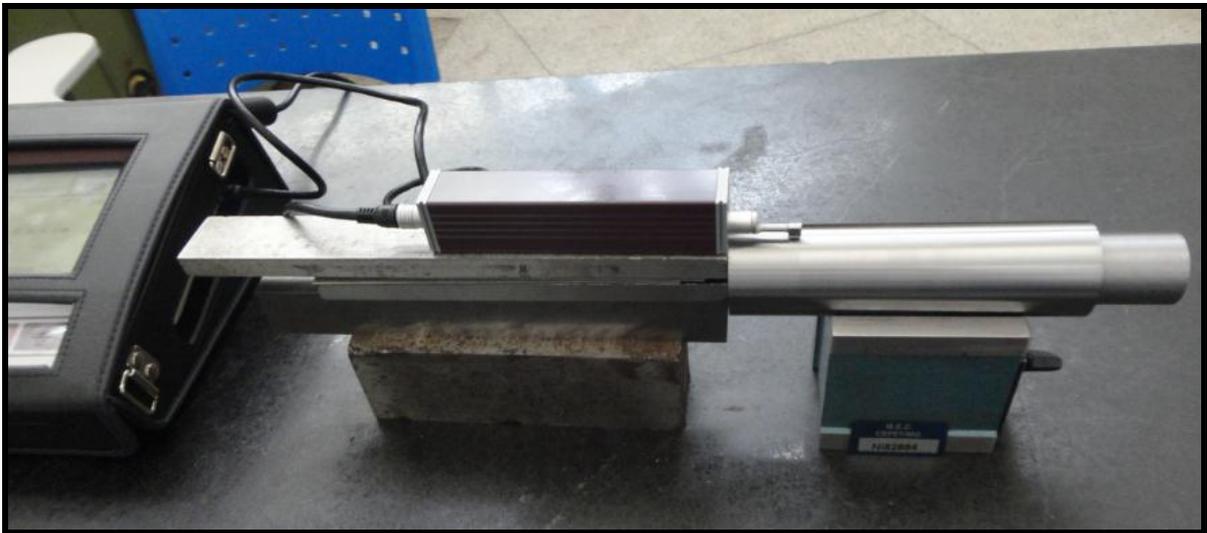


Figura 27: Método de medição do desgaste diametral do rebolo

6.3.3. Análise da microestrutura – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

6.3.3.1. Preparação das amostras para realização da microscopia

A análise da microestrutura (microscopia eletrônica de varredura - MEV) foi realizada no laboratório de metalografia e no laboratório de caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais. O objetivo dessa análise foi verificar os possíveis danos na superfície do material causados pelas solicitações térmicas e mecânicas ocorridas para cada condição de lubri-refrigeração investigada, (fluidos de corte convencional, recuperado e reformulado).

Após a realização do processo de retificação, amostras de todas as condições foram cortadas utilizando disco de corte apropriado e máquina de policorte, e submetidas a procedimentos metalográficos, embutidas, lixadas com lixas de diferentes granulometrias (220, 320, 400 e 600), polidas em uma máquina politriz com pasta de diamante para polimento metalográfico com os seguintes tamanhos de partículas, 3 μ m e 9 μ m. Todas as amostras foram atacadas quimicamente utilizando Nital 3%. Posteriormente as imagens foram obtidas em um microscópio óptico *Fortel* com o aumento de 400X para uma prévia visualização da microestrutura e caso necessário retornaria ao procedimento. Somente depois destes procedimentos as amostras foram encaminhadas para análise no MEV.

6.3.3.2. Realização da microscopia eletrônica de varredura

O MEV utilizado neste trabalho é um aparelho da Shimadzu, modelo SSX 550, Superscan onde foram realizadas ampliações de 1000 vezes.

Os testes da microscopia eletrônica de varredura foram realizados em 15 corpos de prova do total de 30 ensaios realizados. Além disso, ainda foram submetidos a análise no MEV amostras não retificadas e amostras sem tratamentos, para análises comparativas dos resultados.

6.3.4. Análise da microdureza

A microdureza das peças retificadas foi avaliada por meio do microdurômetro instalado no laboratório de metalografia do Departamento de Engenharia dos Materiais. Como resultado pretende-se relacionar o valor da microdureza para os diferentes tipos de fluidos de corte (convencional, recuperado e reformulado).

6.3.4.1. Preparação das amostras

O processo de preparação das amostras para a análise de microdureza foi similar ao utilizado para a MEV. As amostras foram cuidadosamente lixadas usando lixas de diferentes granulometrias (400 e 600) e polidas em uma máquina politriz com pasta de diamante para polimento metalográfico com os seguintes tamanhos de partículas, $3\mu\text{m}$ e $9\mu\text{m}$. Sendo assim foi possível se formar um plano com comprimento (l) entre 3,5 a 4,2 mm, conforme Figura 28, de modo á tornar a superfície perpendicular ao penetrador do microdurômetro.

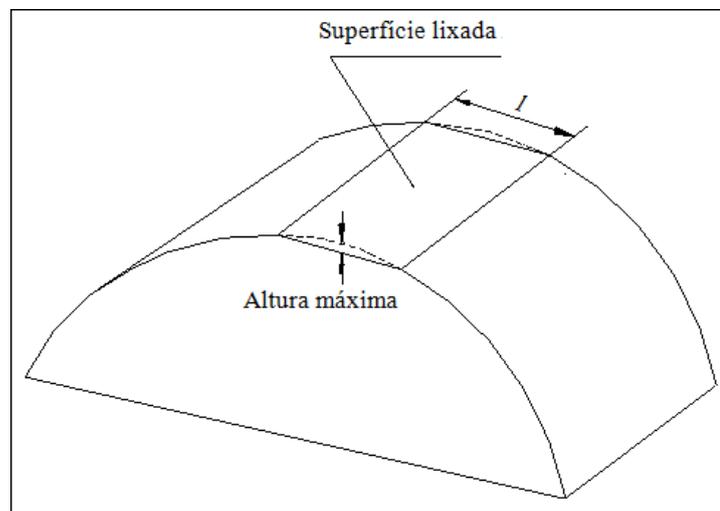


Figura 28: Representação da amostra para medição da microdureza

6.3.4.2. Medição da microdureza

Para obter a microdureza foi utilizado um microdurômetro da marca Shimadzu. A carga aplicada em cada teste foi de 200gf por um período de 15s. Durante os ensaios foram realizadas 10 medições em 3 regiões distintas da amostra, de forma a obter valores de microdureza em diferentes profundidades.

Da mesma maneira que na MEV os testes de microdureza também foram feitos em 15 corpos de prova do total de 30 usinados. Além disto, ainda foram submetidos à medição da microdureza amostra não retificada, para melhor comparação dos resultados.

A forma como foram seccionadas as amostras permitiu a obtenção de uma ampliação da região alterada metalurgicamente para a análise micrográfica demonstrada por meio da Figura 29

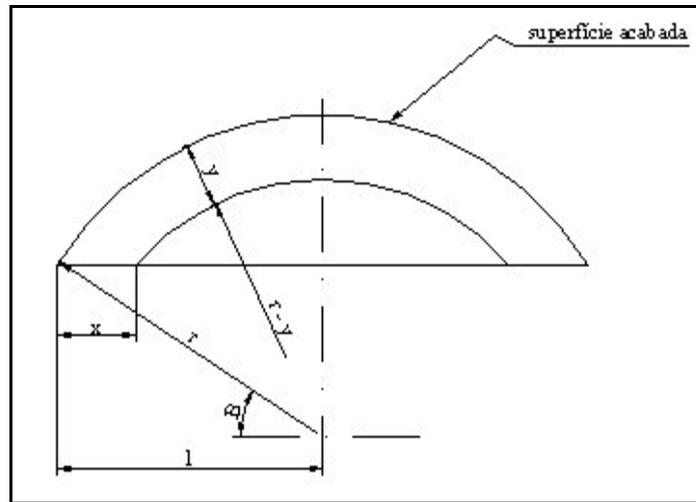


Figura 29: Vista lateral da amostra

Da lei dos cossenos tem-se que:

$$(r-y)^2 = r^2 + x^2 - 2rx \cos\beta \quad (2)$$

Como $\cos\beta = l/r$, tem-se:

$$(r-y)^2 = r^2 + x^2 - 2xl \quad (3)$$

$$r^2 - 2ry + y^2 = r^2 + x^2 - 2xl \quad (4)$$

$$y^2 - 2ry + (2lx - x^2) = 0 \quad (5)$$

Finalmente,

$$y = r - \sqrt{r^2 - (2lx - x^2)} \quad (6)$$

Onde x/y representa a taxa de ampliação da área a ser observada.

A partir da Equação 6 foi possível obter a profundidade para cada valor de microdureza encontrado durante os ensaios. Onde o deslocamento de x em cada medição, foi de 50 a 900 μm , o que proporciona, após o cálculo de y , uma profundidade de 4 a 95 μm , tendo em vista que r é equivalente ao raio da peça analisada.

6.3.5. Teste de Corrosão

A propriedade anticorrosiva dos fluidos de corte é um aspecto que caracteriza o seu desempenho durante as operações de usinagem, pois é benéfica na proteção da peça, da ferramenta e dos componentes da máquina contra a corrosão. Além disso, o potencial anticorrosivo dos fluidos de corte é diretamente afetado pelo seu nível de degradação, que por sua vez resulta na redução do pH do fluido de corte.

Para analisar o potencial anticorrosivo do fluido de corte, foi seguido a norma DIN 51.360, onde 2 gramas de ferro fundido foram pesadas e colocadas sobre o papel filtro acondicionado em uma placa Petri, em seguida os cavacos de ferro foram umedecidos uniformemente com 2ml do fluido de corte a ser testado. A placa de Petri foi recoberta com tampa e deixada em repouso durante 2 horas. Depois foi feito o descarte dos cavacos e lavou o papel de filtro suavemente em água, posteriormente mergulhou o papel de filtro rapidamente em acetona e esperou secar, à temperatura ambiente, e verificou visualmente o grau de corrosão obtido.

A Tabela 10 mostra, conforme especificado na norma DIN 51.360, como se reportar ao grau de corrosão obtido no papel filtro após o descarte dos cavacos de ferro fundido.

Tabela 10: Especificação do grau de corrosão segundo norma DIN 51.360

Grau de corrosão	Significado	Superfície do papel filtro
0	Ausência de corrosão	Sem alteração.
1	Traços de corrosão	No máximo 3 sinais de corrosão, nenhum tendo diâmetro maior que 1mm.
2	Leve corrosão	Não mais que 1% da superfície descolorida, porém sinais de corrosão em maior número ou mais forte que o grau 1.
3	Média corrosão	Descoloração de mais de 1%, porém menos que 5% da superfície.
4	Forte corrosão	Descoloração de mais de 5% da superfície.

Seguindo este método a Figura 30 apresenta exemplos típicos para cada grau (0, 1, 2, 3, e 4) de corrosão que poderão ser obtidos a partir deste teste.

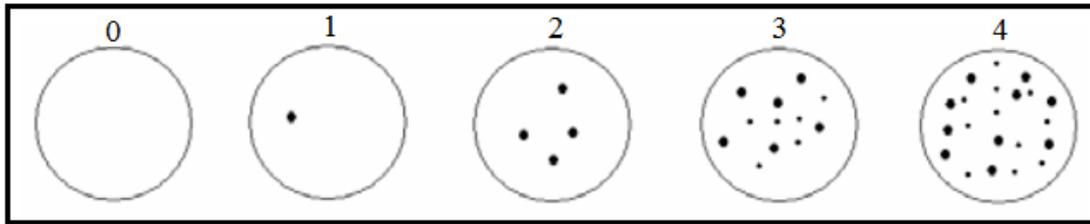


Figura 30: Ilustração dos níveis de corrosão
Fonte: Norma DIN 51.360

Dessa forma foi possível avaliar, por meio do grau de corrosão, as propriedades anticorrosivas dos fluidos de corte (comercial, recuperado e reformulado) utilizados no processo de retificação.

7. RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às variáveis de saída (rugosidade desgaste do rebolo, microestrutura e microdureza) e ao potencial anticorrosivo dos fluidos de corte. Sendo assim foi possível avaliar o desempenho dos diferentes fluidos de corte (comercial, recuperado, reformulado a 6% de aditivo EP e reformulado a 10% de aditivo EP) submetidos às diferentes condições de usinagem.

7.1. Rugosidade

7.1.1. Parâmetro de amplitude (R_a)

Os resultados médios de rugosidades para os parâmetros de amplitude R_a (μm) são apresentados Nas Figuras 31 a 33, Seus valores foram obtidos após 7 ciclos de usinagem de 1mm, para as condições 1 e 2, com $V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $V_f = 0,8\text{mm/min}$ respectivamente e *spark out* (t_s) de 10s em ambas as situações. Os valores para a condição 3 foram obtidos após 35 ciclos de usinagem de 0,2mm, com $V_f = 1,2\text{mm/min}$ e *spark out* (t_s) de 5s por ciclo.

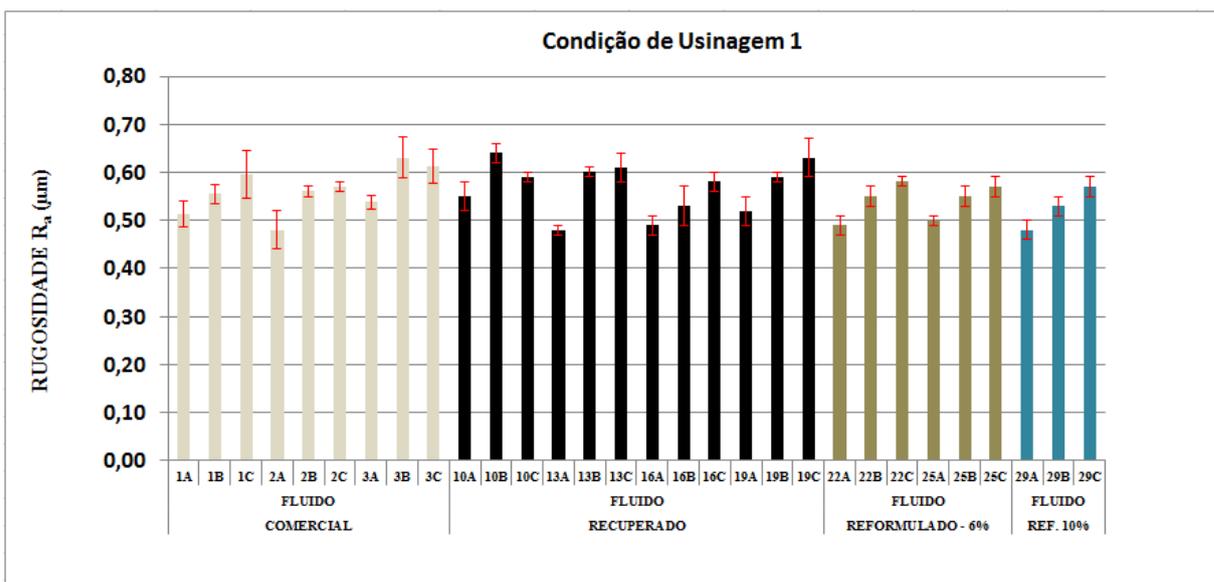


Figura 31: Valores de rugosidade R_a obtidos na condição de usinagem 1 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

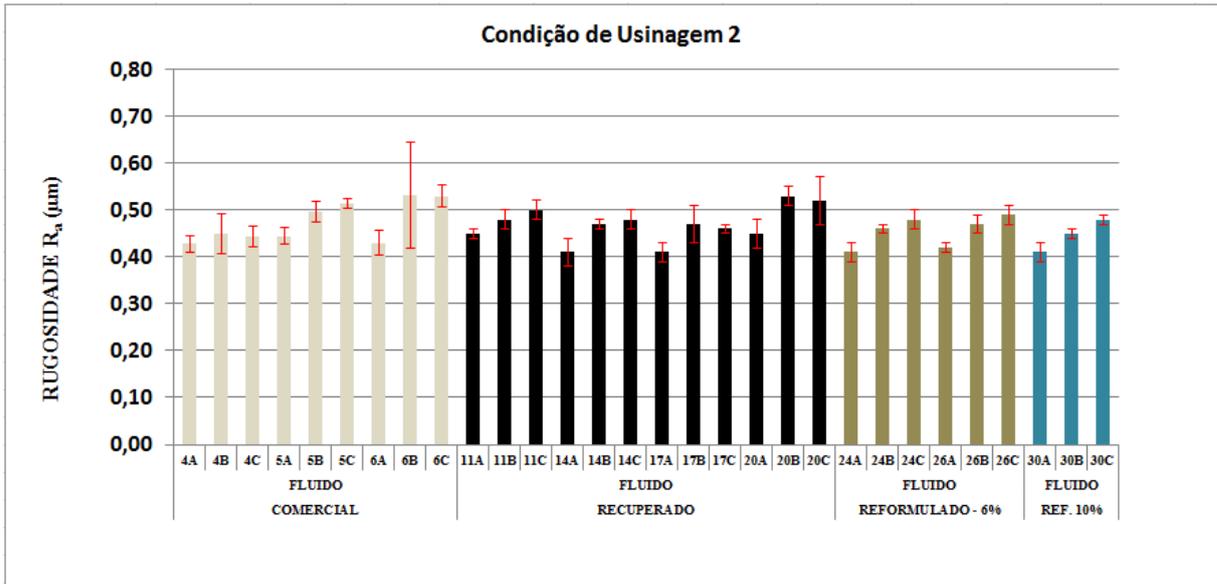


Figura 32: Valores de rugosidade R_a obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

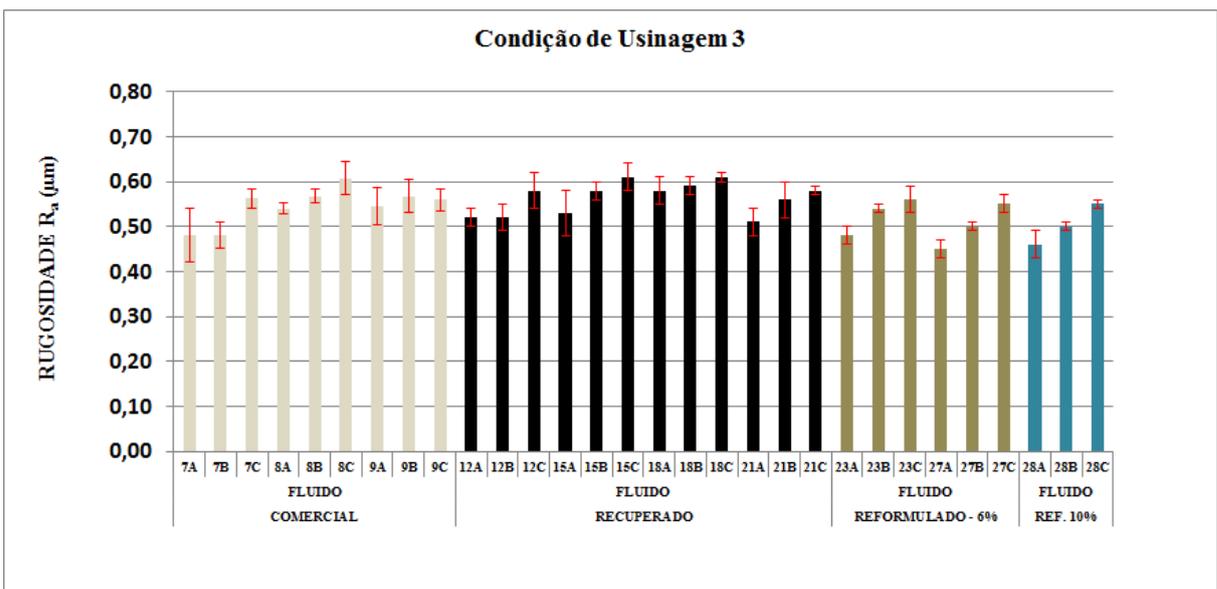


Figura 33: Valores de rugosidade R_a obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$)

Observando as Figuras 31 a 33, constata-se que os valores médios de rugosidade nas três condições de lubri-refrigeração e para todas as situações de corte, obtidas durante os ensaios de retificação, foram relativamente semelhantes, quando comparados os fluidos utilizados (comercial, recuperado, reformulado a 6% de aditivo EP e reformulado a 10% de aditivo EP), sendo em geral os menores valores encontrados na condição de usinagem 2, ou seja, a condição de corte é mais suave e provavelmente proporcionando menor força de usinagem.

Embora não exista diferença significativa entre os valores médios de rugosidade, sabe-se que um aspecto importante para uma superfície usinada é que ela apresente o maior grau de uniformidade possível não possuindo variações dimensionais que possam comprometer aplicações futuras (controle do processo de fabricação). Dessa forma, é importante avaliar a rugosidade quanto ao limite do desvio padrão (máximo e mínimo), obtido durante as diferentes condições de usinagem, além disso, uma análise comparativa estatística requer a consideração das faixas de desvio padrão.

Sendo assim a condição de usinagem 1 apresenta um intervalo de rugosidade, conforme identificado pelo desvio padrão, de 0,44 a 0,67 μm para o fluido comercial, de 0,46 a 0,67 μm para o fluido recuperado, de 0,47 a 0,59 μm para o fluido reformulado a 6% de aditivo EP e de 0,46 a 0,59 μm para fluido reformulado a 10% de aditivo EP.

Por outro lado, nota-se que a menor variação para os resultados de rugosidade foram obtidas com o fluido reformulado a 6% e 10% de aditivo EP, o que demonstra que ao utilizar estas reformulações, na condição de usinagem 1, o processo proporcionou uma superfície mais uniforme, aspecto este importante para operações de retificação que requerem superfícies com alta precisão geométrica. Dessa forma, o aditivo de EP empregado nessa condição de usinagem se mostrou satisfatório, tal aspecto se deve ao fato de que esses aditivos quando utilizados conferem ao fluido maior poder lubrificante, tornando as superfícies facilmente cisalháveis.

Na condição de usinagem 2, observa-se que o intervalo de rugosidade, considerando o desvio padrão, para o fluido comercial foi de 0,40 a 0,64 μm , para o fluido recuperado foi de 0,39 a 0,57 μm , para o fluido recuperado a 6% de aditivo EP foi de 0,39 a 0,51 μm e para o fluido reformulado a 10% de aditivo EP o intervalo de rugosidade foi de 0,39 a 0,49 μm . Nessa condição, a superfície que obteve a menor variação em termos de rugosidade foi a submetida ao fluido de corte reformulado a 6 e 10% de aditivo, o que vem a proporcionar uma superfície mais uniforme. Além disso, foi por meio da utilização destes fluidos e do recuperado que o menor valor de rugosidade, 0,39 μm , foi encontrado.

Já na condição de usinagem 3 o intervalo de rugosidade, levando em consideração o desvio padrão, foi de 0,42 a 0,65 μm para o fluido comercial, 0,48 a 0,64 μm para o fluido recuperado,

0,43 a 0,59 μm para o fluido reformulado a 6% de aditivo EP e 0,43 a 0,56 μm para o fluido reformulado a 10% de aditivo EP. Diante deste resultado nota se novamente que a superfície mais uniforme e com os menores valores de rugosidade foram obtidas ao utilizar os fluidos de corte reformulado a 6 e 10% de aditivo.

Além disso, quando se avalia os resultados de rugosidade do fluido comercial com o fluido recuperado em todas as condições de usinagem, buscando observar a influência dos procedimentos de recuperação no desempenho do processo, nota se devido à similaridade entre os valores, que ao recuperar o fluido de corte suas características primárias foram mantidas, de modo a não comprometer o processo em termos de qualidade superficial da peça e em alguns casos foi possível identificar os menores valores de rugosidade com a aplicação de fluido de corte recuperado.

O aumento da rugosidade entre as seções A, B e C, se deve provavelmente a reafiação do rebolo que ocorreu ao longo do processo, tornando o mais agressivo e proporcionando maior rugosidade durante a usinagem.

7.1.2. Parâmetro de amplitude (R_t)

As Figuras 34 a 36 apresentam os resultados de rugosidade do parâmetro de amplitude R_t , para cada fluido de corte (comercial, recuperado, reformulado a 6% de aditivo EP e reformulado a 10% de aditivo EP) sob as distintas condições de usinagem.

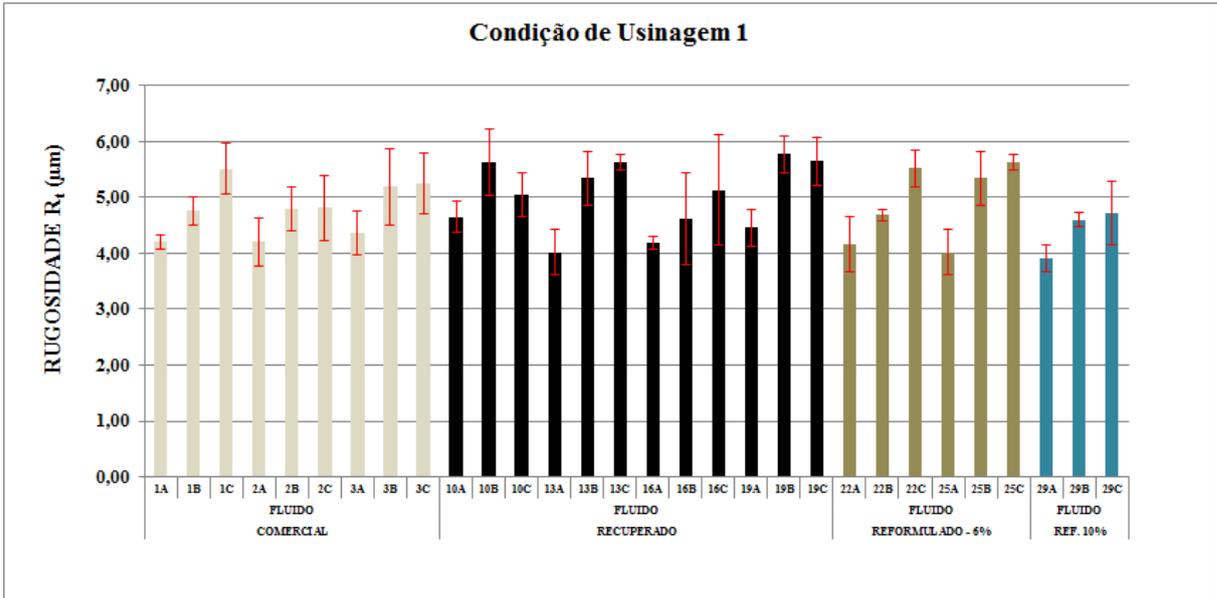


Figura 34: Valores de rugosidade R_t obtidos na condição de usinagem 1, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

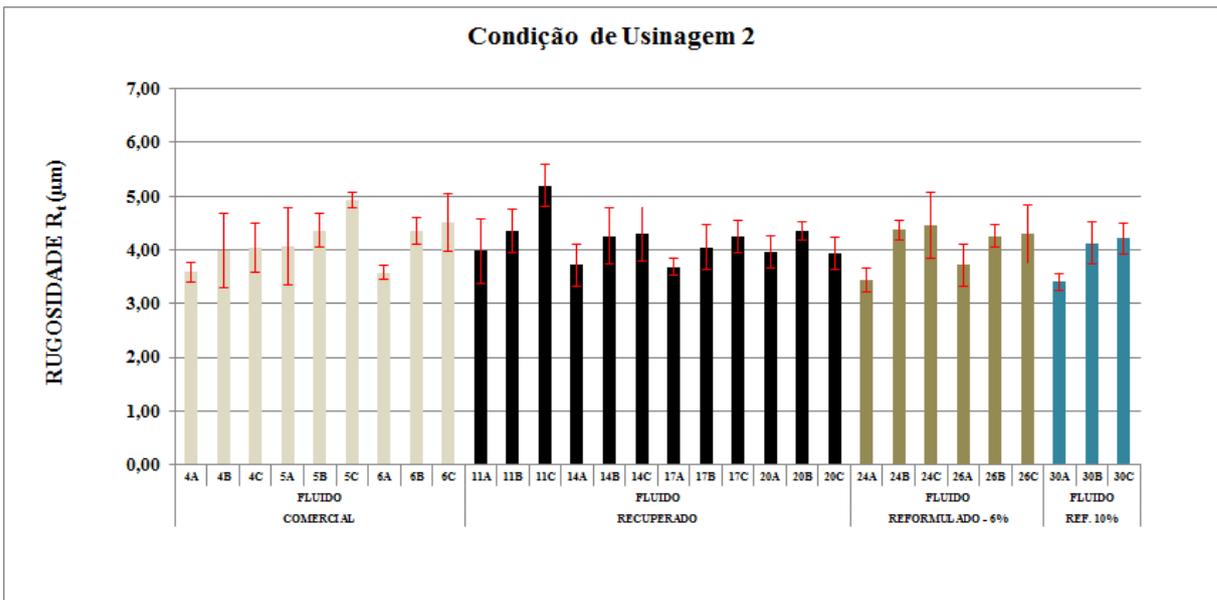


Figura 35: Valores de rugosidade R_t obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

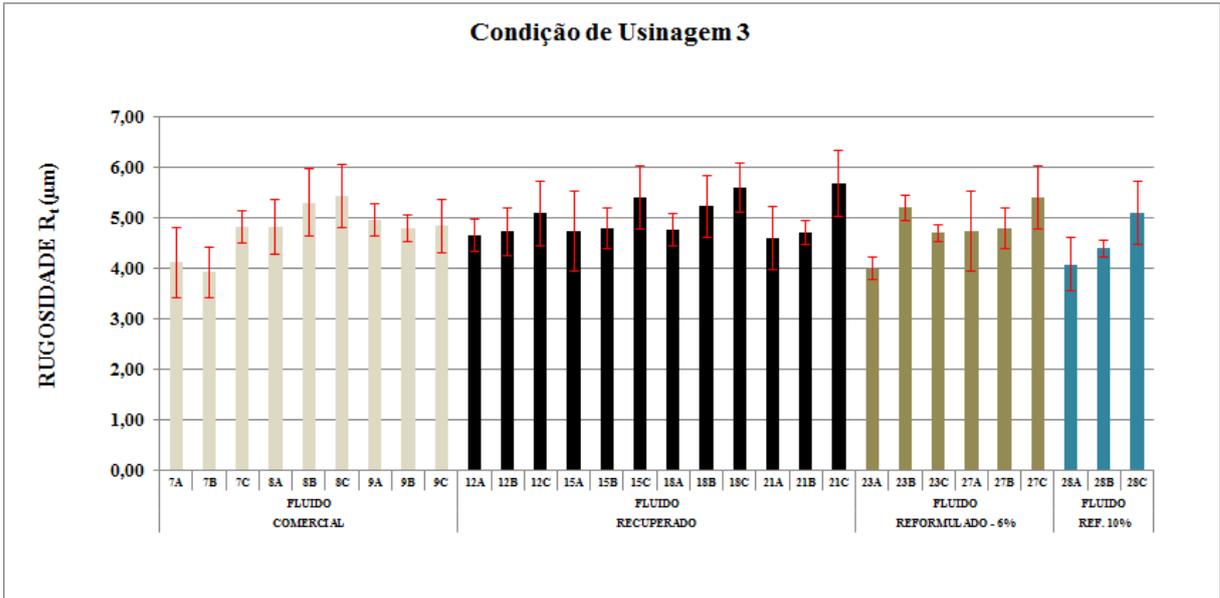


Figura 36: Valores de rugosidade R_t obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$)

Ao analisar os resultados referentes ao parâmetro de rugosidade R_t , nota-se que os valores médios de rugosidade em todas as condições são relativamente semelhantes, sendo em geral os menores valores encontrados na condição de usinagem 2. Entretanto, cabe ressaltar a importância de se realizar uma análise comparativa a partir do desvio padrão (máximo e mínimo), para assim poder identificar a superfície usinada que apresenta o maior grau de uniformidade.

Dessa forma a condição de usinagem 1, apresenta um intervalo de rugosidade para o fluido comercial, conforme identificado pelo desvio padrão, de $3,78$ a $5,97\mu\text{m}$, para o fluido recuperado de $3,61$ a $6,21\mu\text{m}$, para o fluido reformulado a 6% de aditivo EP de $3,61$ a $5,85\mu\text{m}$ e para o fluido reformulado a 10% de aditivo EP de $3,68$ a $4,99\mu\text{m}$. Verificando os intervalos de rugosidade nota-se que a superfície com menor intervalo foi obtida com o fluido reformulado a 10% de aditivo de EP, o que demonstra que nesta condição o aditivo EP proporcionou melhor lubrificidade a superfície usinada, dando a essa maior capacidade de cisalhamento.

Na condição de usinagem 2, analisando os intervalos de rugosidade segundo o valor máximo e mínimo do desvio padrão, chega-se aos seguintes resultados, que o intervalo de rugosidade para o fluido comercial foi de $3,68$ a $5,08\mu\text{m}$, para o fluido recuperado foi de $3,33$ a $5,60\mu\text{m}$, para o fluido reformulado a 6% de aditivo de EP foi de $3,21$ a $5,07\mu\text{m}$ e para o fluido

reformulado a 10% de aditivo EP foi de 3,24 a 4,51 μ m. Novamente para esta condição de usinagem o menor intervalo foi obtido ao utilizar o fluido reformulado a 10% de aditivo EP, o que veio a proporcionar uma superfície mais uniforme.

Já na condição de usinagem 3, ao analisar o intervalo de rugosidade segundo o valor máximo e mínimo do desvio padrão, chega se aos seguintes resultados, que o intervalo de rugosidade para o fluido comercial foi de 3,42 a 6,06 μ m, para o fluido recuperado foi de 3,94 a 6,33 μ m, para o fluido reformulado a 6% de aditivo de EP foi de 3,77 a 6,01 μ m e para o fluido reformulado a 10% de aditivo EP foi de 3,54 a 5,37 μ m. Para essa condição de usinagem o menor intervalo de rugosidade foi obtido ao utilizar o fluido reformulado a 6% e 10% de aditivo EP. Isso demonstra que o desempenho do aditivo EP, para as duas reformulações, proporcionou uma superfície com melhor poder lubrificante, em relação à superfície obtida com os demais fluidos.

Além disso, ao avaliar a influência dos procedimentos de recuperação do fluido no desempenho do processo, nota se diante da similaridade entre valores de rugosidade, que o método de recuperação não comprometeu o desempenho do processo.

7.1.3. Parâmetro funcional (R_{vk})

Nas Figuras 37 a 39 estão apresentados os resultados referentes ao parâmetro funcional R_{vk} de rugosidade nas distintas condições trabalhadas.

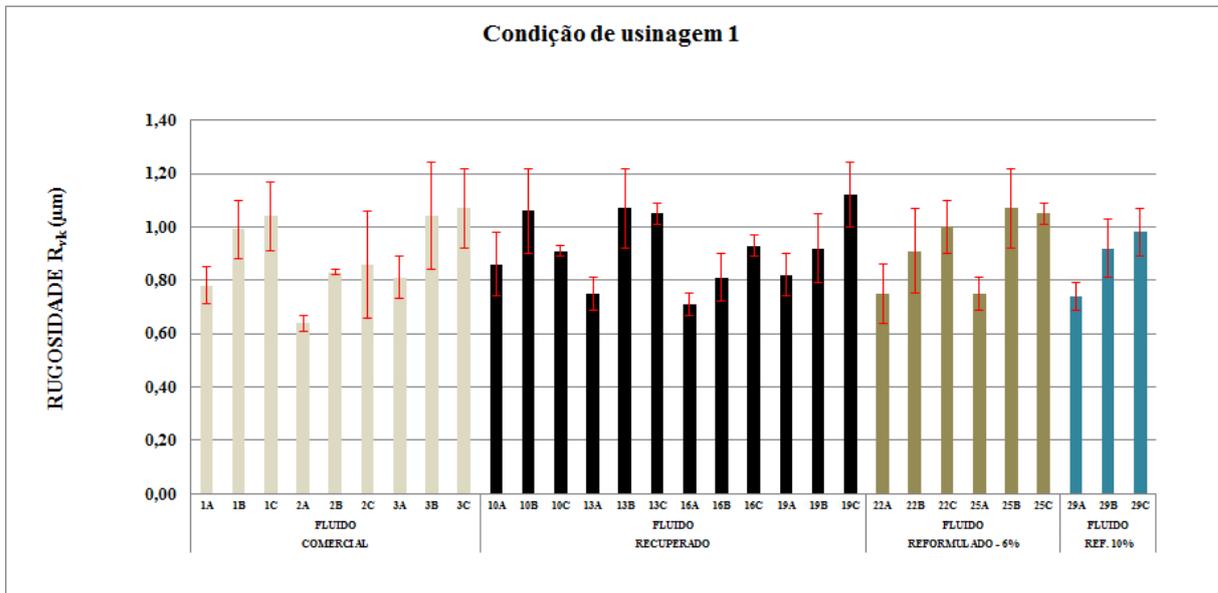


Figura 37: Valores de rugosidade R_{vk} obtidos na condição de usinagem 1 com a emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

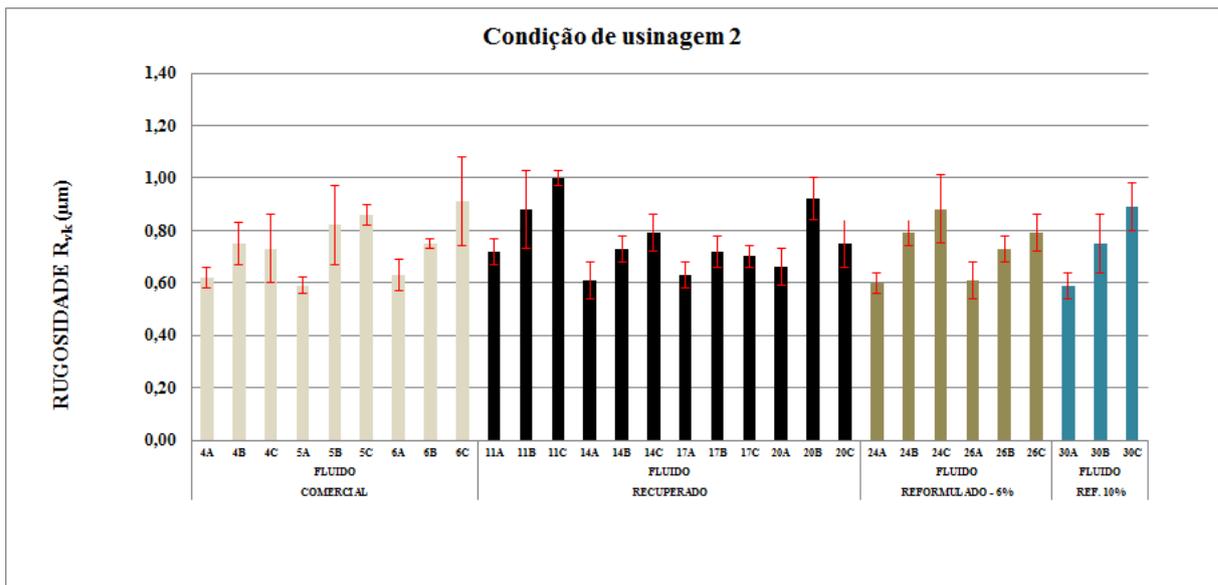


Figura 38: Valores de rugosidade R_{vk} obtidos na condição de usinagem 2 com a emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

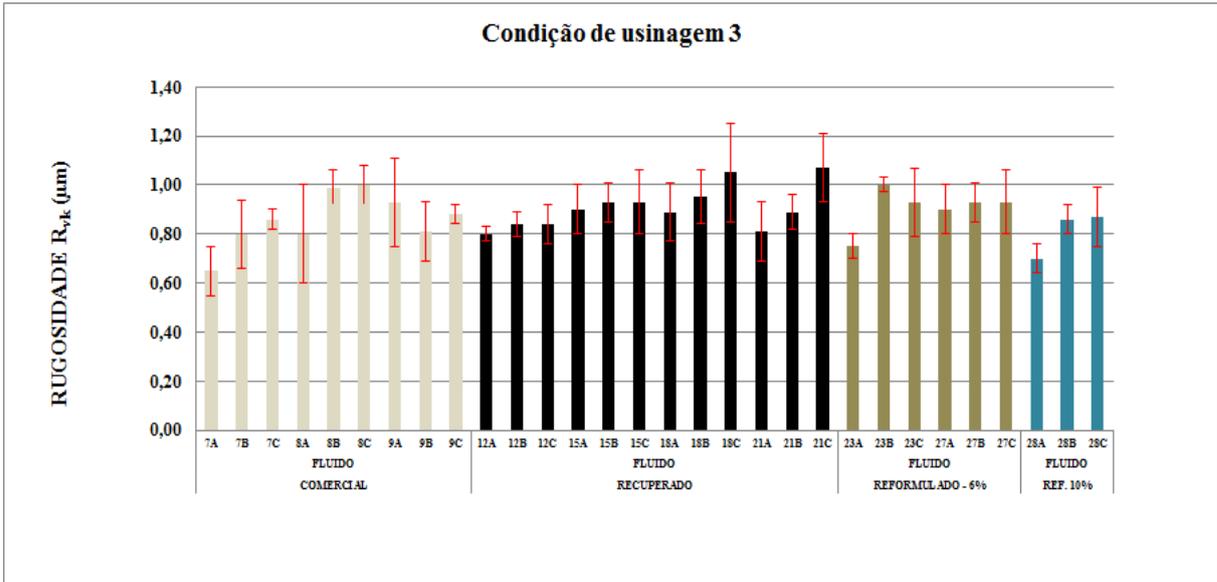


Figura 39: Valores de rugosidade R_{vk} obtidos na condição de usinagem 3 com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$)

O parâmetro funcional R_{vk} , está associado a capacidade de retenção de filmes lubrificantes sendo decisiva para muitas aplicações mecânicas. Quanto maior o valor deste parâmetro maior a capacidade de retenção de lubrificantes.

Sendo assim, ao analisar a condição de usinagem 1, observa-se de uma maneira geral, considerando-se os valores médios e desvio padrão, que o fluido comercial, recuperado e reformulado a 6% de aditivo EP proporcionou uma mesma superfície com a mesma capacidade de retenção de lubrificantes. Por outro lado, devido a seus menores valores, uma superfície obtida com o fluido de corte reformulado a 10% de aditivo EP não teve o mesmo desempenho das demais nesse quesito.

Na condição de usinagem 2, é possível observar resultados similares na aplicação dos diferentes fluidos de corte, o que permite afirmar que a superfície obtida nessas condições terá uma mesma capacidade de retenção de filmes lubrificantes. Da mesma forma, não é possível notar diferença significativa dentre os valores de rugosidade R_{vk} para os diferentes fluidos de corte na condição de usinagem 3, de modo que nessas condições a superfície obtida terá a mesma capacidade de retenção de lubrificantes.

Estes são importantes resultados, tendo em vista que o processo de recuperação e reformulação do fluido mostrou-se eficaz a ponto de se obter uma superfície similar à obtida com o fluido comercial.

7.1.4. Parâmetro funcional (R_{pk})

A Figura 40 a 42 demonstram os valores referentes ao parâmetro funcional R_{pk} , que diz respeito à capacidade de deslizamento da superfície em uma montagem. Quanto maior o valor deste parâmetro maior esta capacidade.

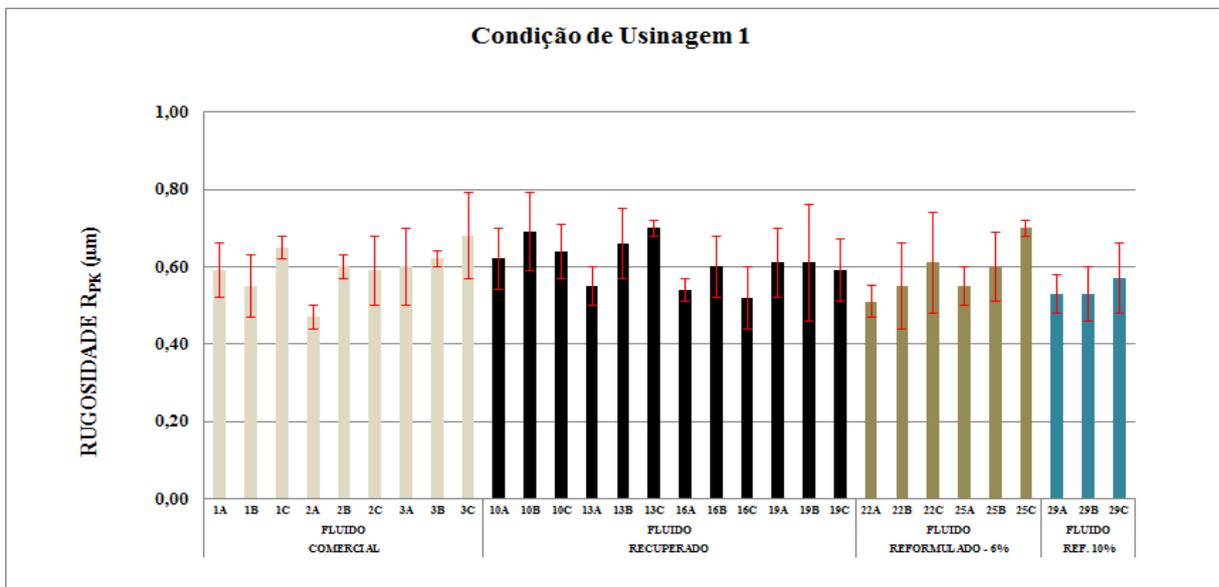


Figura 40: Valores de rugosidade R_{pk} obtidos na condição de usinagem 1 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

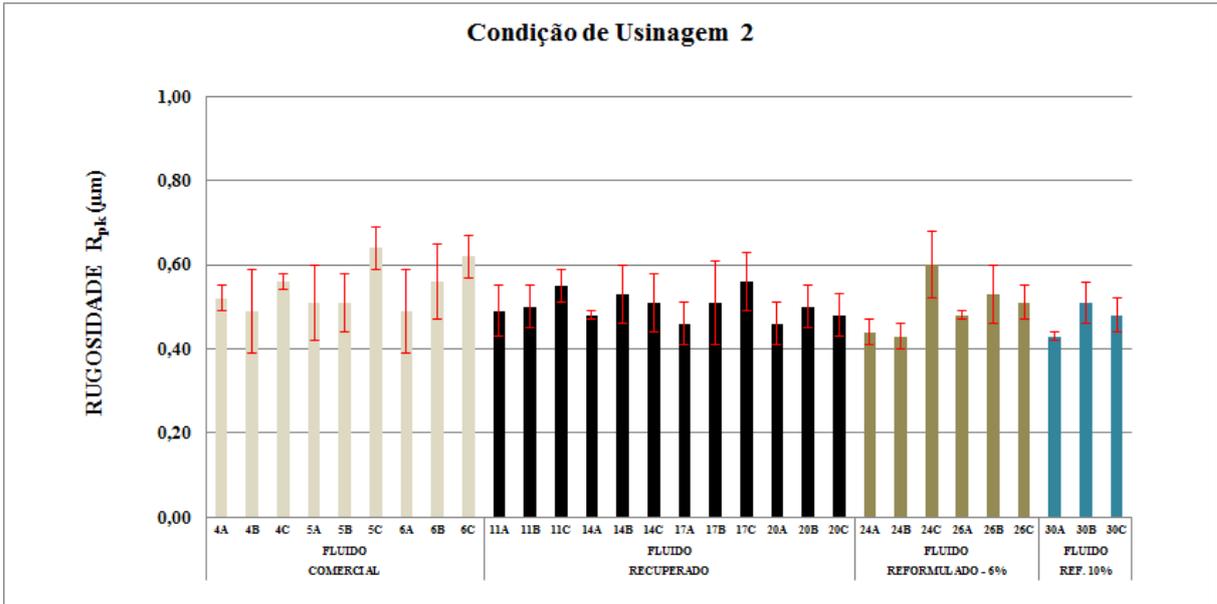


Figura 41: Valores de rugosidade R_{pk} obtidos na condição de usinagem 2 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

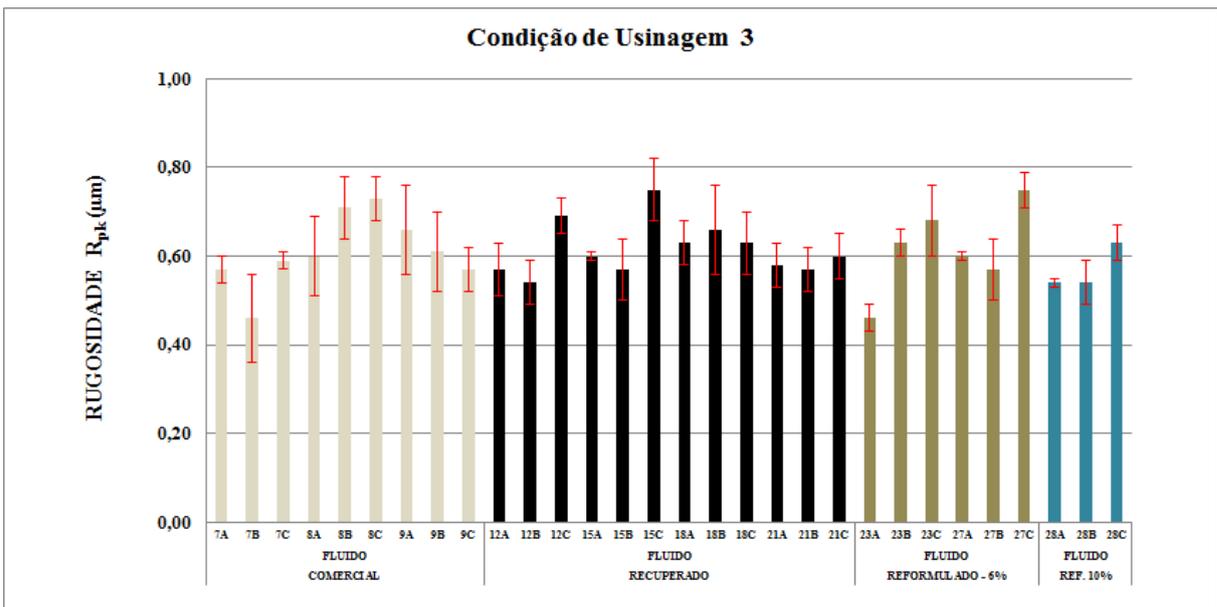


Figura 42: Valores de rugosidade R_{pk} obtidos na condição de usinagem 3 com a aplicação dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$)

Observa-se de forma geral na condição 1, considerando-se os valores médios e desvio padrão, que os resultados foram similares para todos os fluidos aplicados, embora perceba-se por meio dos desvio padrão que existem pontos máximos onde a superfície obtida com os fluidos de corte comercial, recuperado e reformulado a 6% de aditivo EP são relativamente superiores a superfície obtida com o fluido reformulado a 10% de aditivo EP.

Para as condições de usinagem 2 e 3, este mesmo resultado pode ser notado, ou seja, tendo em vista os valores médios e o desvio padrão, superfícies obtidas com fluidos de corte comercial, recuperado e reformulado a 6% de aditivo EP são relativamente superiores a superfícies obtidas com fluido de corte reformulado a 10% de aditivo EP.

7.2. Desgaste Diametral do Rebolo

A medição do desgaste diametral do rebolo possibilita obter maiores informações sobre o desempenho do fluido de corte quando em operação. Os resultados apresentados na Figura 43, 44 e 45, relativos ao desgaste do rebolo, estão em função das diferentes situações de corte e das distintas condições de lubri-refrigeração.

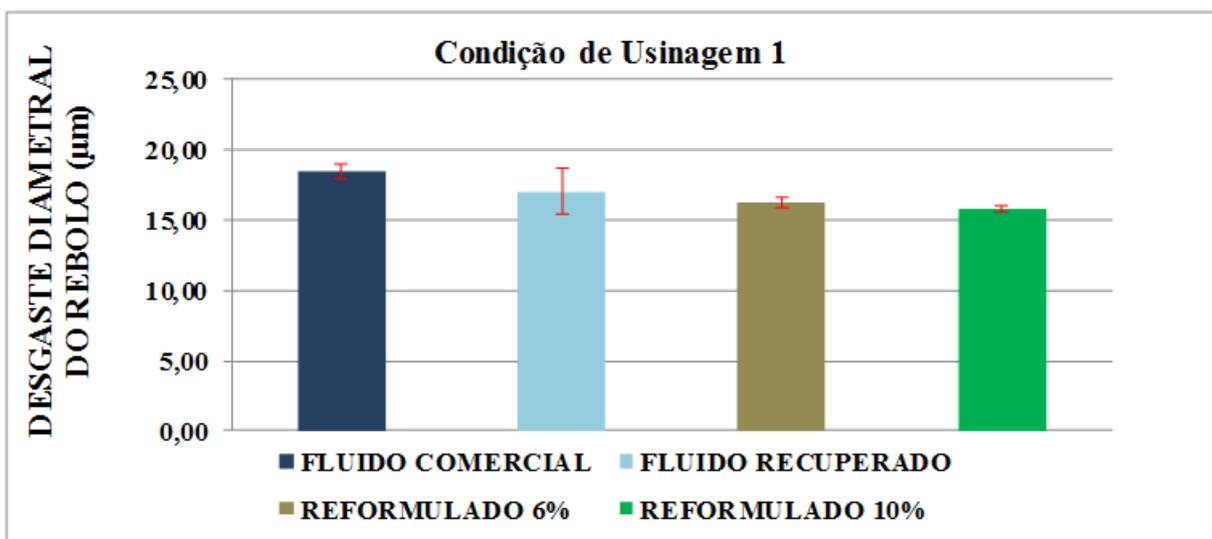


Figura 43: Valores de desgaste diametral do rebolo obtidos na condição de usinagem 1, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

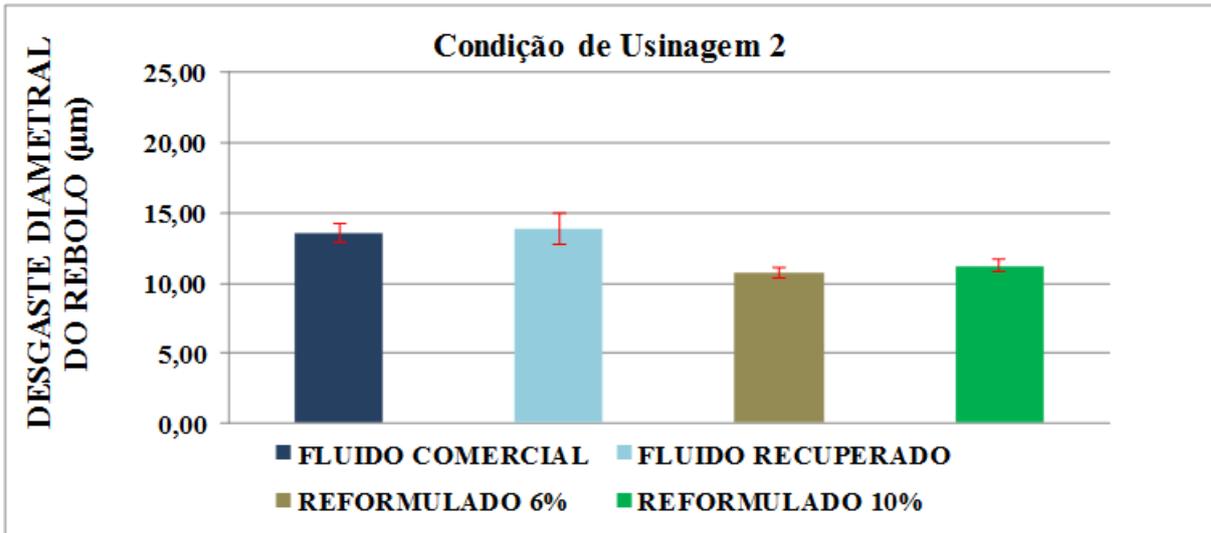


Figura 44: Valores de desgaste diametral do rebolo obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

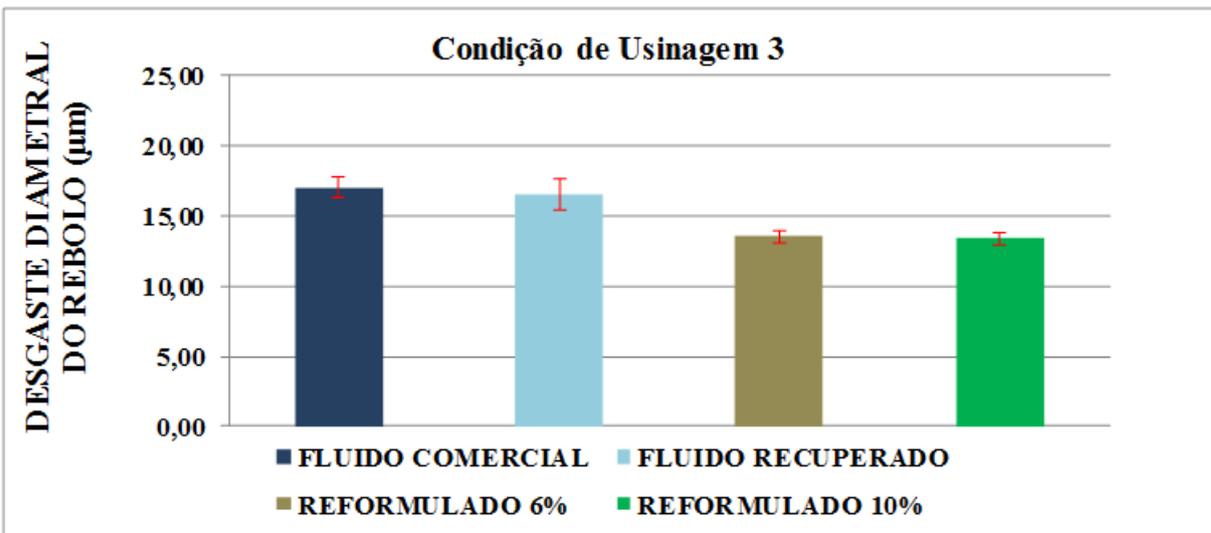


Figura 45: Valores de desgaste diametral do rebolo obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$)

As diferentes condições de lubri-refrigeração levaram a resultados distintos em termos de desgaste diametral do rebolo. Na condição de usinagem 1 o melhor desempenho foi obtido com o fluido de corte reformulado a 6% e a 10 de aditivo EP, com um desgaste médio equivalente a 16,2 e 15,7 μm respectivamente, enquanto a pior situação foi encontrada ao utilizar o fluido comercial e recuperado, obtendo um desgaste médio de 18,54 e 17,06 μm respectivamente.

Para a condição de usinagem 2, menos agressiva e que por isso a que obteve os menores resultados de desgaste diametral do rebolo, o melhor desempenho foi obtido ao utilizar o

fluido de corte reformulado a 6% e 10% de aditivo EP, com um desgaste equivalente a 10,79 e 11,24 μm respectivamente, enquanto os maiores valores foram obtidos ao utilizar o fluido recuperado e o fluido comercial com valor médio de desgaste equivalente a 13,8 e 13,57 μm respectivamente.

A condição de usinagem menos agressiva, proporciona menor desgaste diametral do rebolo, este resultado também foi constatado por Wang (2008) ao observar que o aumento da velocidade de mergulho V_f provoca um aumento no desgaste, isto se dá pelo aumento da carga nos grãos abrasivos, podendo resultar nos mecanismos tradicionais de desgaste volumétrico do rebolo.

Já na condição de usinagem 3, que é uma simulação dos processos de usinagem da indústria metal-mecânica, o melhor resultado foi encontrado ao utilizar o fluido de corte reformulado a 10% e 6% de aditivos, com um desgaste equivalente a 13,44 e 13,53 μm respectivamente, enquanto os piores valores foram obtidos ao utilizar fluido comercial e reformulado, com valores médios de rugosidade igual a 17,06 e 16,51 μm respectivamente.

Entretanto, ao analisar separadamente o fluido comercial com o fluido recuperado, nota-se semelhança entre os valores, com pequena vantagem para o fluido recuperado. Isto comprova mais uma vez que o processo não foi comprometido devido à utilização do fluido de corte recuperado, ou seja, a maneira como o fluido foi recuperado proporcionou as mesmas características de um fluido comercial quando em processo, trazendo ganhos ambientais e com a redução de descarte do fluido que por sua vez teve sua vida útil prolongada.

Além disso, os resultados demonstram que a reformulação a 6% de aditivo EP obteve desempenho similar em relação a reformulação a 10% de aditivo EP, para todas as condições de usinagem utilizadas, embora de uma maneira geral os melhores resultados foram encontrados ao utilizar esses fluidos. Desta forma, aconselha-se utilizar o menor percentual de aditivo EP na reformulação.

Nota-se, além do mais, uma coerência entre o desgaste diametral do rebolo e a rugosidade, ou seja, quando a rugosidade fica maior o desgaste também é maior e quando esta se torna menor, o desgaste também diminui, este resultado também pôde ser identificado por Oliveira et al., (2011). Desta forma, constata-se diante dos resultados de rugosidade R_a e R_t , em todas

condições de usinagem e para os diferentes fluidos utilizados, que as superfícies que obtiveram os menores intervalos de rugosidade foram aquelas que também proporcionaram os menores valores de desgaste diametral do rebolo.

7.3. Microdureza

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

As Figuras 46, 47 e 48 apresentam os valores de microdureza nas três condições de usinagem utilizando fluido de corte comercial, fluido de corte recuperado e fluido de corte reformulado a 6% de aditivo EP no processo de retificação. Com o intuito de verificar a influência do processo de retificação na microdureza, optou-se por medir uma amostra logo após o tratamento térmico, ou seja, sem retificação.

Ressalta-se, que a escolha pela utilização do fluido reformulado a 6% de aditivo EP, para as análises de microdureza, se deu pelo fato que os resultados tanto de rugosidade e desgaste diametral do rebolo, de uma maneira geral foram semelhantes, então optou-se por utilizar a menor quantidade de aditivo EP, tendo em vista os aspectos econômicos no ato da reformulação.

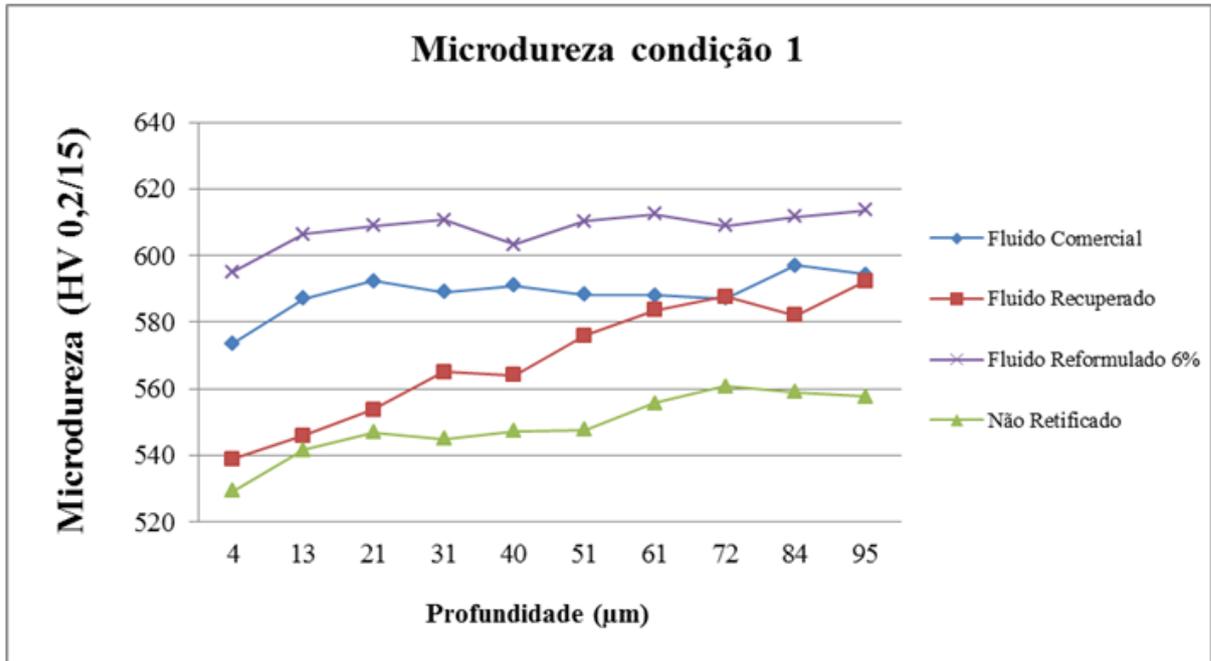


Figura 46: Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 1, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

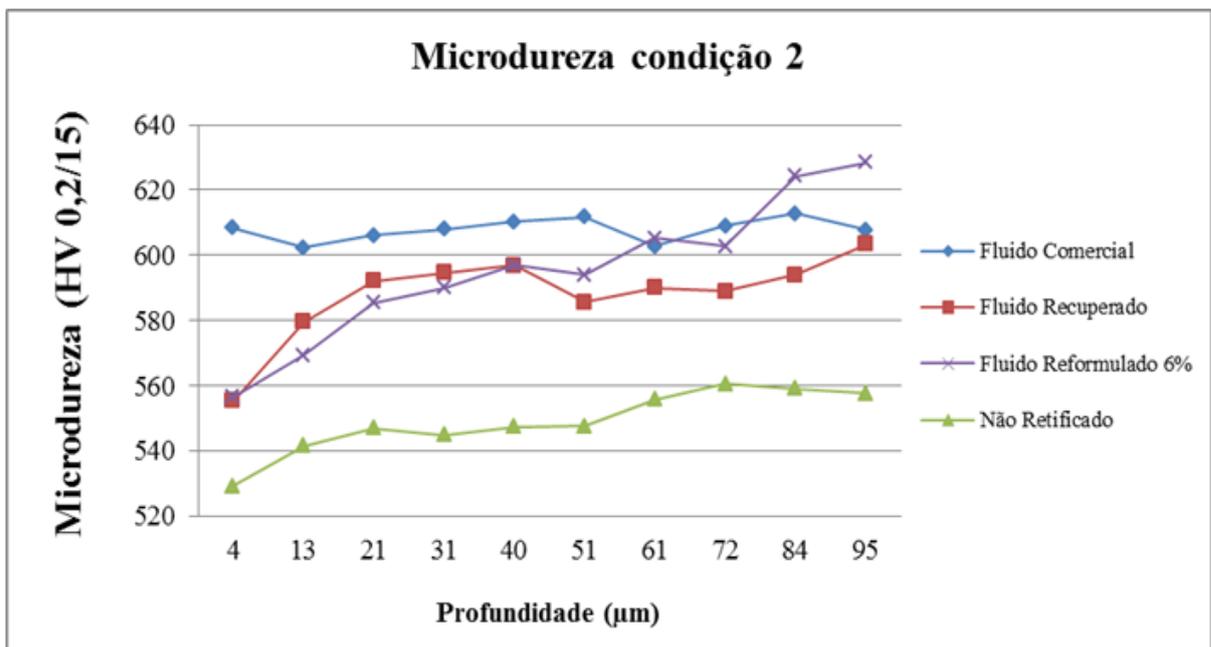


Figura 47: Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 2, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

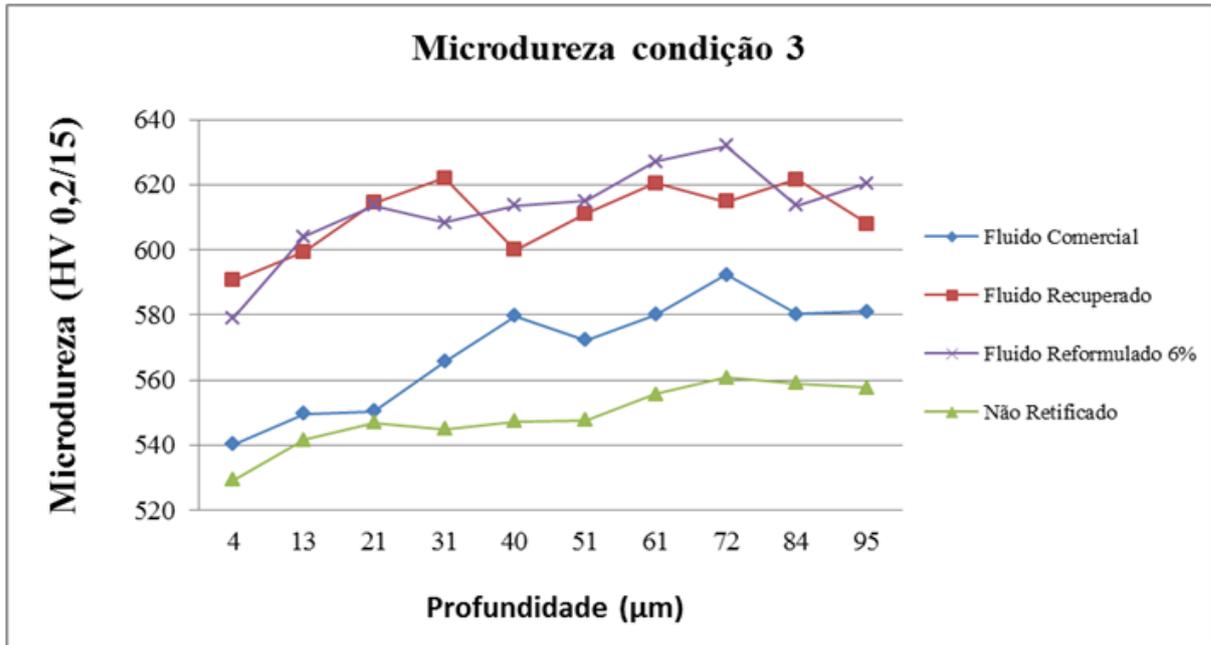


Figura 48: Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 3, com emprego dos diferentes fluidos de corte ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$)

Nota-se, em todos os gráficos, que a retificação proporcionou a todas as amostras um aumento no valor da microdureza quando comparada com a amostra sem retificar, este comportamento é importante para resistência ao desgaste dos materiais. Destaca-se ainda que há uma tendência de aumento do valor de microdureza com o acréscimo da profundidade.

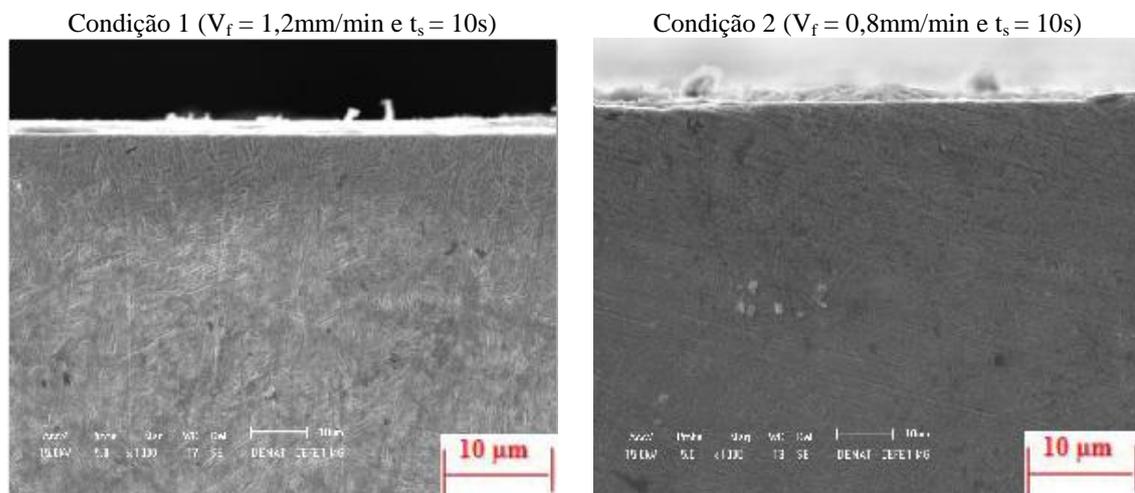
Por outro lado, ao analisar os resultados de microdureza obtidos na condição de usinagem 1, é possível identificar que o fluido de corte reformulado obteve os maiores valores de microdureza, seguido dos fluidos de corte comercial e do fluido de corte recuperado respectivamente. Entretanto, para esta condição de usinagem, há uma tendência de aumento do valor de microdureza quando se fez uso do fluido recuperado, tal fato pode ser atribuído a maior dissipação de calor que favoreceu a formação de uma estrutura martensítica na região, como será demonstrado a partir da exibição do arranjo microestrutural disposto no item 7.4

Na condição de usinagem 2, não foi possível identificar uma diferença significativa entre os valores de microdureza para os fluidos de corte comercial, recuperado e reformulado, o que permite constatar que a temperatura e o resfriamento foram similares durante a usinagem, proporcionando superfícies semelhantes. Na condição de usinagem 3, também não foi possível identificar diferença significativa em relação aos valores de microdureza dos fluidos de corte recuperado e reformulado, embora seus valores tenham sido superiores aos do fluido

comercial. Cabe ressaltar que a condição 3 é uma simulação das condições utilizadas na indústria metal-mecânica. Desta forma, os resultados de microdureza utilizando fluido recuperado e reformulado a 6% de aditivo EP apresentaram desempenho bastante superior em relação ao fluido comercial, devido a superior dureza na sub-superfície da peça, proporcionando maior resistência ao desgaste.

7.4. Análise microestrutural

As Figuras 49 a 52 representam as microestrutura das amostras analisadas por meio da microscopia eletrônica de varredura, com o intuito de verificar possíveis danos causados na sub-superfície do material por meio das solicitações térmicas e mecânicas as quais foram submetidas. Danos causados a uma sub-superfície podem provocar alterações microestruturais que comprometem a integridade superficial da peça. A forma de aplicação, a velocidade, a vazão do fluido de corte e a geometria do bocal podem influenciar as solicitações térmicas e mecânicas da peça.



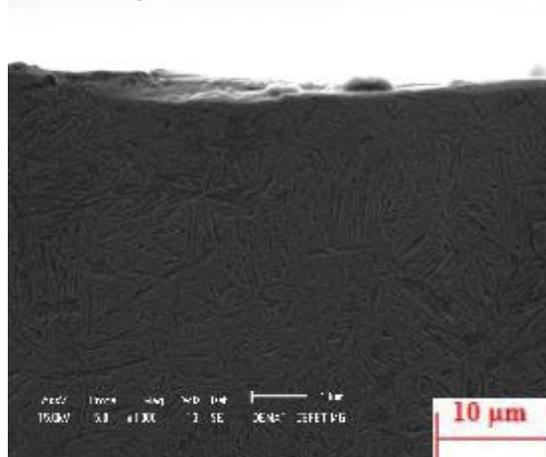
Condição 3 ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)

Figura 49: Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte comercial sob as diferentes condições de usinagem (1000x).

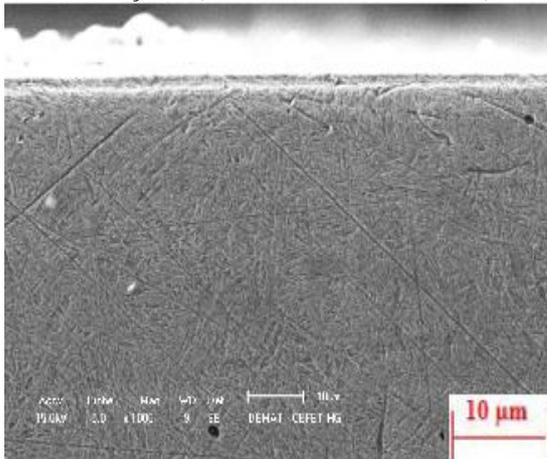
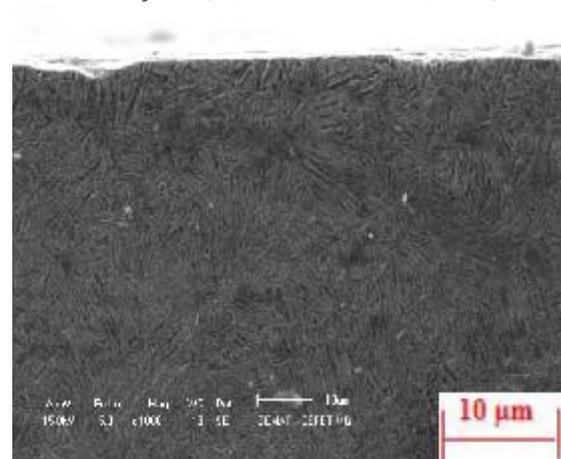
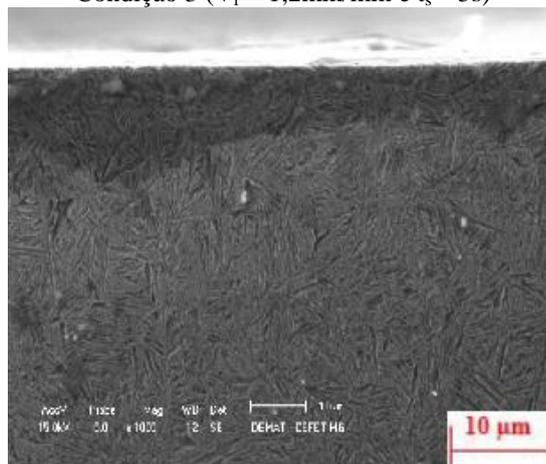
Condição 1 ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)Condição 2 ($V_f = 0,8\text{mm/min}$ e $t_s = 10\text{s}$)Condição 3 ($V_f = 1,2\text{mm/min}$ e $t_s = 5\text{s}$)

Figura 50: Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte recuperado sob as diferentes condições de usinagem (1000x).

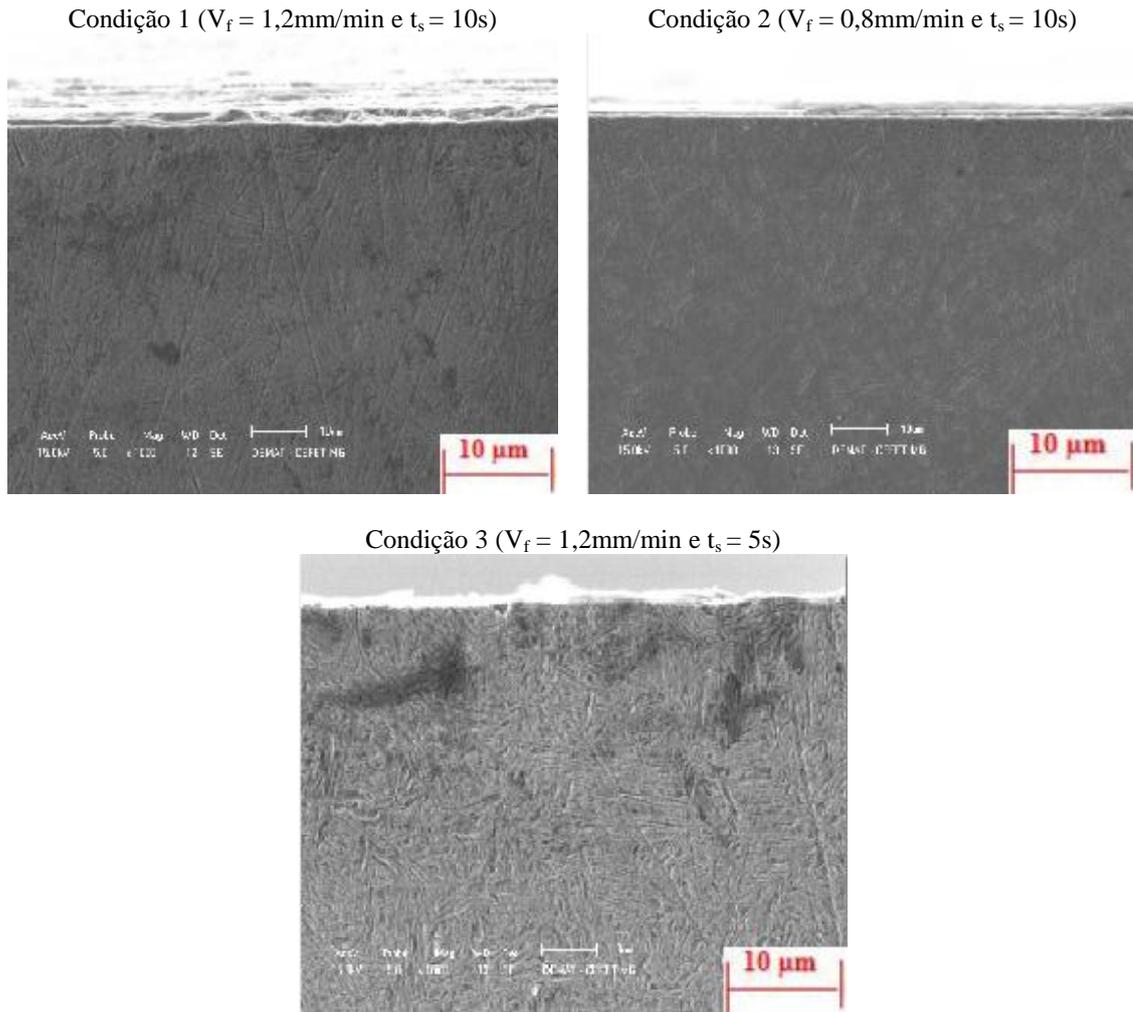


Figura 51: Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte reformulado sob as diferentes condições (1000x).

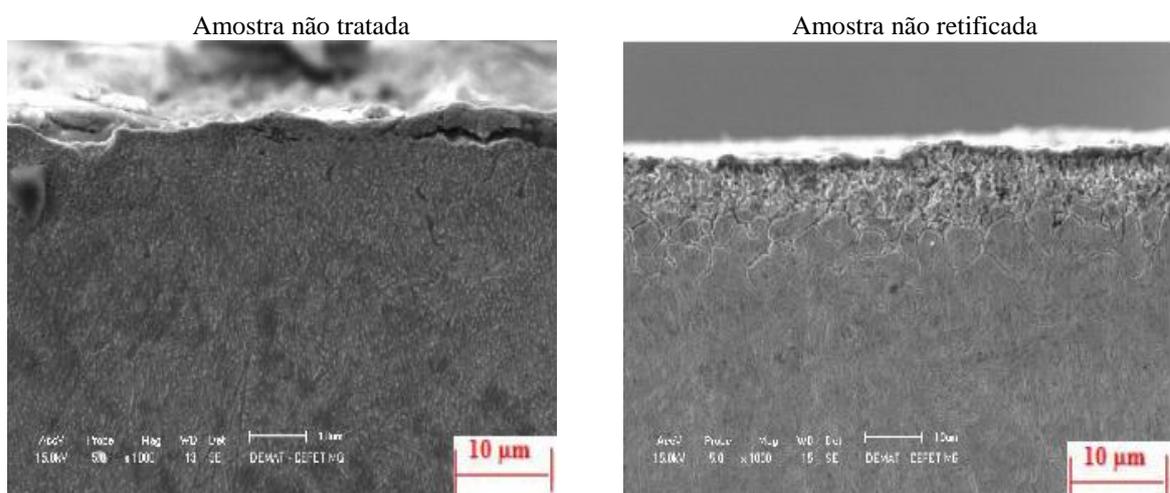


Figura 52: Micrografia eletrônica de varredura de amostras não tratadas e amostras não retificadas (1000x).

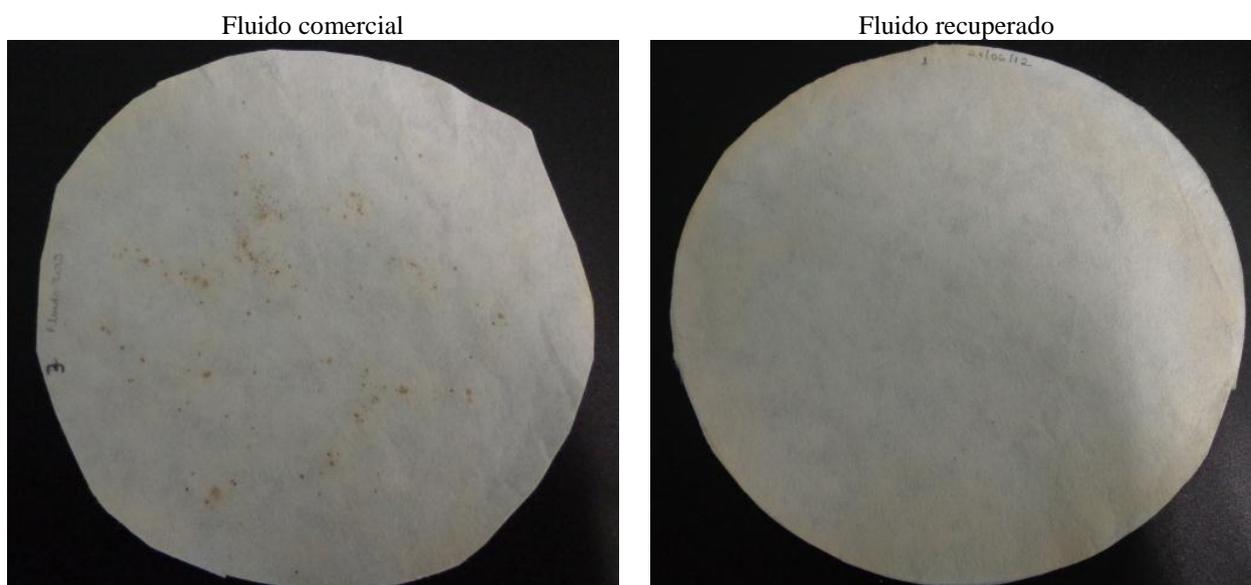
Observa-se nas micrografias apresentadas, que para todos os fluidos de corte (comercial, recuperado, e reformulado) sob as distintas condições de usinagem, há presença marcante de martensita o que explica a elevada dureza, por outro lado, nota se alteração na microestrutura das amostras após sua retificação.

Além disso, ao analisar a microestrutura das amostras, pode-se relacioná-las com os valores encontrados para microdureza, já que, da mesma forma que não houve alteração significativa na dureza do material, não há também alterações significativas na estrutura do mesmo.

Destaca se, portanto que todos os fluidos de corte investigados conseguiram atuar de maneira eficaz como agente refrigerante no processo, reduzindo as possíveis ocorrências de danos térmicos na superfície usinada e que as elevadas temperaturas na zona de corte não foram capazes de alterar a microestrutura do material.

7.5. Teste de Corrosão

O potencial anticorrosivo dos fluidos de corte é diretamente afetado pelo seu nível de contaminação que também resulta na redução de seu pH. Fluidos com pH muito baixo reduzem a proteção dada por eles às peças por sua propriedade anticorrosiva. A Figura 53 demonstra os resultados referentes à análise realizada para a determinação do potencial anticorrosivo dos fluidos de corte utilizados.



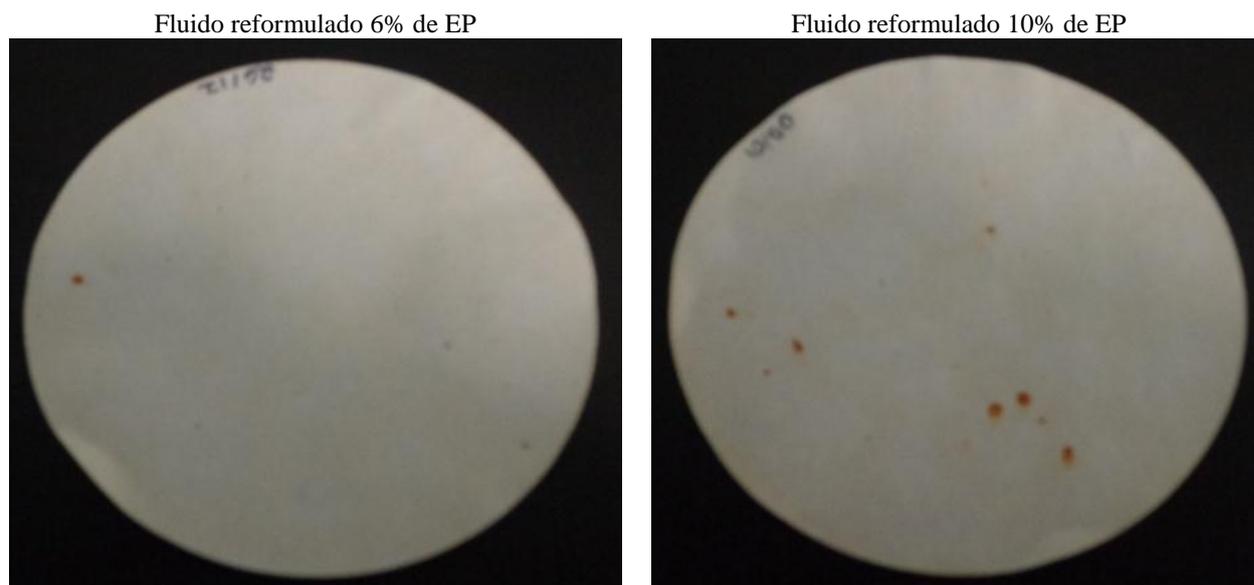


Figura 53: Intensidade do potencial anticorrosivo dos diferentes fluidos de corte analisados

Ao analisar os resultados registrados para o potencial corrosivo de todos os fluidos é possível notar a presença de um maior número de manchas sobre a superfície das placas utilizadas para análise do fluido comercial, isto demonstra que suas propriedades anticorrosivas foram comprometidas.

Já ao analisar as placas utilizadas para o fluido recuperado, nota-se que não há presença de manchas. Isto se deve ao fato de que ao recuperar o fluido, elevando seu pH para valores entre 8,5 e 9,3, o nível de contaminação do fluido é reduzido e suas propriedades anticorrosivas foram recuperadas proporcionando então melhor proteção a peça.

Quanto às placas utilizadas para a análise do fluido reformulado a 6% de aditivo de EP nota se um desempenho semelhante, das características anticorrosiva, quando comparado ao do fluido recuperado, embora com a presença de apenas uma mancha na placa. Já a reformulação com 10% de aditivo de EP, o desempenho das propriedades anticorrosivas também foram superiores ao do fluido comercial, no entanto é possível observar neste caso um maior número de manchas quando comparado com os fluidos recuperado e reformulado a 6% de aditivo de EP. Isto demonstra, que as propriedades anticorrosivas da reformulação a 10% de EP não obtiveram o mesmo desempenho das presentes no fluido recuperado e reformulado a 6% de aditivo de EP.

8. CONCLUSÃO

Pelos estudos e análises comparativas propostas neste trabalho no processo de retificação cilíndrica de mergulho com diferentes fluidos de corte (comercial, recuperado, reformulado a 6% e 10% de aditivo EP) pode se concluir:

Os melhores resultados de rugosidade, para o parâmetro de amplitude (R_a e R_t) de acordo com o desvio padrão máximo e mínimo, foram obtidos com a utilização do fluido de corte reformulado a 6% e 10% de aditivo EP, que proporcionaram uniformidade a peça usinada devido a menor variação de seus valores e em muitas das vezes foi com a utilização destes fluidos que os menores resultados valores de rugosidade.

Ao avaliar os resultados do fluido de corte recuperado com o fluido de corte comercial nota se, devido à similaridade dos resultados, que o método de recuperação do fluido não comprometeu o desempenho do processo nas variáveis de saída analisadas.

Os resultados do parâmetro funcional de rugosidade (R_{vk} e R_{pk}) demonstraram que as superfícies obtidas com fluidos de corte comercial, recuperado e reformulado a 6% de aditivo EP, levará a uma superfície com a mesma capacidade de escorregamento e/ou deslizamento e retenção de filme lubrificante.

A utilização dos fluidos de corte reformulado a 6 e 10% de aditivo EP proporcionaram um menor desgaste diametral do rebolo. Por outro lado, o desgaste com a utilização dos fluidos de corte comercial e recuperado, apesar de maiores, foram equivalentes e demonstrando que a recuperação do fluido não comprometeu o desempenho do processo quando comparado ao fluido de corte comercial.

Os resultados de microscopia eletrônica de varredura e microdureza demonstraram que não foram observadas alterações subsuperficiais significativas quanto ao emprego do fluido de corte comercial, recuperado, reformulado a 6% de aditivo EP e reformulado a 10% de aditivo EP.

O fluido de corte comercial sofreu um elevado nível de degradação ao longo de seu período de uso, o que pôde ser evidenciado pelos testes de corrosão que mostraram que a grande presença de fungos e bactérias reduziu as suas propriedades anticorrosivas. Por outro lado, ao utilizar os fluidos de corte recuperado, reformulado a 6% e 10 % de aditivo EP as propriedades anticorrosivas foram restabelecidas e mantidas, indicando que houve controle sobre o mecanismo de degradação do fluido.

As análises dos resultados indicam que a recuperação do fluido de corte pode ser aplicada com eficiência no processo de retificação sem comprometer as variáveis de saída analisadas, pois o mesmo teve suas propriedades primárias mantidas, de forma a contribuir para a redução de custos com descarte e para uma manufatura ecologicamente correta.

De maneira geral, pode se concluir que a retificação realizada com o fluido de corte reformulado a 6% e 10% de aditivos são as que proporcionaram melhor desempenho, contudo o aumento do percentual de aditivos, de 6% para 10%, não levou a uma melhora considerável do processo, sendo assim é mais prudente utilizar o fluido reformulado a 6% de aditivo, pois este terá o mesmo desempenho da segunda reformulação, porém com menos aditivo.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o desempenho da reformulação utilizando um percentual menor de aditivo EP, buscando assim determinar o valor mínimo de aditivo para que o desempenho do processo seja garantido.

Realizar a recuperação e reformulação de fluidos de corte semissintético e sintético, avaliando o seu desempenho com o fluido de corte emulsionável nas mesmas condições de usinagem.

Avaliar a viabilidade econômica em se realizar a recuperação do fluido de corte ou apenas fazer sua troca periódica em uma planta industrial, levando em consideração os impactos ambientais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFIA

AGGARWAL, A. et al. Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, p. 42-50, Aug. 2008.

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo, Edgard Blücher, 1981

ARAUJO, J. B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade**. 2010. 193f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.

AVILA, R. F; ABRÃO, A.M. The effect of cutting fluids on the machining of AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, n.119. p. 21-26, 2001.

AVILA, R. F. et al. Topografic functional parameters in machining of AISI 4340 steel with coated cemented carbide tools. In: International Congress of Mechanical Engineering, 18. Ouro Preto. **Anais... Ouro Preto COBEM**, 2005

BIANCHI, E. C.; ALVES, M. C. S.; AGUIAR, P. R. Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. **Revista Matéria**, Bauru, v.13, n.4, p. 636-642, jun. 2008.

BIANCHI, E. C. et al. A contribuição dos rebolos superabrasivos com ligantes resinoides e vitrificados. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n.398, p. 88-113, Março. 1999.

BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinoides e vitrificado. **Revista Cerâmica**, v.57, p. 431- 437, 2011.

BIANCHI, 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. et al. Evaluation of the thermal damages in inlet engine valves varying the grinding wheels and the cutting fluids. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.56, n.2, p. 81-86, Abr. jun. 2003.

BRINKSMEIER, E. State-of-the-art of non-destructive measurement of subsurface material properties and damages. **Precision Engineering**, v.11, n.4, p. 211-224, Out. 1989

BRINKSMEIER, E; HEINZEL, M. WITTMAN. M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. **Annals of the CIRP**, v.481, p. 582-598. 1999.

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

CATAI, R. E. et al. Análise da influência do processo de retificação nas circularidades, tensões residuais e na microestrutura do aço VC 131 mediante a variação do tipo de fluido de corte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 17. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBECIMAT, 2006. p. 7181-7192

CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho.** 2004. 205f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

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

CHEN, X; LIMCHIMCHOL, T. Monitoring grinding wheels redress-life using support vector machines. **International Journal of Automation and Computing**, Nottingham, p. 56-62, 2006

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51.360/2:** Testing of cooling lubricants; determination of corrosion preventing characteristics of cooling lubricants mixed with water. Berlin, s/a

DONG, W. P; SULLIVAN. P. J; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterising three III: parameters for characterising amplitude and some functional properties. **Wear**, Birmingham, n.178, p.29-43, Dec, 1994.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: part I. characterization. **Journal of Material Processing Technology**, Dublin, n. 56 p. 786-797, 1996a

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: part II. recycling and grinding machining. **Journal of Material Processing Technology**, Dublin, n. 56 p. 798-806, 1996b

FRANÇA, V. T. **Estudo da perda da circularidade e rugosidade de peças retificadas utilizando as redes neurais artificiais.** 2005. 190f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

FERNANDES, B. U de. **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, Bauru.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** 11 ed. São Paulo, Edgard Blucher. 1977. 751p.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of Material Processing Technology**, v.123, p. 133-145, Apr. 2002

GENTIL, V. **Corrosão.** 6 ed. Rio de Janeiro, LTC. 2011. 360p.

GOMES, J. O; CARVALHO, V. M; CAMPOS, L. A. Qualidade de engrenagens e de rebois com o uso de óleos minerais integrais, **Revista Máquina e Metais**, São Paulo, n.472, p. 112-125, Jun. 2009.

GORANA, V. K; JAIN, V. K; LAL, G. K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, v.44, p. 201-211, Fev. 2004.

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.

HASSUI, A. **Comparação sobre a utilização de diferentes sensores no monitoramento do processo de retificação**. 1997. 102f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

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.

HECHER, R. L.; RAMONEDA, I. M.; LIANG, S. Y. Analysis of wheel topography and grit force for grinding process modeling. **Journal of Manufacturing Process**, v.5, p.13-23, 2003

HOLESOVSKY, F.; HRALA, MICHAEL. Integrity of cylindrical grinding surface. **Journal of Manufacturing Process Technology**, v.153-154 p. 714-721, 2004.

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

JACKSON. M. J. et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels - applications and future technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v.110, p. 78-88, 2001

JAMBO, H. C. M; FÓFANO, S.; **Corrosão: fundamentos, monitoramento e controle**. 1. ed Rio de Janeiro: Ciência Moderna 2008. 342p.

KOPAC, J.; BAHOR, M. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. **Journal of Materials Processing Technology**, v.92-93, p. 381-387, 1999

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

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.

LEE, E. S.; KIM, N. H. A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor. **Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.41, n.7, p. 937-951, 2001.

LI, M. et. al. Development of high water-content cutting fluids with a new concept fire prevention and environmental protection. **Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology**, p. 231-236, 2000.

LIÃO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. A thermal model of the wet grinding process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.101, p. 137-145, 2000.

LIMA, E. A vida pode aumentar dependendo da formulação. **Maquinas e Metais**, p. 154-165, set. 2012.

MACHADO et al, **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2009. 371p.

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

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

MALKIN, S; GUO, C. Thermal analysis of grinding. **Annal of the CIRP**, v.56, p.760-782, jun. 2007.

MAIA, D. A. S et al. Fluidos de corte: novas formulações e recuperabilidade. In: PDPETRO, 4. Campinas. **Anais...** Campinas: PDPETRO, 2007. p. 1-10

MATTOS, M. et al. Recycling of oily ultrafiltration permeates to reformulate O/Wemulsion. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, n.331, p. 8-5, 2008.

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

MIRANDA, G. W. A. **Uma contribuição para o processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TIAIN**, 2003. 182f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de fabricação. Universidade Estadual de Campinas.

MONICI, R. D. et al. Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.46, p. 122-131, 2006

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.

OLIVEIRA, J. D de; et al. Aprimoramento das condições de lubri-refrigeração na retificação de aços endurecidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., Caxias do Sul, 2011. **Anais...** Caxias do Sul: ABCM, 2011. p. 1-13.

OLIVEIRA, J. F. G. de; ALVES, S. M. Novos fluidos de corte adequado ao desempenho mecânico da retificadora e ao meio ambiente. **Maquinas e Metais**, p. 28-43, jan. 2006.

OLIVEIRA, J. F. G. de; ALVES, S. M. Adequação dos processos de usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 129-138, Jan. Abr. 2007.

OLIVEIRA, J. F. G. de; DORNFEL, D. A; WINTER, B. Dimensional characterization of grinding wheel superface through acoustic emission. **Annal of the CIRP**, v. 43, n. 1, p. 291-294, Jan. 1994.

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

PIUBELI, F. A. et al. Caracterização microbiológica de uma emulsão mineral utilizada como fluido de corte nos processos de usinagem. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v.12, n.1, p.35-41. Dez 2008.

RAKIC, R., RAKIC, Z. Tribological aspects of the choice of metalworking fluid in cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v.124, p. 25-31, 2002.

REDDY, N. S. K., RAO, P. V. Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling. **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.46. p. 189-198, 2006.

ROSSINI, N. S. et al. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials and Design**. v.35. p. 572-588, Março. 2012.

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

SAUNDERS, J. R.; NICHOLS, J. R. Oxidation, hot corrosion and protection metallic material. In: **Mechanical Metallurgy** 4. ed. rev. North Holland: 1996, cap 14, p.1291-1361.

SHAW, M. C. Heat-Affected zones in grinding steel. **Annals of the CIRP**. v.43. p. 279-282, 1993

SILVA, L. R da. et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.47, p. 412-418, 2007.

SILVA, L. R da. et al. Manufatura Ecologicamente Correta: Análise do Comportamento da Mínima Quantidade de Lubrificante-MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., Caxias do Sul, 2011. **Anais...** Caxias do Sul: ABCM, 2011. p. 1-10.

SKONG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 836 p.

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

SOUZA, O. G. A. **Monitoramento da dressagem no processo de retificação**. 2009. 72f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed, São Paulo: Edgard Blucher. 1982. 286p.

TONSHOFF, H. K.; FRIELMUTH, T.; BECKER, J. C. Process monitoring in grinding. **Annal of the CIRP**, v.51, p. 551-571, 2002.

ULUTAN, D.; OZEL, T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review. **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.51, p. 250-280, 2011

VIEIRA, M. Jr. et al. Como o calor pode afetar a integridade superficial das peças. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n°.397, p. 28-36, Jul. 1999.

WANG, P. J. **Avaliação da retificação com rebolo CBN vitrificado aplicado em ligas de alto desempenho**. 2008. 163f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade de São Pulo, São Carlos.

WEBSTER, J. et al. Assessment of grinding fluid effectiveness in continuous-dress creep feed grinding. **Annal of the CIRP**, v.5, p. 235-240, 2002.

WHITEHOUSE, D. J. Function maps and the role of surfaces. **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.41, p.1847-1861, 2001.

XIAO, G; MALKIN, S; DANAI; K. Intelligent control of cylindrical plunge grinding. **ACC/WA11**, p. 391-399. 1992.

YOUSSEF. A. H; EL HOFY, H. **Machining technology**: Machine tools and operations, Taylor e Francis group, 2008. 633p.

ZANFERRARI, R. B. Opções para trabalhar material endurecido com rebolos galvânicos de CBN. **Revista Máquinas e Metais**, n°.472, p. 154-171, Maio. 2005.