

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - DEMAT

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FRANCISCO VIEIRA DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO AÇO ABNT 4340
ENDURECIDO APÓS PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM
FLUIDOS DE CORTE SINTÉTICO E INTEGRAL**

Belo Horizonte

Fevereiro de 2017

FRANCISCO VIEIRA DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO AÇO ABNT 4340
ENDURECIDO APÓS PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM
FLUIDOS DE CORTE SINTÉTICO E INTEGRAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Leonardo Roberto da Silva.

Belo Horizonte

Fevereiro de 2017

FRANCISCO VIEIRA DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO AÇO ABNT 4340
ENDURECIDO APÓS PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM
FLUIDOS DE CORTE SINTÉTICO E INTEGRAL**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Leonardo Roberto da Silva

Prof. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Odilon Soares da Silva

Belo Horizonte

Fevereiro de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Maria de Lourdes e Francisco e aos meus irmãos Fabrício (in memoriam) e Fernando pelo apoio, paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida.

Ao professor Leonardo Roberto da Silva pelos ensinamentos, atenção, apoio e compreensão nesses anos de convivência.

Ao professor José Geraldo de Araújo Pereira por todo o apoio, carinho e atenção na caminhada até a chegada ao curso de engenharia de materiais.

Aos professores dos cursos técnicos de eletrônica e química do CEFET pelos ensinamentos de vida que trago comigo e que me foram de grande utilidade na minha formação pessoal e profissional.

Aos professores do curso de engenharia de materiais do CEFET-MG pelos ensinamentos, carinho, atenção, apoio e compreensão ao longo desses cinco anos de minha formação pessoal e profissional como engenheiro de materiais.

À professora Rosana Zacarias Domingues os ensinamentos e a oportunidade de fazer parte do laboratório de materiais e pilhas a combustível – LaMPaC/UFMG onde fui bem acolhido.

Aos professores Carlos Eduardo e Odilon da Silva pela participação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu Tio Nivaldo e a minha Tia Rosa pelo apoio e incentivo para ingressar no CEFET-MG.

À família do meu amigo Geni Caio Roberto pelos ensinamentos de vida que levarei comigo para sempre.

Aos meus amigos Adriano Oliveira, Antônio Cesar, Camila Sanches, Carlos Jacinto, Davi Silva, Eduardo Reis, Fernando Duarte, Filipe Mazzaro, Heitor Vieira, Marcelo Araújo, Paula Bertolini, Pedro Henrique, Rafael Mazzaro, Sebastião Libério, Vinicius Siqueira e aos outros não citados aqui por toda amizade, carinho, compreensão, apoio, respeito e reconhecimento ao longo dessa nossa caminhada de vida.

E por fim a todos os funcionários do CEFET-MG que de uma forma ou outra participaram dessa minha transformação como pessoa ao longo desses anos de curso.

RESUMO

Processo de retificação é empregado na fabricação de componentes que requerem excelente qualidade dimensional. Apesar da sua complexidade, o desempenho do processo de retificação depende muito do tipo de fluido utilizado, que possui a função de amenizar os danos superficiais promovidos nas peças e provocados pela queima, danos microestruturais e efeitos de tensões residuais. Com isso, a caracterização da topografia de superfície de engenharia é muito importante em diversas situações nas quais o material estará sujeito ao atrito e desgaste. Essa ideia de caracterizar as superfícies iniciou-se na década de 60 e até os dias atuais muitas pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas com o intuito de descobrir novos métodos para avaliação de superfícies. Dessa forma, os pesquisadores da área de processo e fabricação desenvolveram novos métodos que permitem analisar as superfícies com muito mais detalhes, além de desenvolver e testar as superfícies conforme sua funcionalidade, isto é, essas superfícies são fabricadas, controladas e testadas segundo a função que irão desempenhar no projeto. O presente trabalho analisa qual a influência do processo de retificação cilíndrica de mergulho, dos parâmetros de cortes utilizados e dos fluidos de corte sintético e integral nas características funcionais da superfície do aço ABNT 4340 por meio dos parâmetros de amplitude R_a , R_t , dos parâmetros estatísticos R_{ku} , R_{sk} e dos parâmetros funcionais, K_p , R_k , R_{pk} , R_{vk} , Θ_k , Mr_1 , Mr_2 , A_1 , A_2 , A_3 . Os resultados obtidos mostraram que os parâmetros funcionais estão interligados entre si, o volume de material retificado exerce maior influência na eficiência dos fluidos de corte do que a velocidade de mergulho, o aumento do volume de material retificado reduz a eficiência de forma mais acentuada do fluido de corte integral. Diante das análises realizadas conclui-se que o fluido de corte integral garantiu a superfície do aço ABNT 4340 endurecido as melhores características funcionais de amaciamento do desgaste na fase inicial, capacidade de suportar cargas e retenção de lubrificante.

Palavras chave: Fluidos de corte, Processo de retificação, Parâmetros funcionais, Caracterização de Superfície.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Composição da ferramenta de corte.....	22
FIGURA 2 – Sistema de classificação dos grãos abrasivos por peneiramento.....	24
FIGURA 3 - Processo de retificação em uma abordagem de sistema	28
FIGURA 4 - As variáveis do processo de retificação cilíndrica de mergulho.....	29
FIGURA 5 - Ciclo de trabalho do processo de retificação cilíndrica de mergulho	30
FIGURA 6 - Desgaste volumétrico do rebolo em função do material removido.....	36
FIGURA 7 - Classificação dos fluidos solúveis em água	45
FIGURA 8 – Classificação dos parâmetros de superfície.....	49
FIGURA 9 - Classificação hierárquica da superfície.....	50
FIGURA 10 - Nova estrutura de classificação hierárquica da superfície	51
FIGURA 11 - Superfícies em diversos padrões	52
FIGURA 12 - Representação da ondulação e rugosidade de uma superfície	54
FIGURA 13 - Representação da textura e integridade superficial.....	54
FIGURA 14 - Perfis de uma superfície.....	56
FIGURA 15 - Análise gráfica do parâmetro R_p	57
FIGURA 16 - Análise gráfica do parâmetro R_v	57
FIGURA 17 - Curva de Abbot-Firestone e os parâmetros da série R_k	58
FIGURA 18 - Representação gráfica do parâmetro R_k	59
FIGURA 19 - Representação gráfica do parâmetro R_{kp}	60
FIGURA 20 - Representação gráfica do parâmetro R_{vk}	61
FIGURA 21 - Comparação dos parâmetros R_k para uma superfície com o mesmo valor de R_a	62
FIGURA 22 - Exemplo das curvas de Abbott-Firestone para os diferentes perfis de rugosidade.....	63

FIGURA 23 - Representação gráfica dos parâmetros A1 e A2.....	65
FIGURA 24 - Representação gráfica do parâmetro Rku.....	68
FIGURA 25 - Representação gráfica do coeficiente de simetria	68
FIGURA 26 - Altura total do perfil	70
FIGURA 27 - Altura máxima do pico do perfil	70
FIGURA 28 – Retificadora cilíndrica universal	71
FIGURA 29 – Desenho esquemático do corpo de prova.....	72
FIGURA 30 – Operação de dressagem.....	73
FIGURA 31 – Rebolo e sistema de lubrificação.....	74
FIGURA 32 – Refratômetro portátil	75
FIGURA 33 – Rugosímetro e os dispositivos usados nas medições dos parâmetros avaliados	77
FIGURA 34 - Rugosidade Ra em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	78
FIGURA 35 - Rugosidade Ra em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	79
FIGURA 36 - Rugosidade Rt em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	80
FIGURA 37 - Rugosidade Rt em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	80
FIGURA 38 - Rugosidade Rku em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	81
FIGURA 39 - Rugosidade Rku em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	82

FIGURA 40 - Rugosidade R_{sk} em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	83
FIGURA 41 - Rugosidade R_{sk} em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	84
FIGURA 42 - Rugosidade R_{pk} em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	85
FIGURA 43 - Rugosidade R_{pk} em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	86
FIGURA 44 - Rugosidade R_k em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	87
FIGURA 45 - Rugosidade R_k em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	88
FIGURA 46 - Rugosidade R_{vk} em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	89
FIGURA 47 - Rugosidade R_{vk} em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	89
FIGURA 48 – Percentual de picos em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	91
FIGURA 49 – Percentual de picos em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	91
FIGURA 50 – Percentual de vales em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	93
FIGURA 51 – Percentual de vales em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	93

FIGURA 52 – Percentual de núcleos em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	95
FIGURA 53 – Percentual de núcleos em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	95
FIGURA 54 – Ângulo Θ_k em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	97
FIGURA 55 – Ângulo Θ_k em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	97
FIGURA 56 – Coeficiente de vazio K_p em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min	98
FIGURA 57 – Coeficiente de vazio K_p em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Representação da dureza do rebolo	25
TABELA 2– Representação da estrutura do rebolo.....	26
TABELA 3– Classificação dos fluidos para processamento de base líquida	42
TABELA 4 – Características dos fluidos de corte no processo de retificação	43
TABELA 5 – Composição química do aço ABNT 4340.....	72
TABELA 6 – Parâmetros de corte	75
TABELA 7 – Matriz dos corpos de corpos de prova retificados	76

LISTA DE SIMBOLOS e NOMECLATURAS

a	Profundidade de corte
a_d	Profundidade de dressagem
Al_2O_3	Óxido de alumínio
A_1	Área correspondente à região dos picos
A_2	Área correspondente à região dos vales
A_3	Área correspondente à região de núcleos
A_t	Área total
CDP	Corpo de prova
d_e	Diâmetro equivalente
d_s	Diâmetro do rebolo
d_w	Diâmetro interno da peça
F_n	Força normal
F_t	Força tangencial
h_{eq}	Espessura equivalente de corte
K	Knoop
K_p	Coefficiente de vazio
l_c	Comprimento de contato
L_e	Comprimento de amostragem
l_m	Comprimento de avaliação
Mr_1	Percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os picos da rugosidade central

Mr_2	Percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os vales da rugosidade central
η_s	Rotação do rebolo
η_w	Rotação da peça
Q_w	Taxa de remoção específica de material
R_a	Desvio médio aritmético
R_{Ges}	Rugosidade da região de picos, núcleos e vales
R_t	Rugosidade total
R_p	Altura máxima de pico a linha média
R_v	Profundidade máxima de vale em relação ao perfil primário
R_k	Profundidade da rugosidade central
R_{pk}	Altura reduzida dos picos
R_{vk}	Profundidade reduzida dos vales
R_{sk}	Coefficiente de simetria (2D)
R_{ku}	Distribuição e forma dos picos na superfície - Curtose
SiC	Carbeto de silício
t_s	Spark out
S_k	Coefficiente de Simetria (3D)
SDL	Superfície que desliza lubrificada
V_f	Velocidade de mergulho
V_s	Velocidade de corte da ferramenta
V_w	Velocidade da peça
θ_K	Ângulo de inclinação da região central

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVO	19
2.1 Objetivos específicos.....	19
3.1. Materiais abrasivos.....	20
3.1.1 Características e propriedades dos rebolos.....	22
3.1.2. Tamanho do grão abrasivo	23
3.1.3 Dureza do rebolo	24
3.1.4 Estrutura do rebolo	25
3.2 Processo de retificação.....	26
3.2.1 Características do processo de retificação cilíndrica de mergulho.....	28
3.2.2 Etapas de produção da retificação cilíndrica de mergulho	29
3.2.3 Comprimento de contato l_c	31
3.2.4 Diâmetro equivalente (d_e).....	31
3.2.5 Espessura equivalente de corte (h_e).....	32
3.2.5 Profundidade de corte (a)	32
3.2.6 Velocidade de mergulho (V_f).....	33
3.2.7 Velocidade de corte (V_s)	33
3.2.8 Velocidade da peça (V_w)	34
3.2.9 Aspectos tribológicos associados ao processo de retificação.....	34
3.3 Desgaste e topografia do rebolo	35
3.4 Dressagem.....	37
3.5 Fluidos de corte	39
3.5.1 Classificação dos fluidos de corte	41
3.5.2 Óleos de corte puro ou integral	43
3.5.3 Fluidos de corte solúveis em água.....	44
3.5.4 Função dos fluidos de corte.....	46
3.6 Parâmetros de superfície	48
3.6.1 Classificação da superfície	49

3.6.2	Características da superfície.....	52
3.6.3	Topografia da superfície.....	53
3.7	- Parâmetros de rugosidade	55
3.7.1	Altura máxima de pico a linha média R_p (μm)	57
3.7.2	Profundidade máxima de vale em relação ao perfil primário R_v (μm)	57
3.7.3	Curva de Abbot-Firestone	58
3.7.4	Profundidade da rugosidade central R_k (μm).....	59
3.7.5	Altura reduzida dos picos R_{pk} (μm)	60
3.7.6	Percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os picos da rugosidade central (Mr_1).....	60
3.7.7	Percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os vales da rugosidade central (Mr_2).....	61
3.7.8	Profundidade reduzida dos vales R_{vk} (μm)	61
3.7.9	Área correspondente à região dos picos (A_1)	64
3.7.10	Área correspondente à região dos vales (A_2)	64
3.7.11	Área correspondente à região de núcleos (A_3)	65
3.7.12	Ângulo de inclinação da região central (θ_k)	66
3.7.13	Distribuição e forma dos picos na superfície - Curtose (R_{ku})	67
3.7.14	Coefficiente de simetria R_{sk}	68
3.7.15	Coefficiente de vazio (K_p)	69
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
4.1	Banco de ensaios	71
4.1.1	Corpo de prova	72
4.1.2	Ferramenta de corte	73
4.1.3	Condições de dressagem	73
4.1.5	Parâmetros de retificação	75
4.1.6	Parâmetros de rugosidade.....	77
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
5.1	Parâmetro de amplitude R_a	78

5.2 Parâmetro de amplitude R_t	79
5.3 Parâmetro estatístico R_{ku}	81
5.4 Parâmetro estatístico R_{sk}	83
5.5 Parâmetro funcional R_{pk}	85
5.6 Parâmetro funcional R_k	87
5.7 Parâmetro funcional R_{vk}	89
5.8 Percentual de picos A_1/At	91
5.9 Percentual de vales A_2/At	93
5.10 Percentual de núcleos A_3/At	95
5.11 Ângulo de inclinação da região central θ_k	96
5.12 Coeficiente de vazio K_p	98
6. CONCLUSÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1. INTRODUÇÃO

A noção de tecnologia de superfície vem sendo discutida e avaliada desde a década de 60 e uma conclusão notável desta avaliação é que ninguém detém todos os dados para definir com precisão a funcionalidade de uma superfície com o intuito de prever o quanto tempo uma peça pode exercer a função para qual foi projetada. Estes aspectos funcionais estão em vários sistemas tais como: contato elétrico, deslizamento, estampagem, mancais, rolamentos, reflexão da luz e vedação (CLARK e GRANT, 1992).

A área da engenharia que estuda o comportamento e desenvolve parâmetros que possibilitam analisar o desempenho das superfícies nas mais diversas situações é a engenharia de superfície que é uma área multidisciplinar que envolve os conhecimentos da engenharia de materiais, engenharia mecânica, biologia, física, química entre outras (RODRIGUES, 2006).

De acordo com Bhushan (1999) na grande parte das interfaces de relevância tecnológica, há sempre o contato entre as asperezas das superfícies. Assim sendo, a investigação de um contato de uma simples aspereza ganha importância nos estudos das propriedades mecânicas, além disso, os fundamentos tribológicos de superfície têm sido amplamente caracterizados.

De acordo com Clark e Grant (1992) cada fabricante desenvolve um método de produção para a superfície de uma peça, o que demanda tempo e custo, contudo poucos examinam todos os parâmetros que quando controlados, podem aumentar a efetividade do desempenho da superfície.

Segundo Gohar e Ranhejat (2012) o processo de usinagem empregado para produzir uma superfície define o tipo de textura que será criado na peça e cada textura desempenha um papel importante na função a qual a peça foi projetada. Os tipos de superfícies criadas conforme os processos de usinagem são homogênea, heterogênea, determinística, aleatória, isotrópica e anisotrópica.

Os parâmetros de rugosidade desempenham importante papel nas características funcionais de uma superfície, uma vez que, a superfície é composta por várias camadas sobrepostas que são caracterizadas por três diferentes parâmetros de rugosidade que são os parâmetros de amplitude, espaçamento e híbrido. Entre os parâmetros citados o híbrido é o mais completo parâmetro para caracterizar a topografia da superfície (DAVIM, 2011).

Ainda de acordo com Davim (2011) outras técnicas podem ser utilizadas para determinar as características intrínsecas da nova superfície gerada após os diversos processos de fabricação. Diante desse fato o parâmetro mais utilizado para verificar a funcionalidade da

superfície é a tensão superficial ou energia superficial. Com isso, inúmeras técnicas de análises físicas e químicas de superfície estão disponíveis comercialmente com o intuito de caracterizar as camadas formadas na superfície. Assim, temos as técnicas de microscopia eletrônica de varredura, microscopia de força atômica, microscopia eletrônica de transmissão, espectrometria dispersiva de raios-x, espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-x, espectrometria de massa de íons secundários, perfilometria e tensão residual.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar as influências do processo de retificação cilíndrica de mergulho e dos fluidos de corte integral e sintético na funcionalidade da superfície do aço ABNT 4340 endurecido por meio da análise dos parâmetros de rugosidade de amplitude, estatísticos e funcionais conforme as normas *DIN 4776* e *ISO 13565-2*.

2.1 Objetivos específicos

- ✓ Analisar os efeitos do processo de retificação cilíndrica de mergulho na funcionalidade da superfície do aço ABNT 4340 endurecido por meio dos parâmetros de rugosidade de amplitude, estatísticos e funcionais.
- ✓ Verificar a influência da velocidade de mergulho e do volume de material retificado nos parâmetros abordados;
- ✓ Verificar os possíveis efeitos dos fluidos de corte integral e sintético nos parâmetros abordados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os seguintes temas: materiais abrasivos, processo de retificação cilíndrica de mergulho, fluidos de corte integral e sintético, parâmetros de superfície.

3.1. Materiais abrasivos

Os materiais abrasivos possuem certas características que determinam sua eficiência na remoção de material tais como: dureza, estrutura do cristal, forma do grão, friabilidade ou durabilidade e ainda a química do abrasivo. As diferenças observadas nas propriedades de um mesmo tipo de abrasivo estão relacionadas com as variações químicas e/ou características estruturas intrínsecas do próprio processo de produção. E por fim, a característica de friabilidade de um material é resultante de sua pureza (MALKIN, 1989).

De acordo com a dureza dos grãos abrasivos, estes são classificados em dois grupos, os convencionais e os superabrasivos. Os grãos convencionais possuem dureza próxima a 2000 kgf/mm², enquanto os grãos superabrasivos têm dureza na faixa de 4500 kgf/mm². Estes valores são obtidos por meio de testes de dureza KNOOP (SHAW, 1996).

Os grãos de óxido de alumínio (Al₂O₃) e os de carboneto de silício SiC destacam-se no grupo dos abrasivos. O óxido de alumínio possui a menor dureza dentre todos os abrasivos, no entanto, tem a vantagem de ser relativamente resistente ao impacto. Sendo empregado na retificação de materiais ferrosos. Já os abrasivos de carbeto de silício são recomendados para retificação de aços não-ferrosos ou aços com elevado teor de carbono em sua composição, pois apesar de ser mais duro que o de óxido de alumínio, quando empregados na usinagem de materiais ferrosos reagem quimicamente com o elemento ferro, ocasionando um desgaste acentuado dos grãos (HASSUI, 2002).

De acordo com sua composição química, tais como: alumina, alumina semi-friável, alumina branca, alumina rosa e sol-gel, os grãos de óxido de alumínio são classificados. Este último abrasivo descoberto há pouco tempo, possui elevada pureza (99,6% em peso) e uma microestrutura uniforme. Tais fatores refletem de maneira positiva nos valores de rugosidade e desgaste diametral do rebolo (JACKSON e MILLS, 2000).

O desempenho do rebolo durante o processo de usinagem é afetado por duas propriedades fundamentais dos grãos abrasivos que são a tenacidade e friabilidade. A tenacidade é um parâmetro relacionado diretamente à quantidade de trabalho (energia) necessária para fraturar o grão abrasivo. Já a friabilidade é definida de forma oposta ao conceito de tenacidade, ou seja, corresponde à facilidade para se quebrar um grão abrasivo

quando submetido à determinada força ou impacto. Sabe-se que a friabilidade de um material está relacionada à sua pureza. Em relação aos grãos destacados anteriormente, pode-se afirmar que os grãos de óxido de alumínio apresentam menor friabilidade que os grãos de carboneto de silício (FERNANDES, 2007).

O nitreto cúbico de boro (CBN) e o diamante são os principais representantes dos grãos superabrasivos. Estes dois representantes apresentam dureza bem mais elevada que os abrasivos convencionais. E os rebolos compostos por estes tipos de grão são empregados na retificação de materiais de difícil usinabilidade, tais como aços rápidos, aços alta liga e aços ligados ao Ni, Cr, Ti e outros (NUSSBAUM, 1988; BIANCHI *et al.*, 2001).

Obtido por intermédio da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões, temperaturas o nitreto cúbico de boro possui elevada dureza (K100 = 4700 *Knoop*), e independente da orientação dos cristais, possui vantagens na aplicação quando comparado ao diamante, devido à possibilidade de usinagem de metais ferrosos. Isso porque, apesar da extrema dureza do diamante (K100 = 7000 *Knoop*), o seu emprego na usinagem de aços, principalmente hipoeutéticos, é dificultado pela tendência do carbono existente na estrutura cristalina do diamante difundir-se no ferro, sob condições de pressão e temperatura usuais de usinagem (BERTALAN, 1997, FELIPE JR., 1992). Além disto, quando comparado ao diamante, o CBN possui uma elevada resistência à temperatura. Enquanto que no diamante a grafitização ocorre a partir de 900°C, já o nitreto cúbico de boro, à pressão atmosférica, apresenta estabilidade até 2000°C. Segundo Bertalan (1997) a queda acentuada da dureza do diamante com o aumento de temperatura ocorre a partir de 500°C. Em 800°C tal dureza já é inferior à do CBN na mesma temperatura.

Segundo Bianchi e Oliveira (1993) o desgaste do ligante está associado à geometria do cavaco produzido. Desta maneira, a variação das condições de retificação é responsável por modificar a geometria média dos cavacos, aumentando assim a permanência do grão abrasivo na superfície do rebolo ou promovendo sua saída. Este mecanismo permite o controle das características topográficas do rebolo pela influência da geometria do cavaco sobre o ligante.

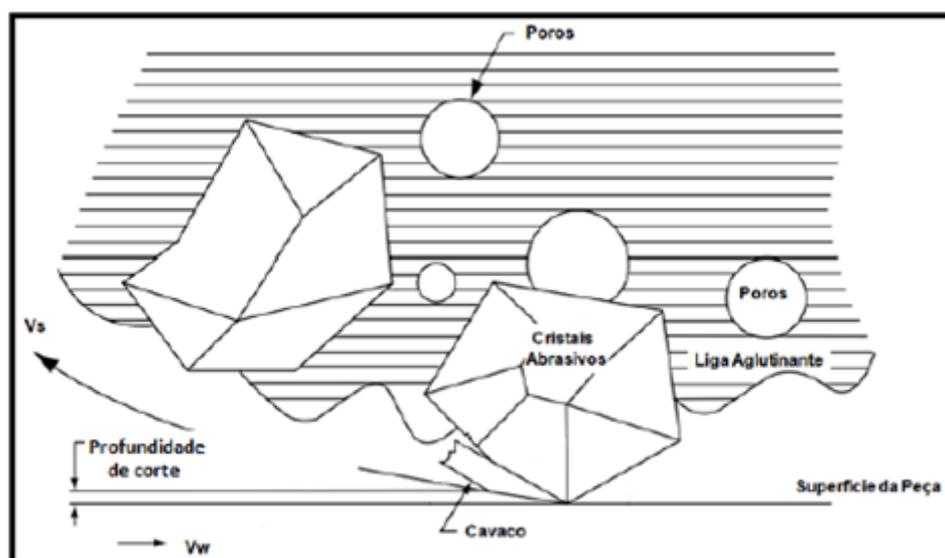
Conforme Jackson *et al* (2001) um aumento da velocidade do rebolo pode acarretar uma melhoria da qualidade da peça ou um aumento da produtividade. E quando a taxa de remoção de material também é aumentada, a força tangencial, que também é crescente, promove um aumento maior na potência de retificação. No entanto, a quantidade de energia térmica gerada na peça é menor do que na situação inicial quando se tem o mesmo volume de peça usinada, apesar da velocidade de corte e da taxa de remoção de material aumentar. Estas

considerações comprovam que a produtividade da usinagem pode ser aumentada empregando-se retificação de alta velocidade sem, porém, ter que gerar efeitos térmicos indesejáveis em componentes retificados. Neste caso, a ação do refrigerante e a natureza do grão abrasivo são de extrema importância para dissipar o calor gerado e com isso assegurar o acabamento e a integridade da superfície da peça retificada, bem como a vida do rebolo.

3.1.1 Características e propriedades dos rebolos

O rebolo é uma ferramenta de corte capaz de promover na peça retificada qualidade superficial desejada por meio da remoção do cavaco. A superfície do rebolo é composta 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). A Figura 1 mostra os elementos que compõem a ferramenta de corte que são distinguidos por suas formas, tamanhos e características de fabricação YOUSSEF; EL HOFY (2008).

Figura 1 - Composição da ferramenta de corte



Fonte: Youssef; El Hofy, 2008

A ferramenta de corte juntamente com os parâmetros de distribuição das arestas de corte sobre a superfície do rebolo, da força de corte e da velocidade do rebolo influencia o desempenho do processo de retificação (CHEN e LIMCHICHOL, 2006). Segundo Bianchi *et al.* (2001) as especificações do rebolo e a escolha adequada das condições de usinagem são

fatores que visam otimizar a vida útil da ferramenta garantindo maior capacidade de remoção de material.

Durante a operação de retificação o perfil do rebolo tem papel importante na interação da ferramenta com a peça. E de acordo Hecher, Ramoneda e Liang (2003) o parâmetro de superfície mais importante para o rebolo no processo de remoção do cavaco é a distribuição das arestas de corte, e de acordo Oliveira, Dornfeld e Winter (1994) sofrem mudanças ao longo do processo devido às irregularidades provocadas pela diferença no volume de material removido e pelas forças de corte que podem variar ao longo da operação.

Conforme Paula (2007) material do grão abrasivo; tipo de ligante; granulação (tamanho do grão); estrutura e a dureza do rebolo determinam a eficiência da ferramenta de corte.

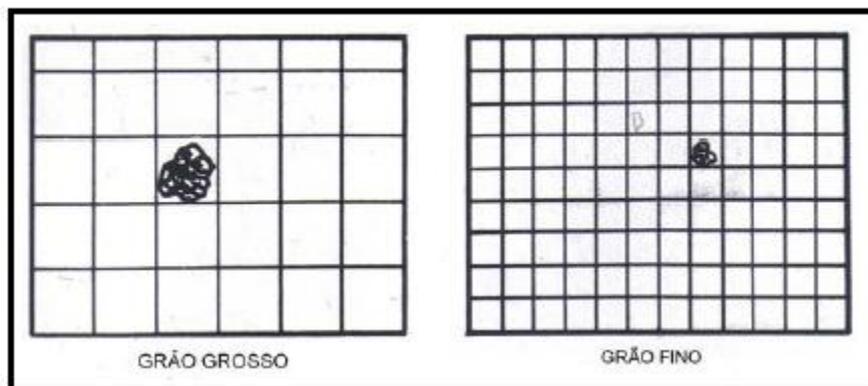
Além do mais, Fernandes (2007) mostra que o desempenho do rebolo está ligado a outras duas propriedades que são a friabilidade e a tenacidade. A tenacidade está relacionada com a energia necessária para fraturar um grão. Já a friabilidade esta relacionada com a facilidade para se quebrar um grão abrasivo submetido a determinado esforço, segundo Youssef e El Hofy (2008) friabilidade alta indica baixa resistência à fratura.

3.1.2. Tamanho do grão abrasivo

Conforme Stemmer (1992), os grãos são classificados pela norma ANSI Standard B74. 12-1977 “*Specification for Size of Abrasive Grain*”, que determina o tamanho do grão em mesh, ou seja, define a quantidade de furos por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos durante o processo de classificação.

Conforme Malkin (1989), a classificação do tamanho do grão é realizada pelo método do peneiramento. Este método consiste em passar os grãos por uma sequência de cinco peneiras, normalmente com aberturas reduzidas num fator $(2)^{\frac{1}{2}}$. Cada peneira deve reter certa quantidade de grãos, de modo que a peneira que reter a maior porcentagem de grãos indicará o número do grão. Assim, observa-se que não há um tamanho exato de grão e sim uma faixa de dimensões. A Figura 2 apresenta um esquema do peneiramento do grão abrasivo.

Figura 2 - Sistema de classificação de grãos abrasivos por peneiramento



Fonte: Krar, 1994

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2003), na operação de desbaste os rebolos com grãos grossos são recomendados. Já rebolos com grãos mais finos possibilitam a obtenção de acabamento superior, dentro de apertadas faixas de tolerância dimensional.

3.1.3 Dureza do rebolo

Malkin (1989) alega que na indústria em geral, utiliza-se rebolos com durezas intermediárias. E segundo Nussbaum (1988), a dureza de um rebolo está relacionada à dificuldade de remoção dos grãos abrasivos de sua superfície, ou ainda, à dificuldade de proporcionar o rompimento entre o grão e o material aglomerante. Esta dureza é diretamente dependente das propriedades mecânicas do material aglomerante, pois se este possuir elevada resistência mecânica reduzirá a possibilidade de ruptura dos grãos abrasivos, devido a uma satisfatória acomodação dos impactos sofridos pelo rebolo. Ademais, uma elevada resistência ao desgaste do material aglomerante dificulta a remoção de grãos inteiros, pois desta maneira a ancoragem dos grãos se mantém estável durante toda a vida do rebolo. Assim, observa-se que as características do material aglomerante são fundamentais para determinar a dureza dos rebolos e a classificação quanto a dureza do rebolo é feita por letras que vão de A a Z em ordem crescente de dureza. A Tabela 1 apresenta a classificação da dureza do rebolo, onde a letra A representa materiais de menor dureza e a letra Z materiais de dureza mais elevada.

Tabela 1- Representação da dureza do rebolo

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

Fonte: Youssef e El Hofy, 2008 (adaptada)

Geralmente, rebolos qualificados moles são empregados na retificação de aços endurecidos tratados termicamente, enquanto rebolos duros são aplicados na usinagem de aços moles. Esta técnica é adotada pelo fato de que sob as mesmas condições de usinagem, rebolos duros tendem a gerar mais calor e vibração que os moles. Isso ocorre, pois a alta resistência ao desgaste do ligante impossibilita a expulsão dos grãos, mesmo quando estes já estão cegos, gerando superfícies planas de corte aumentando desta forma o atrito do rebolo com a peça. A produção excessiva de calor se não controlada, pode gerar danos térmicos à peça, tais como desvios dimensionais e transformações de fase, resultando no descarte da mesma. No tocante aos rebolos moles, sabe-se que estes sofrem auto-afiação durante o processo de usinagem. Isto ocorre, pois o rebolo perde os grãos cegos que proporcionam a quebra de novos, gerando deste modo novas arestas cortantes (KING e HAHN, 1986 apud HASSUI, 2002).

3.1.4 Estrutura do rebolo

Conforme Mello (2011), a formação do rebolo está ligada com os espaços vazios entre os grãos abrasivos e como estes estão distribuídos sobre sua superfície e o rebolo poder ter estrutura 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.

Frequentemente a estrutura do rebolo é identificada por números que irão classificar o rebolo que possui uma estrutura aberta, média ou aquele que tem estrutura fechada de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Representação da estrutura do rebolo

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

Fonte: Mello 2011, (adaptada)

Conforme King e Hahn (1986) apud Hassui (2002) uma porosidade ideal é aquela capaz de estar suficientemente aberta para proporcionar a remoção do cavaco e a entrada do fluido de corte na região de corte, mas por outro lado, suficientemente fechada para garantir um número mínimo de grãos abrasivos atuando na remoção do material. Ressalta-se que uma estrutura fechada apresenta maior número de grãos em contato com a peça durante o corte, fato que proporciona melhor acabamento, pois cada grão é responsável pela retirada de uma quantidade menor de material. Porém, neste caso existe uma tendência à queima e ao empastamento, devido à dificuldade de retirada do cavaco da região de corte.

3.2 Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem que utiliza partículas cerâmicas abrasivas duras como meio de corte (MALKIN, 1989). A remoção de material da peça que se deseja usinar ocorre pela ação dessas partículas cerâmicas abrasivas que possuem alta dureza e arestas com orientações e formas irregulares (MACHADO *et al.*, 2009).

A necessidade atual é produzir peças com elevados padrões de exigências para as diversas áreas industriais com tolerâncias cada vez mais apertadas e acabamento superficial de alta qualidade. Diante desse fato, o processo de retificação ocupa grande destaque nas operações de usinagem usadas nos diversos setores industriais no qual é preciso grande produção de peças, com precisão elevada, através da remoção de sobre-metal em peças com geometrias especiais, com o intuito de promover geometria desejada e integridade superficial que outros processos de usinagem convencional ou não convencionais não são capazes de realizar (SHAW, 1996).

O processo de retificação tem papel importante na etapa final de produção de peças com alta precisão. Isto faz com que esta operação seja geralmente uma das fases mais caras de

todo o processo de fabricação (XIAO, MALKIN e DANAI, 1992). No geral, as operações destinadas ao acabamento exercem grande importância nos processos de produção, pois necessitam de intenso trabalho e precisão por partes das pessoas envolvidas, estas ações requerem 15% do custo total de fabricação e caso haja alguma falha durante esta etapa do processo todo o sistema produtivo terá o seu alto valor agregado prejudicado (GORANA, JAIN e LAL, 2004).

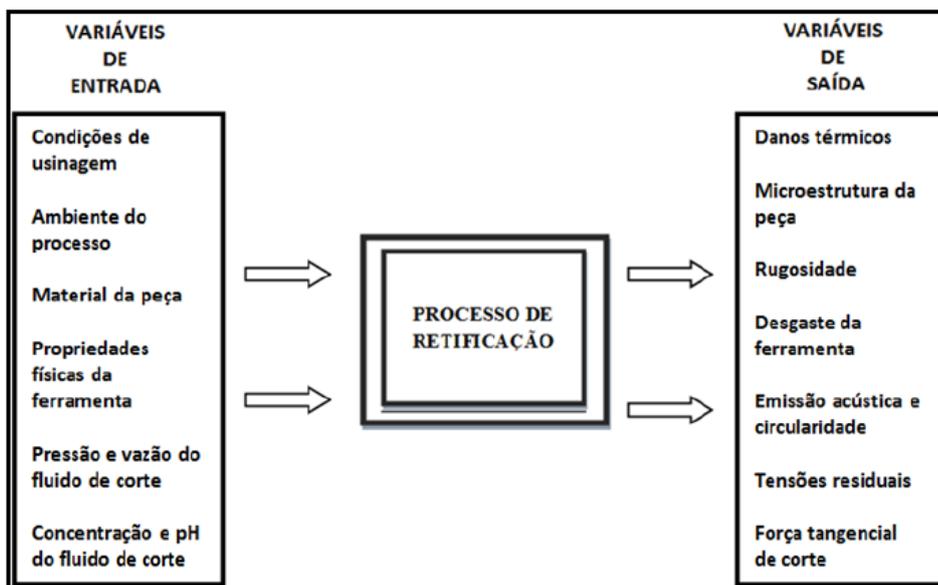
Com isso, este procedimento apresenta um grande número de parâmetros e variáveis associadas. O processo retificação é considerado uma das atividades mais complexas do processo de usinagem já que é difícil obter não só a reprodutibilidade, embora nas mesmas condições de retificação os diversos parâmetros influenciam uns aos outros (LEE e KIM, 2001; BIANCHI, ALVES e AGUIAR, 2008).

Por outro lado, estas inúmeras variáveis e parâmetros são compreendidos com vital importância para a devida seleção das ferramentas e das condições de usinagem, com o intuito de obter produtos que satisfaçam os padrões de qualidade, além de manter aceitáveis os custos de produção (YOUSSEF e EL HOFY, 2008).

O processo de retificação possui diversas vantagens tais como: elevada exatidão das peças, altas taxas de remoção de material, alívio de tensões localizadas, usinagem de materiais duros ou frágeis e a remoção de camadas superficiais que possam estar alteradas e danificadas. No entanto, como qualquer outro processo de usinagem a retificação tem suas desvantagens, sendo os mais recorrentes as vibrações excessivas, danos térmicos na peça, desgaste da ferramenta abrasiva e do difícil controle da rugosidade. (MARINESCU *et al.*, 2007).

A Figura 3 apresenta uma abordagem de sistema que distingue as variáveis de entrada e saída do processo de retificação. De acordo com Tonshoff, Frielmuth e Becher (2002) uma modelagem exata do processo com o intuito de prever os resultados de entrada e saída são difíceis devido à grande complexidade dos processos abrasivos que apresentam um grande número de variáveis.

Figura 3 - Processo de retificação em uma abordagem de sistema



Fonte: Tonshoff, Frielmuth e Becher, 2002 (adaptada)

Segundo Tonshoff, Frielmuth e Becher (2002) a ferramenta de corte com suas propriedades físicas, as condições de usinagem, o método de lubrificação, o ambiente de processo, o líquido de lubri-refrigeração e as propriedades da peça inacabada são considerados com entradas do processo e são dadas pelo próprio sistema. No entanto, o operador ou o programa receberam os outros parâmetros ou grandezas físicas com o intuito de alcançar o resultado desejado para o trabalho requerido. Já para as propriedades de microestrutura da peça, desgaste da ferramenta abrasiva e outras características da peça que avaliam o resultado final do processo são considerados com resultados de saída do sistema.

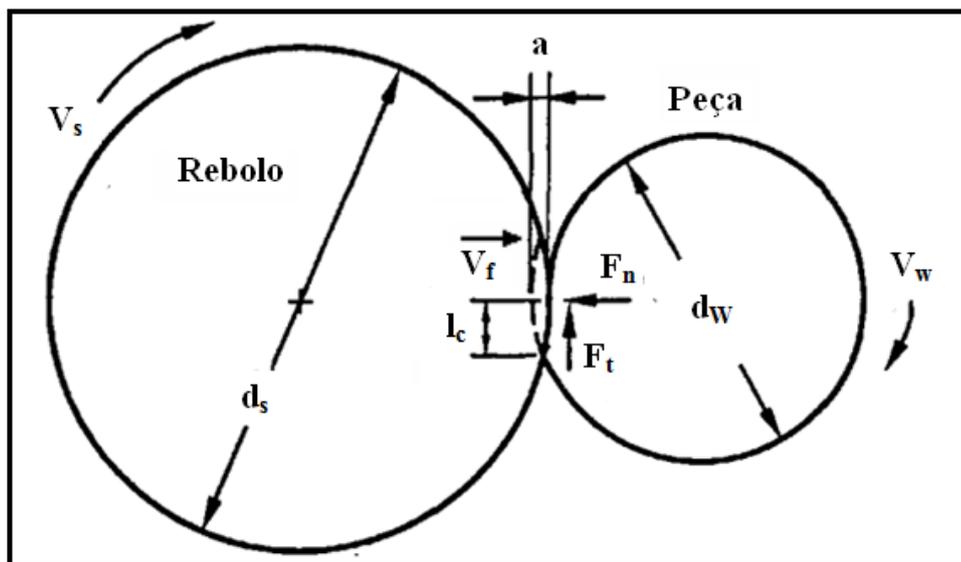
3.2.1 Características do processo de retificação cilíndrica de mergulho

O processo de retificação cilíndrica de mergulho consiste no contato de um rebolo com alta velocidade periférica com a superfície de uma peça em rotação, no entanto em sentido contrário (MALKIN; CHIU 1993). Além do mais, este processo é usado quando a relação espessura do rebolo é maior do que o comprimento da peça a ser retificada e também quando não se utiliza o movimento da mesa de tal forma que se trabalhe somente com os avanços do rebolo que se processam sobre a peça de forma contínua (MELLO, 2011).

A Figura 4 apresenta o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho no qual é composto por: profundidade de corte a comprimento de contato lc , correspondente ao final do ciclo de retificação, com velocidade de corte da ferramenta Vs , 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. Essas são as variáveis que caracterizam a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Figura 4 - Variáveis do processo da retificação cilíndrica de mergulho.

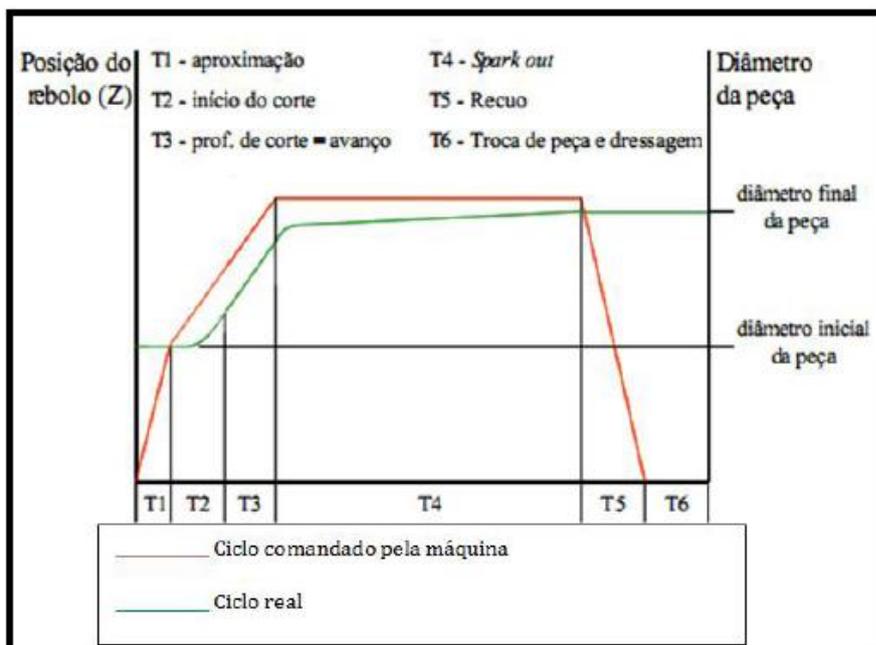


Fonte: Malkin e Chiu, 1993 (adaptada)

3.2.2 Etapas de produção da retificação cilíndrica de mergulho

A Figura 5 mostra as etapas da retificação cilíndrica de mergulho, junto com as séries de tarefas que englobam o período de fixação da peça na máquina até sua saída conforme especificações preestabelecidas (MALKIN e CHIU, 1993; ARAUJO, 2010).

Figura 5 - Ciclo de trabalho do processo de retificação cilíndrica de mergulho



Fonte: Malkin e Chiu, 1993 (adaptada)

O ciclo da retificação cilíndrica de mergulho é composto por quatro fases que mostram as seqüências das tarefas de fixação e saída da peça na máquina. A primeira fase T_1 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 T_2 determina o início do corte, momento onde há os primeiros avanços da ferramenta sobre a superfície da peça e as deformações elásticas na mesma. Na fase T_3 tem-se a profundidade total de corte durante o ciclo de retificação acompanhada pela remoção do material. A quarta fase T_4 corresponde à fase do centelhamento também denominada de “*spark out*”, que ocorre quando a peça chega a sua dimensão final. Conforme, Hassui e Diniz (2003) nesta etapa o rebolo permanece na interface da peça por alguns segundos para a recuperação da deformação elástica que ocorreu na segunda fase e para a completa remoção do volume do material de maneira a se obter a superfície desejada. Finalmente nas fases T_5 e T_6 ocorre à retração do rebolo e a retirada da peça com possível dressagem.

3.2.3 Comprimento de contato l_c

O comprimento de contato ou arco (l_c) é um dos parâmetros mais usado e importante aplicado na retificação, que define a extensão de contato entre a peça e o rebolo ao longo da operação de retificação. Segundo Malkin (1989), o equacionamento do comprimento de contato despreza as deformações e movimentos envolvidos no processo. Neste equacionamento temos a profundidade de corte a e o diâmetro d_s do rebolo, conforme Equação 1.

$$l_c = (a \cdot d_s)^{1/2} \quad (1)$$

3.2.4 Diâmetro equivalente (d_e)

King e Hahn (1986) apud Hassui (2002) garantem que o comprimento de contato (l_c) sofre influência causada pela diferença de curvatura do rebolo e da peça. Por isto, foi possível estabelecer o diâmetro equivalente capaz de determinar o grau com que a superfície do rebolo e da peça se encaixa. No caso da retificação cilíndrica, este parâmetro mostra que o diâmetro do rebolo usado em uma retificação tangencial plana deve ter para proporcionar a mesma geometria de corte e o mesmo comprimento de contato, conforme a Equação 2.

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

Onde:

d_s = diâmetro do rebolo;

d_w = diâmetro da peça.

Segundo Malkin (1989), o sinal positivo na equação do diâmetro equivalente representa a operação cilíndrica externa enquanto o sinal negativo a retificação cilíndrica interna. E no caso da retificação plana, d_w assume valor infinito.

3.2.5 Espessura equivalente de corte (h_e)

Conforme Peters e Decneut (1975) apud Hassui (2002), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) é obtida por intermédio da espessura da camada de material retirada pelo rebolo ao completar uma volta completa. De posse deste parâmetro pode-se quantificar uma condição de trabalho que pode ser definida como a relação entre a taxa de remoção específica do material (Q_w) e a velocidade periférica do rebolo (V_s). Já a espessura de corte pode ser obtida como função dos parâmetros de entrada V_f , conforme Equação 3.

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{V_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot V_f}{60 \cdot 1000 \cdot V_s} \quad (3)$$

Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte se relaciona de forma direta com o comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas no processo tais como: forças de corte, rugosidade, topografia da ferramenta entre outras.

Diniz *et al.* (2003), atesta que a vida do rebolo diminui quando um aumento na espessura equivalente reflete no aumento nos valores das forças de corte e rugosidade.

3.2.5 Profundidade de corte (a)

A área de contato entre o rebolo e a peça é ampliada pela escolha de uma profundidade de corte elevada. Esta escolha aumenta consequentemente o número de grãos em contato com a superfície da peça que esta sendo usinada. Além do que, uma profundidade de corte maior gera uma espessura de corte equivalente maior, como já foi visto na Equação 3. Um acréscimo das forças de corte é causado pelos elevados valores de h_{eq} os quais são responsáveis por causar deformações entre a ferramenta e a peça (FERNANDES, 2007).

Morgan e Rowe (1993) apud Catai (2004) garantem que a integridade superficial da peça usinada é prejudicada pelas defleções ocorridas durante o movimento de avanço da ferramenta abrasiva. Desta maneira, o tipo do rebolo e de material que está sendo usado depende da profundidade de corte que deve ser empregada durante o processo.

3.2.6 Velocidade de mergulho (V_f)

A taxa de remoção de material ocorrida durante o processo de retificação é definida como velocidade de mergulho. Desta forma, esta variável sofre influência da quantidade de material a ser removida, do acabamento desejado, da rigidez da máquina, do material da peça e da quantidade de fluido de corte envolvido no sistema (FERNANDES, 2007).

Segundo Baldo (1994), o início do processo de retificação ou desbaste, remove aproximadamente 95% do material da peça, sendo que para este fim a velocidade de mergulho deve estar entre 0,4 a 2,0 mm/mim. Já para a operação de acabamento, a velocidade de mergulho de estar entre 0,1 a 0,3 mm/min.

3.2.7 Velocidade de corte (V_s)

Segundo Graf (2004), velocidade de corte é responsável por alterar as variáveis de força tangencial de corte, desvios de circularidade, desgaste diametral da ferramenta e a rugosidade conforme Equação 4.

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (4)$$

Onde a velocidade de corte do rebolo m/s é representada por:

d_s é o diâmetro da peça;

n_s é a rotação do rebolo.

Bianchi *et al* (1996) e Graf (2004) garantem que a exposição de um número maior de arestas cortantes ativas por unidade de tempo, resulta na redução da carga exercida sobre cada grão abrasivo quando a velocidade de corte (V_s) é aumentada. Isto pode ser visto pela redução dos valores da força tangencial de corte. Nestas condições de trabalho a dureza dinâmica do rebolo é aumentada pelo o fato dos grãos apresentarem friabilidade reduzida, isto é, apresentam uma resistência elevada quando sujeito às forças e impactos do processo.

3.2.8 Velocidade da peça (V_w)

Graf (2004) define que a velocidade periférica da peça na operação de retificação de mergulho, em m/mim é expressa da seguinte maneira conforme Equação 5.

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad (5)$$

Onde:

d_w é o diâmetro da peça;

n_w é a rotação da peça.

Graf (2004) ainda afirma que um aumento da taxa de remoção do material com a formação de cavacos mais grossos é provocado pelo aumento da velocidade da peça. Observa-se também que os valores da força tangencial de corte aumentam com o aumento da carga sobre cada grão. Desta maneira, o rebolo possui um comportamento com um aumento da velocidade de corte.

3.2.9 Aspectos tribológicos associados ao processo de retificação

De acordo com Marinescu *et al* (2004) a tribologia é a ciência que governa a usinagem por abrasão, além de permitir a análise da relação das informações referentes ao atrito, desgaste e ao processo de lubrificação.

O processo de retificação pode ser classificado em termos tribológicos como um processo abrasivo a dois corpos, no qual as partículas abrasivas são fixas à ferramenta e o movimento relativo é normalmente considerado como escorregamento/deslizamento puro. Na prática, o processo abrasivo a dois corpos envolve elementos do processo abrasivo a três corpos, pois os grãos aderidos ao rebolo se quebram ou se soltam. Sendo assim, esse fenômeno não é desejado e o efeito gerado por esse material solto durante a operação de retificação causa anomalias superficiais na peça retificada (ALVES, 2011).

Conforme Gates (1998) as terminologias de processos abrasivos a dois ou três corpos tendem a obsolescência, apesar da ampla discussão e utilização desses termos. Isso decorre do fato das diferentes interpretações desses dois conceitos.

De acordo com Hutchings (1992) após observar as condições e fenômenos macroscópicos foi possível definir termos padronizados menos susceptíveis à obsolescência tais como: abrasão de baixa tensão que mostra que quando a tensão de compressão das partículas não é ultrapassada sua integridade é mantida, e por fim abrasão de alta tensão que mostra que quando a tensão de compressão é ultrapassada ocorre sua ruptura durante o processo abrasivo. Dessa maneira, o desgaste abrasivo ocorre pelos mecanismos de fratura frágil ou deformação plástica.

A relação entre o rebolo, a peça, o fluido de corte e os resíduos gerados determinam as condições para ocorrer os processos tribológicos na região de contato e os efeitos combinados desses parâmetros influenciam de forma decisiva as características superficiais das peças retificadas (ALVES, 2011).

De acordo com Santos e Sales (2007), as variáveis usadas como parâmetros tribológicos são:

- ✓ A geometria do corte;
- ✓ As condições da formação do cavaco;
- ✓ As propriedades dos materiais da ferramenta e da peça;
- ✓ O tipo de fluidos e a forma de aplicação.

E com os resultados destas variáveis podem-se analisar os seguintes características:

- ✓ Força e potência de corte;
- ✓ Temperatura de usinagem;
- ✓ Avarias, desgaste e vida das ferramentas;
- ✓ Integridade superficial da peça.

3.3 Desgaste e topografia do rebolo

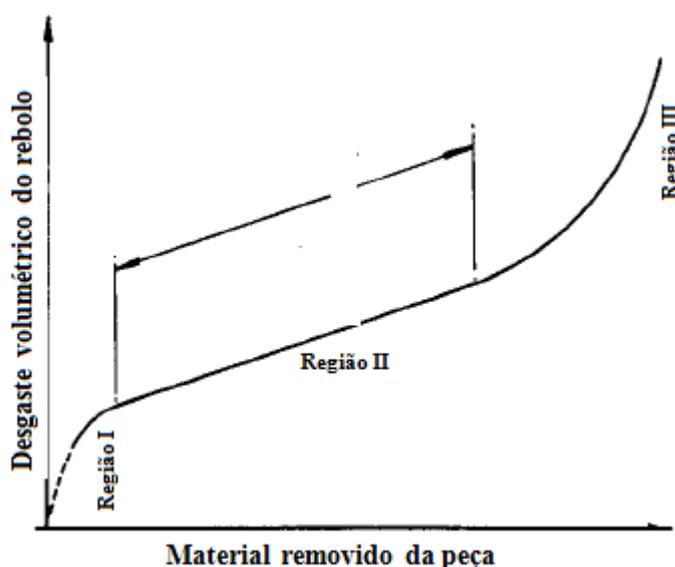
Os materiais retificados têm sua qualidade afetada diretamente pela topografia do rebolo e esta característica varia ao longo da vida útil do mesmo e pode ser influenciada principalmente pelo seu desgaste (HASSUI, 1997).

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

De acordo com Malkin (1989) o desgaste do rebolo está relacionado com a perda volumétrica de material. Este desgaste segundo Bianchi *et al* (2001) é provocado 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 aumentar sua vida útil e proporcionar maior capacidade de remoção do material.

Conforme Graham e Voutsadopoulos (1978) a curva teórica que representa o desgaste volumétrico do rebolo em função do material removido da peça pode ser dividida em três regiões apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Desgaste volumétrico do rebolo em função do material removido



Fonte: Graham e Voutsadopoulos, 1978 (adaptada)

A região I mostra o início do desgaste diametral do rebolo, que equivale ao 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, conforme inclinação da reta. Já a 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 dressagem do rebolo.

O rebolo possui um processo de desgaste complexo, isto ocorre devido a sua distribuição aleatória dos grãos, pois dessa forma, 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 e LIMCHIMCHOL 2006).

Além de que, 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).

Segundo Malkin (1989) o atrito entre o grão e a peça leva ao desgaste do rebolo pela perda de afiação e pelo aparecimento de regiões planas nos grãos. A fratura do ligante ocorre pelo desprendimento integral dos grãos. Já a fratura dos grãos 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.

3.4 Dressagem

Após um período longo de utilização o rebolo sofre desgaste o que ocasionará a perda da 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).

Contudo a operação de dressagem promove a parada de máquina, e é de grande importância estabelecer o momento adequado de realizar esta operação, evitando interrupções desnecessárias que podem levar a retirada excessiva de material do rebolo. No entanto, 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 à integridade da peça (MACHADO *et al.*, 2009).

Conforme Souza (2009), os dressadores são ferramentas que possuem certa 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.

No processo de retificação a operação de dressagem possui externa importância. Com isso, o processo de condicionamento do rebolo (dressagem e limpeza) determina a taxa de remoção de material, as forças de retificação, a qualidade da superfície e as propriedades materiais da zona de subsuperfície (WEGENER *et al.*, 2011).

A capacidade de remoção de material durante a operação de retificação determina a agressividade do rebolo. A palavra dressagem possui dois significados em inglês: “*truing*”, que significa o perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma, (isto é, a obtenção de concentricidade entre a superfície de trabalho e o eixo de rotação do rebolo) e “*dressing*”, que visa à remoção dos abrasivos desgastados e preparação do rebolo para se obter o desempenho desejado. Já nos rebolos convencionais, “*truing*” e “*dressing*” são realizados simultaneamente, ao passo que em rebolos superabrasivos estas operações são conduzidas de forma independente (OLIVEIRA e PURQUÉRIO, 1989).

Segundo Bianchi *et al* (1996) os critérios utilizados na retificação para definir o fim da vida de rebolos, isto é, a necessidade de realização de dressagem segue os seguintes passos:

- ✓ Acabamento da peça: em operações de mergulho a perda de agressividade leva ao aumento de temperatura e provoca um maior fluxo lateral do material durante a passagem do grão abrasivo. Este fenômeno gera o aumento da rugosidade da peça. Nas operações de passagem o desgaste volumétrico do rebolo provoca mudanças na geometria da área de trabalho, o que faz com que a rugosidade aumente;
- ✓ Erros dimensionais: a dressagem pode ser feita como uma forma de ter uma referência da posição da superfície do rebolo. Isto é comum em retificadoras de comando numérico;
- ✓ Erros de forma: o aumento da temperatura no contato rebolo peça, associada à falta de homogeneidade do material e rigidez não uniforme do sistema máquina ferramenta peça dispositivo resultam em variações na profundidade de corte que levam aos erros de forma. Os erros de forma também podem ocorrer nas

operações de mergulho, devido ao desgaste volumétrico do rebolo. Estes ocorrem de forma mais acentuada nos cantos do rebolo e em pequenos raios de curvatura;

- ✓ Forças elevadas: apesar de não ser uma grandeza normalmente utilizada como critério de fim de vida do rebolo, a força de retificação é a causadora de diversos problemas que exigem a dressagem do rebolo. Sistemas de monitoramento de potência podem ser utilizados para determinar o momento de dressagem do rebolo.
- ✓ Integridade superficial da peça: a temperatura na interface rebolo-peça aumenta com a perda da agressividade (perda de afiação). Tal elevação de temperatura pode provocar transformações na estrutura do material da peça, e o aparecimento de queimas ou trincas na superfície da peça ou até a elevação de tensões residuais;
- ✓ Vibrações: as vibrações do sistema peça-dispositivo estão relacionadas com fenômenos de auto-excitação que ocorrem principalmente quando a força de retificação aumenta. O rebolo gira a altas rotações e sofre desgaste diferenciado ao longo de seu perímetro devido a falhas de fabricação, o que provoca também variações das forças de corte ao longo da vida do rebolo. Tais variações dinâmicas excitam o sistema que começa a vibrar. A vibração pode chegar a tais níveis que inviabiliza a continuidade da operação.

3.5 Fluidos de corte

O cavaco formado durante o processo de usinagem, e o calor gerado ao longo do plano de cisalhamento primário e secundário, bem como calor produzido pela aresta de corte será dividido ou fracionado em frações que serão absorvidas pelo cavaco, ferramenta, fluido de corte e pela superfície do material usinado. Em regra, pode-se dizer que aproximadamente 75% do calor gerado nos processos de usinagem são provenientes de deformações e 25% oriundos do atrito da região de corte. Deste modo o calor gerado, cerca de 80% é dissipado pelo cavaco, 10% é dissipada pela ferramenta e outros 10% é absorvido pelo fluido de corte (BYERS, 2006).

Com o intuito de diminuir o calor gerado e melhorar condições de corte (redução do atrito na zona de corte) nos processos de corte, utilizam-se fluidos de diferentes tipos, conhecidos como fluidos de corte. El Baradie (1996) mostra a utilidade deste agente nos

processos de usinagem ao enfatizar que a redução na temperatura faz com que o desgaste da ferramenta seja menor, tendo a ferramenta uma vida útil maior.

Deste modo, a redução de temperatura na região de corte ou no sistema ferramenta/cavaco/peça pode ser feita conduzindo-se o calor para fora da zona de corte pelo meio da lubrificação adequada da interface cavaco/ferramenta. E quando aplicados de forma apropriada, os fluidos de corte podem aumentar a produtividade e reduzir custos, possibilitando o uso de maior velocidade de corte, maior taxa de avanço e maior profundidade de corte. Sendo assim, a aplicação efetiva do fluido pode também aumentar a vida útil da ferramenta, reduzir a rugosidade superficial, melhorar a precisão dimensional e alguns casos diminuir a potência exigida durante o processo (EL BARADIE, 1996).

Conforme Bianchi, Aguiar e Piubeli (2004), a utilização dos fluidos de corte pelo setor industrial é bem conhecido, porém nem sempre os utilizam-nos corretamente, conseqüentemente, perdas substanciais ocorrem durante o processo. Por isso, uma aplicação adequada do fluido deve ser cuidadosamente preparada para atender as necessidades de cada tipo de operação de retificação. Aguiar *et al* (2007), exibiram em sua pesquisa em lubri-refrigeração na retificação que com um escolha adequada do fluido e do método de aplicação pode-se reduzir significativamente a força de corte, rugosidade e o desgaste do rebolo.

Em contrapartida, alguns aspectos negativos são observados no que diz respeito às aplicações dos fluidos de corte durante os processos de usinagem. Assim como, o impacto do descarte dos fluidos ao meio ambiente e riscos oferecidos à saúde de operadores de máquinas expostos ao contato direto com estes fluidos. No entanto, as pesquisas na área de lubri-refrigerantes intensificaram-se com o objetivo de aperfeiçoar ao máximo o uso de fluidos de corte na indústria metal/mecânica. Os fatores levados em conta nos estudos são as análises dos custos relacionados aos fluidos de corte, questões ecológicas e preservação da saúde do ser humano (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

Conforme Stanford e Lister (2002), as empresas estão analisando alternativas para reduzir seu consumo de fluidos de corte e adotar métodos que permitam a reciclagem dos fluidos segundo as exigências das certificações de qualidade. Por outro lado, existem também algumas alternativas que procuram a eliminação completa dos fluidos de corte dos processos de fabricação. Desta forma, as considerações ambientais e da saúde das pessoas estão sendo colocadas como prioridade.

A formação de cavaco durante o processo de retificação acontece por intermédio da ação de várias arestas de corte dos grãos distribuídos e orientados de forma aleatória na estrutura do rebolo. Esta formação é acompanhada de um elevado consumo de energia. Durante as etapas de formação do cavaco (atrimento, cisalhamento e deformação plástica), grande parte da energia produzida é convertida em calor elevando as temperaturas na região de corte. E caso esta temperatura não for mantida dentro de níveis aceitáveis, verifica-se uma solicitação térmica da peça podendo haver o comprometimento da integridade superficial desta, por meio do surgimento de fissuras, distorções, tensões residuais elevadas e não-conformidades dimensionais (HRYNIEWICZ *et al.*, 2000). Segundo Marinescu *et al* (2007) o atrito que ocorre entre o grão abrasivo e a superfície da peça e também entre o cavaco e o grão abrasivo são parcialmente responsáveis pela geração deste calor durante o processo de retificação.

Com o intuito de atenuar a geração de calor os fluidos de corte são aplicados na zona de retificação. Dessa maneira, há uma redução do atrito na zona de corte, devido à ação de lubrificação do fluido. Isso faz com que se diminuam também os esforços e a potência de corte, pois parte do calor gerado é retirado dessa zona (refrigeração) (IRANI, RAUER e WARKNTIN, 2005; EBRELL *et al.*, 2000).

Conforme Ebbrell *et al* (2000), as três principais funções dos fluidos de corte quando aplicados aos processos de usinagem por abrasão são: o resfriamento do material na zona de corte, remoção de detritos provenientes da usinagem e a lubrificação da aresta de corte do grão. Contudo, estas funções são somente alcançadas quando existe uma correta seleção de fluido e aplicação adequada dos fluidos de corte na região de corte.

Bem como as funções já citadas, König e Klocke (1980) mencionam que os fluidos de corte são responsáveis por formar um filme protetor contra a corrosão na máquina-ferramenta e na peça.

3.5.1 Classificação dos fluidos de corte

A classificação dos fluidos de corte possui grande importância na área de pesquisas das indústrias, pois, nestas pesquisas são feitas comparações do desempenho de processos de usinagem com ou sem fluidos de corte, levando-se em consideração o desgaste da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Contudo, devido à grande variedade de operações, ferramentas, e combinações de parâmetros de corte, resultaram na evolução dos fluidos de corte em um conjunto complexo de óleos e aditivos. Essa evolução foi possível também pelo

desenvolvimento de fluidos mais eficientes e ecologicamente mais viáveis (STANFORD e LISTER, 2002).

Conforme Marinescu *et al* (2004) os fluidos de corte usados nos processos de usinagem por abrasão são classificados em três grupos: gases (ar, dióxido de carbono, ou gases inertes); não miscíveis em água (óleos integrais) e; solúveis ou miscíveis em água. Os fluidos à base de água são os melhores condutores de calor, no entanto tem baixa capacidade de lubrificação. Enquanto os óleos integrais são menos eficientes na condução de calor, porém, tem excepcional capacidade de lubrificação. A Tabela 3 apresenta uma classificação dos fluidos de base líquida, dividindo-os em classes, subclasses e grupos.

Tabela 3 Classificação dos fluidos para processamento de base líquida

CLASSES	SUB-CLASSES	GRUPOS
Óleos Integrais (óleos não miscíveis em água)	Óleos Naturais	Óleos animais, óleos vegetais óleos de peixe
	Óleos Minerais	Óleos parafínicos, óleos olefínicos óleos aromáticos
	Óleos Sintéticos	Óleos de hidrocarbonetos saturados, óleos de estrutura complexa
Fluidos a base de água	Soluções	Soluções de sais minerais, soluções sintéticas
	Emulsões	Emulsões de óleo (óleos solúveis), Emulsões Sintéticas

Fonte: Marinescu *et al.*, 2004

Além disso, Marinescu *et al* (2004) afirma que há um equívoco no uso do termo “processo de usinagem a seco”, uma vez que, na tribologia, um processo essencialmente a seco ocorreria apenas no vácuo, o que quase nunca ocorre nos processos de usinagem por abrasão. Contudo, a “abrasão a seco” se faz por meio do ar como fluido.

Segundo Irani, Rauer e Warkntin (2005) as características do processo de retificação podem ser otimizadas pela escolha correta do fluido de corte. A Tabela 4 apresenta a classificação elaborada para as calasses de fluidos de corte de acordo com, seu desempenho (1) ruim, (2) bom, (3) ótimo e (4) excelente.

Tabela 4 Características dos fluidos de corte no processo de retificação

	Sintético	Semi-sintético	Óleo solúvel	Óleo mineral
Calor removido	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Filtrabilidade	4	3	2	1
Danos - meio ambiente	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1

Fonte: Adaptado de Irani *et al.*, 2005

3.5.2 Óleos de corte puro ou integral

O emprego dos óleos minerais tem grande importância nas operações que necessitam de boa capacidade lubrificante e esses 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).

O óleo mineral pode reduzir o atrito, desgaste, poupar energia, prolongar a vida útil de uma máquina de serviço, e satisfazer requisitos de lubrificação sob as condições de trabalho rigoroso. (WANG, 2016).

Segundo Bianchi *et al* (2004) os óleos minerais podem ser utilizados na condição pura ou aditivado com aditivos químicos ou com compostos polares. Óleos minerais são compostos químicos a base de parafínica com cadeias aromáticas policíclicas que podem causar dermatites ou câncer. Contudo, os óleos minerais têm excelentes propriedades lubrificantes, anticorrosivas e longa vida útil. Além disso, eles apresentam menor poder refrigerante quando comparados com os fluidos de corte solúveis em água, devido ao seu calor específico ser cerca de metade em relação ao da água.

De acordo com Gonçalves (2008), os fluidos integrais podem ser usados durante muito tempo desde que sejam mantidos livres de contaminantes. O acúmulo de contaminantes provoca a degradação dos aditivos e das propriedades dos fluidos integrais, fazendo com que a vida útil desse fluido seja reduzida.

Conforme Novaski e Rios (2004), os compostos a base de óleos podem ser inclusas todas as formulações capazes de formar películas oleosas, lubrificantes e aderentes. Normalmente tais compostos são de origem mineral, vegetal ou sintético. Estas substâncias

podem ser usadas no estado puro, ou ainda aditivado com aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos ou inativos.

Segundo Webster, Cui e Mindek (1995) os óleos minerais possuem, em sua grande maioria, base parafínica, ou seja, compostos aromáticos policíclicos, que se não forem destruídos durante o processo de formação do óleo de corte por meio de forte hidrogenação, contudo, esses compostos podem causar câncer e dermatites.

König e Klocke (1980) comprovaram em seus experimentos que óleos minerais possuem boas propriedades contra a corrosão e, devido ao refino praticamente não apresentam contaminação. Além de tudo, estes necessitam também da adição de antiespumantes para suprimir a formação de espuma em sua superfície no reservatório. No entanto, estes óleos apresentam a desvantagem no que diz respeito à refrigeração relativamente baixa, devido à baixa condutividade térmica.

Os óleos de base mineral possuem difícil degradabilidade, além disso, podem trazer sérios danos ambientais quando não manuseados adequadamente. O descarte incorreto desses fluidos prejudica o meio ambiente, devido ao fato da formação de uma fina camada sobre a superfície da água que bloqueia a passagem de ar e luz que prejudica a fotossíntese de algas e plantas impedindo a respiração dos animais aquáticos (Belinato, 2010).

3.5.3 Fluidos de corte solúveis em água

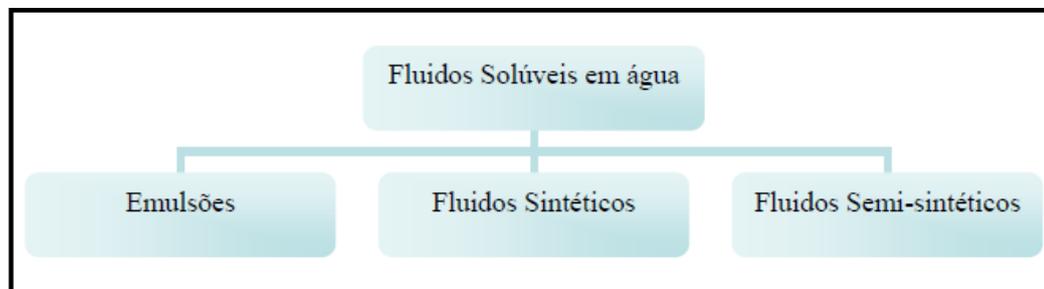
De acordo com El Baradie (1996) os fluidos de corte solúveis em água são essencialmente usados nos processos a altas velocidades, pois possuem melhor capacidade de refrigeração nestas condições. Esses fluidos são melhores também no resfriamento dos componentes evitando distorções térmicas.

Essas misturas variam entre emulsões e soluções dependendo da constituição básica do fluido de corte solúvel concentrado, da presença e da quantidade de emulgadores no concentrado (EL BARADIE, 1996). Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2003), os emulgadores são conhecidos com emulsificadores, essas substâncias são capazes de reduzir a tensão superficial da água, com isso facilitando a dispersão do óleo na água, formando uma emulsão estável.

De acordo com a taxa de diluição e da composição do concentrado do fluido solúvel, o fluido de corte pode apresentar uma refrigeração eficiente aliado a um moderado poder lubrificante, podendo dessa forma, ser empregado em operações gerais de usinagem e com isso minimizar os efeitos negativos de origem térmica. Esse tipo de fluido de corte pode ser

classificado em óleos emulsionáveis, fluidos químicos (sintéticos), ou fluidos semi-sintéticos (EL BARADIE, 1996). A Figura 7 ilustra essa classificação desse tipo de fluido de corte.

Figura 7 - Classificação dos fluidos solúveis em água



Fonte: El Baradie, 1996 (adaptada)

As emulsões ou óleos emulsificantes são mais eficazes em quase todas as operações de usinagem, pois sua aplicação em 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).

Conforme Maia *et al* (2007) as emulsões podem ter suas propriedades físico-químicas pela seleção criteriosa dos aditivos, tais como biocidas, antiespumantes, emulgadores, anticorrosivos dentre outros. Porém, as características lubrificantes e refrigerantes também podem ser alteradas por meio da concentração de água, que vai depender das necessidades do processo. Segundo Brinksmeir, Heinzl e Wittman (1999) a concentração de óleo em emulsões no processo de retificação deve estar entre 2 e 15%.

Os fluidos sintéticos possuem alto poder de remoção de calor. De acordo com El Baradie (1996a) estes fluidos são compostos por materiais inorgânicos e outros aditivos dissolvidos em água sem a presença de óleo mineral. Dessa maneira o aspecto do lubrificante é comprometido se comparado com os demais fluidos.

Normalmente os fluidos sintéticos possuem bom controle dimensional, rápida dissipação de calor, excelente poder detergente e boa visibilidade da região de corte, facilidade no preparo da solução e elevada resistência à oxidação do fluido e à corrosão. Estas substâncias apresentam elevada estabilidade microbiológica, não necessitando ser

periodicamente descartado devido ao ataque de bactérias. Estas características proporcionam uma redução de tempo de máquina parada para limpeza e reabastecimento do reservatório (NOVASKI e RIOS, 2004; DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

De acordo com Bianchi, Aguiar e Piubeli (2004) as principais desvantagens da utilização desta categoria de fluidos estão relacionadas ao baixo poder lubrificante, a formação de compostos insolúveis e de espuma para determinadas operações de usinagem, fatos minimizados com a adição de anti-espumantes e aditivos lubrificantes.

De acordo com Stanford e Lister (2002) os fluidos sintéticos possuem grande resistência ao ataque de bactérias, e isso, proporciona excelente propriedade de refrigeração, apesar de possuir uma capacidade realmente baixa de lubrificação. Suas limitações incluem a necessidade de controlar a concentração de fluido, alterada por fatores como evaporação de água e formação de resíduos. Esses fluidos apresentam maiores custos de aquisição e descarte, devido à difícil tarefa de se separar esses compostos em fluido efluentes.

Conforme Fernandes (2007) os fluidos de corte semi-sintéticos formam uma categoria que garante boa capacidade de lubrificação com menor quantidade de óleo, para isto combina as características dos fluidos sintéticos e dos emulsionáveis. Dessa maneira este fluido acaba influenciando na melhoria da vida do sistema de lubri-refrigeração.

Stanford e Lister (2002) evidenciam que as características operacionais dos fluidos semi-sintéticos são tais que remove o calor mais rápido, boa resistência a bactérias, melhor poder lubrificante e resistência à corrosão, que os fluidos de origem sintética. Contudo, a capacidade de lubrificação desses fluidos é inferior à capacidade dos óleos integrais e dos óleos emulsionáveis, embora estes sejam suscetíveis à contaminação e à formação de espuma em sua superfície.

3.5.4 Função dos fluidos de corte

De acordo com Irani, Rauer e Warkntin (2005) a presença dos danos térmicos na zona de corte durante o processo de retificação é um dos principais fatores que reduzem a taxa de produção da retificação, no entanto isso pode ser atenuado com o uso dos fluidos de corte que têm a capacidade lubrificante e refrigerante, além de remover os cavacos da região de corte, desobstruindo as porosidades.

Segundo Webster, Cui e Mindek (1995) a qualidade superficial e a manutenção da vida útil da ferramenta são dois parâmetros que têm grande importância na demanda pela aplicação dos fluidos de corte. Além disso, a aplicação dos fluidos de corte de maneira eficaz

na zona de atrito peça/rebolo pode conforme Monici *et al* (2006) reduzir as forças de corte em cerca 50% sobre determinadas condições de usinagem.

De acordo com Maia *et al* (2007) além da lubrificação e refrigeração outras características são importantes, tais como:

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

Segundo França (2005) a relevante função do fluido de corte é promover a refrigeração do processo. Dessa forma é possível que o calor produzido entre a superfície da peça e da ferramenta seja reduzido, possibilitando um aumento da vida útil da ferramenta e garantindo maior precisão dimensional pela redução das distorções térmicas ocorridas durante o processo. Contudo, a ação da refrigeração não tem um efeito significativo no acabamento superficial da peça. Assim, uma alternativa é o óleo lubrificante mineral que de acordo com El Baradie (1996a) possui características exigidas para lubrificar a interface peça e ferramenta.

A técnica utilizada para a aplicação do fluido de corte, isto é, na zona onde ocorre o contato entre a peça a ser retificada e o rebolo, tem grande influência de lubrificação e refrigeração do processo. Além disso, várias pesquisas estão sendo desenvolvidas nesse campo de atuação, compreendendo as possíveis variáveis na aplicação do fluido de corte (SIMÕES, 2012).

De acordo com Klocke (2009), uma fina camada de fluido entre a superfície de corte do grão abrasivo e a região a ser retificada garante a aplicação eficiente do fluido de corte, com o intuito de minimizar a adesão entre essas duas regiões. Para esse fim, o fluido deve vencer a barreira de ar existente entre o bocal e a peça. A velocidade do jato de fluido deve ser suficientemente alta para que o fluido chegue à zona de corte sem que ocorra a dispersão.

Conforme Guo e Chand (1998) a vazão útil de fluido, isto é, a vazão ao longo da zona de retificação tem relação com a profundidade e largura de corte, porosidade e velocidade periférica do rebolo.

De acordo com Irani, Rauer e Warkntin (2005) a posição do bocal na qual o fluido é aplicado e a porosidade do rebolo são os principais parâmetros que influenciam a vazão útil. Em seu trabalho, recomendam ainda que o aumento da vazão não necessariamente provoque redução da fricção na interface de contato entre a peça e o rebolo.

Conforme Webster, Cui e Mindek (1995) a temperatura na região de corte é reduzida de forma significativa por meio da incidência do jato de fluido de maneira direta em cima da região de corte, no entanto, altas velocidades do jato de fluido são necessárias para sua penetração efetiva na região de corte, de maneira que a velocidade periférica da ferramenta deve ter velocidade comparável à do jato de fluido.

3.6 Parâmetros de superfície

A mudança técnica na metrologia de superfície tem sido impulsionada pela necessidade de tornar os processos de fabricação mais eficiente tanto no ponto de vista econômico, quanto no ponto de vista ecológico, além de garantir maior desempenho e valor agregado à peça produzida (JIANG e WHITEHOUSE, 2012).

De acordo com Jiang e Whitehouse (2012) ocorreu um avanço tecnológico sobre a metrologia de superfície. Essa evolução aconteceu no ano de 1920 quando a textura de uma superfície era considerada incidental, até a primeira década do século XXI, quando conciliaram valor à forma e textura através de superfícies produzidas com a ajuda de computadores os quais introduziram algumas peculiaridades geométricas predeterminadas.

Muralikrishnan e Raja (2004) destacam a necessidade, dentro da engenharia de superfície, da avaliação das práticas industriais atuais e a identificação das ideias que proporcionarão um avanço na metrologia da superfície para aplicação em correlações funcionais e diagnósticos dos processos de manufatura.

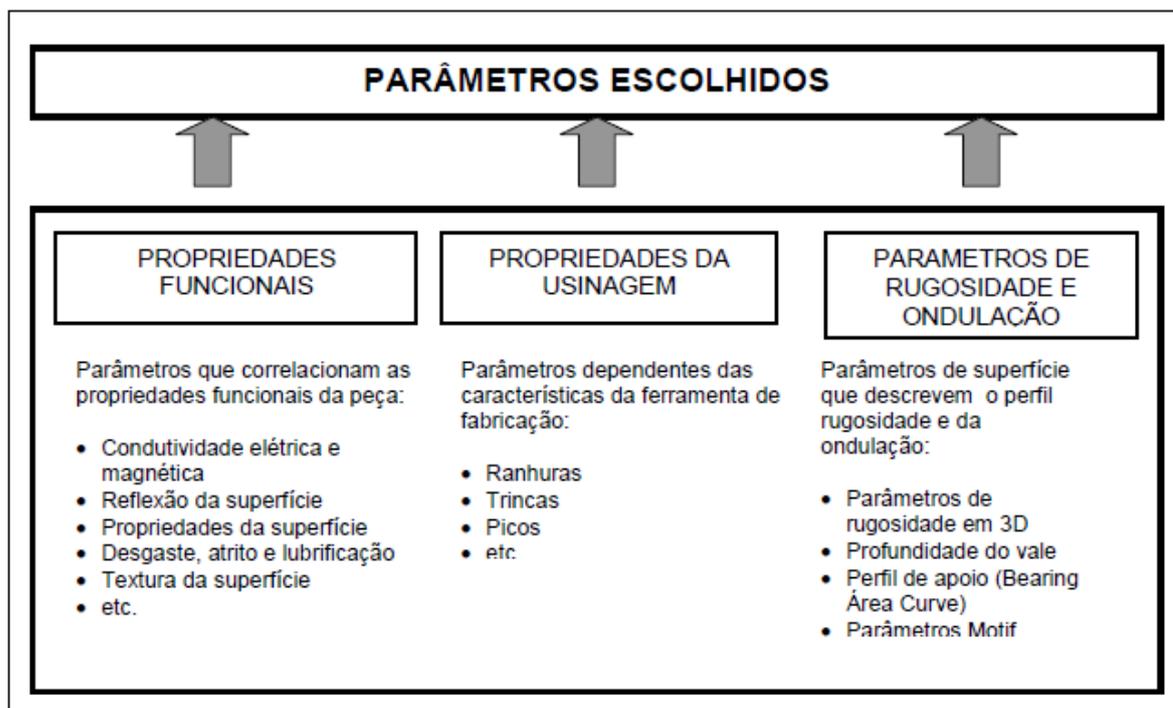
De Lonardo, Lucca e Chiffre, (2002) observaram as tendências emergentes da metrologia da superfície e dentro desse contexto está a otimização do processo de manufatura para produzir uma variação na geometria e/ou nas propriedades da superfície com o intuito de obter uma função específica. Essas superfícies são classificadas como *Engineered Surfaces*. Diante desse conceito o desenvolvimento do processo de produção de uma superfície visando sua função pode ser tratado dentro do campo da engenharia como projeto de uma superfície.

De acordo com Whitehouse (1981) a demanda por uma superfície funcional é uma realidade dentro da prática da engenharia, entretanto, o problema está na determinação de parâmetros que caracterizem apropriadamente essa superfície. Isso tem proporcionado uma proliferação de parâmetros de rugosidade nem sempre úteis na caracterização de uma superfície.

Diante desse fato Westkamper e Kruas (1999) propõem a divisão de três grupos para a determinação de parâmetros ao invés de usar todos os parâmetros disponíveis como um todo,

assim esses grupos são divididos em três categorias. A Figura 8 apresenta a divisão dos parâmetros em três grupos: funcionais, de usinagem e de rugosidade.

Figura 8 - Classificação dos parâmetros de superfície



Fonte: Westkamper & Kruas, 1999

Após a definição das propriedades funcionais da peça, do processo de fabricação, das técnicas de medição e tendo escolhido o conjunto de parâmetros, um número mínimo de parâmetros é escolhido para descrever da melhor forma possível a funcionalidade da peça (WESTKAMPER e KRUAS, 1999).

A partir desse ponto de vista, pode-se afirmar que a funcionalidade da superfície deve ser o primeiro dado de entrada no planejamento do processo de manufatura ou fabricação, isto é, a partir dele defini-se a operação de usinagem, o equipamento de medição para seu controle e quais os parâmetros serão analisados para que a mesma atenda as exigências de aplicação.

3.6.1 Classificação da superfície

Segundo Stout (1997) as superfícies podem ser divididas em duas classes: as superfícies estruturadas e as superfícies de engenharia a partir de um ponto de vista de funções específicas.

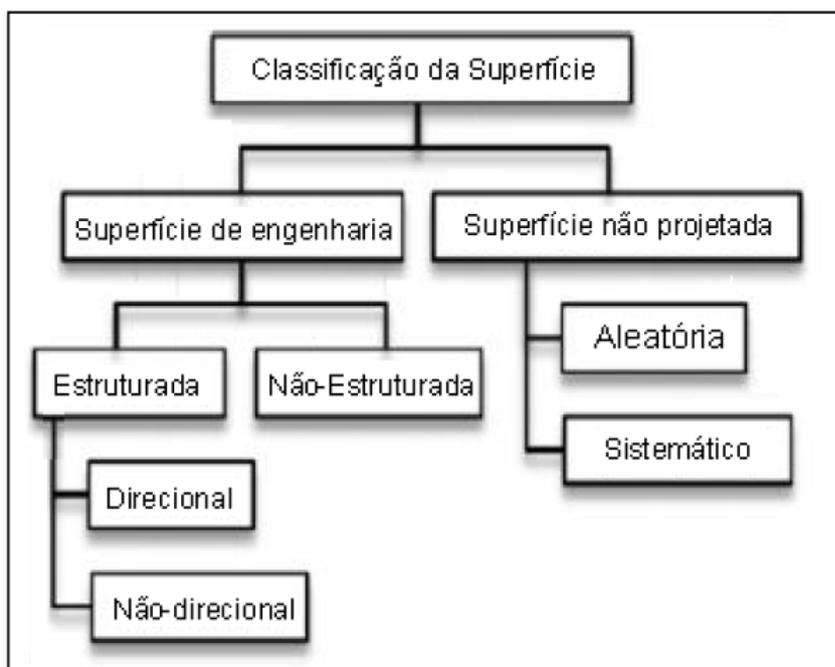
- ✓ As superfícies estruturadas são aquelas superfícies que possuem um padrão determinístico de características geométricas geralmente elevadas em relação ao aspecto formado para obter uma função específica.
- ✓ Nas superfícies de engenharia as camadas da subsuperfície foram alteradas com o intuito de alcançar um desempenho funcional específico.

No entanto este conceito foi modificado por Stout e Blunt, apud Jiang e Whitehouse (2012):

- ✓ Nas superfícies de engenharia as camadas da subsuperfície criam formas alteradas com o intuito de alcançar um desempenho funcional específico conforme descrito por Stout, (1997).
- ✓ Superfícies não projetadas: são superfícies fabricadas em decorrência direta do processo de fabricação, na qual pouca ou nenhuma tentativa foi feita para influenciar no caráter de superfície.

Com isso, essas categorias foram subdivididas em aleatórios, sistemáticos, derivados estruturados e não estruturados conforme a produção de rotas de processamento. Jiang e Whitehouse (2012) mostraram a estrutura hierárquica das oito classificações da superfície, relativas ao final do século passado e a primeira década desse século, conforme Figura 9.

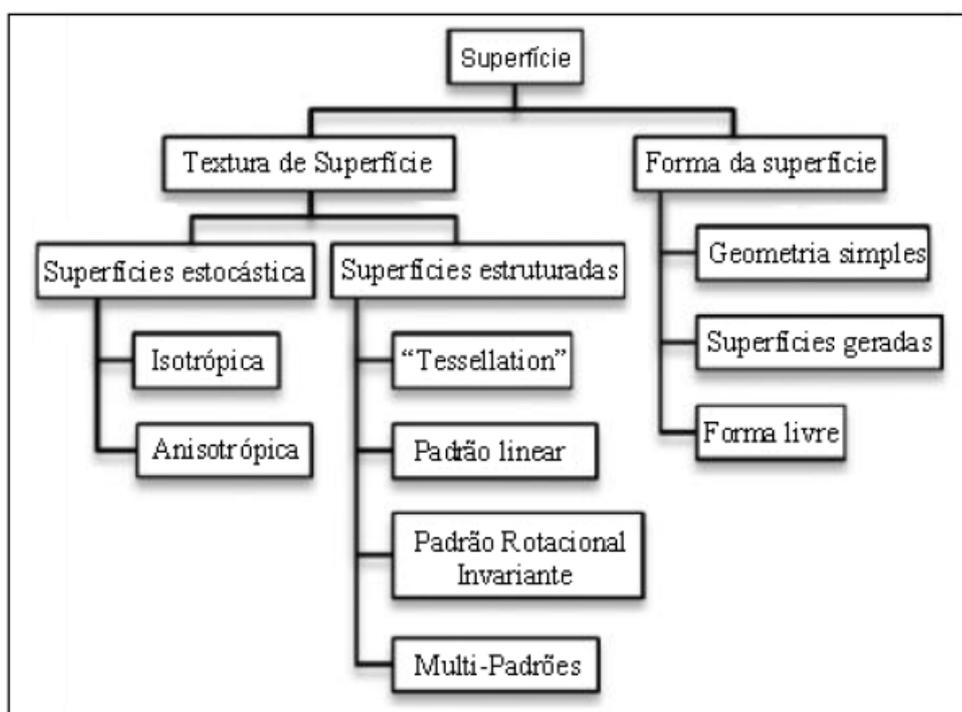
Figura 9 - Classificação hierárquica da superfície



Fonte: Jiang & Whitehouse, 2012

Com o intuito de atender às exigências dessas novas tecnologias e evolução da geometria/textura da superfície, Jiang e Whitehouse (2012) verificaram as tecnologias avançadas de fabricação de superfície e recomendaram a construção de um sistema de classificação modificado e apoiado na identificação das características topográficas críticas superficiais de acordo com sua função. Dessa maneira, a especificação da superfície de projeto pode ser interpretada facilmente de acordo com o princípio da dualidade. A estrutura hierárquica da classificação modificada é apresentada na Figura 10, na qual as formas das superfícies são consideradas.

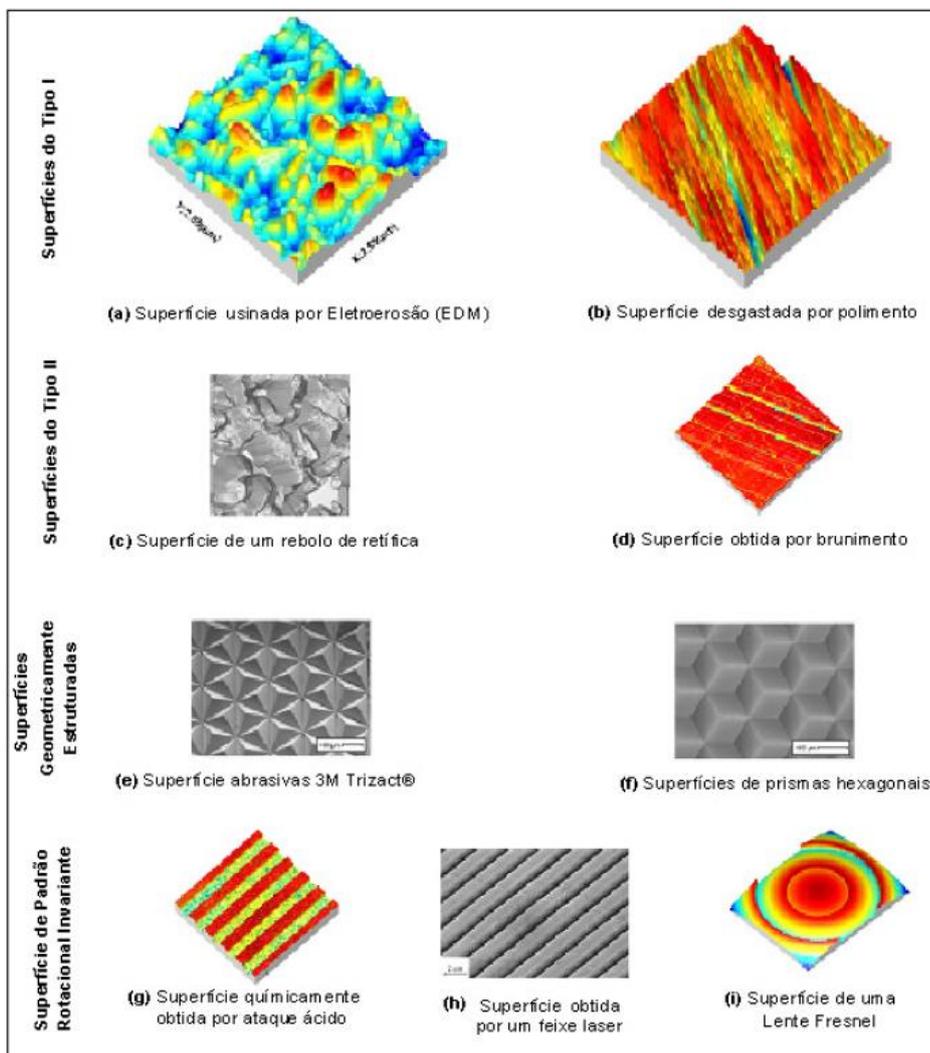
Figura 10 - Nova estrutura de classificação hierárquica da superfície



Fonte: Jiang e Whitehouse, 2012

Já na Figura 11 temos algumas associações morfológicas de superfícies estocásticas, ou aleatórias, isotrópicas e anisotrópicas, e estruturais são mostradas em diversos padrões.

Figura 11 - Superfícies em diversos padrões.



Fonte: Jiang & Whitehouse, 2012

3.6.2 Características da superfície

Uma superfície pode ser caracterizada pelas suas propriedades físicas, geométricas e mecânicas. Nas propriedades geométricas têm-se o acabamento superficial (topografia) e a forma que podem mudar as suas propriedades físicas. Já nas propriedades mecânicas têm-se a dureza e a resistência à fadiga e anexo às propriedades tribológicas têm-se o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste. Assim, o acabamento e a forma de uma superfície são grande importância nas aplicações tribológicas, e o seu controle entra no campo da metrologia. Com isso a rugosidade é amplamente utilizada para retratar a qualidade da superfície (RODRIGUES, 2006).

De acordo com Rodriguez (1995) a rugosidade está conectada à função na qual a superfície exerce, e por meio do conhecimento destas funções e solicitações é possível determinar propriedades de interesse.

Propriedades de superfícies sólidas têm grande relevância para a interação superficial, pois as propriedades da superfície afetam os parâmetros de atrito, área de contato real, lubrificação e desgaste. Nesses contatos entre as superfícies estão envolvidos as próprias superfícies que se relacionam e o elemento lubrificante que as separa (RODRIGUES 2006).

Segundo Clark e Grant (1992) as superfícies são geralmente projetadas para certas aplicações com características de desempenho apropriadas para as seguintes funções:

- ✓ O acabamento da superfície afeta o ajuste e a tolerância da peça?
- ✓ O desgaste é um problema potencial?
- ✓ Ela deve reter o óleo lubrificante?
- ✓ A tensão de compressão é uma preocupação significativa?
- ✓ O atrito é uma consideração importante? Caso seja, qual sua causa ou requisito?
- ✓ Existe a necessidade de um filme ser resistente ao desgaste, e que possa ser efetivamente aplicado?
- ✓ O ambiente de trabalho promoverá a remoção do material da superfície como nas aplicações de ferramentas de corte ou estampagem.

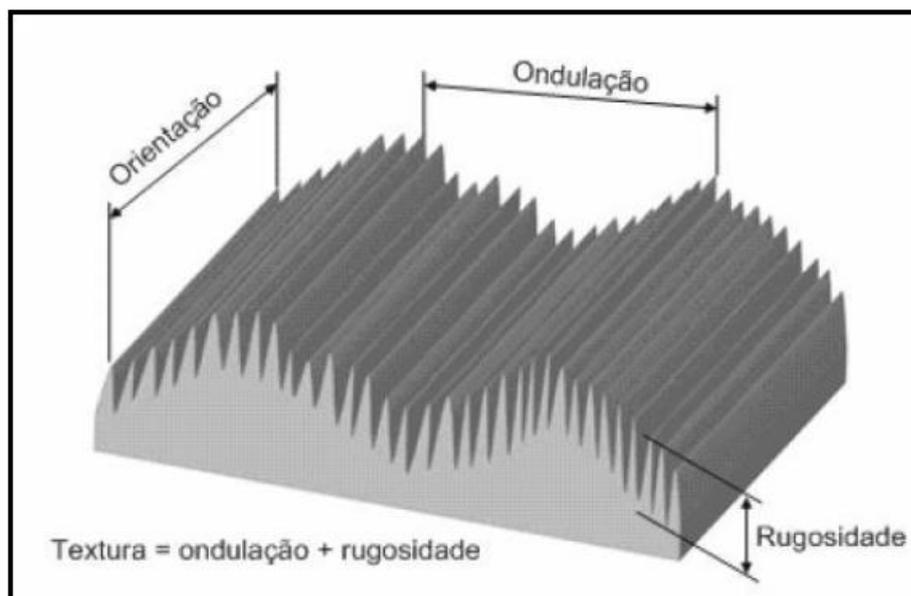
Dessa forma o mais importante é saber qual a função que a superfície realizará para que ela tenha um excelente desempenho.

De acordo com Mesquita (1992) é necessário realizar uma análise completa das superfícies técnicas com o intuito de prever se as exigências feitas são atendidas, de modo que elas venham a exercer bem sua função e possam assim desempenhar sua finalidade. Dessa forma a partir do conhecimento da função exercida pela superfície torna-se necessário conhecer quais parâmetros de rugosidade são mais eficazes para seu controle e especificação.

3.6.3 Topografia da superfície

Segundo a norma ASM (1994), a textura de uma superfície está relacionada com os picos e vales gerados pelo processo de fabricação que a peça foi submetida. Por convenção, a textura de uma superfície compreende dois parâmetros: a ondulação e a rugosidade. A Figura 12 apresenta esses parâmetros.

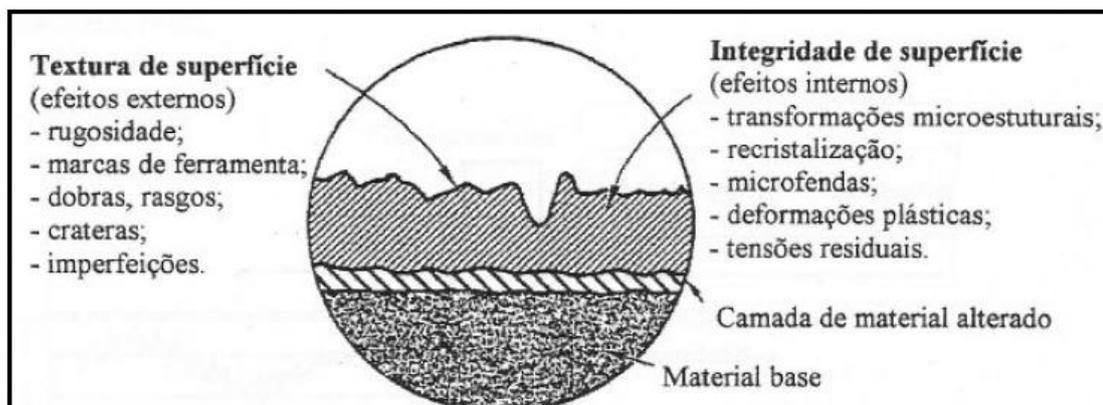
Figura 12 - Representação da ondulação e rugosidade de uma superfície.



Fonte: ASM, 1994

De acordo com Schmidt (1999), a superfície de uma peça pode ser dividida em duas camadas limites diferentes, uma interna e outra externa. A camada limite interna de uma superfície é efeito da ação mecânica da usinagem e a sua profundidade depende da severidade da usinagem na qual a peça foi submetida. Já a camada limite externa situa-se entre a atmosfera externa e a estrutura atômica do material. A integridade da superfície relata os efeitos internos do material e a Figura 13 relata essas camadas e a integridade da superfície.

Figura 13 - Representação da textura e integridade superficial



Fonte: Schmidt, 1999

As peças que trabalham em sistemas lubrificadas precisam ter alguma especificação em seu projeto sobre os valores de rugosidade. Isso ocorre devido o contato entre asperezas e

também ao fato da criação de espaço físico suficiente para que o filme de lubrificante possa ficar retido de forma adequada entre as superfícies, ou seja, a ideia de criar reservatórios adequados para os filmes (NETO, 1999).

Conforme Mattos (2009) as superfícies por mais bem acabadas ainda mostram detalhes que são um legado do método empregado na sua fabricação, como por exemplo: os processos de brunimento, torneamento, fresamento e retificação. Assim as superfícies produzidas apresentam-se como um conjunto de irregularidades, com espaçamento constante e que tendem a formar um padrão ou textura característica em sua extensão.

De acordo com Abe (2001) a textura primária ou a rugosidade são formadas por sulcos ou marcas deixadas pelo agente que agrediu a superfície durante o processo de usinagem (ação química, ferramenta, partículas abrasivas e rebolo) que se encontra superposta a um perfil de ondulação formado por uma imperfeição nos movimentos da máquina, deformação no tratamento térmico, fundição ou tensões residuais de forjamento.

3.7 - Parâmetros de rugosidade

De acordo com Mattos (2009) a rugosidade é o conjunto de irregularidades (pequenas reentrâncias e saliências) presentes em uma superfície. A rugosidade desempenha um importante papel no comportamento e funcionamento de diversos componentes mecânicos e com isso interfere nos seguintes parâmetros:

- ✓ Qualidade de deslizamento;
- ✓ Resistência ao desgaste;
- ✓ Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- ✓ Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- ✓ Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- ✓ Resistência à corrosão e à fadiga;
- ✓ Vedação;
- ✓ Aparência.

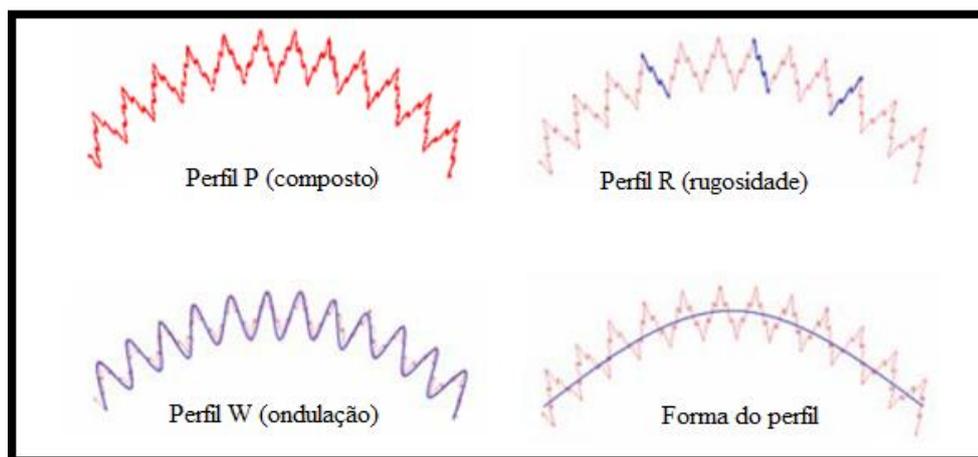
Segundo Rodrigues (2006) nas últimas décadas até os dias atuais nota-se um grande esforço por parte dos grandes fabricantes e da comunidade científica em desenvolver parâmetros, técnicas e metodologias com o intuito de caracterizar as superfícies de engenharia. E por essa razão observa-se uma grande quantidade de parâmetros disponíveis atualmente e o grande desafio dos pesquisadores hoje é determinar quais os parâmetros topográficos que melhor descrevem a superfície analisada.

De acordo com Dong, Sullivan e Stout (1994); Gadelmawla *et al* (2002) a superfície de uma peça é afetada por diversos parâmetros que podem ser reunidos conforme sua funcionalidade. Estes parâmetros reunidos são classificados com parâmetros de amplitude, de espaço, funcionais e híbridos.

Segundo Whitehouse (1994) a avaliação da textura superficial é dividida da seguinte forma: análise de rugosidade (perfil R), análise de ondulação (perfil W), análise sem filtragem (perfil P) e análise de forma. Sendo que o perfil R contempla apenas a rugosidade, o perfil W apenas a ondulação e o perfil P é composto pela rugosidade, à forma e a ondulação.

Segundo Stout (1997) os diversos métodos de mensurar superfícies desenvolvidas ao longo desses anos foram obtidos por intermédio de parametrizações específicas, sendo que, cada parâmetro criado se comporta consoante uma função matemática conforme cada perfil analisado. A Figura 14 apresenta um perfil de uma superfície sem filtragem e com filtragem.

Figura 14 – Perfis de uma superfície

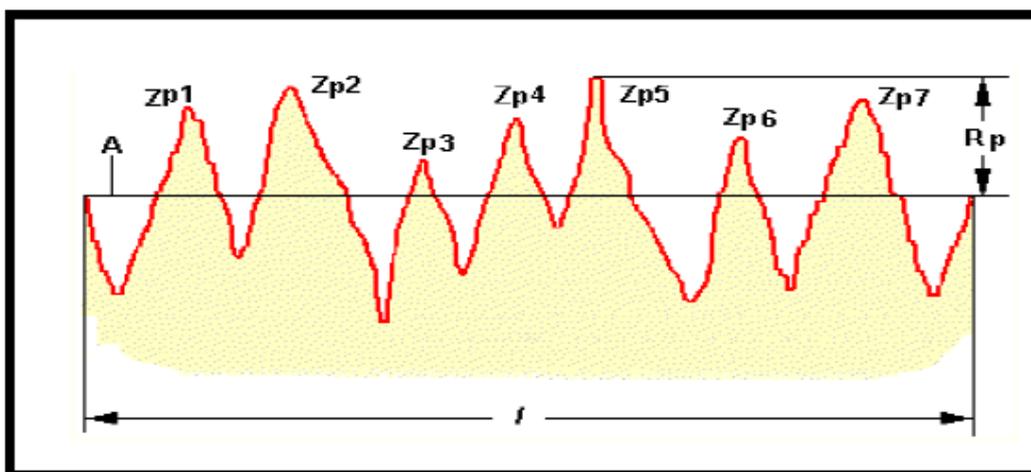


Fonte: Stout, 1990

3.7.1 Altura máxima de pico a linha média R_p (μm)

Esse parâmetro está associado ao maior pico da análise em relação à linha média. O R_p é um parâmetro mais estável em comparação ao R_t . A Figura 15 apresenta como é feita a análise da altura máxima de pico a linha média (R_p). Onde A representa a linha média e l representa o comprimento de amostragem.

Figura 15 – Análise gráfica do parâmetro R_p

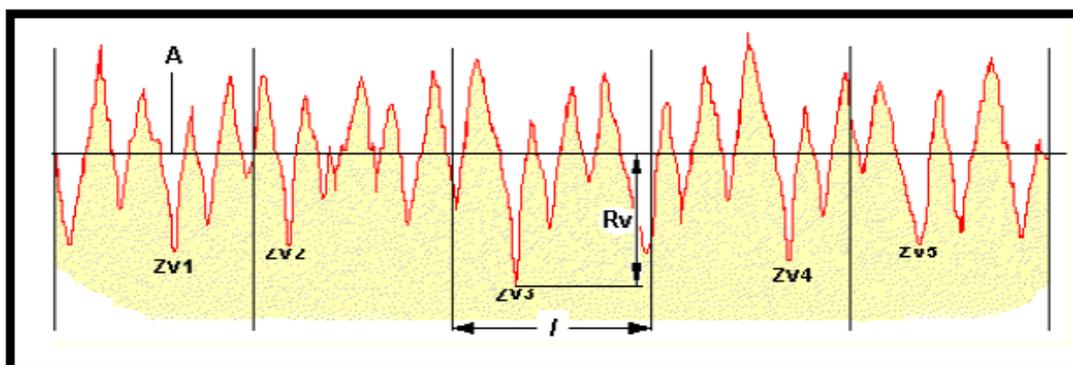


Fonte: Taylor Hobson Precision, 2000

3.7.2 Profundidade máxima de vale em relação ao perfil primário R_v (μm)

O parâmetro R_v toma como referência a linha média do perfil e analisa o vale mais profundo em relação à mesma, conforme apresenta a Figura 16. Onde A representa a linha média e l representa o comprimento de amostragem.

Figura 16 – Análise gráfica do parâmetro R_v



Fonte: Taylor Hobson Precision, 2000

3.7.3 Curva de Abbot-Firestone

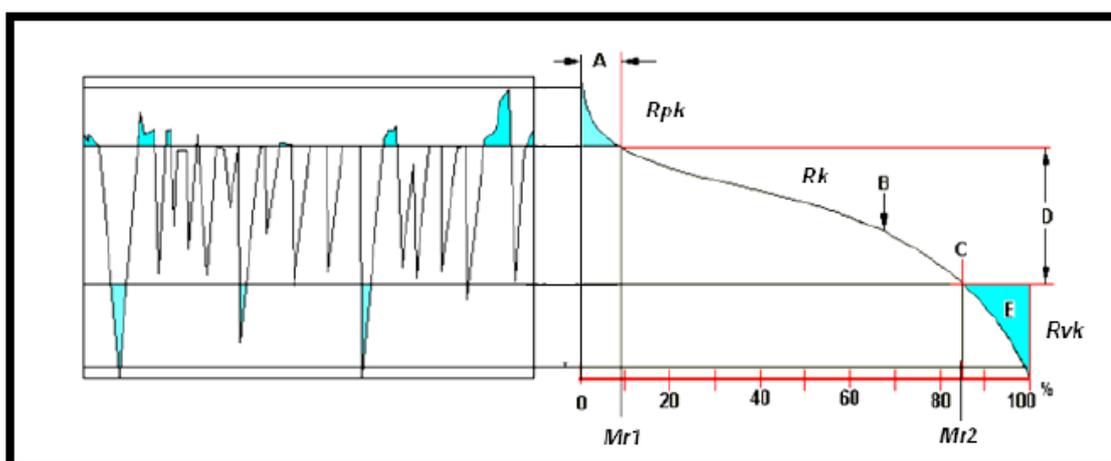
No ano de 1933 Abbott e Firestone desenvolveram uma maneira de descrever todas as propriedades de amplitude de uma superfície por meio da curva da razão de apoio (*Bearing ratio curve*) que mais tarde foi denominada de curva *Abbott-Firestone*.

A curva de Abbot-Firestone é construída a partir da razão de material da superfície do perfil em função da profundidade e possui limites de 0% a 100%. A curva é composta por uma série de parâmetros R_k que podem ser localizados ao do esboço da curva, conforme Figura 17.

Devido à grande importância prática dessa curva todos os parâmetros normalizados pelas normas ISO serão comentados a seguir.

Um exemplo dessa normalização foi à alternativa que engenheiros de manufatura estão considerando de usar de forma gradativamente as normas *ISO 13565-1* (1996), *ISO 13565-2* (1996) e a *ISO 13565-3* (1998). Essas normas recomendam o uso do R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 e Mr_2 em substituição do parâmetro R_a tanto no projeto com na manufatura de componentes ultracríticos como, por exemplo, os cilindros, injetores de combustíveis, pistões e anéis de vedação (FENG, WANG e ZHIGUANG, 2002).

Figura 17 – Curva de Abbot-Firestone e os parâmetros da série R_k



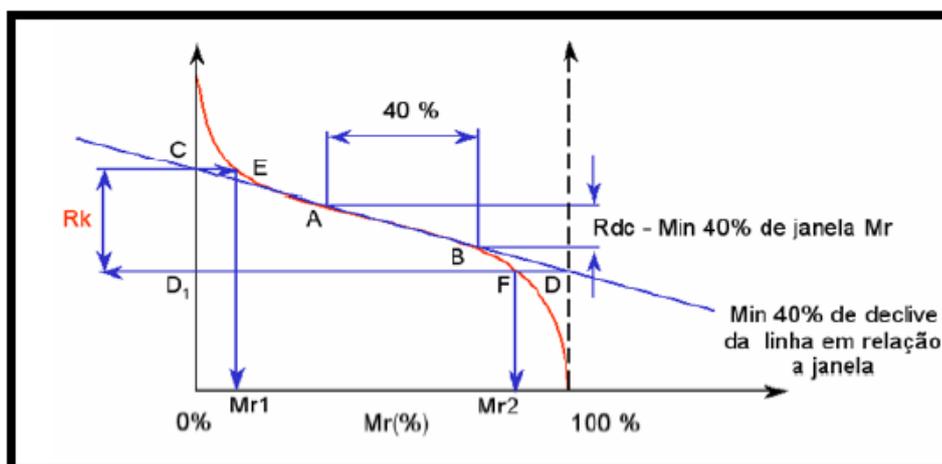
Fonte: Taylor Hobson Precision, 2000

3.7.4 Profundidade da rugosidade central R_k (μm)

O parâmetro R_k está associado à parte intermediária da rugosidade que influencia diretamente no desempenho de certas superfícies. Este parâmetro mede a altura da porção do material do núcleo da superfície e quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato. Um valor pequeno de R_k apresenta uma alta resistência e uma alta capacidade de suportar carga em operações de contato (STOUT 2000). A Figura 18 mostra como esse parâmetro é analisado.

Mummery (1992) apud Medeiros (2002) ressalta a importância de utilizar-se a família dos parâmetros R_k quando se pretende avaliar o contato interativo entre duas superfícies, além de estimar os limites de espessura do filme de óleo ou desgaste entre pares tribológicos.

Figura 18 – Representação gráfica do parâmetro R_k



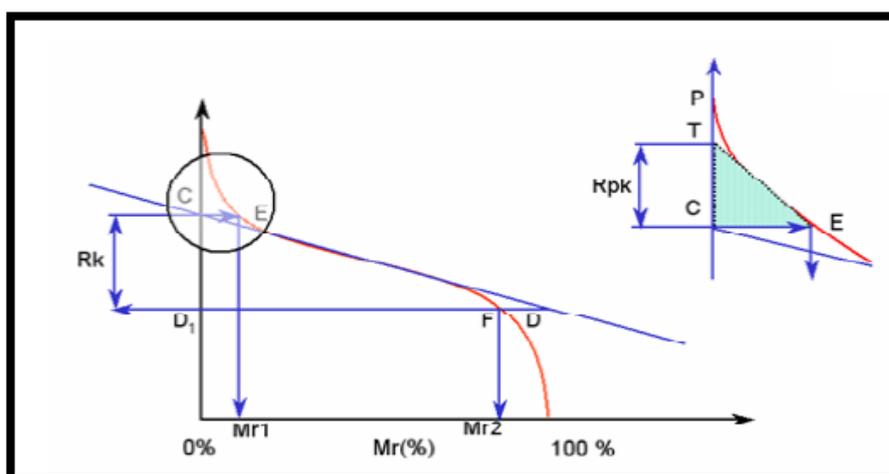
Fonte: Taylor Hobson Precision, 2000

De acordo com Whitehouse (1994) apud Medeiros (2002) a família dos parâmetros R_k é considerada como parâmetros híbridos de avaliação da topografia superficial. Para um parâmetro ser considerado híbrido preciso apresentar informações relativas à altura dos picos, espaçamento e profundidade dos vales de aspereza.

3.7.5 Altura reduzida dos picos Rpk (μm)

Esse parâmetro é associado à região na qual o desgaste ocorre nos primeiros contatos relativos entre as superfícies. E superfícies que nunca trabalham em contato apresentam picos que se rompem ou simplesmente deformam plasticamente. A Figura 19 mostra uma representação dessa região. O parâmetro Rpk é muito usado na verificação do amaciamento de motores de combustão interna, pois fornece informações úteis das propriedades de amaciamento da superfície. E de acordo com Bohm (1992) e Stout (2000) os processos de manufatura nos quais produzem pequenos valores de Rpk são os mais apropriados para obter boas informações das propriedades de amaciamento onde a geometria da superfície é um fator preocupante.

Figura 19 – Representação gráfica do parâmetro Rpk



Fonte: Taylor Hobson Precision, 2000

3.7.6 Percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os picos da rugosidade central (Mr_1)

Esse parâmetro corresponde ao percentual de material correspondente à intersecção entre a linha superior da região de rugosidade central e a curva de *Abbott-Firestone*, isto é, o menor percentual de suporte da região central.

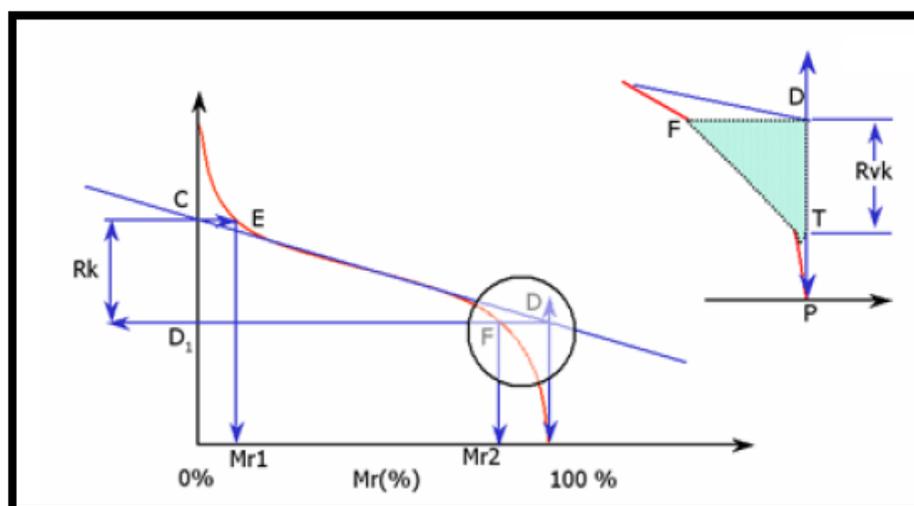
3.7.7 Percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os vales da rugosidade central (Mr_2)

Esse parâmetro corresponde ao percentual de material correspondente à intersecção entre a linha inferior da região de rugosidade central e a curva de *Abbott-Firestone*, isto é, o menor percentual de suporte da região central.

3.7.8 Profundidade reduzida dos vales Rvk (μm)

Esse parâmetro relaciona os sulcos que estão presentes na superfície e está associado à capacidade que a superfície apresenta para reter algum tipo de fluido. A Figura 20 apresenta a curva de um perfil e a área de retenção de fluido. Esse parâmetro tem aplicabilidade na indústria automotiva e aeroespacial, uma vez que, os motores de combustão interna precisam de pontos de contato específicos de lubrificação e retenção de fluidos simultaneamente. E ainda de acordo com Rodrigues (2006) os processos de manufatura que produzem valores de Rvk relativamente altos são adequados para obter boas informações das propriedades de retenção de óleo.

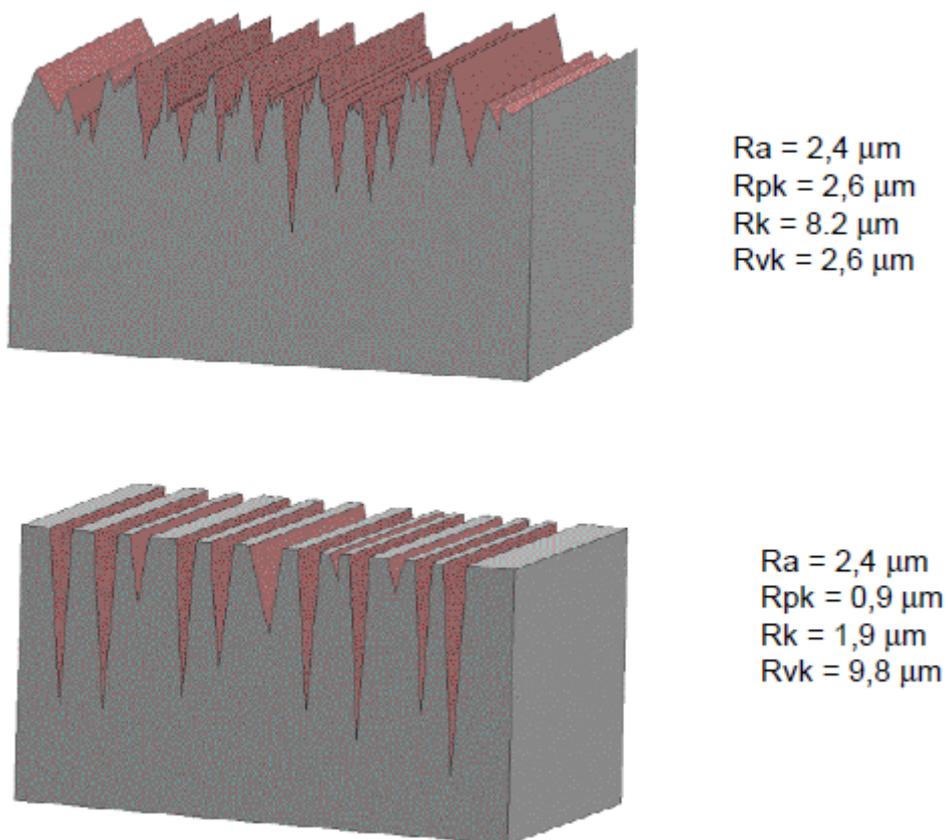
Figura 20 – Representação gráfica do parâmetro Rvk



Fonte: Taylor Hobson Precision, 2000

De acordo com Thomas (1999) a família de parâmetros Rk fornece valores numéricos de vários parâmetros funcionais que discriminam com sucesso diferentes superfícies com o mesmo valor de Ra segundo a Figura 21.

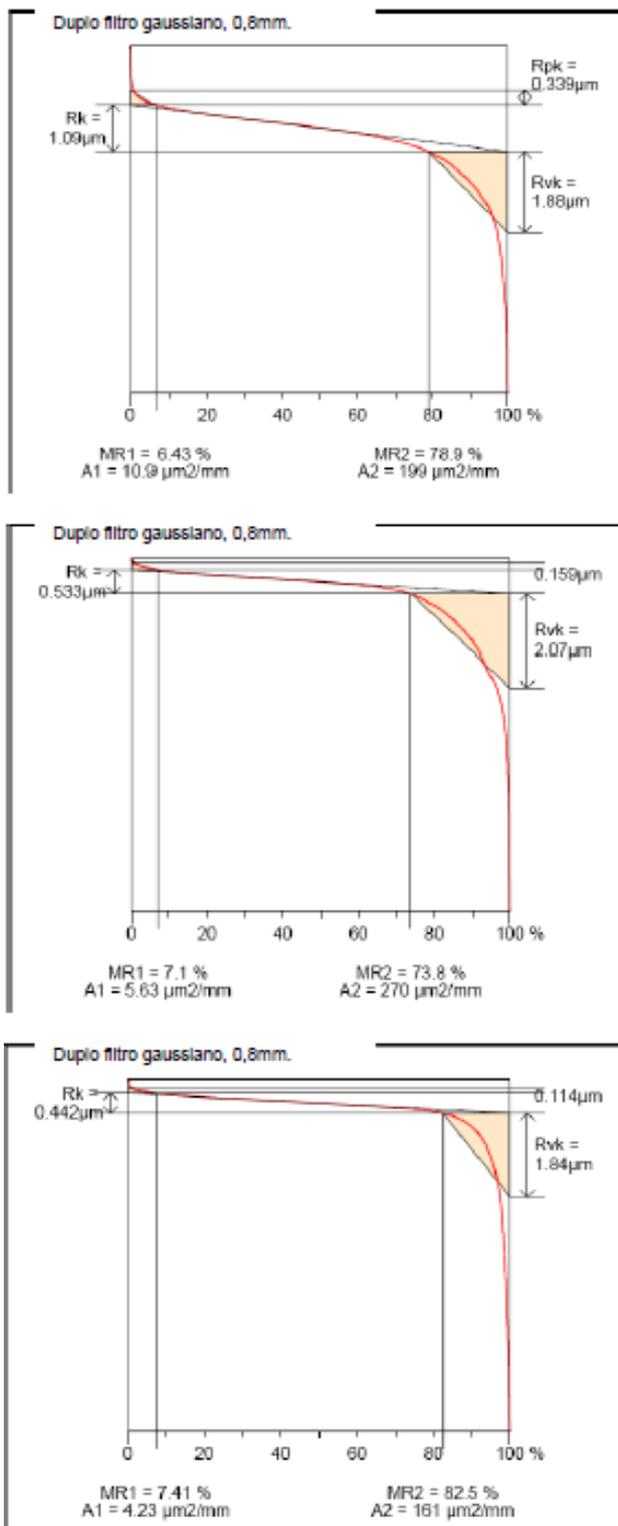
Figura 21 – Comparação dos parâmetros Rk para uma superfície com o mesmo valor de Ra



Fonte: Adaptado de Rodrigues 2006 (apud Thomas 1999)

Já Mattos (2009) nos seus estudos sobre a topografia da superfície de cilindro de motores a combustão interna mostra a influência dos parâmetros da família Rk na evolução dos perfis de rugosidade. A Figura 22 mostra a evolução dos perfis de rugosidade de acordo com a representação na curva de Abbott-Firestone.

Figura 22 – Exemplo das curvas de Abbott-Firestone para diferentes perfis de rugosidade



Fonte: Mattos 2009.

3.7.9 Área correspondente à região dos picos (A_1)

Esse parâmetro está compreendido entre a curva de *Abbott-Firestone* e a linha superior da região central.

Mesquita (1992) propôs a utilização das relações A_1/At , A_2/At e A_3/At em seus estudos para caracterizar as propriedades funcionais (capacidade de suportar carga, amortecer o desgaste inicial, reter lubrificante e resistência ao desgaste) de uma superfície que desliza lubrificada (SDL) nos processos de retificação, torneamento e brunimento.

Por intermédio da aproximação da curva de Abbot calcula-se a área reduzida dos picos (A_1) pela Equação 6 que relaciona os parâmetros funcionais Rpk e Mr_1 .

$$A_1 = \frac{Rpk \times Mr_1}{2} \quad (6)$$

A área total (At) também é uma aproximação da curva de Abbot e leva em conta os parâmetros funcionais Rk , Rpk , Rvk , Mr_1 , Mr_2 , A_1 , A_2 , A_3 , conforme Equação 7.

$$At = A_1 + A_2 + A_3 + (Rvk + Rk) \times Mr_1 + Rvk \times (Mr_2 - Mr_1) \quad (7)$$

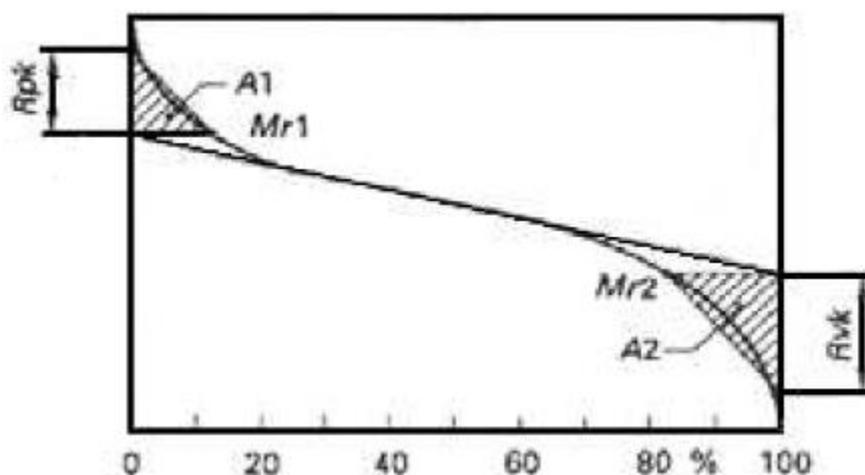
Nos seus estudos Mesquita (1992) afirma que superfícies com $A_1/At < 2\%$ possuem boas capacidades de amortecimento do desgaste na fase inicial.

De acordo com os estudos realizados por Dong, Sullivan e Stout (1994) a área (A_1) calculada através da aproximação da curva de Abbot que pode ser relacionada com o volume de material na zona de pico para análise tridimensionais de superfícies após os processos de brunimento, retificação e usinagem por descargas elétricas (EDM). E quanto menor o valor do volume de material na zona de pico melhor é a capacidade da superfície usinada quanto ao amortecimento do desgaste na fase inicial de contato.

3.7.10 Área correspondente à região dos vales (A_2)

Esse parâmetro está compreendido entre a curva de *Abbott-Firestone* e a linha inferior da região central. A Figura 23 apresenta a curva de *Abbott* contendo os parâmetros de área A_1 e A_2 .

Figura 23 – Representação gráfica dos parâmetros A_1 e A_2



Fonte: Taylor Hobson Precision, 2000

Por meio da aproximação da curva de Abbot calcula-se a área reduzida dos vales (A_2) conforme equação 8:

$$A_2 = \frac{RpK \times (100 - Mr_2)}{2} \quad (8)$$

De acordo com estudos realizados por Mesquita (1992) superfícies com $3\% < A_2/At < 10\%$ possuem boas capacidades de reter lubrificante.

Conforme com os estudos realizados por Dong, Sullivan e Stout (1994) a área (A_2) calculada através da aproximação da curva de Abbot pode ser relacionada com o volume de vazios na zona de vale para análise de superfícies tridimensionais após os processos de brunimento, retificação e usinagem por descargas elétricas (EDM). E quanto maior o valor do volume de vazios na zona de vale melhor é a capacidade da superfície usinada na retenção de lubrificante.

3.7.11 Área correspondente à região de núcleos (A_3)

De acordo com os estudos feitos por Ray (2011) superfícies que apresentam menor volume de vazios na região central da curva de Abbot terão maior capacidade de contato e consequentemente menor taxa de desgaste com o aumento de temperatura.

Já Corral, Calvet e Salcedo (2010) usaram a relação de área da região central da curva de Abbot para avaliar a quantidade de material a ser removido em uma operação de

acabamento de usinagem. E comprovaram que quanto menor a área de núcleos na região central, menor será quantidade de material retirado e melhor será o acabamento superficial da peça usinada.

A relação A_3/At parte dos parâmetros funcionais R_k , Mr_1 , Mr_2 e tem como objetivo garantir uma maior confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que, essa relação leva em conta os desvios verticais e horizontais. Por essa razão a relação do percentual de núcleos é mais confiável que o parâmetro R_k usado de forma isolado.

Por intermédio da aproximação da curva de Abbot calcula-se a área reduzida de núcleos (A_3) pela Equação 9:

$$A_3 = \frac{R_k \times (Mr_2 - Mr_1)}{2} \quad (9)$$

3.7.12 Ângulo de inclinação da região central (θ_k)

O ângulo de inclinação da região central parte dos parâmetros funcionais R_{kp} , R_k , R_{vk} , possui uma propriedade funcional que se refere a quantificar qual a capacidade que uma superfície apresenta de suportar carga em serviço após passar pelos processos de usinagem existentes. A utilização desse parâmetro permite uma avaliação mais clara sobre os patamares de sustentação, uma vez que, superfícies distintas podem apresentar o mesmo valor de R_k , mas disto apresentam patamares diferentes (MESQUITA, 1992).

Por meio da aproximação da curva de Abbot calcula-se a área reduzida de núcleos (A_3) pela Equação 10:

$$\theta_k = \arctan \frac{R_k}{R_{Ges} \times (Mr_2 - Mr_1)} \quad (10)$$

Onde: R_{Ges} representa a rugosidade para região de picos, de núcleos e de vales na relação da curva de rolamento, conforme Equação 11.

$$R_{Ges} = R_{pk} + R_k + R_{vk} \quad (11)$$

Werner e Brinksmeier (1992) monitorou os efeitos do desgaste do rebolo através do parâmetro R_{Ges} e das relações das áreas de picos, núcleos e vales representados respectivamente pelos parâmetros R_{pk} , R_k e R_{vk} na curva de índice de suporte pela relação de rolamento.

Mesquita (1992) propôs a utilização desse parâmetro em seus estudos para caracterizar a propriedade funcional (capacidade de suportar carga) de uma superfície que desliza lubrificada (SDL) nos processos de retificação, torneamento e brunimento. A pesquisadora afirma que por intermédio desse parâmetro é possível comparar quantitativamente diferentes superfícies quanto seus patamares sem que as curvas de comprimento suportante estejam presentes. Além de ser um parâmetro muito mais confiável que o coeficiente de Simetria (S_k). E superfícies SDL com valores de $\theta_k < 33^\circ$ apresentam boas capacidades de suportar carga.

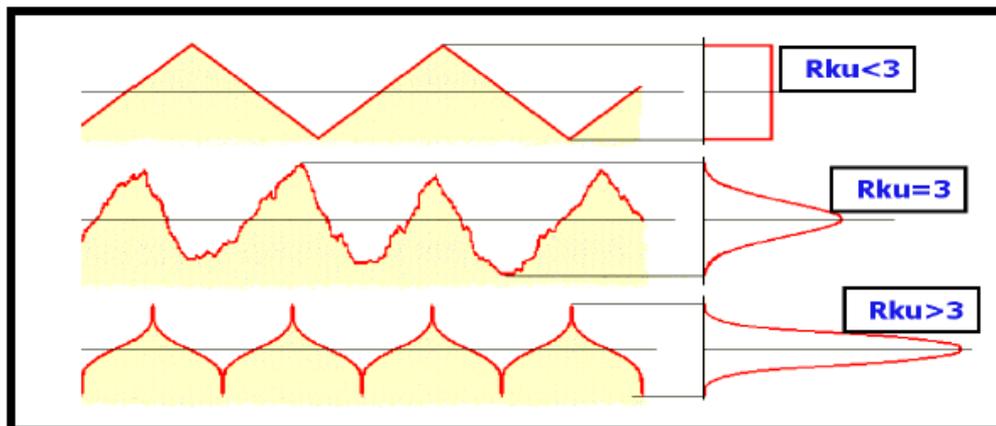
3.7.13 Distribuição e forma dos picos na superfície - Curtose (R_{ku})

O parâmetro R_{ku} possui uma natureza estatística e está relacionado com a distribuição dos picos ao longo do perfil. Se os picos que estão contidos na superfície estão igualmente distribuídos, e sua agudez tem característica aleatória, a análise desse parâmetro de uma superfície irá apresentar um valor de referência igual a três, ($R_{ku} = 3$). Por outro lado, se a análise produzir um valor de R_{ku} menor que três, a superfície apresenta picos irregulares e mais achatados ($R_{ku} < 3$). Se a análise gerar um valor de R_{ku} maior que três, a superfície apresenta picos mais agudos com pouco achatamento. A Figura 24 apresenta o perfil gerado pelo parâmetro R_{ku} (OLIVEIRA, 2004).

De acordo com Oliveira (2004) o parâmetro R_{ku} também é conhecido como a medida de curtose (*Kurtosis*) que é relacionado com a medida de agudez do perfil. Esse parâmetro pode ser utilizado com o intuito de controlar as condições de vida útil das ferramentas de corte usadas em vários processos tais como: as ferramentas de corte usadas no processo de fressamento que vai perdendo o corte à medida que se remove material, ou seja, à medida que a ferramenta é usada, ocorre mudança na sua ação cortante. Contudo esse parâmetro deve ser relacionado com outros parâmetros para análises mais complexas.

De acordo com Carpinetti *et al* (2000) o parâmetro de curtose (R_{ku}) juntamente com os parâmetros Mr_1 e Mr_2 e com o parâmetro R_{sk} que será descrito a seguir são complementares e de muita utilidade para a caracterização de superfícies de deslizamento e de mancais.

Figura 24 – Representação gráfica do parâmetro Rku

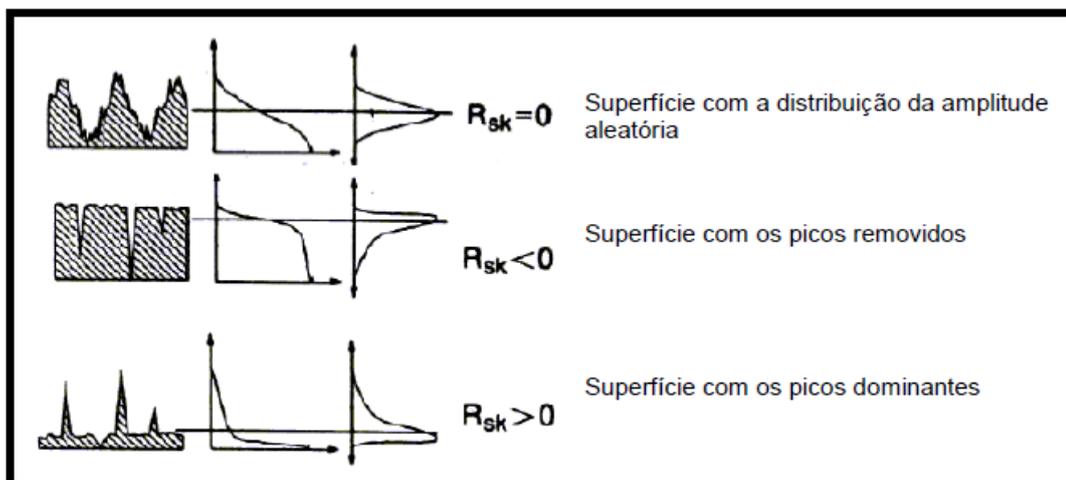


Fonte: Taylor Hobson, 2000

3.7.14 Coeficiente de simetria Rsk

Esse parâmetro está relacionado com avaliação do formato ou deformação da curva de distribuição das amplitudes de irregularidades em relação à linha de referência, no comprimento de medição conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Representação gráfica do coeficiente de simetria



Fonte: Taylor Hobson, 2000

Conforme Carpinetti *et al* (2000) os valores negativos do parâmetro Rsk mostram as irregularidades da superfície tem a forma da distribuição distorcida para cima, isto é, caracterizadas pela presença de sulcos. Caso contrário, para valores positivos de Rsk, a superfície é caracterizada por picos. As superfícies que apresentam Rsk negativo são menos suscetíveis ao desgaste prematuro. Ademais, em aplicações como mancais lubrificadas, os

sulcos tem a função de depositar lubrificante. Dessa maneira, esse parâmetro tem grande importância na medição de superfícies de mancais e (para essas superfícies recomenda-se R_{sk} entre -1,6 e -2,0).

Assim, como a curtose (R_{ku}), o parâmetro de simetria (R_{sk}) não tem unidade de medida, sendo bem mais utilizado com um ou mais parâmetros para que se tenha uma melhor caracterização da superfície (TAYLOR HOBSON PRECISION, 2000).

Contudo, examinados os parâmetros funcionais, é possível analisar as características das superfícies produzidas por diferentes classes de processos de manufatura (STOUT, 2000).

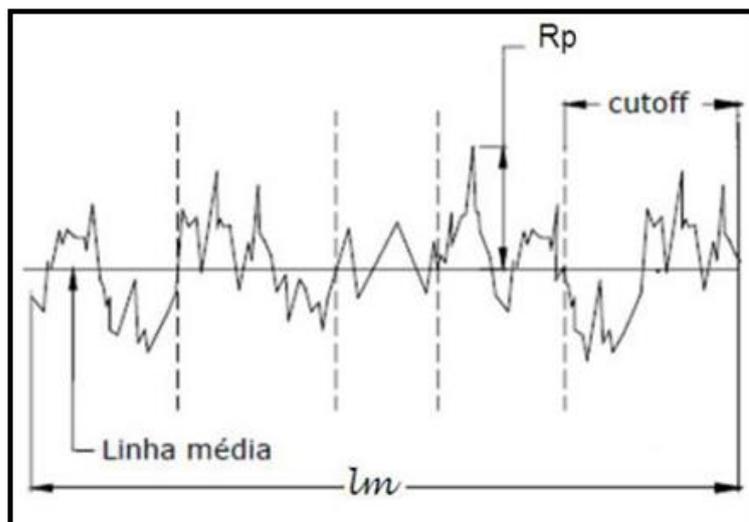
3.7.15 Coeficiente de vazio (K_p)

Pawlus e Michalski (1992) afirmam que, o desgaste linear e acabamento podem ser relacionados por meio do coeficiente de vazio que é um importante parâmetro tribológico usado para avaliar o desgaste ocorrido na superfície da peça. Quanto menor o valor do coeficiente de vazio, menor será o desgaste na superfície da peça e melhor acabamento superficial. Esse coeficiente relaciona os parâmetros de amplitude R_p (altura máxima do perfil) e R_t (Altura total do perfil) que pode ser calculado pela relação entre a altura máxima do perfil e a altura total do perfil conforme Equação 12.

$$K_p = \frac{R_p}{R_t} \quad (12)$$

De acordo com a norma DIN EN ISO 4287 o coeficiente de vazio é representado pela altura máxima de pico do perfil (R_p) que é à distância de pico à linha média definida no comprimento de avaliação (l_m) conforme a Figura 26.

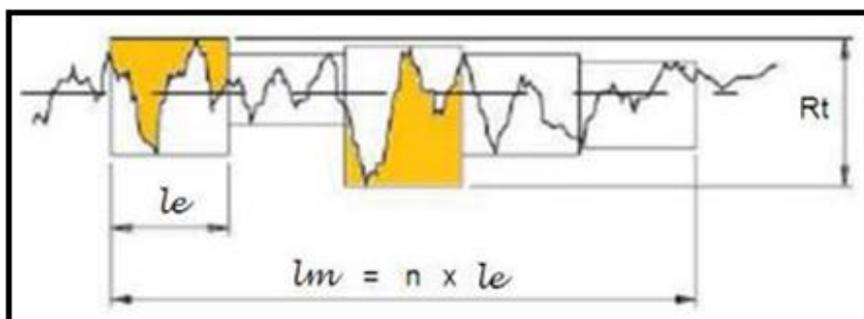
Figura 26 – Altura total do perfil



Fonte: Piratelli-filho, 2011

A Figura 27 representa o parâmetro rugosidade máxima (R_t) que é a soma das maiores alturas de pico e das maiores profundidade dos vales, definidos com comprimento de avaliação (l_m) e não apenas no comprimento de amostragem (l_e).

Figura 27 – Altura máxima do pico do perfil



Fonte: Piratelli-filho, 2011

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a parte experimental realizada nos corpos de prova, juntamente com todos os materiais necessários para sua realização. Os ensaios e procedimentos experimentais foram realizados no laboratório de Retificação do Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAT do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG.

4.1 Banco de ensaios

O banco de ensaios foi composto basicamente por uma retificadora cilíndrica universal, da marca TosHostivar e um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-301. A Figura 28 apresenta a retificadora cilíndrica com potência equivalente a 9 kw, na qual os corpos de prova foram retificados. O sistema de Lubri-refrigeração convencional utilizado consiste essencialmente no reservatório de fluido (90 litros), mangueiras, moto bomba, bocal aplicador e os fluidos de corte.

Figura 28 - Retificadora cilíndrica universal

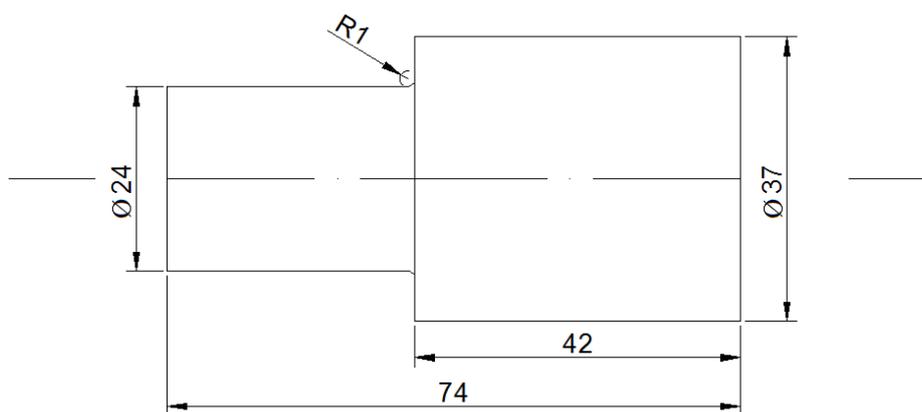


Fonte: próprio autor

4.1.1 Corpo de prova

Foram utilizados na realização deste trabalho corpos de prova (aço ABNT 4340 temperado, revenido e com dureza aproximada de 52 HRC). Classificado como aço para beneficiamento, com elevada temperabilidade, boa combinação entre resistência e tenacidade, e empregado nos componentes para sistemas mecânicos principalmente estruturais, onde se deseja uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções. Suas principais aplicações são eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas, mangas, peças aeronáuticas, virabrequins e cilindros. A Figura 29 representa o desenho esquemático com dimensões do corpo de prova, sendo a dimensão útil de retificação de diâmetro inicial de 37 mm e comprimento retificado de 42 mm.

Figura 29 - Desenho esquemático do corpo de prova.



Fonte: próprio autor.

A composição química em percentual do aço ABNT 4340 usado nos experimentos foi fornecida pelo fabricante conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do aço ABNT 4340 em peso (%)

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	V	Fe
0,4	0,7	0,007	0,35	0,001	0,78	1,74	0,24	0,015	0,05	0,01	0,01	Balanço

Fonte: VILLARES METALS, 2013.

4.1.2 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte usada nos experimentos foi o rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3), com as seguintes características e dimensões: (355,6 x 50,8 x 127 mm - FE 38A60 KV).

O rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) é utilizado na retificação de aços com alta resistência à tração e elevada dureza possibilitando assim que o tratamento térmico não seja alterado. A Figura 30 apresenta o rebolo e o sistema de lubri-refrigeração utilizado durante os experimentos.

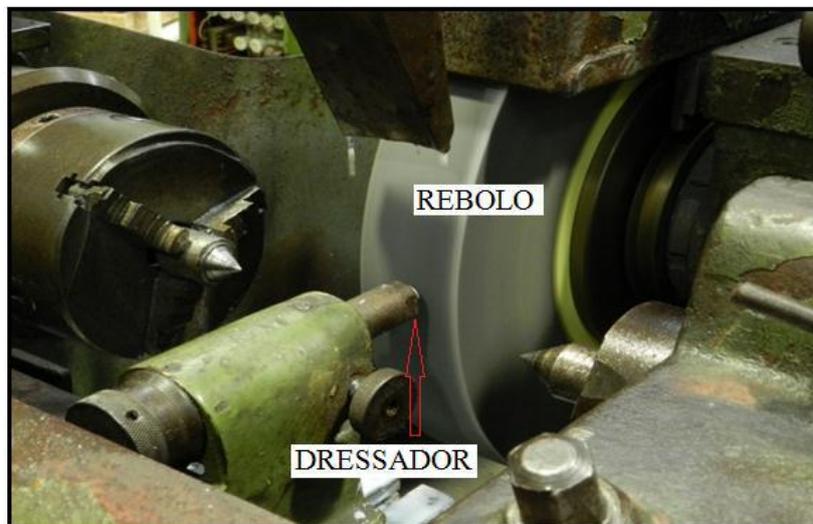
Figura 30 – Rebolo e sistema de lubri-refrigeração



Fonte: próprio autor

4.1.3 Condições de dressagem

A operação de dressagem do rebolo foi feita no princípio de cada ciclo de ensaio. Para isso, foi usado um dressador de ponta única de diamante preso a um suporte junto à máquina retificadora, conforme está representado na Figura 31.

Figura 31 – Operação de dressagem

Fonte: próprio autor

Durante a operação de dressagem não houve mudanças nas variáveis de saída do processo, devido ao fato dos parâmetros de profundidade e de velocidade dressagem ficarem constantes. A profundidade de dressagem usada foi de 0,05 mm x 10 passes, durante a varredura ao longo da superfície do rebolo, no sentido de sua espessura. Dessa forma foram removidos 0,5 mm de material do rebolo antes de cada ensaio com uma velocidade média de 2,7 mm/s e uma vazão de fluido de corte de 12 L/min.

4.1.4 Fluidos de corte utilizados durante a operação de retificação

Os fluidos de corte utilizados na realização dos experimentos foram:

- ✓ Fluido de corte integral a base de óleo mineral Meca Fluid 14SC Petronas Lubrificante;
- ✓ Fluido de corte sintético Southcool RU 20 do fabricante Southquin com concentração de 5,0 %.

Para avaliar a concentração do fluido de corte sintético foi utilizado o refratômetro portátil ATAGO série MASTER- α , Brix 0,0 a 33,0% conforme a Figura 32.

Figura 32 – Refratômetro Portátil



Fonte: próprio autor

4.1.5 Parâmetros de retificação

Os parâmetros de corte utilizados foram determinados após a realização de testes preliminares. O intuito desses testes foi obter as melhores condições de usinagem que pudessem caracterizar a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizado nas indústrias de metal/mecânica. Todos os parâmetros selecionados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de corte

PARÂMETROS	VALORES
Profundidade de usinagem (a_p)	0,05 mm
Rotação da peça (n)	155 RPM
Tempo de centelhamento/Spark-out (t_s)	6s e 10s
Velocidade de dressagem (V_w)	2,7 mm/s
Velocidade de mergulho (V_f)	0,6 mm/min e 1,2 mm/min

Fonte: próprio autor

Durante os testes, os parâmetros de profundidade de dressagem, tempo de centelhamento e velocidade de mergulho foram alterados com o andamento do processo de retificação enquanto aos demais parâmetros de corte foram mantidos constantes. Isso possibilitou avaliar as condições de acabamento da operação de retificação, e ainda foi

possível analisar a qualidade de lubri-refrigeração dos fluidos durante as condições de corte utilizadas.

A Tabela 7 apresenta a matriz composta por 24 corpos de prova do aço ABNT 4340 endurecido, utilizada para a classificação dos mesmos conforme a velocidade de mergulho, o volume de material retificado e o tipo de fluido de corte utilizado durante o processo de retificação.

Tabela 7 – Matriz dos corpos de prova retificados

Velocidade de mergulho (mm/min)	FLUIDOS DE CORTE							
	INTEGRAL				SINTÉTICO			
	0,6		1,2		0,6		1,2	
Volume de material retificado (10 ³ mm ³)	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica
1,93	CDP 19	CDP 22	CDP 13	CDP 16	CDP 31	CDP 34	CDP 25	CDP 28
12,64	CDP 20	CDP 23	CDP 14	CDP 17	CDP 32	CDP 35	CDP 26	CDP 29
21,82	CDP 21	CDP 24	CDP 15	CDP 18	CDP 33	CDP 36	CDP 27	CDP 30

Fonte: próprio autor

Os 24 corpos de prova foram separados em dois grupos denominados teste e replica sendo:

- ✓ Doze corpos de prova para o fluido de corte integral, sendo seis para velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e o restante para velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e uma vazão de fluido de 12,0 L/min.
- ✓ Doze corpos de prova para fluido de corte sintético, sendo seis para velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e o restante para a velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e uma vazão de fluido de 12,0 L/min.
- ✓ Os volumes de materiais retificados foram $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$, $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$, $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$ que são equivalentes respectivamente a 0,4 mm, 2,4 mm e 4,8 mm no diâmetro.

4.1.6 Parâmetros de rugosidade

Para medir a rugosidade dos corpos de prova, utilizou-se um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-301 de acordo com as normas JIS 2001 e DIN 4776, com comprimento de amostragem “*cut-off*” de 0,8mm. As medições dos corpos de prova retificados foram realizadas em quatro posições radiais e equidistantes a 90° aproximadamente em cada medição. Para os valores apresentados foi considerada a média das quatro medições efetuadas juntamente com os desvios padrões obtidos. Foram utilizados dispositivos e técnicas adequadas para uma maior precisão nos parâmetros mensurados conforme Figura 33. Os parâmetros de amplitude avaliados foram R_a (μm), R_t (μm), os parâmetros estatísticos foram R_{sk} , R_{ku} , e os parâmetros funcionais avaliados foram R_k (μm), R_{pk} (μm), R_{vk} (μm), K_p , Θ_k , A_1 (%), A_2 (%), A_3 (%) A_t (μm), Mr_1 (%) e Mr_2 (%), que foram comparados segundo a velocidade de mergulho, o volume de material retificado e o fluido de corte utilizado.

Figura 33 - Rugosímetro e os dispositivos usados para medição dos parâmetros avaliados.



Fonte: próprio autor

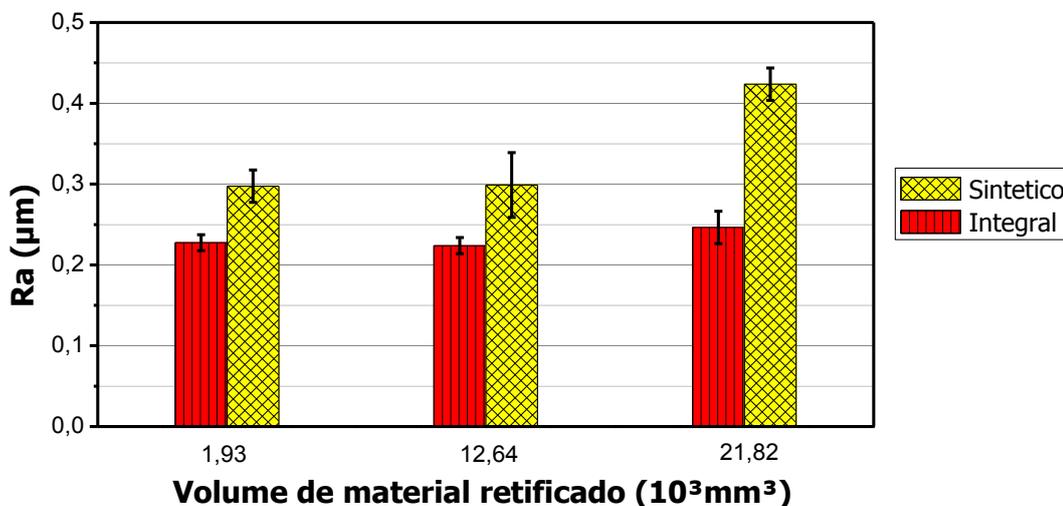
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados da caracterização da superfície do aço ABNT 4340 endurecido pelo tratamento térmico de têmpera por meio dos parâmetros de rugosidade de amplitude, estatísticos e funcionais com seus valores médios e desvios padrões. Dessa maneira, foi possível avaliar o perfil de rugosidade produzido na superfície do aço ABNT 4340, além do desempenho dos fluidos de corte integral e sintético submetidos às diferentes condições de retificação.

5.1 Parâmetro de amplitude Ra

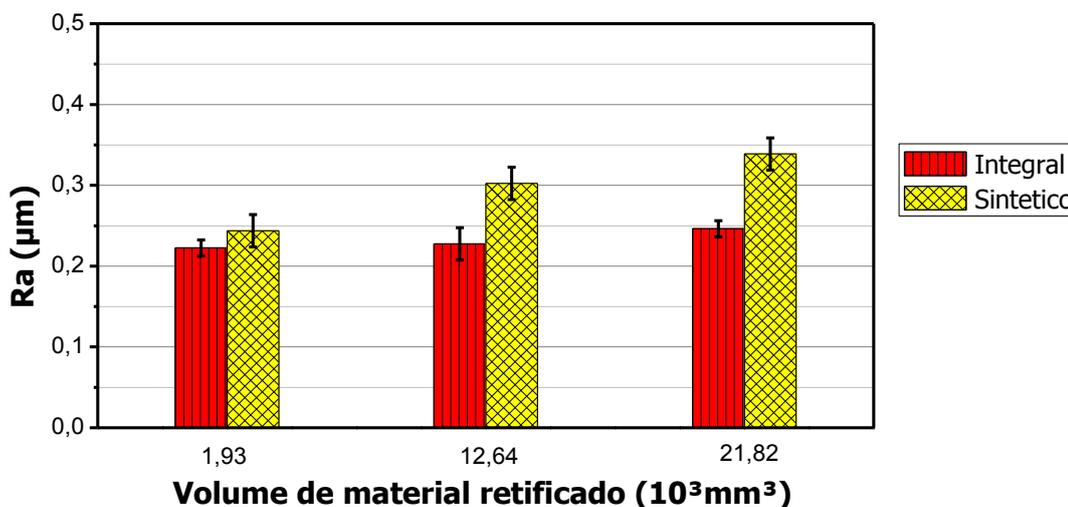
As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados de rugosidade do parâmetro de amplitude Ra (μm) em relação ao volume de material retificado para os fluidos de corte integral e sintético com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 34 – Rugosidade Ra em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 35 – Rugosidade Ra em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

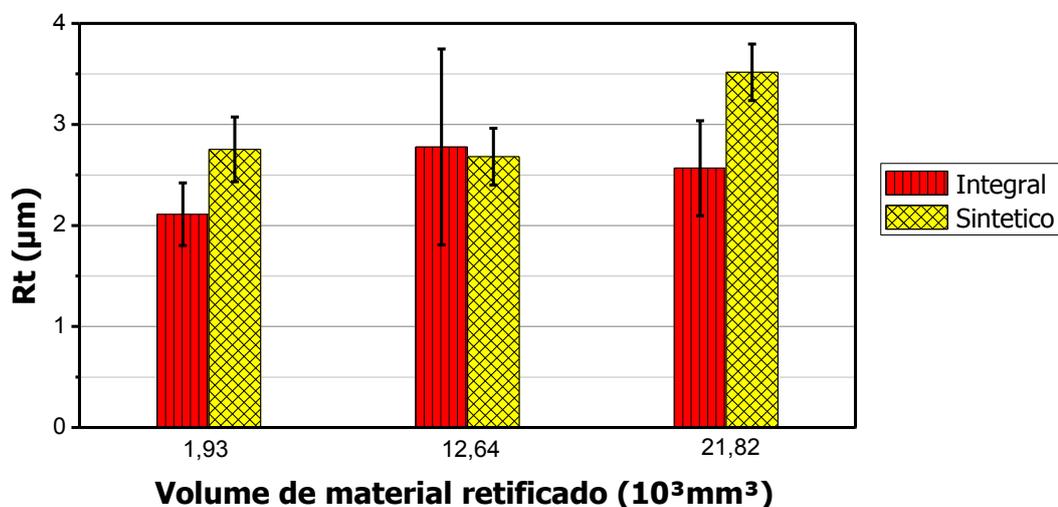
As Figuras 34 e 35 mostram os valores médios e os desvios padrões de rugosidade (Ra) obtidos para os fluidos de corte integral e sintético pode-se afirmar que o fluido de corte integral apresentou os menores valores de rugosidade quando comparados ao fluido de corte sintético frente às velocidades de mergulho e os volumes de material retificado. Essas menores rugosidades obtidas para fluido de corte integral são atribuídas ao excelente poder lubrificante desse fluido que promove menor atrito, e como consequência, menores forças de corte são produzidas durante o processo de retificação e um melhor acabamento é obtido. Já o pior desempenho foi obtido com o volume de material retificado de $21,82 \times 10^3$ utilizando o fluido de corte sintético em ambas as velocidades de mergulho.

No geral, o fluido de corte integral apresentou menor dispersão dos valores de rugosidade nas diversas condições de retificação.

5.2 Parâmetro de amplitude Rt

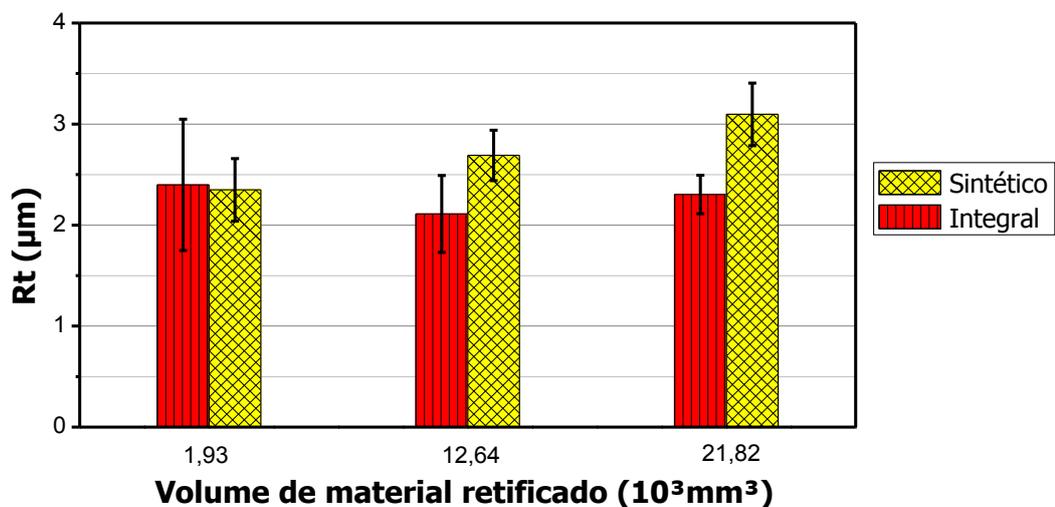
As Figuras 36 e 37 apresentam os resultados de rugosidade do parâmetro de amplitude Rt (μm) em função do volume de material retificado para os fluidos de corte integral e sintético com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 36 – Rugosidade Rt em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 37 – Rugosidade Rt em função do volume de material retificado com velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

Analisando os resultados obtidos na Fig. 36 percebe-se que o menor valor de Rt foi encontrado no volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ para o fluido de corte integral. Já o maior valor encontrado de Rt foi obtido no volume de material retificado de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$ para o fluido de corte de sintético em ambas velocidades de mergulho.

Na Fig. 37 observa-se que ambos os fluidos de corte não apresentam um comportamento padrão diante do volume de material retificado. Por outro lado, o valor de Rt diminui no volume de material retificado de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Esse fato se deve a

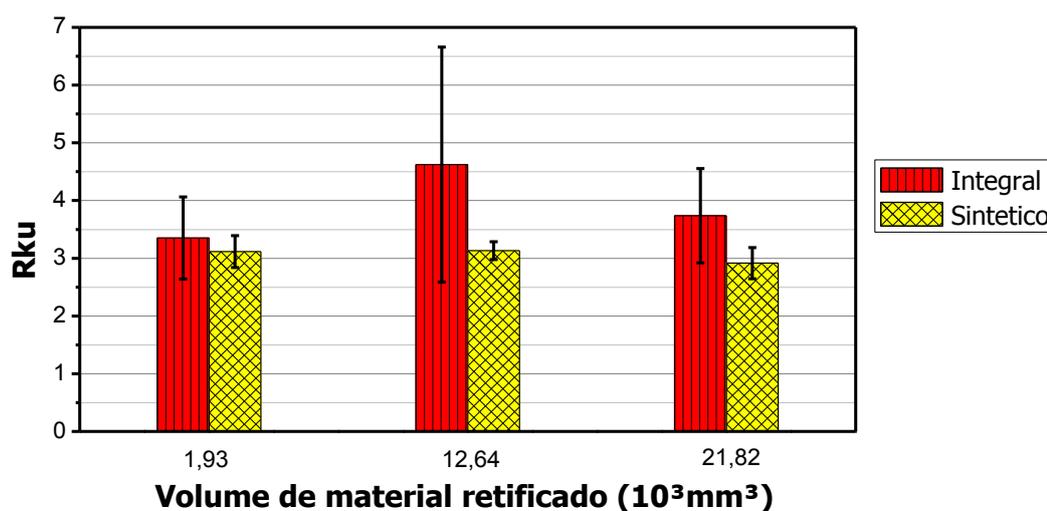
propriedade de friabilidade do rebolo que com o aumento da velocidade de mergulho promove a quebra dos grãos mais agudos do rebolo e gera novos grãos menos agudos que reduzem o valor de R_t . Isso mostra que o rebolo exerce papel importante na geração da superfície retificada.

No geral, nota-se um melhor desempenho do fluido de corte integral nas diversas condições de retificação utilizadas.

5.3 Parâmetro estatístico R_{ku}

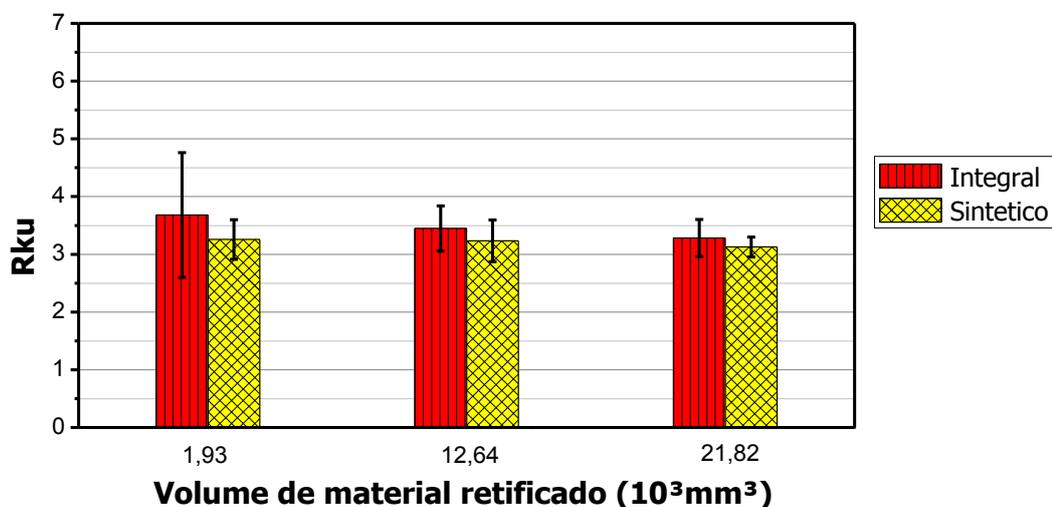
As Figuras 38 e 39 apresentam os resultados de rugosidade do parâmetro estatístico R_{ku} (μm) em função do volume de material retificado utilizando fluidos de corte integral e sintético com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 38 – Rugosidade R_{ku} em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 39 – Rugosidade Rku em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

Analisando os resultados obtidos na Fig. 38 percebe-se que aumentando o volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ para $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ o valor de Rku aumenta, contudo ao aumentar o volume de material retificado de $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ para $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$ o valor de Rku sofre uma redução. Isso mostra que o fluido de corte integral consegue exercer sua função de lubrificação mesmo com o aumento do volume de material retificado. Já para o fluido de corte sintético observa-se que nos volumes de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$ os valores de Rku permaneceram praticamente constante.

Na Fig. 39 observando o comportamento do fluido integral percebe-se que aumentando o volume de material retificado o valor de Rku foi reduzido. Já o fluido de corte sintético manteve o mesmo comportamento observado na Fig. 38. Diante dos resultados obtidos nota-se que os valores de Rku nos dois casos não têm variações significativas.

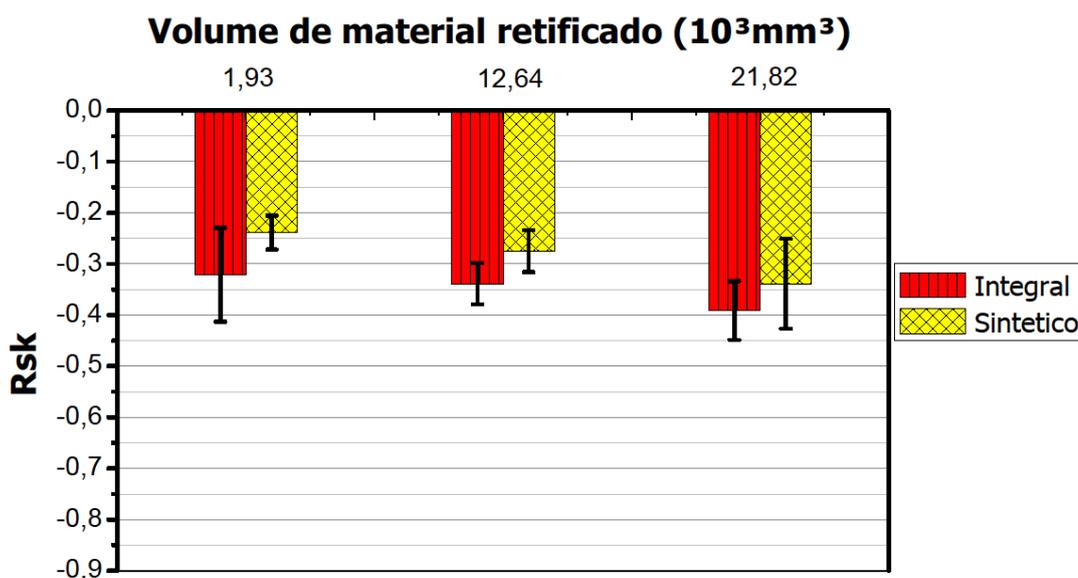
Os resultados mostram que o poder de lubrificação do fluido integral teve desempenho inferior ao poder refrigerante do fluido sintético, uma vez que, estatisticamente quanto menor o valor de Rku menor será a distribuição dos picos agudos ao longo da superfície e conseqüentemente menor será a fricção e o atrito entre duas superfícies em contato. Neste contexto verifica-se que o poder de dissipação de calor da superfície da peça durante a retificação é mais importante para obter menores valores para Rku. A redução de Rku indica que a fricção entre duas peças em contato tende a diminuir. Resultado este que vai de encontro aos resultados obtidos por Sedlacek, Podgornik e Vizintin (2009) que ao analisar o aumento do atrito com o aumento da rugosidade no processo de retificação, verificando que a

redução no valor de R_{ku} promove a diminuição da fricção para superfícies lubrificadas. Em outro estudo realizado por Ghosh e Sadeghi (2015) foi investigado que o desgaste entre duas superfícies aumenta com o aumento do valor de R_{ku} e que a variação da taxa de desgaste é afetada pelo valor de R_{ku} para superfícies com maiores valores de rugosidade quando comparado com valores inferiores de rugosidade.

5.4 Parâmetro estatístico R_{sk}

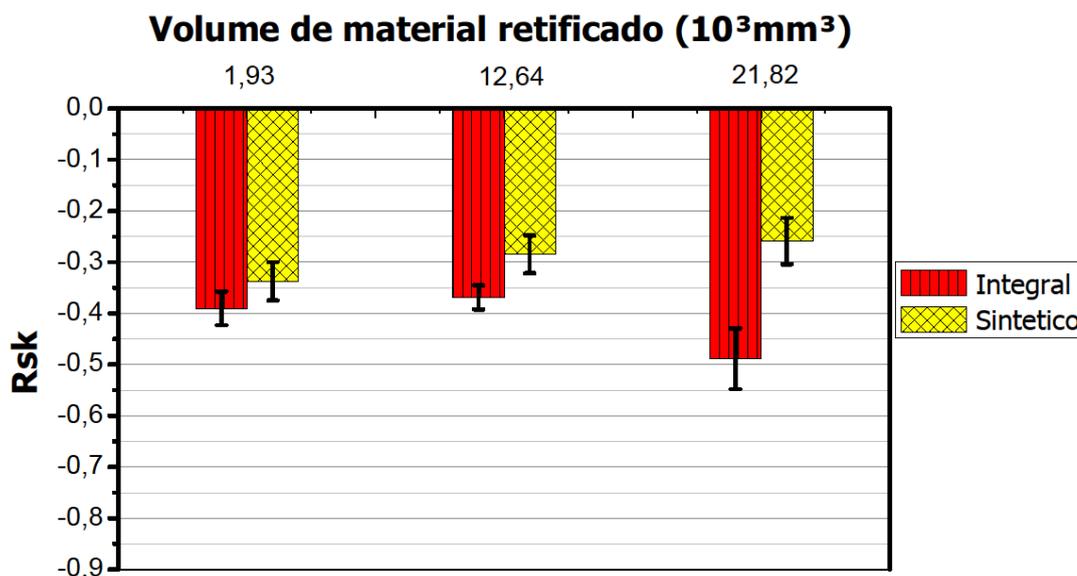
As Figuras 40 e 41 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados médios com os desvios padrões obtidos para o parâmetro estatístico de rugosidade R_{sk} em função do volume de material retificado utilizando fluidos de corte integral e sintético com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 40 – Rugosidade R_{sk} em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 41 – Rugosidade Rsk em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

Considerando os valores médios obtidos nas Fig. 40 observa-se que para o fluido de corte integral que aumentando o volume de material retificado o valor de Rsk se torna mais negativo. Já o fluido de corte sintético apresentou um comportamento padrão. Já na Fig. 41 ambos os fluidos de corte apresentaram não apresentaram um comportamento padrão. Isso mostra que esse parâmetro estatístico foi afetado pela variação do volume de material retificado.

Os resultados do parâmetro Rsk mostram que o poder de lubrificação do fluido de corte integral obtido nas condições de retificação prevaleceu sobre o poder de dissipação de calor do fluido sintético, uma vez que, menores valores obtidos para Rsk tendem a diminuir o atrito entre duas superfícies em contato. De acordo com Carpinetti *et al* (2000) as superfícies que apresentam Rsk negativo são menos suscetíveis ao desgaste prematuro. Além disso, em aplicações como mancais lubrificados, os sulcos formados tem a função de depositar lubrificante o que diminui o atrito entre as superfícies em contato. Estudos feitos por Sedlacek, Podgornik e Vizintin (2009) mostram que quanto menor for os valores obtidos para Rsk menor tende a ser a fricção e consequentemente menor o atrito entre as superfícies analisadas.

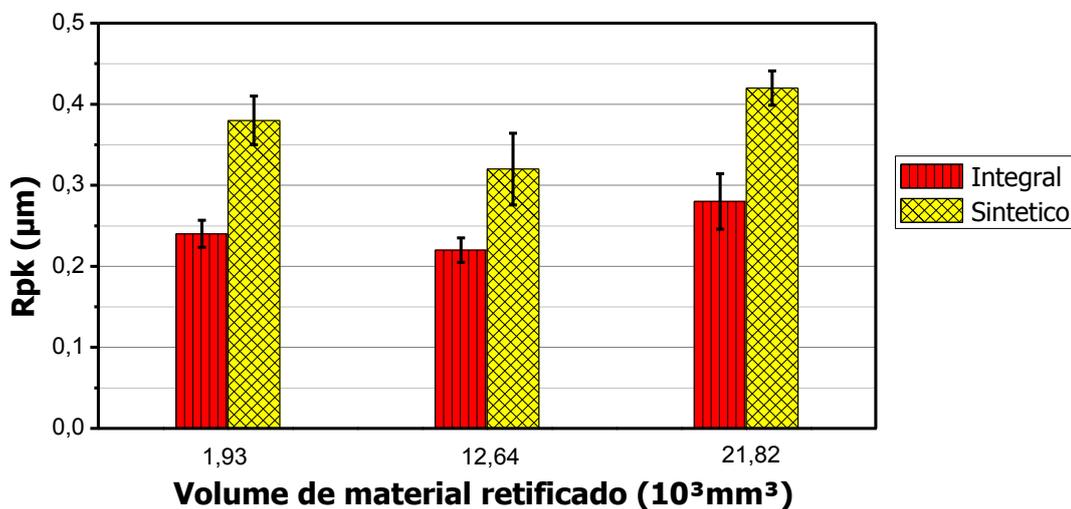
Analisando os parâmetros estatísticos Rku e Rsk percebe-se que os dois fluidos de corte usados geram uma superfície com elevada distribuição de picos mais agudos, no entanto em apenas uma etapa de retificação o fluido de corte sintético apresentou um valor de Rku <

3, valor este que caracteriza uma superfície platafórmica que possui excelentes propriedades de suportar carga. Já o parâmetro R_{sk} mostrou que os dois fluidos de cortes utilizados apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que, os valores obtidos para $R_{sk} < 0$, contudo os resultados obtidos pelo fluido de corte integral foram superiores ao fluido de corte sintético. Diante dos resultados de $R_{sk} < 0$ para os dois fluidos de corte, conclui-se que isso é uma característica do processo de retificação gerar uma superfície com boa distribuição de picos removidos. Dessa maneira, os resultados obtidos mostram que parâmetros estatísticos conseguiram caracterizar os perfis gerados pelos dois fluidos de corte e pelo processo de retificação.

5.5 Parâmetro funcional R_{pk}

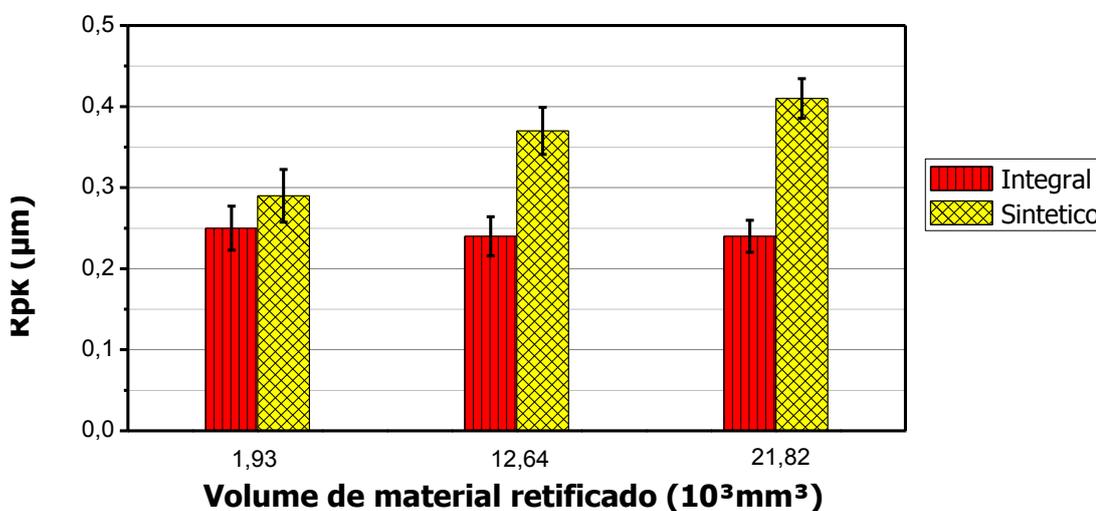
As Figuras 42 e 43 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados médios com os desvios padrões obtidos para o parâmetro funcional de rugosidade R_{pk} em função do volume de material retificado utilizando fluidos de corte integral e sintético com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 42 – Rugosidade R_{pk} em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 43 – Rugosidade Rpk em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

A Fig. 42 mostra de forma geral que o aumento do volume de material retificado não apresenta um comportamento padrão. Isso ocorreu para os dois fluidos de corte. Já a Fig. 43 mostra que o fluido de corte integral comporta-se de forma contrária ao observado na Fig. 42, uma que vez, com o aumento do volume de material retificado o valor de Rpk diminui.

De acordo com a Fig. 42 o menor e o maior valor obtido para Rpk foi alcançado no volume de material retificado de $12,64 \times 10^3 \text{mm}^3$ e $21,82 \times 10^3 \text{mm}^3$ respectivamente.

Considerando os valores médios obtidos nas Figuras 42 e 43 observa-se que os menores valores obtidos para Rpk ocorreu com a aplicação do fluido de corte integral. Isso mostra que o fluido de corte integral obteve melhor desempenho que o fluido de corte sintético mesmo com o aumento da velocidade de mergulho e do volume de material retificado. Uma explicação para tal resultado se deve a capacidade que o fluido de corte integral tem de formar um filme lubrificante na peça durante o processo de retificação que garante um menor atrito em a peça e o rebolo, e com isso, menores valores de Rpk foram obtidos. O parâmetro Rpk está associado à região na qual o desgaste ocorre nos primeiros contatos relativos entre as superfícies. Esse parâmetro é muito usado para verificação de amaciamento de motores a combustão interna. E de acordo com Stout (2000) os processos de manufatura nos quais produzem pequenos valores de Rpk são os mais apropriados para obter boas informações das propriedades de amaciamento onde a geometria da superfície é um fator preocupante.

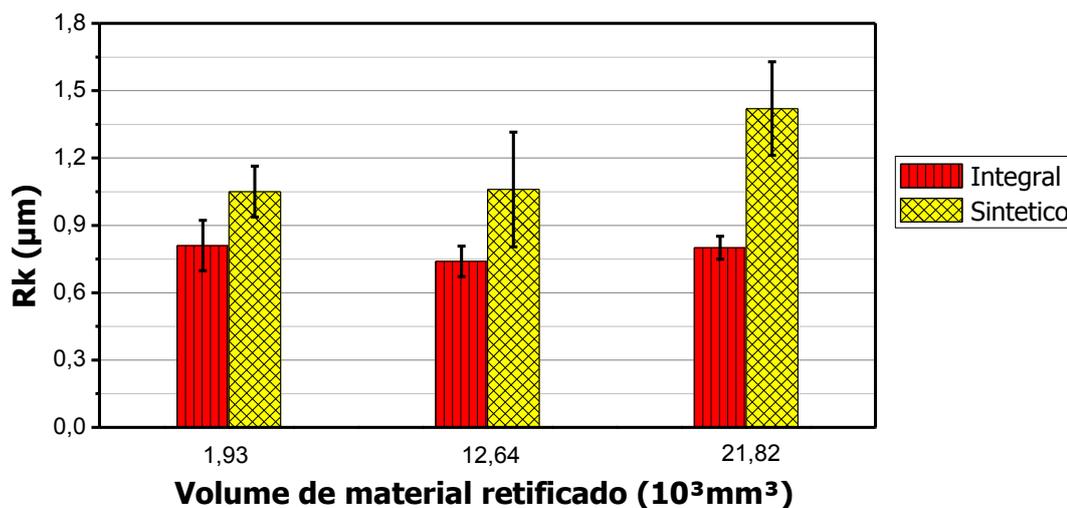
Golchin *et al* (2015) observaram que valores menores de Rpk proporcionam melhor desempenho da superfície em contato quanto a fricção e da taxa de desgaste.

Relacionando os resultados obtidos do parâmetro estatístico Rku e do parâmetro funcional Rpk, uma vez que, esses dois parâmetros analisam a presença de picos na superfície, observamos que o fluido de corte sintético obteve melhores resultados para Rku e que o fluido de corte integral alcançou melhores resultados para Rpk.

5.6 Parâmetro funcional Rk

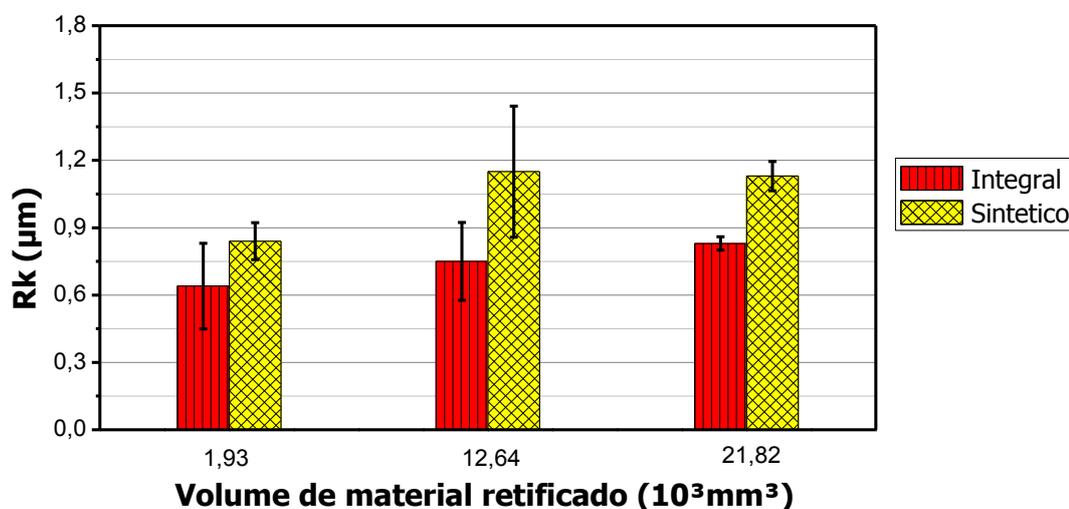
As Figuras 44 e 45 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados médios com os desvios padrões obtidos para o parâmetro funcional de rugosidade Rk em função do volume de material retificado utilizando os fluidos de corte integral e sintético com velocidades de mergulho de 0,6 mm/mim e 1,2 mm/min.

Figura 44 – Rugosidade Rk em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 45 – Rugosidade Rk em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

Considerando os valores médios obtidos nas Fig. 44 e 45 observa-se que os menores valores obtidos para Rk ocorreu com a aplicação do fluido de corte integral. Novamente observa-se que a capacidade que o fluido de corte integral tem de formar um filme lubrificante na peça durante o processo de retificação em velocidades menores garante um menor atrito entre a peça e o rebolo, e com isso, menores valores de Rk seriam obtidos quando comparados aos resultados obtidos com o fluido de corte sintético. Contudo, percebe-se que mesmo com o aumento da velocidade de mergulho e com o aumento do volume de material retificado a condição com fluido de corte integral obteve os menores resultados.

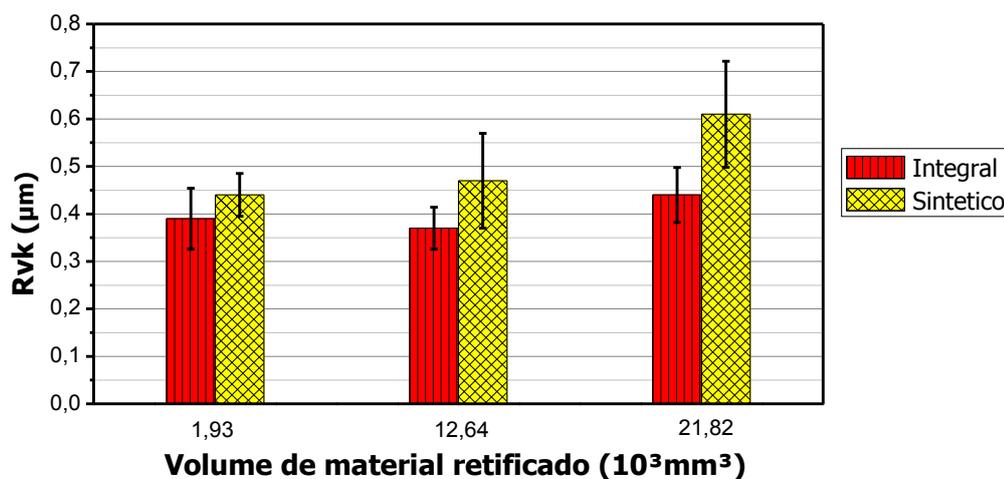
Pode-se observar por meio da Figura 18 que a relação da área de rolamento que o parâmetro Rk está relacionado com os parâmetros Mr_1 e Mr_2 . E quanto menor for o valor de Rk, menor será o valor de Rpk e maior será o valor de Rvk.

Analisando os resultados obtidos percebe-se que os menores valores de Rk coincidem com os menores valores obtidos para Rpk. Isso mostra que nos testes realizados os resultados encontrados estão de acordo com a teoria aplicada para esses parâmetros. Além disso, os resultados obtidos estão em conformidade com os estudos de Petropoulos *et al* (2003) que analisaram a influência do processo de usinagem na relação dos parâmetros Rk e Rpk na curva de rolamento. E os resultados encontrados pelos autores mostram que quanto menor o valor de Rk, menor será o valor de Rpk, com isso menor será o desgaste na fase inicial de contato entre duas superfícies.

5.7 Parâmetro funcional Rvk

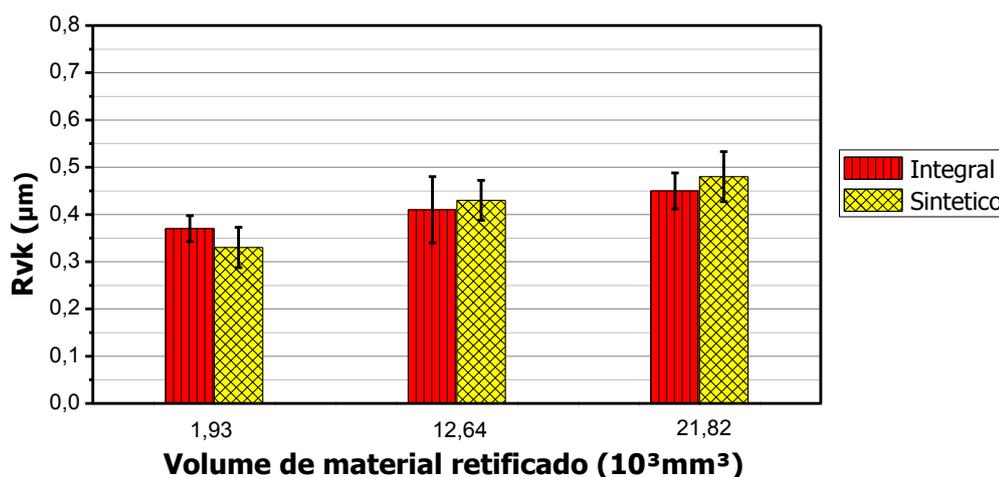
Nas Figuras 46 e 47 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados médios com os desvios padrões obtidos para o parâmetro funcional de rugosidade Rvk em função do volume de material retificado utilizando fluidos de corte integral e sintético com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 46 – Rugosidade Rvk em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 47 – Rugosidade Rvk em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

Observando as Fig. 46 percebe-se que com o aumento do volume de material retificado o valor de Rvk aumentou para o fluido de corte sintético. Esse fato também é

observado na Fig. 47 para os dois fluidos de corte. Isso mostra que o aumento no volume de material retificado promove alterações na superfície do material retificado.

Considerando os valores médios obtidos nas Figuras 46 e 47 observa-se que o fluido de corte sintético obteve os maiores resultados para R_{vk} , sendo menor apenas na Fig. 47 com o volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$. O parâmetro R_{vk} representa a profundidade do vale gerado na superfície após os processos de fabricação. Essa é uma medida reduzida da porção de vales profundos que se prolongam para dentro do material conforme a curva de rolamento. E quanto maior esse valor, maior será a capacidade de uma superfície reter lubrificante nesses vales formados.

Analisando os resultados encontrados percebe-se que o fluido de corte sintético atua de forma mais eficaz ao gerar superfícies com maiores valores de R_{vk} quando comparado com o fluido de corte integral.

Relacionando o parâmetro R_{vk} e o parâmetro R_{pk} , podemos obter informações sobre a fricção e o atrito entre duas superfícies em contato. Analisando os valores obtidos nos testes observa-se que os valores de R_{vk} são maiores que todos os valores de R_{pk} nas duas velocidades de corte e nos volumes de material retificado para os dois fluidos de corte usados. Contudo, percebe-se que a diferença entre R_{vk} e R_{pk} é mais acentuada para o fluido de corte integral. E quanto maior for o valor de R_{vk} em relação à R_{pk} menor será a fricção, o atrito e o desgaste entre duas superfícies em contato. Sedlacek, Podgornik e Vizintin (2009) relacionaram o desgaste da superfície do aço AISI 52100 com os parâmetros funcionais e descobriram que quanto maior for o valor de R_{vk} em relação ao R_{kp} menor será a fricção, o atrito e o desgaste entre duas superfícies em contato.

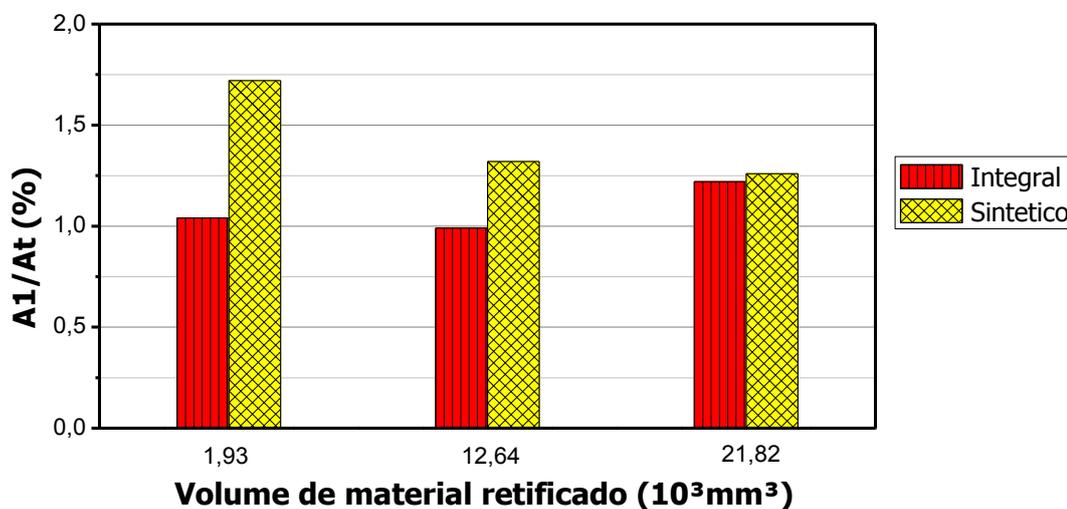
Por intermédio da análise isolada dos parâmetros funcionais R_{pk} , R_k , R_{vk} percebe-se que o fluido de corte integral apresentou-se mais eficiente em gerar uma superfície com menores valores de R_{pk} , uma vez que, quanto menor o valor desse parâmetro, menor será o desgaste sofrido por essa superfície produzida nos primeiros contatos relativos entre duas superfícies. Isso implica em uma vida útil maior para superfície na fase de amaciamento e nas fases posteriores. Para R_k o fluido de corte integral se apresentou mais eficiente em gerar uma superfície com os menores valores para R_k , uma vez que, superfícies com valores cada vez menores para esse parâmetro, são superfícies que apresentam uma alta capacidade de suportar carga em operações de contato. Já para R_{vk} o fluido de corte sintético se mostrou mais eficiente, uma vez que, os melhores resultados foram obtidos com esse fluido de corte, e

quanto maior o valor desse parâmetro, melhor será a capacidade da superfície gerada reter lubrificante nos vales formados na superfície.

5.8 Percentual de picos A_1/At

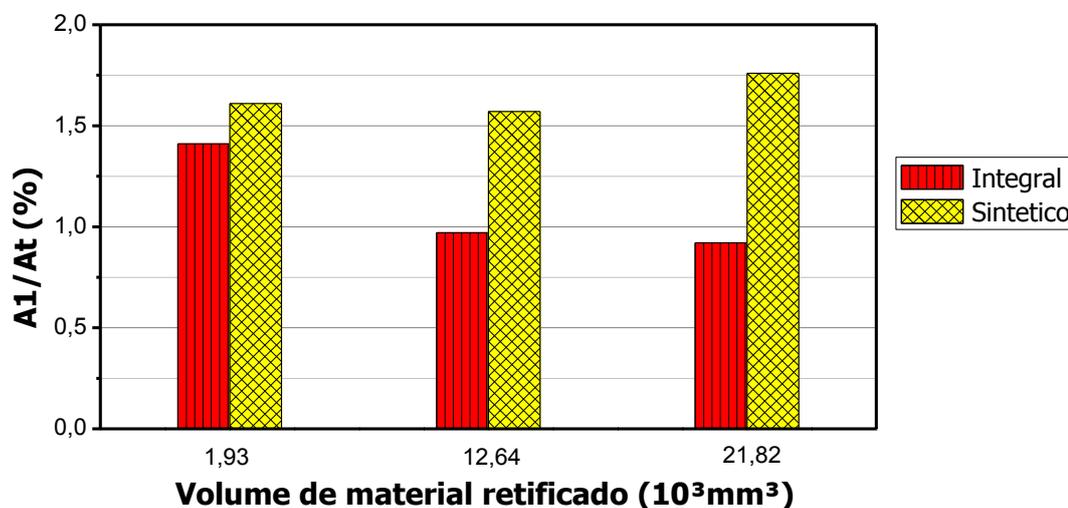
As Figuras 48 e 49 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados obtidos para relação do percentual de picos A_1/At em função do volume de material retificado com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 48 – Percentual de picos em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 49 – Percentual de picos em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

A relação A_1/At parte dos parâmetros funcionais R_{pk} , Mr_1 , tem como intuito garantir uma maior confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que, essa relação leva em conta os desvios verticais e horizontais. Por essa razão a relação do percentual de picos é mais confiável que o parâmetro R_{pk} utilizado de forma isolado.

Considerando os valores obtidos nas Figuras 48 e 49, o fluido de corte sintético obteve os maiores resultados para A_1/At nos volumes de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$ respectivamente. Para o fluido de corte integral de acordo com a Fig. 49 o menor valor foi encontrado no volume de material retificado de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

Analisando os resultados obtidos na Fig. 48 percebe-se que o aumento do volume de material retificado promoveu uma redução na eficiência do fluido de corte integral em comparação com o fluido de corte sintético, uma vez que, comparando os valores obtidos a partir da relação A_1/At e realizando a diferença dos valores nos seus respectivos volume de material retificado, percebe-se que no volume de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ essa diferença era de 0,73% passando para 0,05% no volume de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Isso mostra que o aumento do volume de material retificado promoveu um aumento na eficiência do fluido de corte sintético em relação ao fluido integral.

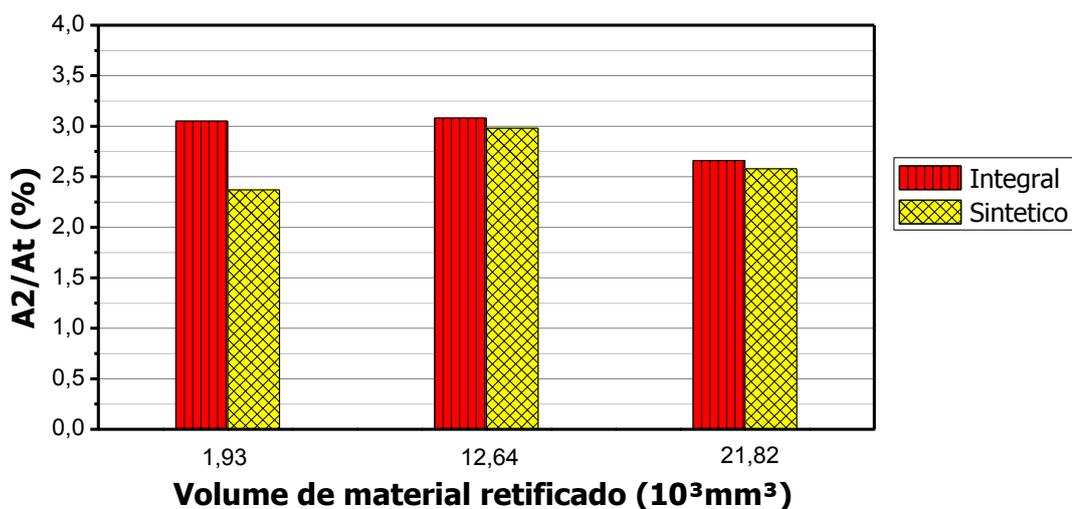
Já na Fig. 49 percebe-se o contrário, pois com o aumento do volume de material retificado o fluido de corte integral teve sua eficiência aumentada, uma vez que, no volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ a diferença percentual entre os fluidos sintético e integral era de 0,20% passando para 0,84% no volume de material retificado $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Esse aumento no percentual pode ter ocorrido devido ao fato do fluido de corte integral mesmo em velocidade de mergulho mais alta manter sua ação lubrificante devido à capacidade desse mesmo fluido promover a redução do calor na zona de corte, garantido assim, maior eficiência do fluido integral em relação ao fluido sintético.

Analisando a relação A_1 percebe-se que os fluidos de corte integral e sintético obtiveram $A_1/At < 2\%$ o que mostra que os dois fluidos foram capazes de gerar superfícies que apresentam boas características de minimizar o desgaste na fase inicial de contato. Porém, de uma forma geral o fluido de corte integral obteve maior eficiência na geração de uma superfície com menores valores de A_1/At .

5.9 Percentual de vales A_2/At

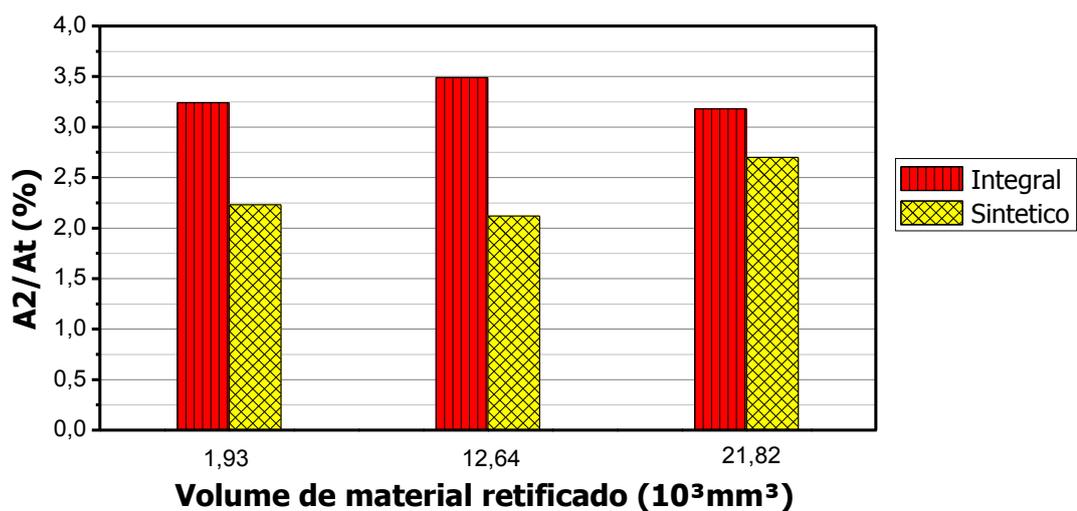
As Figuras 50 e 51 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados médios obtidos para relação do percentual de picos A_2/At em função do volume de material retificado com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 50 – Percentual dos vales em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 51 – Percentual dos vales em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

A relação A_2/At parte dos parâmetros funcionais Rvk , Mr_2 e tem como objetivo garantir uma maior confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que, essa relação leva em

conta os desvios verticais e horizontais. Por essa razão a relação do percentual de vales é mais confiável que o parâmetro Rvk usado de forma isolado.

Analisando os resultados obtidos percebe-se que na Fig. 50 o aumento do volume de material retificado promoveu uma redução na eficiência do fluido de corte integral, uma vez que, comparando os valores obtidos a partir da relação A_2/At realizando a diferença dos valores nos seus respectivos volume de material retificado, percebe-se que no volume de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ essa diferença era de 0,67% passando para 0,08% no volume de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Isso mostra que o aumento do volume de material retificado promoveu um aumento na eficiência do fluido de corte sintético em relação ao fluido integral.

Considerando os valores médios obtidos na Fig. 51 observa-se que foram alcançados os maiores valores percentuais de vales para o fluido integral e os menores valores percentuais de vales para o fluido sintético. O menor valor encontrado (2,12 %) para a relação do percentual de vales foi na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min com volume de material retificado de $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e o maior percentual (3,49%) foi obtido nas mesmas condições.

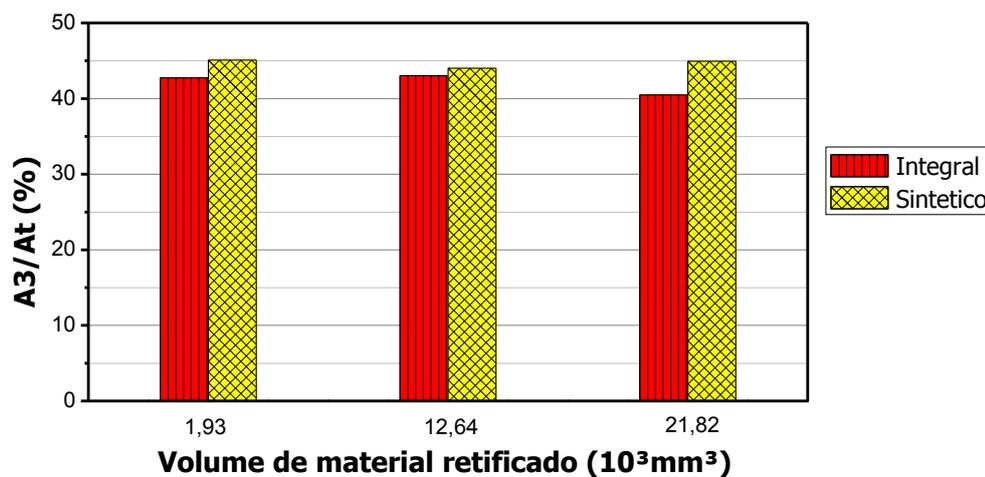
Ainda na Fig. 51 percebe-se que com o aumento do volume de material retificado o fluido de corte integral teve sua eficiência aumentada, uma vez que, no volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ a diferença percentual entre os fluidos sintético e integral era de 1,01%, no volume de $12,64 \times 10^3 \text{ mm}^3$ a diferença passou para 1,37%, no entanto no volume de material retificado de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$ a diferença passou para 0,48%. Esse aumento no percentual seguido por uma redução pode ser relacionado ao fato de no início o fluido de corte integral ter suas propriedades de lubrificação e redução do calor mantida, contudo a partir do volume de material retificado de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$ o fluido sintético passou a ter sua eficiência aumentada com diminuição do percentual da área de vales.

Analisando a relação $3\% < A_2/At < 10\%$ proposta por Mesquita (1992), observa-se que apenas o fluido de corte integral gerou superfícies com capacidade de retenção de lubrificante, no entanto com o aumento da velocidade de mergulho e do volume de material retificado a eficiência do fluido de corte integral em gerar superfície com capacidade de reter lubrificante foi reduzida em relação ao fluido de corte sintético. Esse resultado de A_2/At obtido pelo fluido de corte integral é mais confiável que o resultado obtido pelo fluido de corte sintético de forma isolado no parâmetro Rvk .

5.10 Percentual de núcleos A_3/At

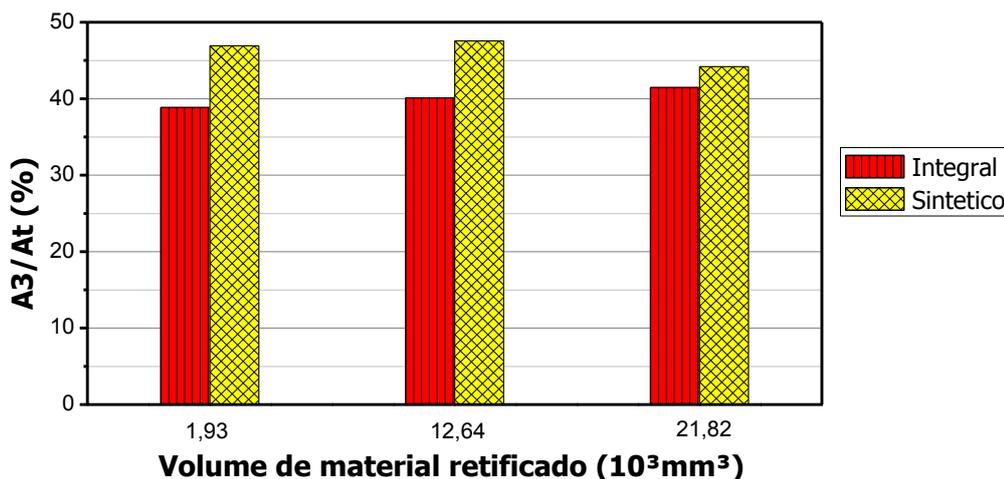
Nas Figuras 52 e 53 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados obtidos para relação do percentual de núcleos A_3/At em função do volume de material retificado com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 52 – Percentual de núcleos em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 53 – Percentual de núcleos em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

A relação A_3/At parte dos parâmetros funcionais Rvk , Mr_1 , Mr_2 e tem como objetivo garantir uma maior confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que, essa relação leva em

conta os desvios verticais e horizontais. Por essa razão a relação do percentual de núcleos é mais confiável que o parâmetro R_k usado de forma isolado.

Analisando a Fig. 52 observa-se que os dois fluidos de cortes não apresentam um comportamento padrão, no entanto nos três volumes de material retificado o fluido de corte integral obteve os melhores resultados.

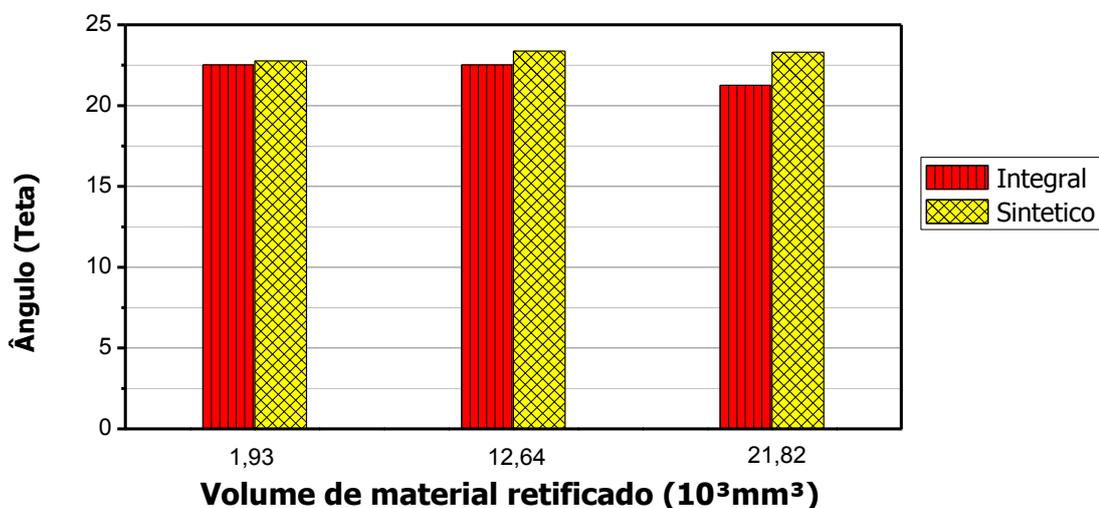
Considerando os valores médios obtidos na Fig. 53 observa-se que no volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ foi alcançado o menor valor percentual de núcleos para o fluido de corte integral. Observa-se que com o aumento da velocidade de mergulho foi alcançado o melhor e pior resultado para a relação percentual de núcleos, uma vez que, essa relação quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato e quanto menor o valor dessa relação, melhor será a capacidade da superfície suportar carga em operações de contato.

Os resultados obtidos mostram que na menor velocidade de mergulho e menor volume de material retificado o fluido de corte integral se mostrou mais eficaz ao gerar uma superfície com menor valor percentual de núcleos. Isso se deve ao fato do fluido de corte integral em baixas velocidades de mergulho formar um filme lubrificante que reduz o atrito e garante melhores resultados. No entanto, percebe-se que com o aumento da velocidade de mergulho e do volume de material retificado o fluido de corte integral tem esse poder de formar um filme lubrificante reduzido devido ao fato do atrito aumentar, pois essa mudança nos parâmetros afeta a topografia do rebolo que reduz a eficiência do fluido de corte integral. Nesse instante o fluido de corte sintético promove uma dissipação do calor na zona de corte tornando-o competitivo frente ao fluido de corte integral. Comparando essa competitividade na Fig. 51 com os volumes de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$, condição na qual observou a maior diferença entre os dois fluidos de corte. Nessa comparação a diferença entre o fluido de corte integral e o fluido de corte sintético no volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ era de 8,09% passando para 2,73% no volume de material retificado de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$. Percebe-se que o fluido de corte integral tem uma redução na sua eficácia em relação ao fluido de corte de sintético.

5.11 Ângulo de inclinação da região central θ_k

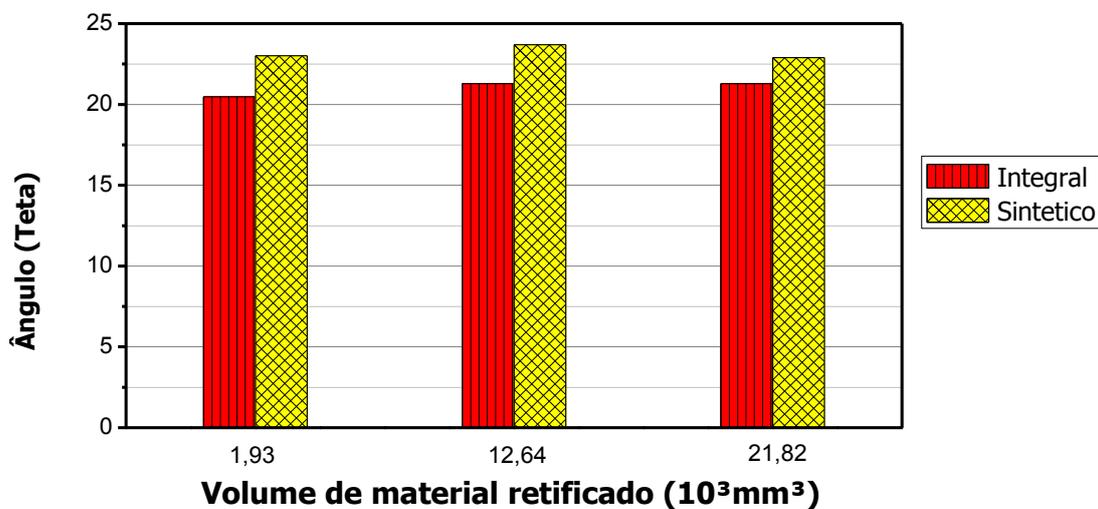
As Figuras 54 e 55 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados obtidos para o ângulo de inclinação (θ_k) em função do volume de material retificado com velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

Figura 54 – Ângulo (θ_k) em função do volume de material retificado com velocidade de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 55 – Ângulo (θ_k) em função do volume de material retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

De acordo com a Fig. 55 observa-se que nos três volumes de material retificado o fluido de corte integral apresentou menores valores comparados ao fluido sintético. Diante disto, nota-se que com o aumento do volume de material retificado o fluido de corte integral aumentou sua eficiência em relação ao fluido de corte sintético quando feita a diferença entre os valores obtidos, percebe-se que essa diferença angular entre os dois fluidos de corte no volume de material retificado de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ era de $0,24^\circ$ passando para $2,05^\circ$ no volume de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

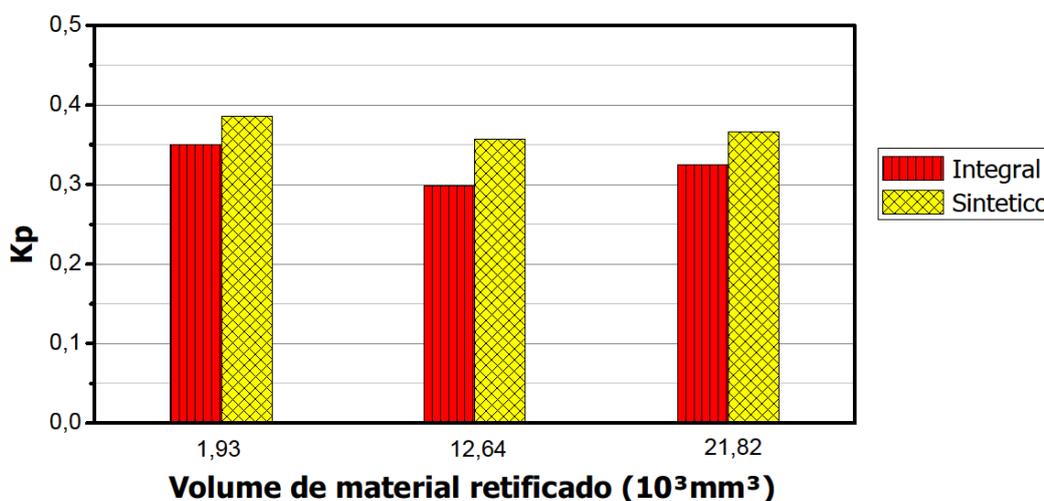
Já na Fig. 55 observa-se o contrário, uma vez que, com o aumento do volume de material retificado a eficiência do fluido de corte integral em relação ao fluido de corte sintético diminui passando de $2,54^\circ$ no volume de $1,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ para $1,6^\circ$ no volume de $21,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

Para o ângulo θ_k os dois fluidos de corte apresentaram alta capacidade de suportar carga em operações de contato. Pois, segundo Mesquita (1992) superfícies com $\theta_k < 33^\circ$ apresentam alta capacidade de suportar carga. No entanto, o fluido de corte integral por obter menores valores de ângulo se mostrou mais eficiente.

5.12 Coeficiente de vazão K_p

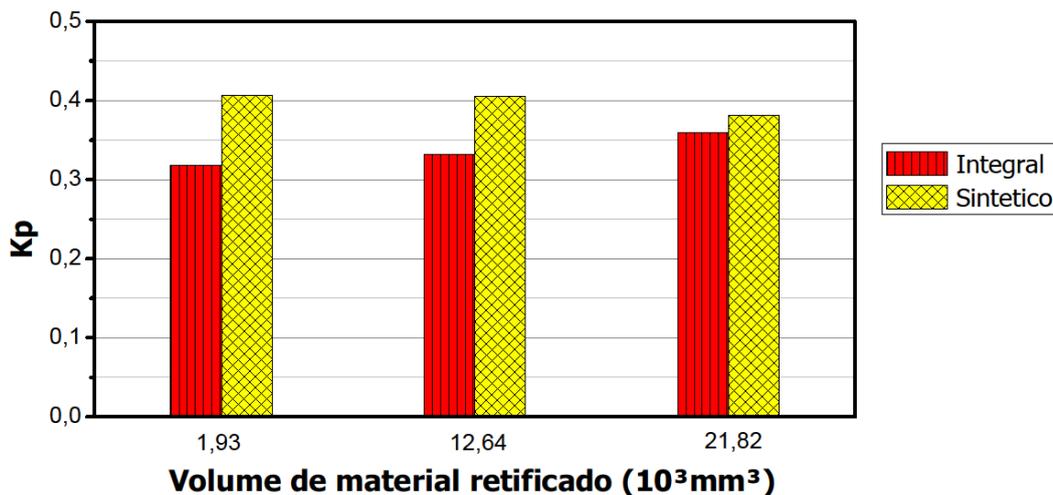
As Figuras 56 e 57 ilustram de forma comparativa e quantitativa, os resultados médios obtidos para o coeficiente de vazão K_p em função do volume de material retificado com velocidades de mergulho de $0,6 \text{ mm/min}$ e $1,2 \text{ mm/min}$.

Figura 56 – Coeficiente de vazão K_p em função do volume de material de retificado com velocidade de $0,6 \text{ mm/min}$.



Fonte: próprio autor

Figura 57 – Coeficiente de vazio K_p em função do volume material de retificado com velocidade de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor

Considerando os valores médios obtidos nas Fig. 56 e Fig. 57 observa-se que o fluido de corte integral apresentou os menores valores para o coeficiente de vazio. Observando a Fig. 56 percebe-se que com o aumento do volume de material retificado o fluido de corte integral aumentou sua eficiência com a redução no valor do coeficiente de vazio.

Já Fig. 57 observa-se o contrário, uma vez que, com o aumento do volume de material retificado a eficiência do fluido de corte integral diminui. Dessa forma, percebe-se que no maior valor de volume de material retificado tanto para a velocidade de mergulho de 0,6 mm/min ou 1,2 mm/min o fluido de corte integral tem sua eficiência reduzida.

O coeficiente de vazio está interligado com o parâmetro R_k , uma vez que, esse parâmetro mede a capacidade de contato entre duas superfícies e quanto menor o valor de R_k na curva de rolamento menor será o volume de vazios presentes nessa superfície.

Comparando os resultados obtidos de R_k com os valores de coeficiente de vazio para o fluido de corte integral, percebe-se que nas mesmas condições analisadas de velocidade de mergulho e volume de material retificado, que os menores valores de R_k garantem os menores valores para o coeficiente de vazio.

No geral o fluido de corte integral apresentou maior eficiência, contribuindo para uma superfície com menor coeficiente de vazio, e quanto menor o valor desse parâmetro, menor a quantidade de vazios na superfície, garantindo assim maior contato entre duas superfícies e menor será o desgaste sofrido por essa superfície.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos para a superfície do aço ABNT 4340 endurecido utilizando os fluidos de corte integral e sintético no processo de retificação conclui-se:

Comparando os fluidos de corte integral e sintético no processo de retificação percebe-se que os dois fluidos de corte analisado apresentam características próprias na geração da superfície retificada, permitindo assim controlar a sua fabricação em função da aplicação desejada.

Os parâmetros funcionais utilizados neste trabalho estão interligados, ou seja, a variação desses parâmetros altera de forma positiva ou negativa o desempenho da superfície retificada conforme a aplicação desejada.

O volume de material retificado exerce maior influência nos resultados dos fluidos de corte integral e sintético do que a velocidade de mergulho.

O fluido de corte integral obteve o melhor desempenho nos parâmetros de amplitude. Na análise dos parâmetros estatísticos o fluido de corte integral obteve melhor resultado no parâmetro R_{sk} , enquanto que o fluido de corte sintético obteve melhor desempenho no parâmetro R_{ku} . Na análise dos parâmetros funcionais de forma isolada o fluido de corte integral obteve o melhor desempenho nos parâmetros R_{pk} e R_k , no entanto o fluido de corte sintético obteve melhor desempenho em R_{vk} .

Já nas análises das relações percentuais, do ângulo de inclinação e do coeficiente de vazio o fluido de corte integral obteve os melhores resultados, isso garante a superfície retificada do aço ABNT 4340, boas propriedades de amaciamento do desgaste na fase inicial de contato, boa capacidade de suportar carga em operações de contato e boa capacidade de retenção de lubrificantes. No entanto, com o aumento do volume de material retificado o fluido de corte integral tem sua eficiência reduzida.

Dessa forma, o fluido de corte integral demonstrou por meio do seu desempenho nas condições de retificação utilizada ter capacidade para substituir o fluido de corte sintético na geração de uma superfície com características funcionais específicas, uma vez que, o fluido de corte sintético é o mais utilizado pelas indústrias de retificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABE, R. **Leitura e Interpretação dos Resultados de Controle Rugosidade**. Apostila, Renault do Brasil, Curitiba-PR. p. 5, 2001.
- ABBOTT, E. J., FIRESTONE, F. A. (1993). **Specifying surface quality. A method based on accurate measurement and comparison**, Mechanical Engineering, n. 55, p.569-572, 1993.
- AGUIAR, P. R.; CATAI, R. E.; BIANCHI, E. C.; FREITAS, R. “**Studies on the cooling minimum quantity and conventional cooling at hardened steels in grinding process**”. Journal of Brazilian Society of Mechanic Science & Engineering. Vol.29, No.2, pp. 136-141, 2007.
- ALVES, A. A. M. Ricardo Fernando. **Estudo de Processo de retificação aplicado à recuperação de placas de molde de máquinas de lingotamento contínuo de placas de aço**. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito do Santo Estadual Paulista, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Surface engineering**. In: Metals Handbook, vol. 5, p 2535. 1994.
- ARAÚJO, J. B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade**. 193f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.
- BALDO, E. D. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica**. Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, p.86, 1994.
- BELINATO, G. **Estudo da oxidação dos óleos de soja e dendê aditivado com antioxidantes, para uso em tratamento térmico em têmpera**. 2010. 160f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo – São Carlos, 2010.
- BERTALAN, C. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas Ferramentas Convencionais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, J. F. **Controle da geometria do cavaco gerado por rebolos CBN**. Revista Máquinas & Metais, p. 26-31. julho 1993.
- BIANCHI, E. C.; DIAS, A. C. P.; BORTOLOTO, R. G.; JÚNIOR, C. E. S.; SANCHEZ, L. E. A.; JÚNIOR, M. V. **A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de usinagem e dressagem**. Revista Máquinas e Metais, maio, p.70-83, 1996.
- BIANCHI, C. E.; VALARELLI, I. D.; AGUIAR, P. R.; SILVA, E. J.; MONICI, R. D.; SOUZA, G. F. **A contribuição dos rebolos de CBN para a melhoria da competitividade e qualidade**. Revista Máquinas e Metais, abril, p. 170-197, 2001.
- BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; PIUBELI, B. A. “**Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação**”. Artliber Editora, São Paulo, SP, Brasil, 2004.
- 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.
- BOHM, H. J. **Parameters for evaluating the wearing behavior of surfaces**. Int. J. Mach. Tools manufact., v. 32, n. 0,5, p.109-113, 1992.
- BHUSHAN, B. (1999). **Principles and applications of tribology**, Jonh Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMAN, M. “**Friction, cooling and lubrication in grinding**”. CIRP Annals. Vol. 48, No.2, pp.581-598, 1999.
- BYERS, J. P. “**Metalworking fluids**”. CRC Press, 2nd edition, New York, 463p, 2006.

- CATAI, R. E. **Otimização das Condições de Refrigeração/Lubrificação no Processo de Retificação Cilíndrica de Mergulho**. Tese de Doutorado, UNESP, Guaratinguetá SP, Brasil, 2004.
- CARPINETTI, L. C. R. et al. **Rugosidade Superficial**. USP – EESC, 2000.
- CORRAL, I. B.; CALVET, J. V.; SALCEDO, M. C. **Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50, 621–629, 2010.
- CHEN, X; LIMCHIMCHOL, T. **Monitoring grinding wheels redress-life using support vector machines**. International Journal of Automation and Computing, Nottingham, p. 56-62, 2006.
- CLARK, J.R., GRANT, M. B. **The effect of surface finish on component performance**, Int. J. Mach. Tools Manufact., v.32, n. 1/2, p.57-66, 1992.
- DAVIM, P. **Tribology for Engineers A Practical Guide**. Wood head Publishing, 2011.
- DIN EN ISO 4287 – “**Geometrical Product Specifications**” (GPS).
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição, p.230-248, 2003.
- DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. “**Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography**”, wear 167 p.9-21, 1994.
- DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. “**Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties**”, wear 178 p.29-43, 1994.
- EBBRELL, S.; WOOLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. “**The effects of cutting fluid application methods on the grinding process**”. International Journal of Machine Tools & manufacture: Design, Research and Application. Vol. 40, p. 209-223, 2000.
- EL BARADIE, M. A. “**Cutting fluids: Part I. Characterization**”. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 56, pp. 786-797, 1996.
- EL BARADIE, M. A. **Cutting fluids: part I. characterization**. Journal of Material Processing Technology, Dublin, n. 56 p. 786-797, 1996a.
- FELIPE JÚNIOR, J. **Estudo fenomenológico do processo de retificação creep-feed**. Dissertação de mestrado, USP/EESC/SEM, 1992.
- FENG C. X., WANG X., ZHIGUANG Y.: **Neural networks modeling of honing surface roughness parameters defined by ISO 13565**. Journal of Manufacturing Systems. 21(5), 395-408, 2002.
- FERNANDES, B. U. **Análise de métodos de lubri-refrigeração aplicados no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho em aços endurecidos**. 163f. Tese (Doutorado) – Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2007.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 11 ed. São Paulo, Edgard Blucher. 751p. 1977.
- FRANÇA, V. T. **Estudo da perda da circularidade e rugosidade de peças retificadas utilizando as redes neurais artificiais**. 190f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.
- GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD,; ELEWA, I. M.; SOLIMMAN, H. H. **Roughness parameters**. Journal of Materials Processing Technology. 133-145, 123, 2002.
- GATES, J.D. **Two-body and three-body abrasion: A critical discussion**. Wear, 214, 1998.

- GOHAR, R.; RANHEJAT, H. **Fundamentals of Tribology**. Imperial College Press, 2nd Edition, 2012.
- GOLCHIN, A.; FRIEDRICH, K.; NOLL, A.; PRAKASH, B. **Influence of Counter Surface Topography on the Tribological Behaviour of Carbon-filled PPS Composites in Water**. International Tribology Conference, Tokyo, 2015.
- 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.
- GONÇALVES, P. S. C. **Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.
- 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.
- GRAF, W. **Cylindrical Grinding**. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 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. 1978.
- GUO, C.; CHAND, R.H. **A ceramic machining primer: (diamond grinding of ceramics)**. Ceramic Industry, v. 4, p.71-78, abril. 1998.
- GHOSH, A., SADEGHI, F. **A novel approach to model effects of surface roughness parameters on wear**. Wear 338-339, 73-94. 2015.
- HASSUI, A. **Comparação sobre a utilização de diferentes sensores no monitoramento do processo de retificação**. 102f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.
- HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2002.
- HASSUI, A.; DINIZ, A. E. **Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 855–862, 2003.
- 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.
- HUTCHINGS, Ian M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. ISBN 0 340 56184 X, Great Britain, 1992.
- HRYNIEWICZ, P.; SZERI, A. Z.; JAHANMIR, S. **“Coolant flow in surface grinding with non-porous wheels”** International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 42, pp.2347-2367, 2000.
- 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.
- ISO 13565: **“Superfícies com propriedades funcionais Estratificadas”**, 1996.
- ISO 13562-2: **“Geometrical product specifications profile method, surfaces having stratified functional properties” – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve**, 1996.

ISO 13565-3: “**Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method; surfaces having stratified functional properties - part 3: height characterization using the material probability curve**”, 1998.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. **Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding whells**. Journal of Materials Processing Technology n° 108, p. 114-124, 2000.

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

JIANG, X. J., WHITEHOUSE, D.J. **Technological shifts in Surface Metrology**. *CRIP Annals – Manufacturing Technology* 61 pp. 815-836. 2012.

KING, R. I., HAHN, R. S., “**Handbook of Modern Grinding Technology**”. 3a Ed., New York, Chapman And Hall, 1986.

KLÖCKE, E. F. **Manufacturing process 2: grinding, honning, lapping**, RWTH ed. Springer, 433 p. 2009.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren band 2: Shchleifen, Honen, Läppen**“. Band 2.VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 1980.

KRAR, S. F.”**Grinding technology**”. Delmar Publishers Inc., Second Edition, USA, p. 165-319, ISBN 0-8273-6390-7. 1994.

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.

LONARDO, P. M.; LUCCA. D. A.; DE CHIFFRE, L. **Emerging trends in surface metrology**, Annals of the CIRP, v. 51, p.701-723, 2002.

MACHADO, R.M.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M. B.”**Teoria da usinagem dos materiais**”. Editora E.Blucher, São Paulo. Brasil, 371p, 2009.

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

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

MATTOS, R. F. J. **Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna**, 82p. Dissertação (Mestrado) Engenharia Mecânica e de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UFTPR. 2009.

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

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. “**Handbook of Machining with Grinding Wheels**”. CRC Press. New York, 2007

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

MEDEIROS, J. T. N. **Fadiga de Contato de Discos Metálicos Não-Conformes submetidos a ensaio a seco de rolamento cíclico**. Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica em São Paulo, 2002.

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

MESQUITA, N. G. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação**. 142p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.

MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; AGUIAR, P. R. “**Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasives CBN grinding wheels**”. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application. Vol. 46, pp.122-131, 2006.

MUMMERY, L. **Surface Texture Analysis the handbook**, 1992.

MURALIKRISHANM, B., RAJA, J. **Process diagnostic and functional correlation in surface metrology: novel technique, case studies y analysis system development**, Measurement, n.36, p. 175-183, 2004.

NETO, N. M.; PEDROSO, E. E. A. **Avaliação da pintura do veículo em função da rugosidade do metal**. In: **QUALIFICAÇÃO DE CHAPAS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**, II Workshop, 1999, São Paulo. Anais. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1999.

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

NUSSBAUM, O. H. C. **Rebolos e abrasivos** - Tecnologia básica, Ícone editora Ltda, 1988.

OLIVEIRA, J. F. G.; PURQUÉRIO, B. M. **Dressagem controlada: uma solução para os problemas**. Revista Máquinas e Metais, nº 283, 1989.

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

OLIVEIRA, C. J. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados à topografia de superfície em usinagens**. 135f. Dissertação mestrado (Mestre em ciências em engenharia mecânica) Pós-graduação em Engenharia Mecânica, PUC - Minas, Belo horizonte, 2004.

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

PAWLUS, P., MICHALSKI, J.; “**Characterization of the shape of the roughness profile ordinate distribution of honed cylinder surfaces**”. Wear; Vol. 161, pp. 135-143. 1992.

PETROPOULOS. G, DASIC. P, VODOLAZSKAYA. N, DRAMALIS. D. **Is the Rk group of roughness parameters suitable to describe turned surfaces**. International Scientific Conference, Gabrovo, 2003.

PIRATELLI, F. A. “**Rugosidade superficial**”, Palestra 3º Seminário de metrologia, Brasília, Brasil, 41p. 2011.

RAY, S. **Experimental investigation into the effect of 3D surface roughness parameters on flash temperature**. General Motors Technical Center, Bangalore, India, 2011.

RODRIGUES, F. E. S. **Parâmetros Topográficos para Avaliação, Caracterização e Controle Tribológico de Superfícies de Engenharia**, 118p.,(Mestre em Engenharia Mecânica - EESC), 2006.

RODRIGUEZ, E.C. **Caracterização de superfícies de deslizamento lubrificadas (SDL) para virabrequins**. São Carlos, 159 pp (Mestrado EESC), 1995.

SANTOS, C.S; SALES, W. F. “**Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**”. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 1ª Edição, 246p. 2007.

- SCHMIDT, M. A. **Brunimento em ferro fundido cinzento utilizando ferramenta tipo bucha com grãos de diamante**. Dissertação de mestrado. Florianópolis: UFSC, p. 240. 1999.
- SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. **Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear**. *Wear* 266:482–487. 2009.
- SIMÕES, P. S. **Utilização de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação cilíndrica externa de mergulho cerâmica avançada com rebolo**. 159f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru. 2012.
- SHAW, M. C. **“Principles of abrasives processing”**. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996.
- SOUZA, O. G. A. **Monitoramento da dressagem no processo de retificação**. 72f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru. 2009.
- STANFORD, M., LISTER, P.M. **“Future role of metalworking fluids”**, *Industrial Lubrication Tribology*, Vol. 54, No.1, pp. 11-19, 2002.
- STEMMER, C. E. **“Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos”**. Editora da UFSC, Florianópolis, 314 p. 1992.
- STOUT, **In Introduction to Surface Characterization**, 1997.
- STOUT, K. J. **Developments of methods of the characterization of roughness in three-dimensions**. Penton press, London, 2000.
- TAYLOR, H.P. **Guide to Surface Texture Parameters**, 2000.
- TONSHOFF, H. K.; FRIELMUTH, T.; BECKER, J. C. **Process monitoring in grinding**. *Annal of the CIRP*, v.51, p. 551-571, 2002.
- THOMAS, R. T. **Roughness surfaces**. 2nd edition, Imperial College Press, London, 1999.
- WANG, Y. **Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils**. *Journal Of Cleaner Production*, Qingdao, v. 127, p.487-499, jul. 2016.
- WANG, P. J. **Avaliação da retificação com rebolo CBN vitrificado aplicado em ligas de alto desempenho**. 163f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade de São Pulo, São Carlos, 2008.
- WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK Jr., B. **“Grinding fluid application system design”**. *CIRP Annals*.Vol. 44, No.1, pp.333-338, 1995.
- WEGENER, K.; HOFFMEISTER, W. H.; KARPUSCHEWSKI, B.; KUSTER, F.; HAHMANN, W. C.; RABIEY, M. **Conditioning and monitoring of grinding wheels**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* v.60 p. 757 – 777, 2011.
- WERNER, F.; BRINKSMEIER, E. **“Monitoring of Grinding Wheel Wear”**. *CIRP Annals*, 1992.
- WESTKAMPER, E., KRAUS, M. **Theoretical considerations for a new tolerance system to characterize technical surfaces in the micro and nanometer scale**, Institute of Industrial Manufacturing and Management, University of Stuttgart, 1999.
- WHITEHOUSE, D. J. **The parameter rash**, Proceedings of the 2nd International Conference on the Metrology & Properties of Engineering Surface, Leicester, England, April 1981.
- WHITEHOUSE, D. J. **Hand Book of Surface Metrology**. Bristol: Institute of Physics, 1994.

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, 633p, 2008.