

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

LUCAS BENINI

**CARACTERÍSTICAS DAS GRANDEZAS DE PROCESSO E
RESULTADO DE TRABALHO DE RETIFICAÇÃO COMO
FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE REBOLO DE Al_2O_3**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. -Ing.

Florianópolis, outubro de 2011.

**CARACTERÍSTICAS DAS GRANDEZAS DE PROCESSO E
RESULTADO DE TRABALHO DE RETIFICAÇÃO COMO
FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE REBOLO DE Al_2O_3**

Lucas Benini

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”
e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica**

**Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
ORIENTADOR**

**Prof. Júlio César Passos, Dr.
COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph. D.

Prof. Dr. -Ing. Joel Martins Crichigno Filho

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

*À Emilia Winterfeld
(in memorian)*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar, conceder saúde e força para realizar este trabalho;

Ao Prof. Walter Lindolfo Weigaertner, pelo apoio, amizade, orientação e pela visita de acompanhamento durante a execução deste trabalho na *Technische Universität Berlin*;

Ao Prof. Moacir Eckhardt, pela amizade e motivação dada na fase inicial de minhas atividades acadêmicas;

Ao Prof. Rolf Bertrand Schroeter, pelo auxílio e contribuições fornecidas;

Um agradecimento especial ao Mestre Tiago Klein, pela amizade, auxílio, sugestões, discussões e apoio técnico fornecidos durante o período na *Technische Universität Berlin*;

Aos meus pais, Miguel e Leda, por tudo. Aos demais familiares por todo apoio, conselhos e carinho;

Ao Mestre Adriano Boaron, pela amizade, apoio técnico, sugestões e contribuições;

Aos colegas Lucas Maciel e Luiz Schweitzer pelo auxílio (tanto na USFC como na TU Berlin), amizade e apoio;

Ao Dipl. -Ing. Gregor Hasper, pelo apoio técnico, auxílio, incentivo e suporte nas atividades efetuadas na TU Berlin;

A equipe de retificação da TU Berlin: Henning Biesgen, Nikolas Schröer, Sascha Zimmerman, por todo apoio, auxílio e amizade;

Aos amigos que sempre me apoiaram durante este trabalho, Adriano, Achraf, Alafde, Carlos, Carlos Eduardo, Daiane, Eduardo, Erick, Eliane, Erli, João Paulo, Juliana, Margarete, Nabil e Pavlo;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e ao *Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik* - IWF da TU Berlin, pela oportunidade de realização deste trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio econômico.

*“Was bei den Menschen unmöglich ist,
das ist bei Gott möglich.”
Lukas 18:27*

RESUMO

A evolução tecnológica de máquinas-ferramentas e estratégias inovadoras de usinagem, como altas velocidades de corte e elevadas taxas de remoção de material, estão continuamente exigido um aprimoramento das ferramentas de retificação. Os rebolos são frequentemente utilizados no limite de suas propriedades físicas. Isto acarreta que pequenas variações nas propriedades dos rebolos têm consequências significativas sobre o resultado de trabalho no processo de retificação. A repetibilidade das características dos componentes produzidos depende das características das ferramentas de retificação. O comportamento do rebolo em processo tem influência direta na rugosidade da superfície usinada, no desvio de perfil e danos térmicos do componente usinado. A previsão do resultado no processo depende do conhecimento de dados corretos das características do rebolo, principalmente em estruturas fabris onde a preparação do ciclo produtivo é efetuada pela engenharia de processos e não sofre mais uma correção por parte do operador (condutor) de máquina-ferramenta numericamente controlada. No entanto, nem o fabricante de rebolos, nem o usuário têm um procedimento adequado para determinar as características de um rebolo. As informações contidas no rótulo do rebolo especificam o material abrasivo, a granulometria, a dureza, a porosidade e o ligante empregado, mas não dá informações sobre a distribuição dos grãos na estrutura do rebolo. Desta forma, os valores característicos de parâmetros de rugosidade, desvios de perfil, danos térmicos e forças de retificação foram analisadas em componentes retificados com rebolos convencionais, variando-se a composição, fabricantes, grãos de diferentes fornecedores para investigação do comportamento de rebolos de óxido de alumínio. Desenvolveu-se também uma metodologia de avaliação de gumes cinemáticos da ferramenta, com uma concepção de ensaio rápido que fornece um panorama sobre comportamento do desgaste da ferramenta em tempo real para o sistema de gerenciamento do processo, permitindo a adequação das variáveis de entrada do processo de retificação sempre que forem detectadas alterações das características do rebolo. Estas informações podem ser empregadas em um modelo matemático para a determinação das variáveis de entrada e possíveis correções no processo de retificação. Isto permite que as modificações no processo, anteriormente executadas em base do conhecimento do operador, ocorram de forma otimizada pela Engenharia de Processo.

Palavras chaves: rebolos convencionais, forças de retificação, desvios de perfil, danos térmicos, gumes cinemáticos.

ABSTRACT

Due to the technological developments regarding innovative machine tools and machining strategies, higher cutting speeds and higher material removal rates are continuously demanded of conventional grinding tools. Thus, the grinding tools are often utilized at the limit of their physical properties and capabilities. This leads to the effect that small variations in the properties of the grinding wheels often have significant consequences on the grinding process. Hence, the repeatability of the production of grinding tools in terms of their properties, and the prediction of their in-process behavior are of increasing importance for process control. The process behavior of the grinding wheels has direct influence on the surface roughness, profile deviation and thermal damage of the workpiece. The results of in-process predictions depend on the precise acquisition of data concerning the grinding wheel's properties. This is even more critical on industrial environments, where the production cycle is guided mainly by an engineered process and is no longer corrected by the machine operator. However, neither the grinding tool producers, neither the users have an adequate procedure to evaluate the grinding wheel characteristics. The grinding wheel's label contains information about the abrasive material, grain size, hardness, porosity and bond used. However, no information about the grains distribution in the grinding wheel structure is given. Therefore, the values of roughness, profile accuracy, thermal damage and grinding forces were analyzed in workpieces machined with conventional grinding wheels, varying the composition, manufacturers and grains from different suppliers, in order to investigate the behavior of aluminum oxide wheels. In addition, a methodology to evaluate the kinematic edges of a grinding wheel was developed. Based on a quick-test concept, this methodology provides an overview of the grinding wheel wear behavior, allowing the correct adjustment of the process settings as changes on the tool wear condition are detected. This information can be used on a mathematical model to determine the input variables and possible corrections on the grinding process. That allows that changes on the process, which were previously performed on the operator's knowledge basis, occur optimally by the Process Engineering.

Keywords: conventional grinding wheels, grinding forces, profile accuracy, thermal damage, kinematic edges.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relação entre os parâmetros de entrada e o resultado de trabalho - adaptado de [1].	32
Figura 2 - Relação do h_{cu} com as variáveis de entrada e as condições de contato - adaptado de [1].	34
Figura 3 - Representação esquemática do início de corte na retificação - adaptado de [1].	36
Figura 4 - Distribuição da energia durante o corte no processo de retificação - adaptado de [1].	37
Figura 5 - Rebolos: superabrasivo e convencional.	38
Figura 6 - Características físicas de alguns materiais - adaptado de [22].	43
Figura 7 - Representação do desgaste de rebolos - adaptado de [1].	47
Figura 8 - Classificação dos processos de condicionamento dos rebolos - adaptado de [5].	48
Figura 9 - Forma média de um gume - adaptado de [1].	49
Figura 10 - Gumes estáticos - adaptado de [12].	50
Figura 11 - Gumes cinemáticos - adaptado de [12].	51
Figura 12 - Métodos para caracterização da topografia de rebolos - adaptado de [12].	52
Figura 13 - Objetivos do monitoramento - adaptado de [31].	54
Figura 14 - Principais fontes de emissão acústica no processo de retificação - adaptado de [39].	58
Figura 15 - Transdutores para o monitoramento da retificação - adaptado de [12].	60
Figura 16 - Diagrama das faixas de frequências comumente encontradas para máquinas e processo - adaptado de [42].	63
Figura 17 - Grandezas macroscópicas - adaptado de [12].	64
Figura 18 - Transdutores para medição da topografia do rebolo - adaptado de [43].	65
Figura 19 - Comportamento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização - adaptado de [48].	67
Figura 20 - Ruído magnético de Barkhausen na curva de histerese.	68

Figura 21 - Representação da bobina e sinal do ruído de Barkhausen - adaptado de [48].	68
Figura 22 - Exemplo de detecção de queima da retificação em engrenagens pelo método de nital [55].	70
Figura 23 – Retificadora CNC Schaudt Pf 51.	71
Figura 24 - Sistema de medição de forças.	72
Figura 25 - Placa de aquisição de dados.	73
Figura 26 - Diagrama de blocos do <i>software</i> para análise de forças.	74
Figura 27 - Interface do <i>software</i> LabView para análise de forças.	74
Figura 28 - Sinais de medição de força.	75
Figura 29 - Nanoscan 855.	76
Figura 30 - Interface do algoritmo de medição de contorno.	77
Figura 31 - Representação do desvio de perfil na peça.	78
Figura 32 - Sistema de medição do ruído de Barkhausen.	78
Figura 33 - Representação do corpo de prova.	81
Figura 34 - Sistema de medição óptico 3D GFM MikroCAD Pico GFM.	82
Figura 35 - Alocação da ponta de diamante na máquina-ferramenta.	83
Figura 36 - Interface do algoritmo no <i>software</i> Matlab para avaliação dos gumes cinemáticos.	84
Figura 37 - Esquematização da metodologia do experimentos.	85
Figura 38 - Esquematização de fabricantes de rebolos.	86
Figura 39 - Fluxograma do ataque metalografico nital - adaptado de [55].	88
Figura 40 - Representação esquemática da geometria da ponta de diamante.	90
Figura 41 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 100% coríndon branco - [57].	92
Figura 42 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo A - [57].	93
Figura 43 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A - [57].	94

Figura 44 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo A - [57].	94
Figura 45 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B - [57].	95
Figura 46 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo B - [57].	96
Figura 47 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo B - [57].	96
Figura 48 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A, dureza H - [57].	97
Figura 49 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A, dureza L - [57].	98
Figura 50 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo B, dureza H - [57].	99
Figura 51 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo B, dureza L - [57].	99
Figura 52 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 100% coríndon branco - [57].	100
Figura 53 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 15% Tipo A - [57].	101
Figura 54 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 30% Tipo A - [57].	102
Figura 55 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 45% Tipo A - [57].	103
Figura 56 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 15% Tipo B - [57].	103
Figura 57 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 30% Tipo B - [57].	104
Figura 58 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 45% Tipo B - [57].	105
Figura 59 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 100% de coríndon branco.	107
Figura 60 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 15% Tipo A.	108

Figura 61 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo A.	109
Figura 62 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 45% Tipo A.	110
Figura 63 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 15% Tipo B.	111
Figura 64 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo B.	112
Figura 65 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 45% Tipo B.	113
Figura 66 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo A, dureza H.	115
Figura 67 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo A, dureza L.	116
Figura 68 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo B, dureza H.	117
Figura 69 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo B, dureza L.	119
Figura 70 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 100% coríndon branco.	120
Figura 71 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.	121
Figura 72 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo A.	122
Figura 73 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.	123
Figura 74 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.	125
Figura 75 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo B.	126
Figura 76 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo B.	127
Figura 77 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 100% coríndon branco.	129

Figura 78 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.....	130
Figura 79 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo A.....	131
Figura 80 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.....	131
Figura 81 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.....	132
Figura 82 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo B.....	133
Figura 83 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo B.....	134
Figura 84 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo A, dureza H.....	134
Figura 85 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo A, dureza L.....	135
Figura 86 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo B, dureza H.....	136
Figura 87 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo B, dureza H.....	137
Figura 88 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 100% coríndon branco.....	138
Figura 89 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.....	138
Figura 90 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A.....	139
Figura 91 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.....	140
Figura 92 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.....	141
Figura 93 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.....	142
Figura 94 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.....	142

Figura 95 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 100% coríndon branco.	144
Figura 96 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.	145
Figura 97 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A.	146
Figura 98 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.	147
Figura 99 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.	148
Figura 100 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo B.	149
Figura 101 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo B.	150
Figura 102 - Medição do ruído magnético de Barkhausen posteriormente ao ataque metalográfico nital.	151
Figura 103 - Esquematisação da bancada para avaliação de gumes cinemáticos.	153
Figura 104 - Esquematisação das profundidades de avanço da ponta de diamante no rebolo.	154
Figura 105 - Esquematisação dos sinais de emissão acústica proveniente das leituras ao longo da profundidade de avanço.	156
Figura 106 - Estratégias de medição ensaiadas na metodologia de avaliação de gumes cinemáticos.	157
Figura 107 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - mesma coordenada Z da máquina-ferramenta.	158
Figura 108 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - diferente coordenada Z da máquina-ferramenta.	159
Figura 109 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - grãos Tipo A.	160
Figura 110 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - grãos Tipo B.	161
Figura 111 - Relatório de medição da ponta de diamante do sistema de medição óptico GFM MicroCAD Pico.	162

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos fluidos de corte (1=pior; 4= melhor) - (Sreejith e Ngoi, 2000 <i>apud</i> [22]).	46
Tabela 2 - Especificação do dinamômetro.	72
Tabela 3 - Especificação dos apalpadores.	76
Tabela 4 - Especificação do padrão de rugosidade.	77
Tabela 5 - Especificação Rollscan 300.....	79
Tabela 6 - Composição dos rebolos.	79
Tabela 7 - Especificação dos corpos de prova.....	81
Tabela 8 - Especificação da ponta de diamante.....	82
Tabela 9 - Rebolos - diferentes fabricantes.	86
Tabela 10 - Rebolos - grãos abrasivos de diferentes fornecedores...	87
Tabela 11 - Condições de retificação.	89

ÍNDICE DE SIMBOLOGIA E ABREVIACÕES

A	[-]	Amplitude da onda
A_{sc}	[mm ²]	Superfície de desgaste total
A_{sk}	[mm ²]	Superfície de desgaste de quina
A_{sr}	[mm ²]	Superfície de desgaste radial
C_{est}	[mm ⁻³]	Distribuição estatística de grãos no rebolo
C_s	[-]	Densidade de gumes ativos
C_{stac}	[mm ⁻³]	Gumes por unidade de volume na área de corte
F'_n	[N/mm]	Força normal relativa
F_n	[kN]	Força normal
F_t	[kN]	Força tangencial
F_x	[kN]	Força na direção X
F_y	[kN]	Força na direção Y
F_z	[kN]	Força na direção Z
G	[-]	Relação entre volume retificado e desgaste do rebolo
H	[-]	Classe de dureza de rebolos
J	[-]	Classe de dureza de rebolos
K_{100}	[kgf/mm ²]	Dureza Knoop
L	[-]	Classe de dureza de rebolos
M_z	[Nm]	Momento na direção Z
N_s	[-]	Número de gumes
N_{sact}	[-]	Número de gumes ativos
N_{scin}	[-]	Números de gumes cinemáticas
N_{stac}	[mm ²]	Gumes por unidade de superfície
P	[kW]	Potência de corte
Q'_w	[mm ³ /mm.s]	Taxa de retificação
R	[m]	Distância da fonte geradora
R_a	[μm]	Rugosidade média
$R_{am\acute{a}x}$	[μm]	Rugosidade média máxima
R_k	[μm]	Rugosidade de núcleo de perfil
$R_{m\acute{a}x}$	[μm]	Rugosidade máxima
R_{pk}	[μm]	Altura de picos reduzida
RS_m	[μm]	Média de espaçamento das irregularidades do perfil
R_{taus}	[μm]	Rugosidade da superfície usinada
R_{tb}	[μm]	Rugosidade da superfície usinada específica
R_{tw}	[μm]	Rugosidade da superfície usinada efetiva
R_{vk}	[μm]	Profundidade de vales reduzidos
R_z	[μm]	Rugosidade aritmética

S_{act}	[-]	Número de gumes ativos
S_b	[mm]	Largura do rebolo
S_{stac}	[mm ⁻¹]	Gumes estáticos por unidade de comprimento
$T\mu$	[mm]	Profundidade de início de corte
U_d	[-]	Grau de recobrimento
V'_w	[mm ³ /mm]	Volume usinado específico
V_s	[mm ³]	Desgaste volumétrico
V_w	[mm ³]	Volume usinado

a_e	[mm]	Profundidade de corte
a_{ed}	[mm]	Profundidade de dressagem
a_p	[μm]	Penetração passiva
b_w	[mm]	Largura do corpo de prova
c	[N/m ²]	Constante de amortecimento
d_s	[mm]	Diâmetro do rebolo
d_{se}	[mm]	Diâmetro equivalente do rebolo
d_w	[mm]	Diâmetro do corpo de prova
$f_n(M_z)$	[kHz]	Frequência natural no momento Z
f_{nx}	[kHz]	Frequência natural na direção X
f_{ny}	[kHz]	Frequência natural na direção Y
f_{nz}	[kHz]	Frequência natural na direção Z
h_{cu}	[mm]	Espessura de cavaco não deformado
h_{cUEff}	[mm]	Espessura efetiva de usinagem
h_{cuMax}	[mm]	Espessura de cavaco não deformado máximo
k	[-]	Fator de proporcionalidade
k	[N/m]	Constante de mola
l_k	[mm]	Comprimento de contato
m	[kg]	Massa sísmica
q	[-]	Relação de velocidades - desbaste
q^*	[-]	Relação de velocidade - acabamento
v_s	[mm/s]	Velocidade periférica do rebolo
v_w	[mm/s]	Velocidade da peça

α	[-]	Constante experimental
α	[graus]	Ângulo de incidência
β	[-]	Constante experimental
γ	[-]	Constante experimental
η	[graus]	Ângulo de ataque
λ	[m]	Comprimento de onda

μ	[-]	Relação de forças de usinagem
Δe	[μm]	Desvio de perfil
Δr_s	[mm^2]	Desgaste radial
Δr_{sc}	[mm^2]	Desgaste total
Δr_{sk}	[mm^2]	Desgaste de quina
Al_2O_3		Óxido de alumínio
CBN		Nitreto de boro cúbico
CN		Comando numérico
DIN		<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EA		Emissão acústica
EA_{raw}		Sinal bruto de emissão acústica
ECDM		<i>Electro Chemical Discharge Machining</i>
GmbH		<i>Gesellschaft mit beschränkter Haftung</i>
HCl		Ácido clorídrico
HNO_3		Ácido nítrico
ISO		<i>International Organization for Standardization</i>
IWF		<i>Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb</i>
NaOH		Hidróxido de sódio
PSD		<i>Position-sensitive detectors</i>
RBM		Ruído magnético de Barkhausen
RMS		Valor quadrático médio
SEM		<i>Scanning Electron Microscopie</i>
SiC		Carboneto de silício
<i>mp</i>		<i>Magnetoelastic parameters</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	28
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
2. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	31
2.1 PARÂMETROS DO PROCESSO	33
2.1.1 Espessura do cavaco não deformado (h_{cu}).....	33
2.1.2 Potência de corte	34
2.1.3 Força tangencial	35
2.1.4 Força normal.....	35
2.1.5 Relação de forças de usinagem.....	35
2.1.6 Rugosidade R_a	35
2.1.7 Rugosidade R_z	35
2.1.8 Relação G	36
2.2 MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO GUME	36
2.3 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	37
2.4 FERRAMENTAS DE CORTE	38
2.4.1 Rebolos convencionais	40
2.4.1 Rebolos superabrasivos	42
2.5 MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES.....	44
2.6 CONDICIONAMENTO DE REBOLOS	46
2.7 TOPOGRAFIA DE REBOLOS	48
2.7.1 Medição da topografia de rebolos	51
2.8 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	53
2.8.1 Força de corte	54
2.8.2 Potência do motor.....	55

2.8.3 Vibrações	56
2.8.4 Emissão acústica.....	56
2.9 TRANSDUTORES PARA MONITORAMENTO	59
2.9.1 Transdutores de força	60
2.9.2 Transdutores de potência	61
2.9.3 Transdutores de emissão acústica	61
2.9.4 Transdutores para monitoramento de rebolos.....	63
2.10 DANOS TÉRMICOS	65
2.10.1 Ruído magnético de Barkhausen	66
2.10.2 Ataque metalográfico nital	69
3. MATERIAIS E MÉTODOS	71
3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA	71
3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS	72
3.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE E DESVIO DE PERFIL	75
3.4 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DANOS TÉRMICOS.....	78
3.5 FERRAMENTAS DE CORTE	79
3.6 CORPOS DE PROVA.....	80
3.7 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE EMISSÃO ACÚSTICA	81
3.8 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	84
3.8.1 Medições de força, desvio de perfil e danos térmicos	84
3.8.2 Configuração do sensor de emissão acústica.....	89
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	92
4.1 FORÇAS NORMAIS DE RETIFICAÇÃO	92
4.1.1 Rebolos de diferentes fabricantes	92
4.1.2 Grãos de diferentes fornecedores.....	100

4.2 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E DESVIO DE PERFIL	105
4.2.1 Rebolos de diferentes fabricantes	106
4.2.2 Grãos de diferentes fornecedores	119
4.3 DESVIO DE PERFIL.....	128
4.3.1 Rebolos de diferentes fabricantes	129
4.3.2 Grãos de diferentes fornecedores	137
4.4 DANOS TÉRMICOS.....	143
4.5 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE GUMES CINEMÁTICOS EM REBOLOS CONVENCIONAIS.....	152
4.5.1 Descrição da metodologia	153
4.5.2 Evolução da metodologia	156
4.5.3 Resultados da metodologia.....	157
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	164
REFERÊNCIAS	169

1. INTRODUÇÃO

O cenário atual da economia mundial exige sistemas de manufatura mais flexíveis. No caso do processo de retificação, esta tendência é percebida na aplicação das ferramentas de corte. Embora os rebolos superabrasivos sejam mais duráveis devido a suas propriedades mecânicas, e possuem a capacidade de serem perfilados, sua utilização não é tão adequada para a produção em pequenos lotes, utilizada em empresas com mentalidade *just in time*, ao contrário dos rebolos convencionais, que podem com muita facilidade ser perfilados. Desta forma, os rebolos superabrasivos são geralmente empregados na produção de grandes lotes de um mesmo produto e os rebolos convencionais são apropriados para pequenos lotes de produção flexível.

Há uma variedade de rebolos de diferentes fabricantes no mercado. É importante salientar que o controle do processo de retificação é afetado a um grau considerável pelas propriedades do rebolo. Ao mesmo tempo, estas são afetadas por um grande número de variáveis durante a produção:

- proporção de fase dos grãos abrasivos, ligantes e poros,
- tipo de grão, geometria do grão, tipo do ligante,
- tipos e quantidades de materiais de preenchimentos e aditivos,
- misturas,
- temperatura de sinterização, pressão de sinterização e tempo de sinterização.

Além disto, os rebolos são frequentemente utilizados no limite de suas propriedades físicas. Isto acarreta que pequenas variações nas propriedades dos rebolos têm consequências significativas sobre o resultado de trabalho no processo de retificação.

O comportamento do rebolo em processo tem influência direta na rugosidade da superfície usinada, no desvio de perfil e danos térmicos do componente usinado, entre outras características. A previsão do resultado no processo depende do conhecimento de dados corretos das características do rebolo, principalmente em estruturas fabris onde a preparação do ciclo produtivo é efetuada pela engenharia de processos e não sofre mais uma correção por parte do operador (condutor) da máquina-ferramenta numericamente controlada.

No entanto, nem o fabricante de rebolos, nem o usuário têm um procedimento adequado para determinar as características de um rebolo. As informações contidas no rótulo do rebolo especificam o material abrasivo, a granulometria, a dureza, a porosidade e o ligante empregado,

mas não dá informações sobre a distribuição dos grãos na estrutura do rebolo.

A busca por um método de avaliação de rebolos tem sido perseguida desde a década de 1980, mas até hoje não foi definida uma forma prática de avaliação. O estabelecimento de uma metodologia de ensaio que leve a parâmetros numéricos que possam ser empregados em um modelo matemático para a determinação de variáveis de entrada para o processo de retificação é o um dos objetivos deste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

Devido à complexa estrutura das ferramentas de retificação, uma associação geral entre as especificações conhecidas, como entregues pelos fabricantes das ferramentas, e do comportamento em processo desta não é possível. Isto impede a elaboração de bases de dados para a seleção de ferramentas para materiais a usinar e tarefas específicas de usinagem.

Além disto, a fim de satisfazer as exigências do mercado, muitos materiais naturais e sintéticos, assim como diferentes combinações, são utilizados em processos de retificação. Entretanto, a influência destas combinações e misturas de grãos abrasivos ainda não é bem conhecida no processo de retificação cilíndrica externa.

O grande número de ensaios que são necessários para medir com precisão os desvios de perfil e os danos térmicos no componente usinado torna estas influências difíceis de avaliar. Ainda, a fim de obter resultados precisos, a determinação dos danos térmicos exige um método de ensaio rápido pós-processo, sendo que a maioria dos métodos atuais são demorados e destrutivos.

Desta forma, as influências acima mencionadas foram analisadas em rebolos convencionais, variando-se a composição, fabricantes, grãos de diferentes fornecedores para investigação do comportamento de rebolos de óxido de alumínio. Foi analisada a influência dos grãos abrasivos, proporção e ligante nos valores característicos de força, rugosidade, desvio de perfil e danos térmicos gerados por estas ferramentas de corte.

Os danos térmicos neste trabalho foram determinados utilizando-se as técnicas do ruído de Barkhausen e ataque metalográfico nital. Uma vez que o ruído de Barkhausen é um método rápido e não destrutivo, uma avaliação do seu potencial para aplicação em processo foi efetuada.

O ataque metalográfico nital foi aplicado com o objetivo de comparar qualitativamente ambos os métodos.

Deve-se considerar também que antes da introdução do comando numérico em retificadoras, o operador efetuava o controle das variáveis do processo de retificação, ou seja, o *set-up* da máquina era feito de acordo com a experiência do operador, influenciando diretamente o resultado de trabalho. Atualmente, a preparação da máquina-ferramenta é efetuada pela Engenharia de Processo. Os programas são transmitidos *on-line* para a máquina-ferramenta. O operador não interfere mais no processo de retificação e não exerce influência no resultado de trabalho.

A detecção de não-conformidades no componente somente ocorre após a verificação das características pelo laboratório de metrologia, posteriormente a fabricação de uma série de peças, causando desperdícios e prejuízos. A máquina-ferramenta permanece parada até que a Engenharia de Processos tenha reenviado um novo programa com correções dos parâmetros de entrada do processo de retificação.

Para garantir um resultado de trabalho uniforme e poder garantir que as modificações de processo anteriormente executadas em base do conhecimento do operador sejam otimizadas, foi desenvolvida uma metodologia de ensaio rápido, que fornece um panorama sobre os gumes cinemáticos da ferramenta em tempo real para o sistema de gerenciamento do processo, permitindo a adequação das variáveis de entrada do processo de retificação sempre que forem detectadas alterações das características do rebolo.

Isto permite que a Engenharia de Processos compare a situação atual com a desejada e, baseada nas especificações fornecidas pelo fabricante, efetue possíveis correções dos parâmetros de retificação no programa de retificação, possibilitando ganhos pela minimização de refugos e maior estabilidade do processo de retificação. Pretende-se assim contribuir para o desenvolvimento de um modelo matemático que permita a correção das variáveis de entrada do processo de retificação para a obtenção de características pré-estabelecidas no componente retificado.

Este trabalho está inserido no Programa de Cooperação Internacional BRAGECRIM: *Brazilian - German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology*, da CAPES e da DFG no projeto de pesquisa “*A Quick-Test Method for the On-line Characterization of Grinding Wheels*”. As atividades efetuadas neste trabalho foram desenvolvidas no IWF - *Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb*, dirigido pelo Prof. Dr. h. c. Dr. -Ing. Eckart

Uhlmann na *Technische Universität Berlin* - TU Berlin, contemplando o requisito de desenvolvimento corporativo de pesquisa.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentados alguns tópicos relacionados ao processo de retificação, necessários para um melhor entendimento dos assuntos abordados neste trabalho. A revisão da literatura visa esclarecer os métodos existentes para determinação dos parâmetros de interesse deste trabalho, relacionados ao processo de retificação.

No Capítulo 3 são descritos os materiais e a metodologia utilizados nos experimentos. São apresentados os equipamentos, as características das ferramentas de corte, as quais foram fabricadas especialmente para execução das atividades relacionadas ao projeto do qual este trabalho está inserido, configuração da bancada, considerações e parâmetros adotados na condução dos ensaios.

No Capítulo 4 são exibidos os resultados alcançados nos ensaios. São apresentados os resultados de medição de força, rugosidade da superfície, desvio de perfil e danos térmicos. Posteriormente são mostrados os resultados referentes à metodologia de avaliação de gumes cinemáticos e a descrição do método desenvolvido.

O Capítulo 5 descreve as conclusões deste trabalho. São indicados os pontos mais relevantes alcançados na pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Os processos de usinagem com ferramentas de geometria não-definida, dentre os quais a retificação é o que apresenta maior emprego na indústria, caracterizam-se pela remoção de material da peça através da ação conjunta de grãos abrasivos ativos. Estes podem estar ligados entre si através de um ligante, como na retificação com rebolos e no brunimento, ou estarem soltos, suspensos em um meio, como nos processos de lapidação e de jateamento abrasivo. Os grãos podem deslocar-se numa trajetória pré-estabelecida (retificação), serem pressionados por uma força constante contra a peça (brunimento), serem limitados por uma superfície de referência (lapidação), ou ainda, penetrarem na peça munidos de certa energia cinética (jateamento abrasivo). A impossibilidade de definir geometricamente os gumes das ferramentas abrasivas levou ao nome “usinagem com gumes de geometria não definida” [1].

Na retificação, a peça é colocada em contato com a ferramenta, enquanto esta gira, sendo que a peça pode apresentar ou não movimento próprio de rotação ou translação. Deste modo, dispõe-se de um número significativo de possíveis métodos de retificação. A norma alemã DIN 8589 - Parte 11 classifica seis possíveis variações do processo de retificação [2]:

- Retificação plana;
- Retificação cilíndrica;
- Retificação de rosca;
- Retificação de geração de perfil;
- Cópia de perfil por retificação.

A retificação é empregada, via de regra, quando as tolerâncias dimensionais e geométricas da peça são reduzidas e a qualidade de superfície exigida é elevada, e o material usinado é demasiado duro para a usinagem convencional. A retificação é aplicada principalmente no acabamento de peças metálicas, podendo ser utilizada na usinagem de cerâmicas, vidros, plásticos e pedra [3]. As ferramentas de corte utilizadas neste tipo de operação são denominadas rebolos.

O processo de retificação, basicamente, compreende operações nas quais a remoção de material por gume se dá na faixa de alguns micrometros, de forma que a observação da interação dos gumes com o material da peça é bastante limitada. Isto ocorre devido às formas complexas dos gumes, sua orientação aleatória no ligante e à grande

quantidade de gumes que atuam simultaneamente. A remoção de material é dada pela soma da remoção isolada de cavacos.

Apesar destas dificuldades, empregando-se um raciocínio sequencial e lógico, baseado em análises e modelagens, é possível entender os processos físicos, mecânicos, térmicos, químicos e termoquímicos que descrevem a retificação e possibilitam, a partir deste entendimento, otimizar o processo [4].

A retificação como um processo de fabricação, deve ser analisada em função das grandezas de entrada, características de processo e resultados de trabalho. Como grandeza do sistema, tem-se a máquina-ferramenta, a peça, o rebolo, a ferramenta de dressamento e o sistema lubri-refrigerante. A caracterização do processo é feita pela força de retificação, pela potência consumida, o desgaste do rebolo, a temperatura, a emissão acústica e a duração do processo, devendo ser sempre consideradas as influências externas sobre o processo [5].

O resultado de trabalho é verificado pelas características macro e micro-geométricas do componente, a influência térmica sobre o mesmo, bem como pelo consumo do rebolo e do fluido de corte. A Figura 1 apresenta os parâmetros de entrada e a dependência das variáveis do processo.

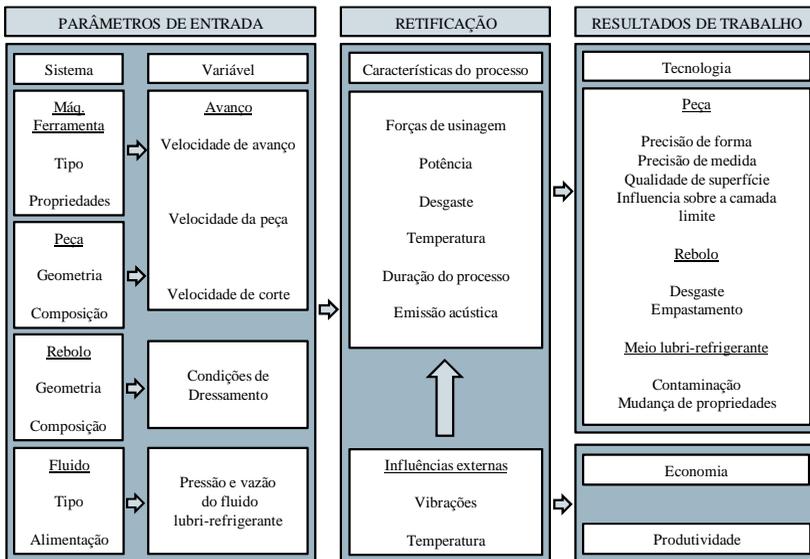


Figura 1 - Relação entre os parâmetros de entrada e o resultado de trabalho - adaptado de [1].

O resultado de trabalho alcançado é consequência da interação dos parâmetros de entrada em cada processo de retificação. Força de corte, potência, desgaste do rebolo, temperatura e duração do processo são as grandezas que caracterizam o processo de retificação em si, salientando-se que as influências externas (vibrações e temperaturas alternantes) atuam sobre o resultado de trabalho [1].

2.1 PARÂMETROS DO PROCESSO

O número de parâmetros do processo de retificação que o usuário final precisa para entender é atualmente limitado. A priori, os fatores-chaves são geralmente associados com a vida da ferramenta, tempo de ciclo e qualidade final. A seguir são definidos alguns dos parâmetros relacionados com a vida da ferramenta, tempo de ciclo e qualidade final.

2.1.1 Espessura do cavaco não deformado (h_{cu})

A espessura do cavaco não deformado é dependente da densidade estática dos gumes no rebolo - C_{est} , e das variáveis geométricas e cinemáticas do processo, onde o v_w é a velocidade da peça, v_s é a velocidade de corte, a é a profundidade de corte, e d_{se} é o diâmetro equivalente do rebolo [1]. Esta dependência é descrita pela função exponencial, expressa na Equação 1.

$$h_{cu} = k \left[\frac{1}{C_{est}} \right]^\alpha \left[\frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \left[\frac{a}{d_{se}} \right]^\gamma \quad (1)$$

Na Equação 1, k é um fator de proporcionalidade e os índices α , β , γ são expoentes constantes experimentais, que assumem valores entre zero e um [1].

O comprimento de contato l_k , indicado na Figura 2, é calculado a partir da Equação 2.

$$l_k = \sqrt{a \cdot d_{se}} \quad (2)$$

Nas Equações 1 e 2, o diâmetro equivalente d_{se} é um parâmetro que está relacionado às condições de contato entre rebolo e peça, indicando o diâmetro que o rebolo utilizado na retificação cilíndrica deveria ter para proporcionar a mesma geometria de corte quando

utilizado na retificação plana. O diâmetro equivalente é dado pela Equação 3.

$$d_{se} = \frac{d_w d_s}{d_w \pm d_s} \quad (3)$$

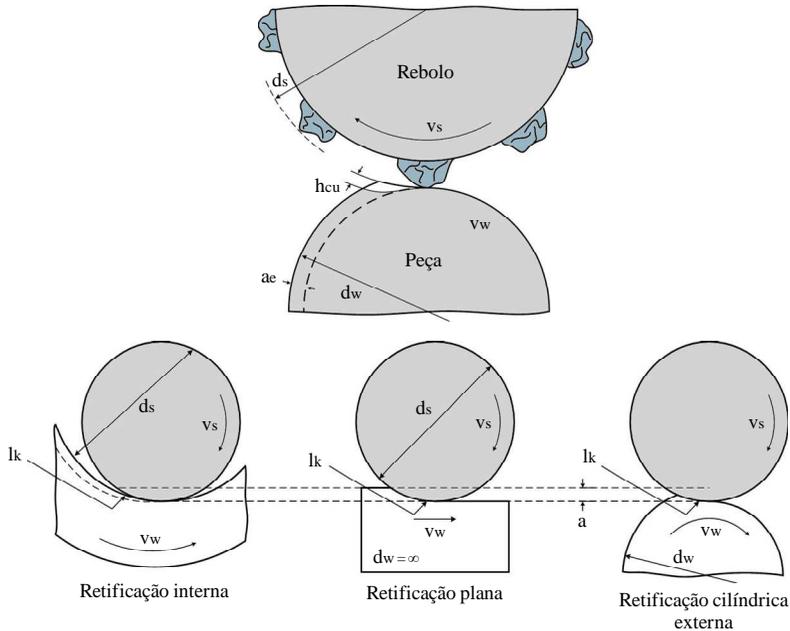


Figura 2 - Relação do h_{cu} com as variáveis de entrada e as condições de contato - adaptado de [1].

Na Equação 3, o sinal positivo é empregado para calcular o d_{se} na retificação cilíndrica externa - $d_{se} < d_s$. O sinal negativo, por sua vez, é utilizado para a retificação cilíndrica interna - $d_{se} > d_s$. Na retificação plana o diâmetro equivalente é igual ao diâmetro do rebolo.

2.1.2 Potência de corte

É o produto da força tangencial (F_t) e a velocidade de corte (v_s) e é a energia necessária para a formação de cavacos (Equação 4).

$$P = F_t \cdot v_s \quad (4)$$

2.1.3 Força tangencial

Obtida pela Equação 5:

$$F_t = \frac{P}{v_s} \quad (5)$$

2.1.4 Força normal

Relacionada com a força tangencial pelo coeficiente de forças.

2.1.5 Relação de forças de usinagem

Obtido a partir da Equação 6:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (6)$$

2.1.6 Rugosidade R_a

A qualidade de uma superfície usinada é, em geral, classificada apenas em termos do parâmetro de rugosidade, cujos valores são expressos por R_a ou pela profundidade máxima de rugosidade $R_{\text{máx}}$ [6].

O parâmetro R_a consiste na média aritmética de todas as coordenadas de um perfil de linha média ($Z(x)$) dentro de um período de amostragens (l) depois de filtrados os desvios de forma [8], conforme expressa a Equação 7.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (7)$$

2.1.7 Rugosidade R_z

É a média de cinco valores de pico-vale (Z_j) extraídos de amostras individuais adjacentes de comprimento l_e (Equação 8).

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (8)$$

Este parâmetro de rugosidade é recomendado para avaliação de qualidade de superfícies de apoio e deslizamento, ajustes prensados, entre outros [9].

2.1.8 Relação G

O parâmetro G é definido como a relação entre o volume de material retificado (V_w) e o desgaste volumétrico do rebolo (V_s) [1]. A Equação 9 apresenta esta relação:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (9)$$

Esta relação caracteriza o desgaste de um rebolo em condições de trabalho determinadas. Quando o desgaste for grande a relação G é baixa, ou seja, há auto-afiação e o rebolo permanece agressivo pela renovação dos grãos abrasivos. Quando o desgaste for baixo, a relação G é alta e não há liberação dos grãos desgastados e o rebolo perde a agressividade [9].

2.2 MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO GUME

Os gumes penetram na superfície da peça em uma trajetória quase plana durante o processo de retificação. Na Figura 3 é ilustrado esquematicamente o mecanismo de penetração do gume no material e a formação de cavaco.

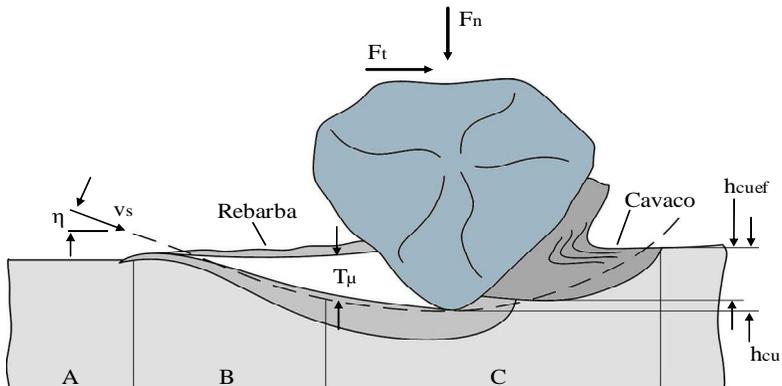


Figura 3 - Representação esquemática do início de corte na retificação - adaptado de [1].

O grão penetra no material com velocidade v_s e com ângulo de ataque η , sob a ação das forças tangenciais F_t e normais F_n . Caracterizam-se três regiões: região de deformação elástica pura (A); deformação elástica e plástica com escoamento de material para as laterais e por baixo do grão abrasivo, sem formação de cavaco efetiva (B); e por fim a região de deformação elástica e plástica com formação de cavaco, que inicia quando a espessura de usinagem, h_{cu} , atinge a profundidade de início de corte $T\mu$ (C). A espessura efetiva de usinagem h_{cuf} é ligeiramente inferior à espessura de usinagem h_{cu} , devido às deformações elásticas [1].

Este mecanismo de deformação vem sendo bastante pesquisado. Contudo, em virtude da complexidade deste processo de formação de cavacos e da dificuldade da identificação dessas fases, a divisão entre estas etapas não é exatamente conhecida [10].

2.3 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

A energia mecânica introduzida no processo de retificação é basicamente transformada em calor em quatro regiões. A maior parcela de energia é transformada em energia térmica pela deformação plástica na superfície da peça de trabalho e pelo atrito no flanco dos gumes.

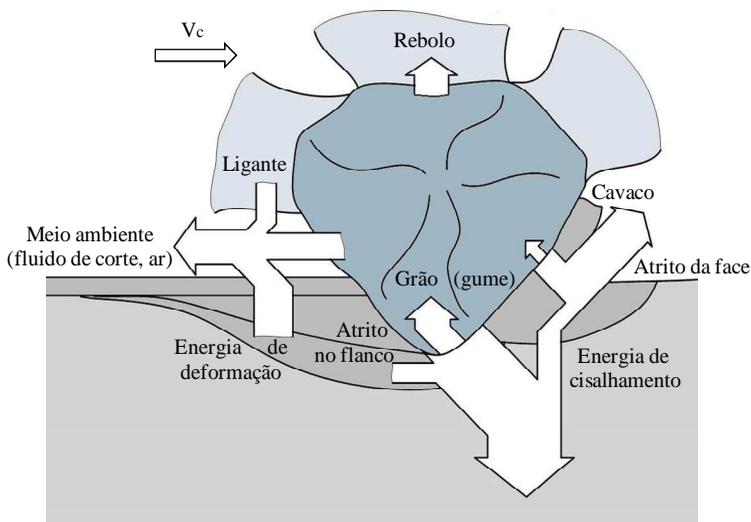


Figura 4 - Distribuição da energia durante o corte no processo de retificação - adaptado de [1].

É importante mencionar que uma parte da energia é transformada em calor em decorrência do atrito do ligante sobre a superfície da peça [1]. A Figura 4 ilustra a distribuição da energia nas regiões distintas.

2.4 FERRAMENTAS DE CORTE

Os rebolos são ferramentas rotativas fabricadas em diversos formatos. Basicamente, são constituídas por três partes: os grãos, o ligante e os poros, sendo que cada parte apresenta influência sobre as características mecânicas e de corte da ferramenta [5]. A composição volumétrica destas partes define a estrutura da ferramenta, assim também propriedades como a dureza e porosidade. Quanto mais fechada a estrutura, menor a porosidade e maior a dureza [11].

Os materiais abrasivos ligados podem ser utilizados na fabricação de rebolos inteiros ou ainda aplicados sobre um suporte (corpo base), dependendo do tipo de abrasivo, conforme apresenta a Figura 5.

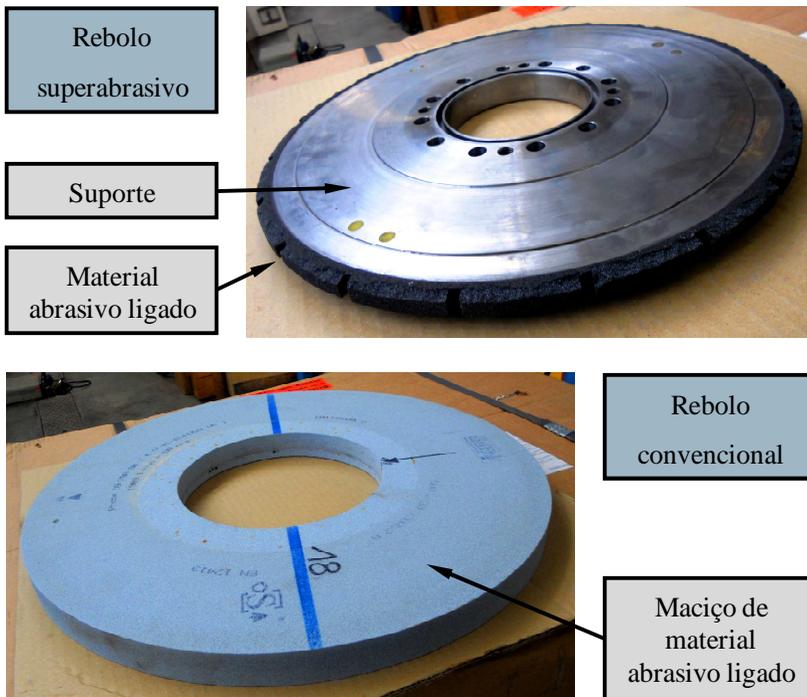


Figura 5 - Rebolos: superabrasivo e convencional.

Os grãos abrasivos utilizados no rebolo devem ser compostos de materiais cristalinos, com dureza superior à do material a ser usinado. Estes materiais são frágeis e o próprio processo de moagem faz a ruptura dos grãos ocorrer de forma geométrica aleatória, com cantos vivos. São estes cantos vivos que irão atuar como gumes do grão abrasivo.

As características necessárias do material abrasivo são [1, 13]:

- Elevada dureza: para que a remoção do material ocorra mais significativamente ao lado da peça;

- Estabilidade térmica: para que o grão possa resistir às temperaturas alternantes que ocorrem durante o processo.

- Estabilidade química: para que nas pressões e temperaturas elevadas, o grão não sofra alterações químicas ao interagir com o ar, meio lubri-refrigerante e material da peça.

- Boa condutividade térmica: para reduzir a quantidade de calor transferido à peça durante o processo de retificação, e assim evitar danos térmicos na superfície das peças.

Os ligantes têm a função primária de manter os grãos abrasivos ligados entre si. São responsáveis pela transmissão da força motriz ao local de ação do grão abrasivo. Para se conseguir um bom rendimento do rebolo, este deve estar constantemente afiado e possuir capacidade de absorver um volume elevado de cavacos. O rebolo deve ser poroso e deve suportar as cargas elevadas da retificação que são aplicadas nos grãos abrasivos e nas pontes de ligante que seguram os grãos [1, 13].

A função de manter os grãos abrasivos ligados entre si é atingida quando o ligante satisfaz as seguintes exigências:

- O material do ligante deve ser o suficientemente resistente;

- O ligante deve formar pontes entre os grãos com seção transversal suficientemente grande;

- Entre o grão abrasivo e o ligante deve existir uma energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão.

Ferramentas abrasivas modernas podem ser divididas em dois grupos [13]:

- Rebolos abrasivos convencionais: fabricados em carboneto de silício (SiC) ou óxido de alumínio (Al_2O_3);

- Rebolos superabrasivos: fabricados em diamante ou nitreto de boro cúbico (CBN).

Esta divisão é baseada na diferença entre dureza dos diferentes grãos, a qual determina os parâmetros de usinagem e as características de desgaste do rebolo. A divisão leva em consideração o custo do

rebolo, uma vez que rebolos fabricados com grãos superabrasivos são geralmente entre 10 a 100 vezes mais caros [12].

2.4.1 Rebolos convencionais

Os rebolos convencionais possuem seu corpo totalmente constituído do material abrasivo misturado a uma matriz cerâmica ou resinóide, adicionada ao material de enchimento. Este tipo de rebolo pode ser compactado de acordo com o material de sua matriz, seguindo então por estágios intermediários de queima, polimerização ou compactação a quente, e por fim a usinagem, a qual garante sua forma e dimensões finais (König, 1989 *apud* [10]).

A estrutura de rebolos convencionais é representada pela composição volumétrica em relação ao percentual de grãos, porosidade e ligante. Estas variáveis possuem influência direta sobre elasticidade e dureza [10].

A obtenção de grãos abrasivos com características controladas tornou-se necessária devido às exigências na atividade industrial. As pesquisas neste âmbito tiveram os primeiros sucessos pela descoberta do carboneto de silício e do óxido de alumínio [17], que são os materiais abrasivos utilizados em rebolos convencionais.

O carboneto de silício é obtido indiretamente por meio de reação química de sílica pura com coque em fornos elétricos. Este tipo de abrasivo apresenta maior dureza que os óxidos de alumínio, sendo mais quebradiço. É empregado na retificação de materiais de baixa resistência à tração, porém, de elevada dureza, como vidros, porcelanas, ferros fundidos (tratados ou não superficialmente), plásticos, alumínio e carbonetos (metal duro). Estes abrasivos podem ser reconhecidos pela sua coloração: pretos e verdes, sendo esse último empregado nas afiações de ferramentas de metal duro; por serem mais duros que os pretos e não alteram a constituição do metal duro [15].

Os rebolos convencionais ainda podem ser fabricados com óxido de alumínio. Segundo o tipo de fabricação do óxido de alumínio, ele pode ser classificado em fundido ou sinterizado. Obtido a partir do mineral bauxita por um processo de redução, apresenta-se em duas qualidades segundo o critério de pureza atingida na sua elaboração [15]:

- Óxido de alumínio comum (A): de cor acinzentada, com pureza química em torno de 96% a 97%, e tendo como principal característica a alta tenacidade, que se presta nos casos de retificação de materiais que tenham elevada resistência a tração.

- Óxido de alumínio branco (AA): com 99% de pureza, distingue-se pela sua cor, geralmente branca, e com propriedades semelhantes ao óxido de alumínio comum, porém devido à sua pureza e forma de obtenção (cristalizado) torna-se quebradiço. Por isto, é empregado em processos de retificação que requerem nível baixo de calor, gerado entre o rebolo e a peça, e ao mesmo tempo qualidade de acabamento de superfície com menor tempo de execução.

O ligante que compõe um rebolo convencional pode ser cerâmico, resinóide ou de borracha. Os ligantes cerâmicos ou vitrificados são os mais comuns na fabricação de rebolos. Estes ligantes são misturas de materiais como caulim, argilas brancas e vermelhas, quartzo em pó, feldspato e fundentes. Os fundentes contêm silicatos de boro e monóxido de magnésio, com o objetivo de baixar a temperatura de queima dos rebolos, poupando tempo e combustível no aquecimento dos fornos de sinterização [1].

As principais características destes ligantes são a agressividade da ferramenta em função da estrutura porosa, elevado módulo de elasticidade, fragilidade e suscetibilidade a impactos, resistência a temperatura, resistência química a óleo, água, fluido de corte e ácidos (König, 1989 *apud* [10]).

A ação robusta da liga vitrificada requer menos material na matriz do que das ligas com resina ou das metálicas, para reter os cristais superabrasivos [16, 17]. Outra vantagem resultante da estrutura porosa dos rebolos com ligante vitrificado é o maior fluxo de fluido lubri-refrigerante através dos poros entre os grãos (Muckli, 2000 e Beck, 2002 *apud* [18]). Por este motivo, esse tipo de ligante tem crescido rapidamente no mercado de CBN.

Na fabricação de rebolos abrasivos as ligas resinóides são amplamente empregadas. Estas ligas são obtidas através da prensagem a quente de resinas. Devido ao fato de poder se deteriorar e perder a sua capacidade de retenção de grãos em temperaturas de trabalho acima de 250 °C, as ligas resinóides são menos duras e proporcionam ao processo de retificação uma redução nas forças de corte. Outra característica dos ligantes resinóides é que podem resistir às cargas de choque, contudo estes ligantes são mais suscetíveis a ataque químico (König, 1989 *apud* [10]).

Os ligantes resinóides são orgânicos, fabricados por pressão a quente com temperaturas relativamente baixas e apresentam características não agressivas de corte, baixa resistência a temperatura e conformidade estrutural. Os ligantes leves não são necessariamente prensados, mas apenas misturados na forma líquida com abrasivo e

levado a cura. Concepções sobre classe e estrutura são muito diferentes dos ligantes vitrificados. Ligantes resinóides são divididos em três classes segundo a sua resistência à temperatura. Esses são: plásticos, resinas fenólicas e resinas poliamídicas (Marinescu *et al.*, 2004 *apud* [10]).

2.4.1 Rebolos superabrasivos

Os rebolos superabrasivos possuem um corpo de ferramenta sobre o qual é aplicado o conjunto ligante/grão. Os materiais utilizados para a fabricação deste tipo de rebolo podem ser o nitreto de boro cúbico (CBN) ou diamante.

O CBN é o material abrasivo sintético que satisfaz e as características de um abrasivo de maneira quase ideal [18]. O CBN é obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas temperaturas e pressões. A alta dureza do grão de CBN, juntamente com sua extrema resistência ao desgaste, capacidade térmica e estabilidade química, permitiu que a tecnologia de retificação de peças metálicas fosse levada a um passo à frente em relação a sua situação convencional [19].

Na temperatura ambiente, o CBN apresenta-se como um dos materiais mais duros que se conhece. Em comparação com o diamante sintético o CBN possui uma maior estabilidade térmica, uma vez que a queda da dureza do diamante com a temperatura é tão brusca a partir dos 500 °C, que em 800 °C ela é inferior à do CBN sob a mesma temperatura [13].

Ferramentas de CBN permitem o uso de velocidades periféricas em aplicações industriais superiores a 200 m/s, para a qual apresentam melhores resultados [19]. Outra vantagem do CBN é o fato de ser um excelente condutor de calor. No processo de retificação uma parcela significativa do calor gerado no processo é transferida para o abrasivo e para a ferramenta, ao invés de ser transferida ao componente usinado [18, 20, 21]. Neste contexto, é interessante salientar que somente em torno de 20% da energia total gerada é transferida como calor para a peça de trabalho (Morales, 2000 *apud* [18]).

A retificação com CBN é empregada atualmente para a usinagem de aços-ferramentas e aplicada mais extensivamente a outros materiais ferrosos e ligas aeronáuticas [18].

O diamante é a forma alotrópica cristalina do carbono, com uma estrutura cúbica compacta na forma tetraédrica, a qual apresenta fortes

ligações entre os seus cristais. Tal forma cristalina é instável e passa espontaneamente para a forma hexagonal - grafita - quando submetido a temperaturas elevadas (König, 1989 *apud* [5]).

O diamante natural se formou em condições de pressão extremas e em temperaturas elevadas, durante um longo período de tempo. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais são empregados na indústria. Já o diamante sintético pode ser obtido pela transformação alotrópica do elemento carbono, através da ação de um catalisador sob alta pressão e temperatura [19].

Entre as propriedades mais relevantes do diamante sintético como material abrasivo, deve-se citar a sua dureza extrema que não é atingida por nenhum outro material. A Figura 6 apresenta características de alguns materiais. Como pode ser observada nesta figura, a dureza Knoop do diamante atinge valores de $K_{100} = 7000$, duas vezes maior que o óxido de alumínio e o carboneto de silício.

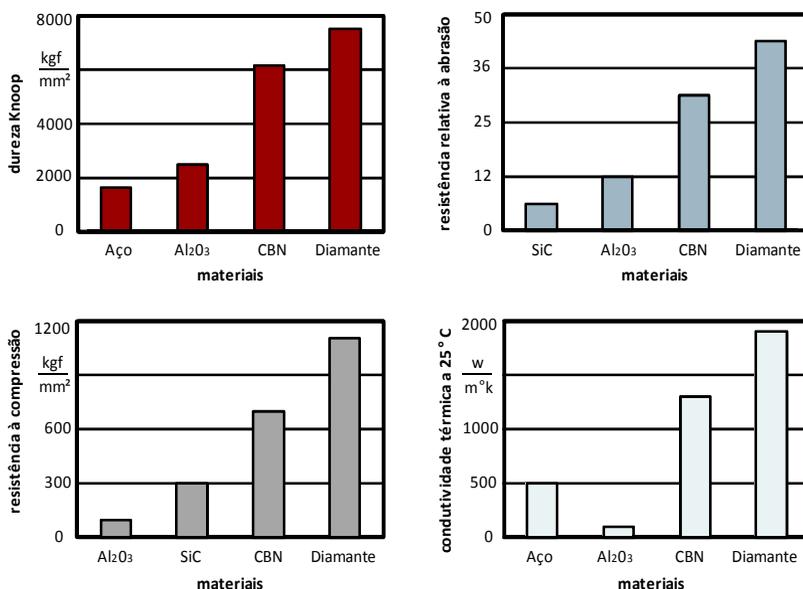


Figura 6 - Características físicas de alguns materiais - adaptado de [22].

É importante salientar que a grafitação do diamante inicia-se a partir de 900 °C e sua oxidação após 1400 °C [1], o que limita a aplicação do diamante em materiais ferrosos.

Os ligantes empregados nos rebolos superabrasivos podem ser:

- Resinóides;
- Vitrificados;
- Metálicos.

Os ligantes metálicos subdividem-se em ligantes sinterizados e os depositados eletronicamente. Os ligantes sinterizados são predominantemente feitos de níquel. Os ligantes metálicos utilizados com superabrasivos são mais resistentes ao calor, quando comparados aos ligantes de resina, e mais resistentes ao impacto, quando comparados aos ligantes vitrificados (König, 1989 *apud* [18]).

Na fabricação de ligantes sinterizados, parte-se do pó metálico que é misturado com os grãos abrasivos. A sinterização ocorre em fornos elétricos com atmosfera levemente redutora em temperaturas que atingem até 800 °C. Após este processo, ocorre a fase de compactação em prensas hidráulicas [19].

O ligante metálico depositado eletronicamente, normalmente de níquel, serve para a fixação de apenas uma camada de grãos abrasivos. A ancoragem dos grãos é tão firme que estes podem ficar até 70% expostos, o que possibilita espaços maiores para alocação de cavacos e agressividade a ferramenta [19]. O processo possibilita a fabricação de ferramentas com perfis complicados através da confecção do corpo com o perfil desejado e posterior cobertura com grãos de CBN [18].

2.5 MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES

Durante o processo de retificação é gerada uma grande quantidade de calor em função da deformação plástica, bem como pelo atrito entre peça e o rebolo. Em decorrência disto, o meio lubri-refrigerante assume as seguintes funções [1, 18, 22, 32]:

- Propiciar lubrificação na interface entre peça e o rebolo;
- Refrigeração da superfície da peça por absorção e posterior transporte do calor gerado;
- Manter uma uniformidade de temperatura de trabalho;
- Remoção do cavaco produzido na área de trabalho, evitando assim que o mesmo danifique a peça e feche os poros do rebolo;
- Formação de um filme protetor contra a corrosão para a máquina-ferramenta e para a peça.

É importante destacar que as propriedades físicas, químicas e biológicas do meio lubri-refrigerante influenciam o processo retificação. Conforme o tipo de material da peça de trabalho podem ser usados

diversos tipos de fluidos. A Norma DIN 51385 [24] classifica os meios lubri-refrigerantes em não-miscíveis (óleos de corte) e miscíveis em água. A seguir são descritas algumas características dos meios lubri-refrigerantes mais utilizados.

Os meios lubri-refrigerantes não miscíveis em água possuem 80 a 95% de um óleo base em sua composição, podendo ser empregados com ou sem aditivação. Sua viscosidade, a uma temperatura de 40°C, é aproximadamente 50 vezes maior que os fluidos de base aquosa. Por este motivo, são indicados para retificação de materiais formadores de cavaco longos, como por exemplo o aço [25]. Como desvantagem, este tipo de fluido apresenta a menor capacidade de transporte de calor [1].

Como principais fluidos lubri-refrigerantes não-miscíveis em água, citam-se (Brinksmeier *et al.*, 2000 *apud* [18]):

- Óleo mineral;
- Óleo hidrocraqueado;
- Óleo à base de alfa-olefinas polimerizadas;
- Ésteres.

Os óleos minerais possuem boas propriedades anticorrosivas e praticamente não apresentam contaminação devido ao refino. Não é necessária a adição de inibidores de corrosão da máquina-ferramenta e da peça e adição de antibióticos para evitar a proliferação de fungos. Mas para prolongar a vida do fluido é necessária a adição de antioxidantes e anti-espumantes para diminuir os efeitos danosos da formação de espuma, ou seja, menor eficiência de bombeamento e de lubrificação [22, 26].

É importante frisar que o óleo mineral cria névoa e vapores na atmosfera, apresentando um perigo de detonação e contaminação da área de trabalho. Portanto, são necessários maiores cuidados para a retificação com óleos [13].

Os meios lubri-refrigerantes miscíveis em água são empregados quando se requer alta eficiência na refrigeração, como emulsões e soluções [1, 18]. A emulsão consiste em uma dispersão de óleo (geralmente mineral) em água, na qual a quantidade de óleo determina a capacidade de lubrificação e a quantidade de água, a capacidade de refrigeração. O emprego de emulsão no processo de retificação apresenta como vantagens, quando comparadas ao óleo mineral, maior capacidade de refrigeração, maior facilidade de filtragem, maior capacidade de transporte dos cavacos e menor custo [18, 22, 25].

Como desvantagens têm-se o menor poder lubrificante, a necessidade de constante ajuste da concentração devido à perda de óleo

junto aos cavacos, sendo necessário controlar e adicionar óleo periodicamente para manter a efetividade da emulsão [27].

Tem-se ainda a possibilidade de contaminação por microorganismos [18, 25], que devem ser combatidos por fungicidas e bactericidas, elevando assim o custo de manutenção [28].

No processo de retificação são empregadas concentrações de 2 a 15% de óleo em água [1]. As concentrações mais utilizadas na retificação são entre 1 a 2% de óleo em água, entretanto, em operações mais difíceis onde são necessárias melhores condições de lubrificação, utilizam-se concentrações entre 5 a 20% e com aditivo de extrema pressão [22, 29].

Os fluidos sintéticos (ou soluções aquosas) possuem concentrações entre 1 a 2% de um concentrado de produtos orgânicos e inorgânicos em água, sendo que sua ação está baseada apenas em efeitos de refrigeração e limpeza. As principais vantagens destas soluções são a boa estabilidade e transparência [28].

A Tabela 1 sintetiza as principais características dos meios lubri-refrigerantes utilizados no processo de retificação atribuídos em uma escala entre 1 e 4 (Sreejith e Ngoi, 2000 *apud* [22]), onde o número 1 é considerada a pior situação até 4, considerada como melhor.

Tabela 1 - Características dos fluidos de corte (1=pior; 4= melhor) - (Sreejith e Ngoi, 2000 *apud* [22]).

Característica	Sintéticos	Semi-sin.	Emulsões	Óleos
Remoção de calor	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Facilidade de filtração	4	3	2	1
Aspectos ambientais	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Aumento de vida rebolo	1	2	3	4

2.6 CONDICIONAMENTO DE REBOLOS

O desgaste dos grãos e do ligante ocorre à medida que um rebolo é utilizado. Conforme as condições de trabalho e do material abrasivo, o desgaste do grão abrasivo leva a um arredondamento do gume (micro-

efeito de desgaste) ou ainda em virtude de microlascamentos, leva a uma afiação contínua do grão (macro-efeito de desgaste) [10].

Devido o arredondamento dos gumes há o aumento da força de retificação e a sobrecarga do ligante, e assim o grão é mais facilmente arrancado da estrutura. Com o desgaste do grão abrasivo ocorre também o desgaste do ligante. Este pode ser ainda por ataque químico ou térmico (König, 1989 *apud* [10]).

A soma dos desgastes verificados nos grãos e no ligante resulta no desgaste do rebolo (Δr_{sc}) e este se apresenta como desgaste radial (Δr_s) e desgaste de quina (Δr_{sk}) como apresentado na Figura 7.

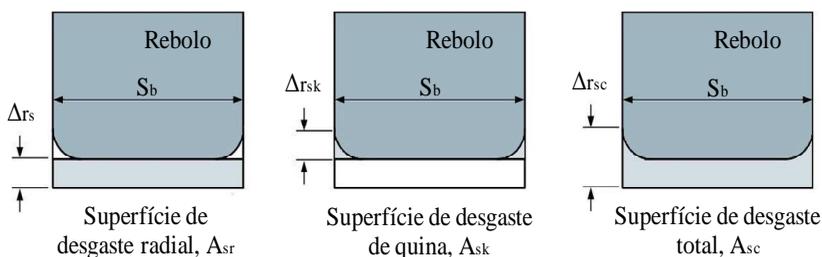


Figura 7 - Representação do desgaste de rebolos - adaptado de [1].

Devido a este comportamento após certo uso, e também quando novos, os rebolos apresentam-se em condições ‘não adequadas’ para usinagem e devem ser preparados para manter suas condições de corte. Os procedimentos de preparação ou manutenção das ferramentas de corte de geometria não definida são denominados ‘condicionamento’, o que engloba as operações de perfilamento, afiação (ou avivamento) e limpeza do rebolo [1, 5].

A Figura 8 apresenta a classificação dos processos envolvidos no condicionamento e a sua dependência relacionada ao tipo de ligante empregado na fabricação do rebolo.

A operação de perfilamento trabalha apenas a macro-geometria do rebolo, pois objetiva conferir a forma geométrica ao rebolo. Essa etapa ocorre com a remoção do material abrasivo desgastado até que toda a superfície do rebolo que está acima do nível da superfície atingida pelo desgaste de quina seja removida [10]. Não depende do tipo de ligante empregado no mesmo.

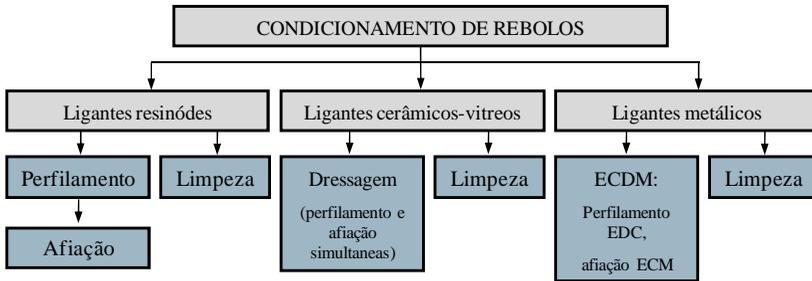


Figura 8 - Classificação dos processos de condicionamento dos rebolos - adaptado de [5].

A afiação corresponde à operação de condicionamento que visa o aumento da protusão dos grãos abrasivos através da remoção de uma determinada quantidade de ligante entre os grãos da periferia radial do rebolo [19]. Mediante a afiação, elimina-se o ligante entre os grãos, numa determinada quantidade, para se ter o espaçamento necessário para o fluxo de cavacos, e também permitir o fluido atingir à zona de corte [10]. Nos rebolos convencionais a afiação ocorre simultaneamente ao perfilamento. Este processo é denominado dressagem.

A operação de limpeza tem como objetivo remover resíduos dos poros da ferramenta, como restos de cavacos e partículas aderidas à superfície. É realizada com auxílio de escovas de aço e jatos de ar comprimido [5].

2.7 TOPOGRAFIA DE REBOLOS

Na retificação o princípio de causa-efeito do processo de corte pode somente ser descrito baseado no comportamento de corte dos grãos abrasivos individuais. Devido à distribuição estocástica^[1] de geometria não definida dos gumes, sua posição e seu formato não podem ser exatamente determinados [12].

Contudo, a posição, o número e o formato dos grãos abrasivos podem ser analisados estatisticamente e relacionados com o processo cinemático e geométrico para alcançar uma especificação das condições de engajamento dos grãos abrasivos. Assim, o resultado de trabalho pode ser relacionado a eventos na área efetiva de corte (*grinding*

[1] Estocástico: processo que depende das leis do acaso.

contact) para os valores dos parâmetros de entrada na máquina-ferramenta, os parâmetros da peça de trabalho e outras especificações de processo [12].

Os principais parâmetros envolvidos no processo de corte são a espessura de usinagem (h_{cu}), o comprimento de contato e o ângulo de incidência (α). A geometria de um único gume pode ser descrita estatisticamente pela medição do perfil do gume. A Figura 9 mostra de forma esquemática a geometria de um único grão abrasivo.

A determinação da topografia de um rebolo pode ser dividida em métodos estáticos, cinemáticos e dinâmicos (Bruecher, 1996 *apud* [12]):

- Métodos estáticos: todos os grãos abrasivos na superfície do rebolo são considerados. A cinemática do processo de retificação não é considerada neste método;

- Métodos dinâmicos: o número dos atuais grãos abrasivos cortantes é mensurado. O número de gumes ativos é o conjunto de gumes envolvidos no processo de corte;

- Métodos cinemáticos: combina os efeitos cinemáticos do processo com a distribuição estatística dos grãos para a especificação da microcinemática de um grão individual, e assim, a determinação dos parâmetros de corte.

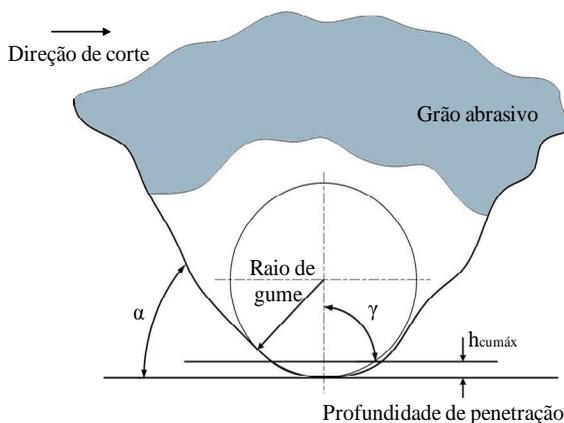


Figura 9 - Forma média de um gume - adaptado de [1].

Nos métodos estáticos, basicamente todos os gumes na área de corte são incluídos da análise da topografia, e não há distinção entre gumes ativos e não ativos no processo de corte.

A Figura 10 apresenta uma seção esquemática do corte de um rebolo. Todos os grãos abrasivos protusos possuem gumes. Como

alguns grãos geralmente possuem mais de um gume, a distância entre os gumes estáticos não corresponde à média de separação estatística de grãos no rebolo [12].

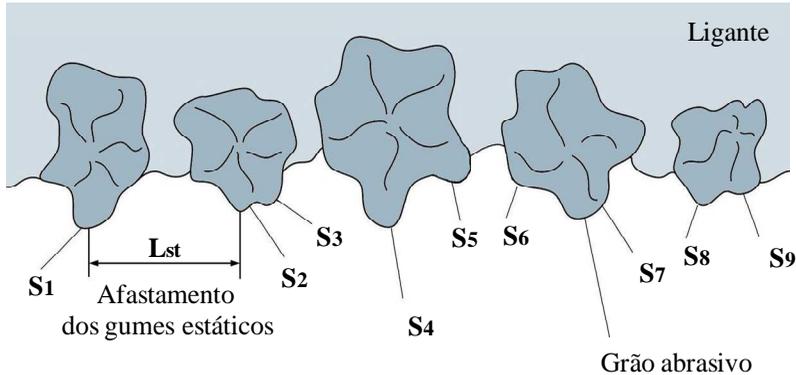


Figura 10 - Gumes estáticos - adaptado de [12].

Como alternativa para a distância entre os gumes estáticos, o número de gumes é especificado por unidade de comprimento S_{stat} (número de gumes estáticos), número de gumes por unidade de superfície N_{stat} ou pelo número de gumes por unidade de volume na área de corte C_{stat} .

Nos métodos dinâmicos são obtidas informações sobre quais áreas da superfície efetiva do rebolo estão realmente envolvidas no processo. Estes métodos dependem das condições do processo [40].

Na Figura 11 podem ser observados alguns gumes ativos envolvidos no processo. O número e a densidade dos gumes ativos S_{act} e C_{act} são menores que os gumes estáticos S_{stat} e C_{stat} . Seus valores podem ser determinados por parâmetros geométricos e cinemáticos. A densidade de gumes muda seu valor continuamente devido ao desgaste do rebolo e conseqüentemente pelas mudanças na topografia do mesmo [40].

Em métodos cinemáticos a especificação de gumes efetivos leva em consideração a cinemática do processo. Baseado no número de gumes, a trajetória de um único grão é reproduzida quando considerado o processo de retificação, os parâmetros e as condições geométricas [12].

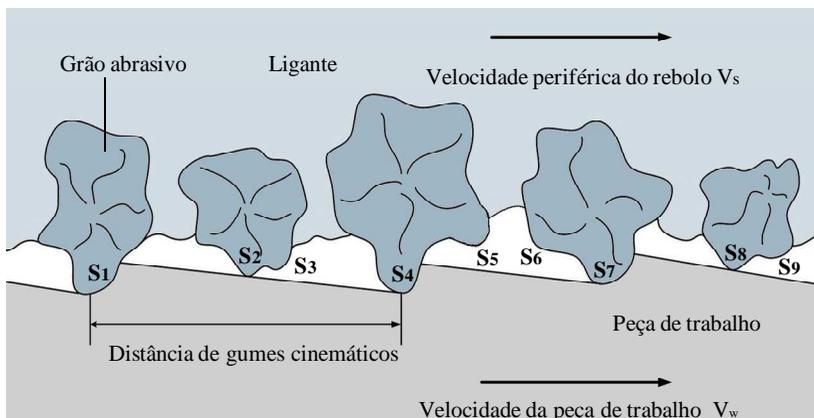


Figura 11 - Gumes cinemáticos - adaptado de [12].

2.7.1 Medição da topografia de rebolos

A Figura 12 apresenta os diferentes métodos de medição de topografia de rebolos. No caso do método de papel carbono, um papel branco e um papel carbono são colocados entre o rebolo e um anel de plástico polido ligeiramente cônico. Ao rolar o rebolo no anel de plástico, a topografia do rebolo é reproduzida no papel branco. Em virtude do formato cônico do anel, espera-se que a medição da distribuição dos gumes seja dependente da profundidade do gume (Nakayama, 1973 *apud* [12]).

A avaliação qualitativa também é utilizada para determinação da topografia de rebolos. Imagens de SEM (*Scanning Electron Microscope*), microscópios óticos e *stereos* são utilizadas para avaliação qualitativa do processo de desgaste. Processos microscópicos podem ser utilizados para demonstrações quantitativas sobre a área de corte efetiva do rebolo. Neste contexto, grãos ou diferentes características de desgaste são estaticamente contados. As medições podem ser diretamente efetuadas sobre a superfície do rebolo ou indiretamente, sobre uma impressão da superfície [12].

Os processos piezelétricos utilizados para determinação do número de gumes efetivos são baseados na medição de sinais de força ou picos de temperatura de um único gume ativo. O processo piezelétrico é somente aplicável para pequenas superfícies de contato, uma vez que deve ser assegurado que apenas um gume ativo esteja na

zona de contato, o que aumenta a complexidade de medições por este método [12].

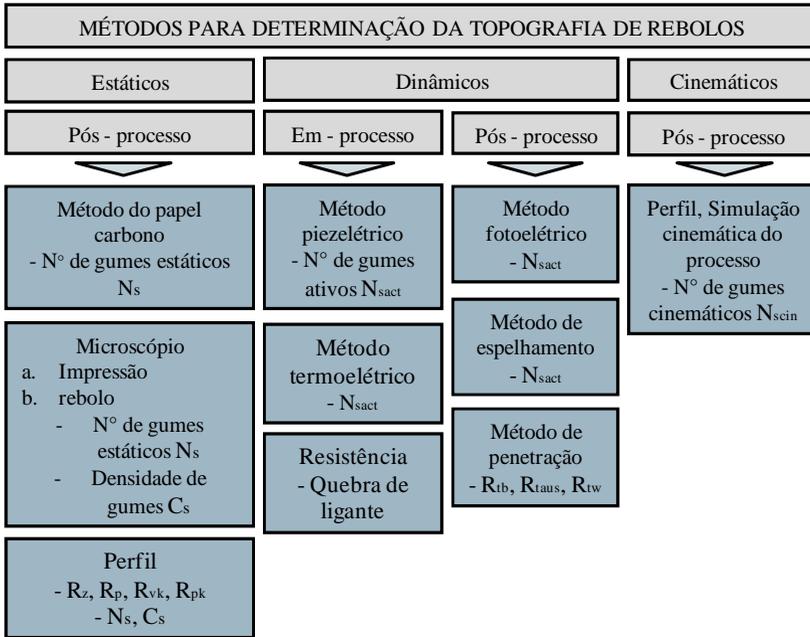


Figura 12 - Métodos para caracterização da topografia de rebolos - adaptado de [12].

Métodos fotoelétricos, de acordo com o princípio da luz difusa, são baseados na luz refletida pela superfície de corte e coletados através de um detector de radiação. Neste método a distribuição de luz refletida e o número de impulsos luminosos na direção regular de reflexão são avaliados (Werner, 1994 *apud* [12]).

Pode-se determinar a topografia do rebolo, também, através do método de espelhamento de peça: a topografia do rebolo pode ser retratada em uma peça de controle ou padrão. Para isto, uma peça padrão é fixada em ângulo diagonal da direção de corte. Com a contagem das marcas deixadas pelo rebolo, uma conclusão pode ser feita sobre o número de gumes ativos por unidade de superfície. Uma vez que as marcas deixadas por sucessivos gumes podem sobrepor-se na peça, não é possível determinar totalmente o número de gumes ativos engajados (Shaw, 1977 e Verkerk, 1977 *apud* [12]).

Outro método é a penetração de uma chapa de aço fino ou uma peça de trabalho estacionária na área efetiva do rebolo. Trata-se do método de penetração de peça. A rugosidade da superfície usinada é resultante da sobreposição dos perfis dos gumes ativos no processo de remoção. A rugosidade gerada na peça, por este método, recebe o nome de rugosidade da superfície usinada específica (R_{ib}) e rugosidade da superfície (R_{taus}) ou rugosidade da superfície usinada efetiva (R_{tw}). Este processo é adequado para avaliações comparativas da topografia dos gumes. Entretanto não é possível obter informações sobre a forma e número dos gumes [12].

2.8 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Devido à complexidade do processo de retificação, não se pode esperar um comportamento constante e previsível deste processo. Isto leva a indústria a controlar estatisticamente ou continuamente as peças produzidas em processo ou pós-processo. Portanto, há a necessidade crescente de sistemas de monitoramento para uso preventivo no intuito de assegurar a qualidade da peça produzida. Estes sistemas devem identificar erros na peça produzida, dependentes do estado do processo, através do monitoramento em processo [30].

Este tipo de sistema permite o aumento da produtividade de máquinas-ferramentas caras, trabalhando com mínima assistência ou de forma automática em um terceiro turno [31]. Assim, sistemas de monitoramento em processo, baseados em efeitos físicos produzidos durante a retificação, dressagem e condicionamento do rebolo, tornaram-se essenciais para as retificadoras.

Geralmente um sistema de monitoramento apresenta três funções principais (Inasaki, 1999 *apud* [32]):

- Deve ser capaz de detectar os problemas inesperados;
- Gerar informações que podem ser utilizadas para otimizar o processo;
- Possibilitar a relação de causa e efeito não previstos de entrada-saída, que são úteis para estabelecer um banco de dados a respeito de um processo em particular.

Monitorar o processo de retificação implica em observar um ou diversos sinais para atingir diferentes objetivos, conforme apresentados na Figura 13:

Existem várias grandezas relacionadas ao processo de retificação que podem ser monitoradas em processo para o acompanhamento e

controle, tais como força de corte, vibração, potência do motor e emissão acústica.

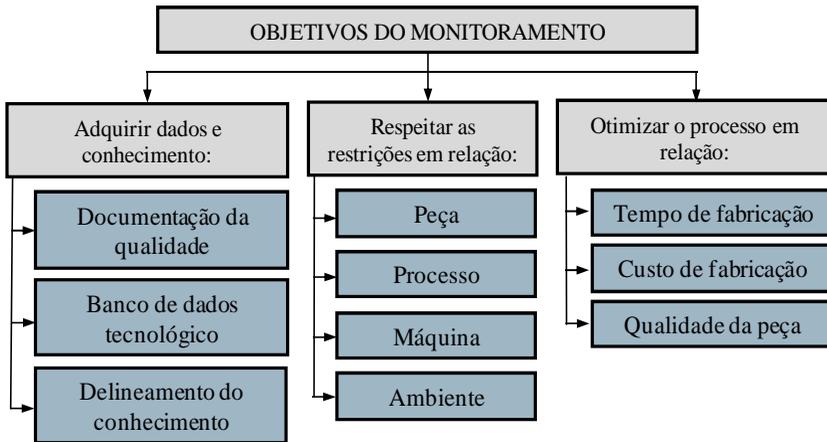


Figura 13 - Objetivos do monitoramento - adaptado de [31].

2.8.1 Força de corte

Dentre as principais grandezas que podem ser monitoradas está a força de corte. O desgaste da ferramenta implica em um aumento da força de corte e suas componentes, as quais são adequadas para o monitoramento do processo [30].

Além de possibilitar a estimativa da potência requerida para executar o corte, o conhecimento da força de usinagem e o estudo do comportamento de suas componentes são importantes para o projeto de máquinas-ferramentas e seus elementos. A força de corte pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta por deformação plástica dos gumes, além de influenciar o desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste [33].

A força de corte permite efetuar o cálculo da potência de corte e a determinação do rendimento da máquina, para diferentes cargas e velocidades de trabalho, sendo o indicador mais importante do estado e da qualidade da usinagem [34].

A força de usinagem pode ser medida por meios diretos e indiretos. O valor das suas componentes é avaliado por meios diretos enquanto os seus efeitos (deflexão no eixo da porta-ferramenta ou

torque no eixo árvore) são avaliados por meios indiretos. Experimentos efetuados por Brinksmeier e Popp (1991) *apud* [30] no processo de retificação cilíndrica externa concluíram que o monitoramento da força normal permite a otimização do tempo do ciclo de retificação e detecção do desgaste do rebolo.

Nos experimentos efetuados por Shih e Shin (1995) *apud* [30] em processos de retificação interna de mergulho, concluiu-se que os valores estatísticos obtidos a partir da medição da deflexão apresentam correlação com a retilidade, circularidade e batimento da peça resultante.

2.8.2 Potência do motor

O torque entregue pelo eixo do motor possui relação direta com a potência efetiva do eixo árvore. Os eventos que ocorrem no eixo árvore refletem-se na potência requerida pelo motor (König e Klumpen, 1993 *apud* [30]).

A maior vantagem do monitoramento de parâmetros do motor é que os instrumentos de medição não interferem no processo de usinagem [34]. Outra vantagem é o relativo baixo custo dos sensores - geralmente são utilizados os sensores de efeito Hall que efetuam a medição da corrente elétrica do motor da máquina-ferramenta, sendo esta corrente posteriormente convertida na potência utilizada pela mesma [35].

O monitoramento da potência do motor pode ser utilizado para detectar quebras de ferramentas e desgaste, em processos onde as seções transversais de corte utilizadas são grandes o bastante para que alterações possam ser detectadas [36].

O sinal de potência oferece uma informação bastante confiável sobre a energia consumida no processo de retificação, sendo proporcional à quantidade de material removido pela ferramenta abrasiva. Um aspecto negativo deste sinal é sua resposta lenta, diretamente relacionada à inércia do motor, o que induz a certo amortecimento do sistema (Valente, 2003 *apud* [32]).

Nos experimentos realizados por Inasaki (1990) *apud* [35] utilizou-se o monitoramento da potência do motor e emissão acústica. A conclusão para o monitoramento da potência é que esta é muito eficaz para identificar a aspereza dos gumes do grão.

2.8.3 Vibrações

Utiliza-se o monitoramento das vibrações do processo de retificação principalmente para dois propósitos (Tönshoff *et al.*, 2002 *apud* [37]):

- Medir vibrações forçadas para identificar desbalanceamentos ou fontes externas de vibração;
- Detectar vibrações auto-excitadas, ou seja, trepidações ou *chatter*.

A vibração forçada é mais facilmente detectada, uma vez que sua frequência pode ser mensurada e comparada com os elementos rotativos da própria máquina ou de equipamentos adjacentes a esta. A vibração auto-excitada possui frequências mais altas, próximas da frequência de ressonância da máquina e sua importância no processo de retificação é maior, uma vez que a sua origem é mais difícil de ser determinada [37].

Além disto, propriedades específicas do sistema porta-ferramenta, bem como o estado dos elementos rotativos da máquina e irregularidades da ferramenta e do material da peça obra são refletidas por vibrações de baixa frequência [30].

Na pesquisa efetuada por Hassui *et al.* (1998) *apud* [37] utilizou-se o sinal de vibração para avaliação do processo de retificação. Através deste sinal pode-se determinar indiretamente o momento mais propício para efetuar o processo de dressagem do rebolo. Nesta pesquisa foi verificado ainda que a vibração é capaz de indicar com clareza as três fases da retificação cilíndrica externa de mergulho: deformação elástica inicial, remoção de material e *spark-out* ^[2][37].

No trabalho realizado por David e Warnecke (1996) *apud* [37] foi relacionado o sinal de vibração com as forças dinâmicas da retificação. O trabalho mostrou que estas forças fazem o sistema (máquina-rebolo-peça) vibrar e que é possível captar o aumento de amplitude da vibração em algumas frequências à medida que o rebolo perde afiação.

2.8.4 Emissão acústica

A emissão acústica (EA) é o resultado de uma rápida liberação de energia que se propaga na forma de uma onda elástica longitudinal

[2] *Spakt-out*: ou centelhamento, compreende uma das etapas de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho. Em termos gerais, consiste em manter o rebolo sem deslocamento radial na posição final especificada. Com isto, removem-se as deformações impostas no contato do rebolo com a peça, para obtenção das tolerâncias geométricas e dimensionais [11].

transiente em corpos sólidos e em fluidos nos estados gasoso e/ou líquido. A velocidade de propagação é função da densidade e módulo de elasticidade do meio no qual a onda se propaga. A fonte da emissão acústica em corpos sólidos pode ser um agente externo (impacto de um corpo externo sobre o corpo na qual está sendo verificada a emissão acústica) ou uma fonte interna (deformação plástica, fratura, formação de uma trinca, transformação de fase e outros) [5, 38].

Os fenômenos relacionados com a formação de cavacos na retificação, como as deformações plásticas e o processo de atrito, são acompanhados por fenômenos relacionados ao rebolo, como desgaste do grão abrasivo e fratura do ligante. A intensidade destes fenômenos é diretamente proporcional a um sinal de emissão acústica mensurável [30]. A medição e análise da emissão acústica produzida pelo processo é uma técnica adequada para o propósito de otimização e controle do processo de retificação.

A emissão acústica é fortemente dependente dos parâmetros de processo. Como fatores de influência citam-se: taxa de retificação, velocidade de retificação, largura de contato entre rebolo e peça e as características do material de peça, tais como módulo de elasticidade, estrutura, composição e porosidade.

A faixa de frequência de interesse na emissão acústica situa-se entre 50 kHz a 1000 kHz, superando a faixa de frequência de muitos ruídos advindos de fontes exteriores ao processo em análise. É um método sensível e adequado para o monitoramento do processo de retificação (Liu, 1991 *apud* [5]).

As origens da emissão acústica no processo são decorrentes principalmente da fratura do grão e do ligante, atrito entre o grão abrasivo e a peça-obra, formação de trincas, e deformação elástica do material. Todos diretamente ligados ao processo de formação de cavaco e desgaste do rebolo [37], como pode ser observado na Figura 14.

A tecnologia de monitoramento por emissão acústica é aproveitada para o reconhecimento de contato entre rebolo e peça no processo de retificação [4, 19]. No processo de dressagem e na fabricação da primeira peça a identificação do ponto de referência sobre a superfície da peça, a partir do qual se iniciam as operações de retificação, podem ser identificadas com auxílio da emissão acústica.

A emissão acústica contempla um sinal que apresenta uma relação direta com a dimensão da taxa de retificação, permitindo a verificação do comportamento do processo e possibilitando detectar situações de ocorrências específicas durante o processo, como o exato

momento de contato entre rebolo e peça ou ferramenta de dressagem [4].

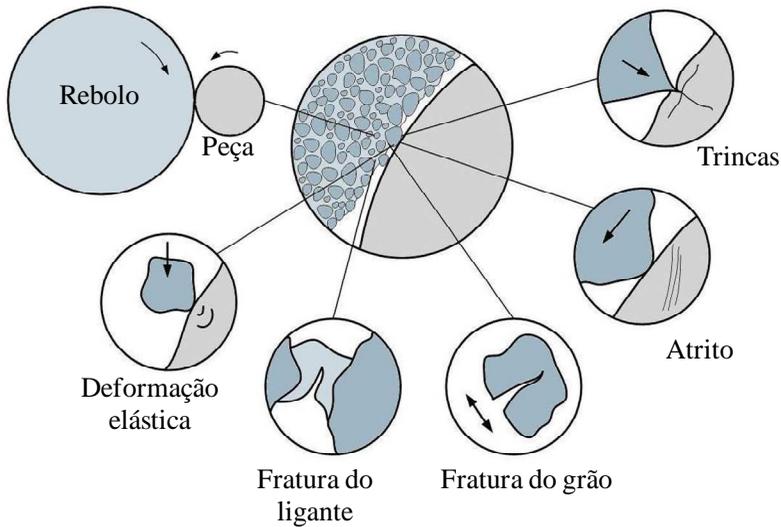


Figura 14 - Principais fontes de emissão acústica no processo de retificação - adaptado de [39].

Este ponto de referência é, na grande maioria dos casos, determinado através da movimentação de mergulho do rebolo contra a superfície da peça, até que ocorra o contato entre ambos. O contato é caracterizado pela impressão de uma pequena marca, a qual não deve afetar as características dimensionais da peça nas tolerâncias exigidas [9].

Boaron (2009) [4] realizou estudos do reconhecimento do contato entre rebolo e peça empregando um sistema de reconhecimento por emissão acústica integrado no comando numérico de uma retificadora, o qual permite um acompanhamento em tempo real dos sinais de emissão acústica decorrentes do evento de contato. Este posicionamento entre rebolo e peça é, na maioria das vezes, efetuado manualmente, exercendo influência direta nos resultados de trabalho e demandando um tempo considerável por parte do operador da máquina.

A automatização desta atividade com o emprego de um sistema de monitoramento por emissão acústica integrado diretamente no

comando numérico da máquina-ferramenta levou a resultados satisfatórios de centralização, reduzindo consideravelmente o tempo necessário na preparação da máquina para a produção de um componente.

2.9 TRANSDUTORES PARA MONITORAMENTO

A necessidade do monitoramento do processo de retificação surge em consequência de haver um grande número de variáveis de entrada e o mecanismo de corte mudar com a variação do tempo.

A aplicação de transdutores tem ganhado cada vez mais espaço nos processos industriais, como se observa em máquinas modernas, nas quais se encontra uma variedade de transdutores, como os acelerômetros, sensores de força, sensores de balanceamento, *encoders*, sensores de velocidade e posição (Aronson, 1997 *apud* [34]).

Uma característica essencial de um sistema de monitoramento é possuir transdutores que possam detectar se o processo não está funcionando normalmente. Outro aspecto importante é o sistema ser capaz de corrigir parâmetros operacionais da máquina-ferramenta visando atingir valores ótimos, ou próximos destes [40].

Os sensores de um sistema de monitoramento do processo de retificação devem ser capaz de detectar qualquer mau funcionamento no processo com confiabilidade. Assim, possíveis danos e perdas na produção podem ser minimizados [40].

Em termos de otimização, um sistema de monitoramento deve gerar informações que possam aperfeiçoar o processo em relação aos tempos totais de retificação e aos custos. As informações obtidas através de um sistema de sensores podem ser utilizadas também para o estabelecimento de banco de dados para uso, por exemplo, em partes de sistemas inteligentes (Beck, 2002 *apud* [12]).

Uma dificuldade em prever o comportamento do processo é devido à performance do rebolo poder mudar significativamente durante o processo de retificação. O condicionamento do rebolo é necessário antes do início do processo e quando o rebolo sofrer desgastes para voltar à sua condição inicial de topografia. Assim, sistemas de sensores são requeridos para minimizar os tempos de processo, assegurar que as condições da topografia do rebolo sejam mantidas e diminuir o desperdício de material abrasivo durante o condicionamento [12].

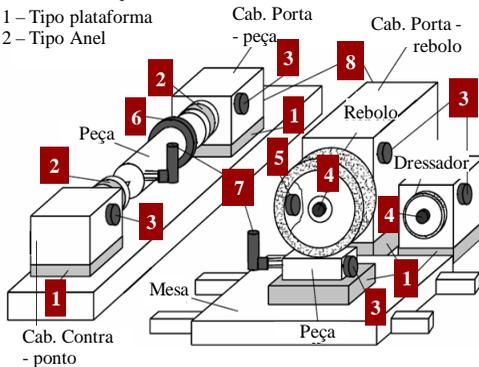
Os transdutores mais utilizados em ambiente industrial são de força, potência e emissão acústica [41]. A Figura 15 apresenta a

integração de transdutores no processo de retificação cilíndrica externa e no processo de retificação plana.

Transdutores para aquisição de força

Dinamômetros piezelétricos

- 1 – Tipo plataforma
- 2 – Tipo Anel



Transdutores para aquisição de EA

- 3 – Montagem no cabeçote ou na peça/transmissão por cabo ou *wireless*
- 4 – Rotativos no eixo árvore/transmissão de sinais *wireless*
- 5 – Rotativos montado no rebolo/transmissão de sinais *wireless*
- 6 – Tipo anel rotativo na peça/transmissão de sinais *wireless*
- 7 – Sensor de emissão acústica com acoplamento fluídico

Transdutores para aquisição de Potência

- 8 – Medição de tensão corrente no acionamento dos motores (sensores Hall)

Figura 15 - Transdutores para o monitoramento da retificação - adaptado de [12].

2.9.1 Transdutores de força

Os primeiros transdutores para medição de força, desenvolvidos na década de 1950, eram baseados em extensômetros de resistência. O uso desta tecnologia tinha a desvantagem de reduzir a rigidez total do sistema. Através de pesquisas com sistemas alternativos, a introdução de transdutores de força com elementos piezelétricos, baseados em quartzo ou cerâmicas piezelétricas, foi uma solução satisfatória para a medição desta grandeza.

Devido ao comportamento anisotrópico (alteração das propriedades com a direção) de materiais piezelétricos à base de quartzo, é possível configurar uma montagem destes materiais agrupando-os de forma sobreposta para formar um transdutor de medição de força de três componentes ortogonais (Tönshoff, 1999 *apud* [5]).

Como se observa na Figura 15, este tipo de transdutor pode ser montado diretamente no fluxo de força, reduzindo assim a perda de rigidez necessária em extensômetros. Os dinamômetros são os sensores mais utilizados para a medição de força de corte, os quais são

constituídos de um conjunto de transdutores do tipo *strain gages* em sua base. Os sensores são localizados abaixo dos parafusos que fixam a peça, e possuem forma de pequenos anéis. A soma das forças exercidas em cada parafuso resulta na força tangencial [34].

2.9.2 Transdutores de potência

A medição da potência consumida pela árvore principal pode ser considerada como uma técnica simples, contudo a determinação da quantidade desta grandeza em processo é limitada. O montante de potência utilizado para o processo de remoção de material é somente uma fração da potência total consumida. Apesar disto, o monitoramento da potência é amplamente utilizado na indústria para definir limites específicos de potência e assim evitar sobrecargas na máquina-ferramenta. Em máquinas-ferramenta modernas os inversores de frequência oferecem saídas nas quais a tensão e a corrente podem ser adequadamente lidas, através de sensores Hall [4].

Na retificação o monitoramento da potência é um método popular para evitar danos térmicos na peça de trabalho. Além do relativo baixo custo, a instalação de transdutores para medição de potência não influencia no espaço de trabalho da máquina-ferramenta (Tönshoff e Inasaki, 2001 *apud* [37]).

Transdutores de potência podem também ser utilizados para detectar desgaste nos casos em que as taxas de remoção são elevadas. Colisões e quebra de ferramentas são detectados de forma tardia [4, 41].

2.9.3 Transdutores de emissão acústica

As primeiras pesquisas publicadas com resultados de transdutores de emissão acústica foram feitas na década de 1950, em ensaios de tração. Após essa década é que a emissão acústica começou a ser utilizada para o monitoramento de processos de fabricação [12].

Para o monitoramento do processo de retificação, os transdutores de emissão acústica utilizados apresentam, na maioria dos casos, o princípio de medição por aceleração: princípio de um detector sísmico (*seismischer Aufnehmer*^[3]). Neste caso, o funcionamento do transdutor depende da ação de aceleração de um sistema massa-mola amortecido a ser medida. O comportamento de medição do transdutor é influenciado

^[3] *Seismischer Aufnehmer*: sensores sísmicos.

diretamente através do dimensionamento da massa sísmica m , a constante de mola k , assim como a constante de amortecimento c . Como formas construtivas possíveis de serem utilizadas destacam-se, por exemplo, os transdutores de aceleração, capacitivos, magnéticos, indutivos e piezelétricos (Karpuschewki, 2001 *apud* [4]).

Diferentes tipos de avaliação de sinal podem ser aplicados aos sinais de saída dos sensores de emissão acústica. Os mais importantes são o valor quadrático médio (do inglês RMS^[4]), sinal bruto de emissão acústica (EA_{raw}) e análise de frequências. O curso no domínio do tempo do valor RMS contém informações essenciais sobre as condições do processo [12, 41]. Este valor pode ser entendido como a quantidade física da intensidade de sinal acústico e está diretamente relacionado com a quantidade de energia e dispersão das tensões no material, tornando este valor atrativo para o monitoramento. É importante ressaltar que o valor RMS é um valor estatístico médio, uma vez que na maioria dos casos um filtro passa-baixa é aplicado [12].

Os sinais de emissão acústica também podem ser investigados no domínio da frequência. Efeitos como desgaste e vibrações exercem diferentes influências no espectro da frequência, assim pode-se separar estes efeitos e analisá-los, identificando possíveis anormalidades no sistema.

A Equação 7 apresenta a relação da amplitude das ondas de energia elástica (A) com a distância da fonte geradora (r).

$$A = \frac{1}{r} \quad (7)$$

As ondas de energia elástica propagam-se nos meios na forma de ondas volumétricas, ou seja, apresentam componentes transversais e longitudinais com o sentido de deslocamento, sendo que suas amplitudes (A) estão relacionadas com a distância (r) da fonte geradora. Por este motivo, os transdutores de emissão acústica devem ser instalados o mais próximo possível da fonte geradora do ruído [4, 42].

O monitoramento por emissão acústica apresenta-se como uma técnica sensível na captação de ondas de tensão elástica de alta frequência e adequada para o processo de retificação (Ravindra *et al.*, 1997 *apud* [4]). A Figura 16 apresenta a faixa de frequência das fontes causadoras de ruídos no processo de retificação.

^[4] RMS: *root medium squar*.

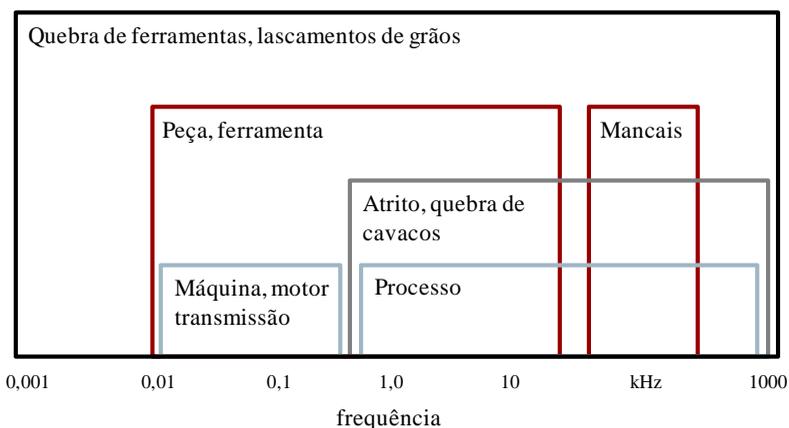


Figura 16 - Diagrama das faixas de frequências comumente encontradas para máquinas e processo - adaptado de [42].

De acordo com a faixa de frequência, sempre que possível, as interferências ou perturbações devem ser minimizadas pelo posicionamento adequado dos transdutores de EA na máquina-ferramenta e/ou pelo emprego de filtros [4].

2.9.4 Transdutores para monitoramento de rebolos

As condições do rebolo podem ser descritas pelas características dos grãos e do ligante. O número de gumes e a taxa de grãos ativos são importantes para prever o estado do rebolo. Ainda, o ligante exerce influência no desgaste e na variação da distribuição dos grãos. Estes efeitos resumem os aspectos da topografia do rebolo, que muda com o uso e com o condicionamento do mesmo. Como resultado, o diâmetro do rebolo reduz com o desgaste [12].

A Figura 17 apresenta uma visão sobre as diferentes grandezas geométricas afetadas com o condicionamento do rebolo. Os diferentes tipos de desgaste podem ser divididos em macroscópicos e microscópicos. Várias tentativas têm sido pesquisadas para descrever a topografia de um rebolo e correlacioná-la com os resultados de trabalho na peça.

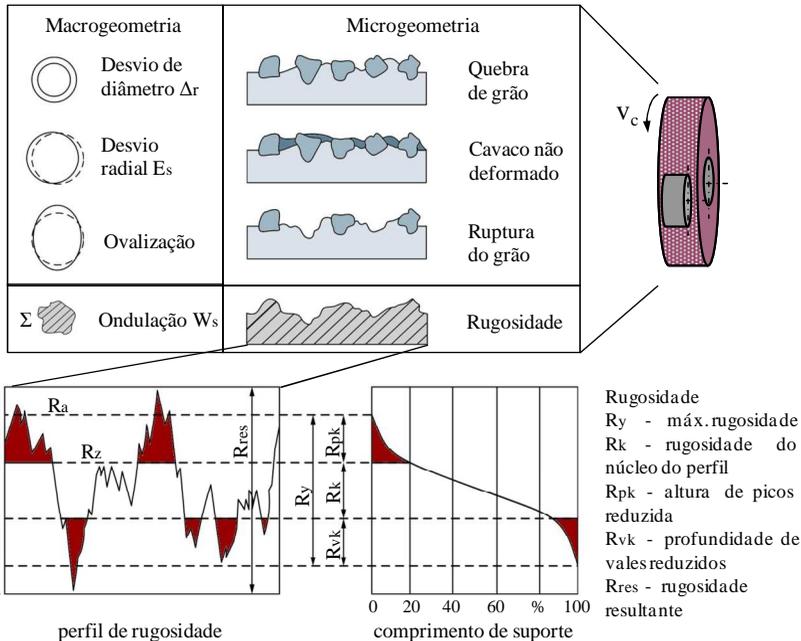


Figura 17 - Grandezas macroscópicas - adaptado de [12].

Na Figura 18 são apresentados os métodos adequados para medições dinâmicas no rebolo. Muitos destes sistemas não são capazes de detectar todas as grandezas macro e microgeométricas, contudo são utilizados para aplicações especiais.

A maioria dos transdutores é capaz de mensurar formas macrogeométricas. Entretanto alguns tipos de contatos mecânicos de um transdutor com o rebolo em movimento podem causar sérios problemas, uma vez que o abrasivo tende a “usinar” o transdutor. Somente com toques de curta duração, com pequenas forças e utilizando materiais duros, é possível alcançar resultados satisfatórios [12].

Há sensores baseados em sistemas pneumáticos para determinar a macrogeometria de rebolos. Estes são classificados de acordo com os que utilizam de ar comprimido e aqueles quais não utilizam. Estes sistemas são capazes de mensurar mudanças de distâncias relacionadas com o desgaste radial com resolução de $0,2 \mu\text{m}$ [12].

Oliveira *et al.* (1994) *apud* [12] propuseram um sistema que consiste em um dressador com ponta de diamante equipado com um sensor de emissão acústica para detectar a posição da superfície do

rebolo. Neste sistema, podem ser distinguidas no total três condições de contato: não contato, contato elástico e contato frágil.

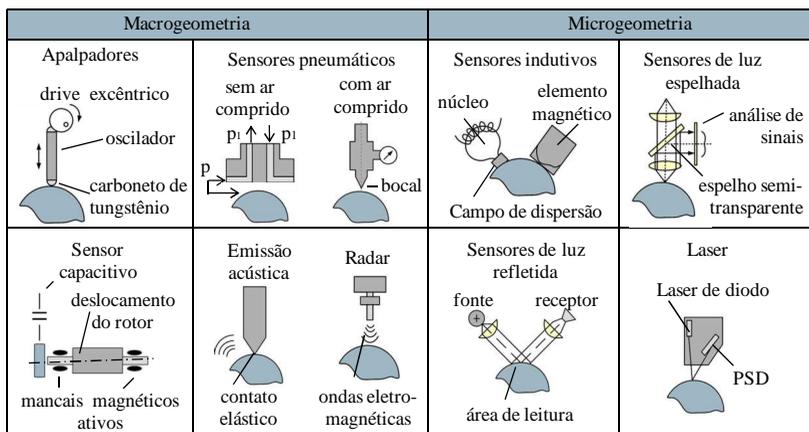


Figura 18 - Transdutores para medição da topografia do rebolo - adaptado de [43].

Outra possibilidade para determinar desgaste radial de rebolos é o sistema baseado em sensor de radar. No processo de retificação, estes transdutores são baseados no princípio interferométrico. Emitindo frequências de 94 GHz e comprimentos de ondas $\lambda = 3,18$ mm, estes transdutores possuem faixa de medição de 1 mm e resolução de 1 μm (Westkamper, 1997 *apud* [12]).

2.10 DANOS TÉRMICOS

Danos de retificação (danos térmicos) consistem no resultado da energia convertida em calor. Este calor é concentrado nas camadas superficiais e pode causar efeitos negativos nas propriedades da peça.

Na retificação com rebolos convencionais de óxido de alumínio cerca de 60 - 75% do total da energia gerada no processo é transferida tanto para a peça quanto para a região de corte. Já na retificação com rebolos de CBN cerca de 20% do total da energia gerada é transferida como calor para a peça (Kohli *et al.*, 1995 *apud* [10]).

O controle dos danos térmicos requer um conhecimento detalhado da participação de energia e do controle de energia introduzida no componente usinado pelo processo de retificação, através

da escolha correta do par fluido-ferramenta (Guo e Malkin, 1992 *apud* [44]).

Os métodos comuns para determinar os danos térmicos causados pelo processo de retificação são: dureza, tensão residual, e ataque metalográfico nital. Há ainda o método alternativo: o ruído de Barkhausen. A seguir são abordados alguns aspectos relativos ao método de Barkhausen e nital, os quais são utilizados neste trabalho.

2.10.1 Ruído magnético de Barkhausen

O método do ruído de Barkhausen é baseado no fenômeno físico que ocorre em materiais ferromagnéticos durante a magnetização [45]. Nestes materiais existem grandes volumes de átomos nos quais os momentos magnéticos estão alinhados segundo uma direção de magnetização espontânea ou de fácil magnetização. Estas regiões são conhecidas como domínios magnéticos.

Em dependência das características da estrutura cristalina, a direção preferencial de magnetização é diferente em diversas regiões do material, ou seja, a direção dos momentos magnéticos varia de domínio para domínio [46].

Os momentos magnéticos dentro dos domínios estão alinhados de forma que a magnetização total do material é igual a zero - exceto em ímãs naturais [47]. A direção de alinhamento dos momentos magnéticos varia de domínio a domínio, segundo a direção do eixo de fácil magnetização, portanto a separação entre os domínios magnéticos é feita por camadas de transição conhecidas como paredes de domínio, ou paredes de Bloch. Nos materiais ferrosos, estas são de 180° ou de 90° [46].

Quando materiais ferrosos são submetidos a campos magnéticos variáveis, os momentos magnéticos no interior dos domínios sofrem rotação contínua alinhando-se em uma direção próxima à direção de campo magnético aplicado. Os domínios com orientação na direção do campo tendem a se expandir em todas as suas direções, movendo suas paredes e subjogando os domínios vizinhos [48]. A Figura 19 esquematiza o comportamento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização.

A saturação ocorre quando todos os momentos magnéticos nos domínios se alinham na direção do campo aplicado devido ao movimento das paredes de domínio [47].

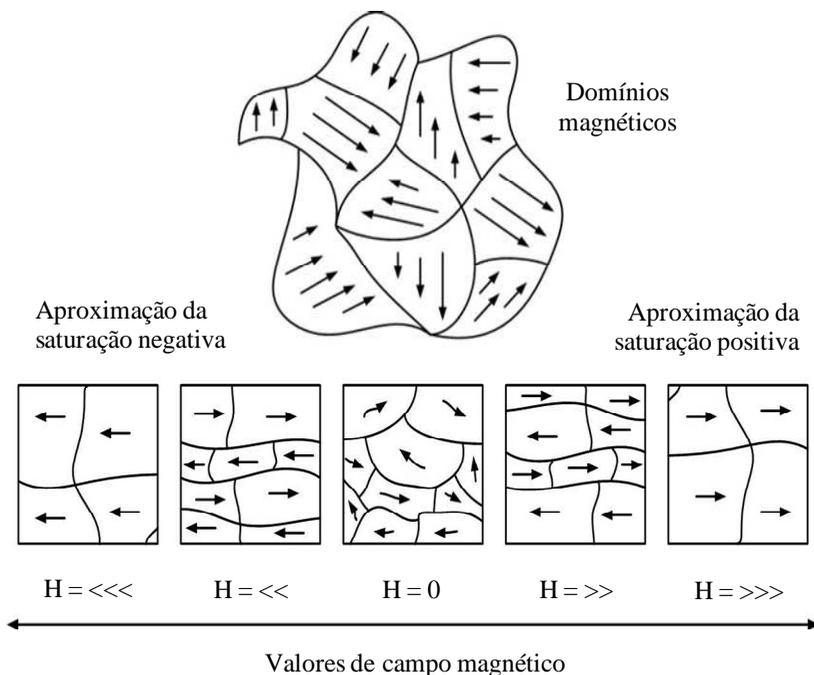


Figura 19 - Comportamento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização - adaptado de [48].

Em materiais ferromagnéticos os contornos de grãos, discordâncias, partículas de segunda fase (fatores estes também conhecidos como “pontos de ancoragem”) podem atuar como uma barreira no movimento das paredes dos domínios. Com a aplicação de altos valores de magnetização, a força necessária para ultrapassar os defeitos cresce até a parede se movimentar e encontrar um novo defeito. Portanto, o processo de magnetização não ocorre de forma contínua em decorrência da movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Estes saltos discretos da indução produzem pulsos magnéticos conhecidos como ruído magnético de Barkhausen [47, 48, 49, 50, 51].

Na Figura 20 pode ser visualizado o efeito dos saltos, ou o ruído magnético de Barkhausen (RMB) em uma curva típica de histerese magnética de materiais ferromagnéticos.

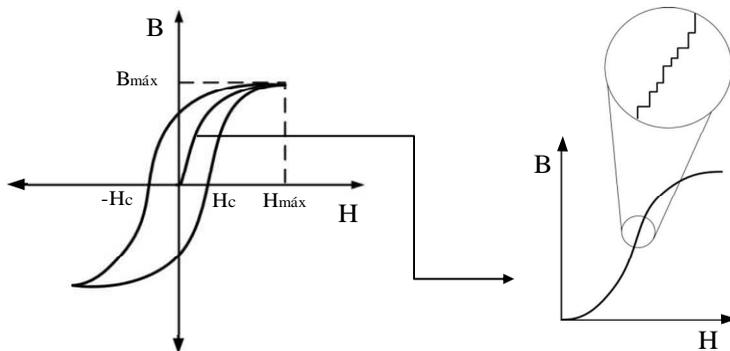


Figura 20 - Ruído magnético de Barkhausen na curva de histerese.

Como pode ser observado na Figura 21, o movimento das paredes dos domínios ao vencer as barreiras ocorre de forma irregular, conferindo ao RMB um carácter estocástico [46].

As emissões do ruído de Barkhausen podem ser detectadas como pulsos de tensão elétrica, se uma bobina for colocada perto da superfície da amostra no momento em que ocorre a movimentação das paredes dos domínios. Basicamente um sistema de medição para RMB possui uma sonda composta por um jugo (*yoke*) eletromagnético (que produz um campo magnético alternado sobre a amostra) e uma bobina (que detecta o sinal de RMB) [48].

A Figura 21 (a) apresenta uma sonda de medição e (b) um exemplo de sinal de Barkhausen no domínio do tempo (em azul), e corrente de excitação (em vermelho).

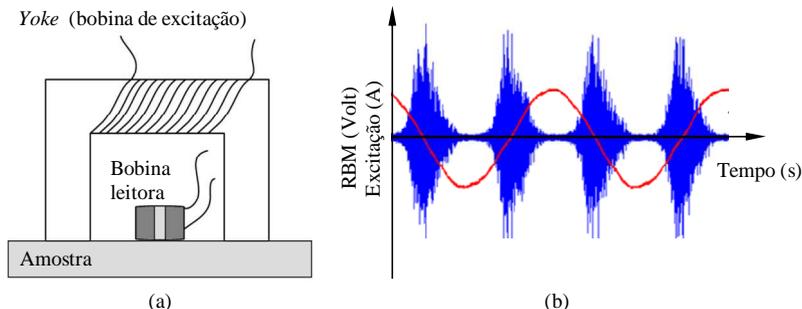


Figura 21 - Representação da bobina e sinal do ruído de Barkhausen - adaptado de [48].

A intensidade deste sinal pode ser utilizada para caracterizar a integridade da superfície. A voltagem efetiva (valor RMS) do sinal gerado, também conhecido como *mp* (*magnetoelastic parameter*), é uma forte função da microestrutura e estado de tensão residual do material. Por este motivo, o método de ruído de Barkhausen é ideal para detectar queima de retificação, uma vez que o dano térmico implicará na diminuição da dureza e mais tensões residuais, e ambos resultarão em um aumento no ruído de Barkhausen [49].

A profundidade de emissão de RMB depende da frequência que se utiliza para excitar o campo magnético. A banda de frequência da emissão Barkhausen está no intervalo de 10 Hz a 500 Hz (Jiles, 2000 *apud* [46]), contudo a faixa de frequência de excitação geralmente utilizada está na banda de 0,01 Hz a 100 Hz.

Algumas aplicações industriais em que a técnica de medição do RMB está ganhando espaço são:

- Processo e controle de qualidade na produção de engrenagens, válvulas, rolamentos, virabrequins, comando de válvulas;
- Avaliação de danos de fadiga de contato em engrenagens e rolamentos;
- Avaliação de tensões residuais em tubulações soldadas e cilindros de laminação;
- Avaliação do efeito *shot peening* em aços;
- Inspeção por ruído de Barkhausen para detecção de queima por retificação em peças de aço de alta resistência [52].

2.10.2 Ataque metalográfico nital

A inspeção pelo método de nital é utilizada para avaliação de efeitos de processos de fabricação como retificação e tratamento térmicos em componentes metálicos. Este ensaio é tipicamente realizado por ataque químico na superfície do componente analisado com solução de ácido nítrico (2 a 4%) em álcool (etanol ou metanol) [53, 54, 55].

O ataque químico de nital forma um filme colorido da superfície analisada que permite examiná-la visualmente para detectar modificações microestruturais (como por exemplo, martensita não revenida) que podem ser o resultado de danos térmicos durante usinagem inadequada.

Este método também é conhecido como “*temper etch*”. A Figura 22 apresenta o resultado de um ensaio pelo método de nital realizado em engrenagens.

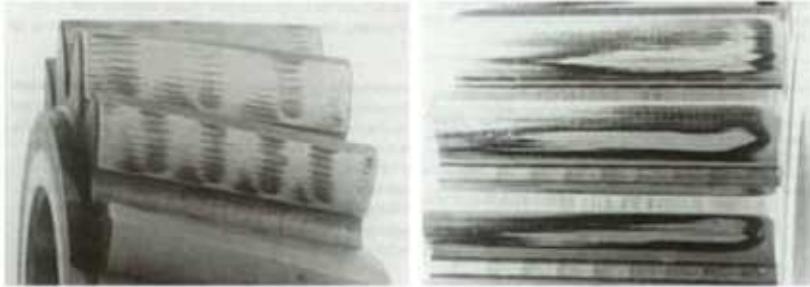


Figura 22 - Exemplo de detecção de queima da retificação em engrenagens pelo método de nital [55].

Um aspecto negativo desta técnica é que, embora possa ser prática para inspeções de baixo volume, dificilmente é utilizada para inspeção de 100% da produção de altos volumes. É um método relativamente demorado e de difícil automatização. Além disto, sofre avaliação subjetiva da qualidade da superfície. As superfícies inspecionadas, atacadas por nital, devem ser adicionalmente tratadas e muitas vezes necessitam de tratamento térmico para evitar a fragilização por hidrogênio [49].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram efetuados no IWF - *Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb Berlin*, onde se utilizou a infraestrutura do Laboratório de Máquinas-ferramentas (*Versuchsfeld*), Laboratório de Análise de Superfícies (*Oberflächenlabor*) e Análises de Materiais (*Werkstofflabor*). Os equipamentos utilizados nesta pesquisa bem como a metodologia empregada são descritos nas seções subsequentes.

3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta utilizada nos experimentos foi uma retificadora cilíndrica universal externa e interna, fabricada pela empresa SCHAUDT, modelo Pf 51. A Figura 23 apresenta a máquina-ferramenta.



Figura 23 – Retificadora CNC Schaudt Pf 51.

Esta máquina-ferramenta é projetada para usinagem de peças com até 1600 mm de comprimento, 445 mm de diâmetro e até 250 kg de peso. Possui potência de acionamento de 25 kW e permite o uso de rebolos de até 600 mm de diâmetro. É equipada com comando numérico Siemens SINUMERIK 840D e sistema de acionamento Siemens Digital SIMODRIVE 611D.

3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS

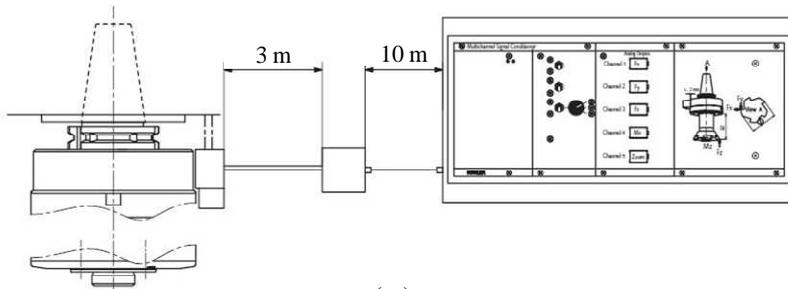
O sistema permite a medição dos valores absolutos das forças de retificação durante o processo de usinagem e é baseado no efeito piezométrico. É composto por um dinamômetro rotativo, da empresa KISTLER INSTRUMENTS GmbH, modelo 9123C, o qual mede a componentes da força F_x , F_y , F_z , bem como a unidade de momento M_z . A Figura 24 (a) apresenta o dinamômetro, (b) o condicionador de sinais de força e (c) uma representação esquemática da montagem dos equipamentos.



(a)



(b)



(c)

Figura 24 - Sistema de medição de forças.

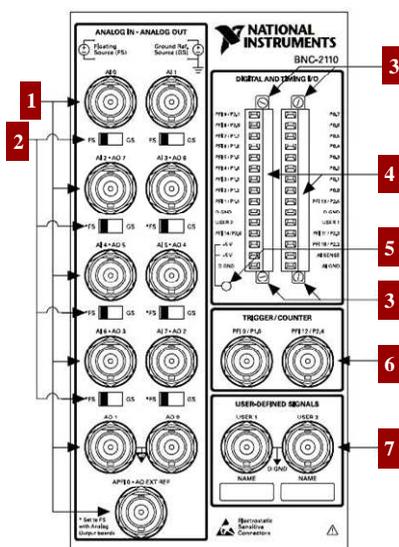
Os sinais coletados por este sistema são enviados a um *laptop* e analisados pelo *software* LabView. A Tabela 2 apresenta as especificações do dinamômetro.

Tabela 2 - Especificação do dinamômetro.

Especificação	Tipo 9123C	
Faixa de medição	F_x, F_y	- 5...5 (kN)

Faixa de medição	F_z	- 20...200	(kN)
	M_z	- 200...200	(kN)
Velocidade		10000 máx.	(1/min)
Sensitividade	F_x, F_y	~ 2	(mV/N)
	F_z	$\sim 0,5$	(mV/N)
	M_z	~ 50	(mV/N.m)
Frequência Natural	f_{nx}, f_{ny}, f_{nz}	~ 2	(kHz)
	$F_n(M_z)$		
Faixa de temperatura de operação		0...60	(°C)
D x H		115 x 52	(mm)
Peso		3	(kg)

A Figura 25 exibe a placa de aquisição de dados utilizada para coleta dos sinais de força e emissão acústica dos experimentos. Posteriormente estes são visualizados através da interface do *software* LabView.



- 1 – Entradas / saídas analógicas
- 2 – FG/Gs Switches
- 3 – Parafusos de retenção de cabos
- 4 – Terminais de blocos

- 5 – Luz indicadora de alimentação
- 6 – Conector de *trigger/counter*
- 7 – Conectores de cabos para sinais definidos pelo usuário

Figura 25 - Placa de aquisição de dados.

A Figura 26 apresenta o diagrama de blocos correspondente ao programa no *software* LabView e a Figura 27 mostra a sua interface. Na Figura 27 pode ser observado o comportamento do processo em tempo real de um ciclo de retificação de acabamento, com taxa de retificação de $Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$.

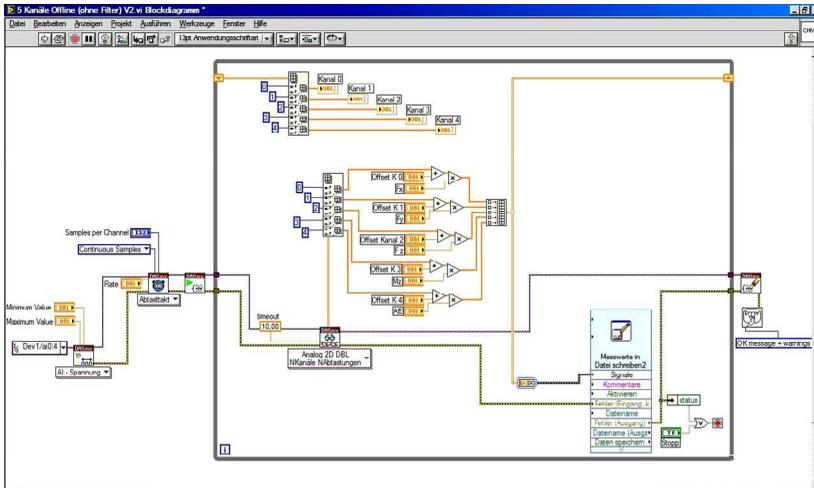


Figura 26 - Diagrama de blocos do *software* para análise de forças.

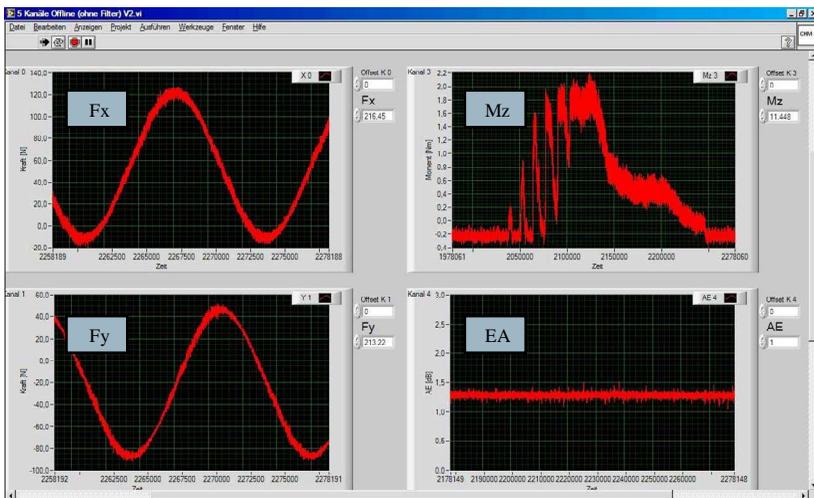
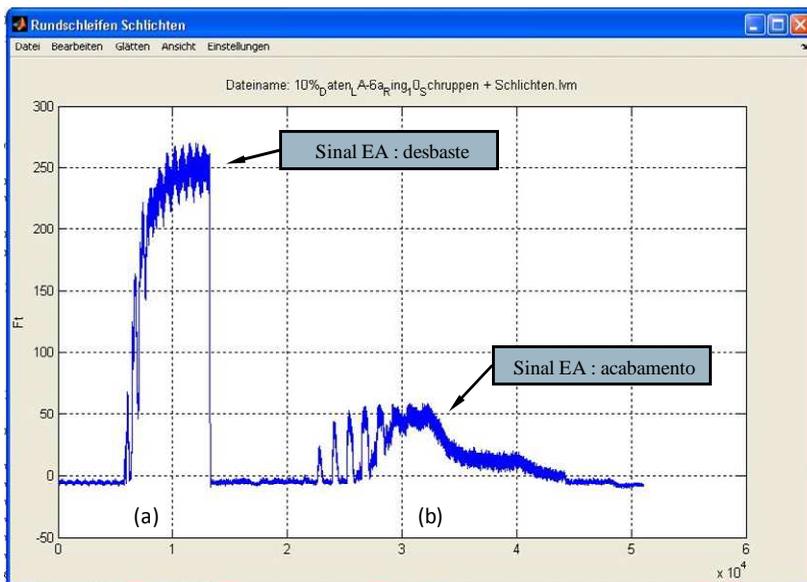


Figura 27 - Interface do *software* LabView para análise de forças.

Posteriormente estes valores receberam tratamento no *software* Matlab R2008. A Figura 28 ilustra os sinais coletados pelo sistema de medição de forças e analisados em um algoritmo neste *software*. Na Figura 28 (a) é observada uma leitura de medição de força na operação de desbaste e na Figura 28 (b) de acabamento. Estes sinais receberam o tratamento de análise necessário (como *offset*, filtros, etc.) para indicar os valores das forças normais e tangenciais.



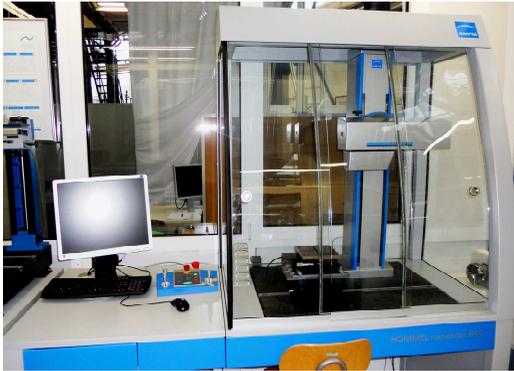
- | | |
|---|--|
| * - <i>Ansicht</i> : verificar dado; | - <i>Glätten</i> : filtro (neste caso 10%); |
| - <i>Bearbeiten</i> : edição; | - <i>Einstellungen</i> : configurações; |
| - <i>Datei</i> : busca o dado; | - <i>Ft</i> : (ordenada) força normal; |
| - <i>Dateiname</i> : nome do dado (neste caso anel 1, desbaste + acabamento); | - <i>Rundschleifen Schlichten</i> : Retificação de acabamento. |

Figura 28 - Sinais de medição de força.

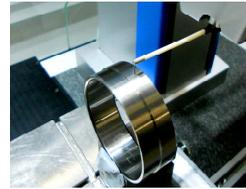
3.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE E DESVIO DE PERFIL

As medições dos parâmetros de rugosidade e desvios de perfil foram realizadas com o rugosímetro da empresa HOMMEL - ETAMIC GmbH, modelo Nanoscan 855, apresentado pela Figura 29 (a), com dois

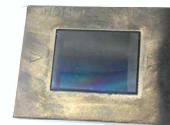
apalpadores. A Figura 29 (b) apresenta um detalhamento da área de medição. A especificação dos apalpadores utilizados nas medições de rugosidade e contorno é apresentada na Tabela 3.



(a) Nanoscan 855



(b) Apalpador



(c) Padrão de Rugosidade

Figura 29 - Nanoscan 855.

Tabela 3 - Especificação dos apalpadores.

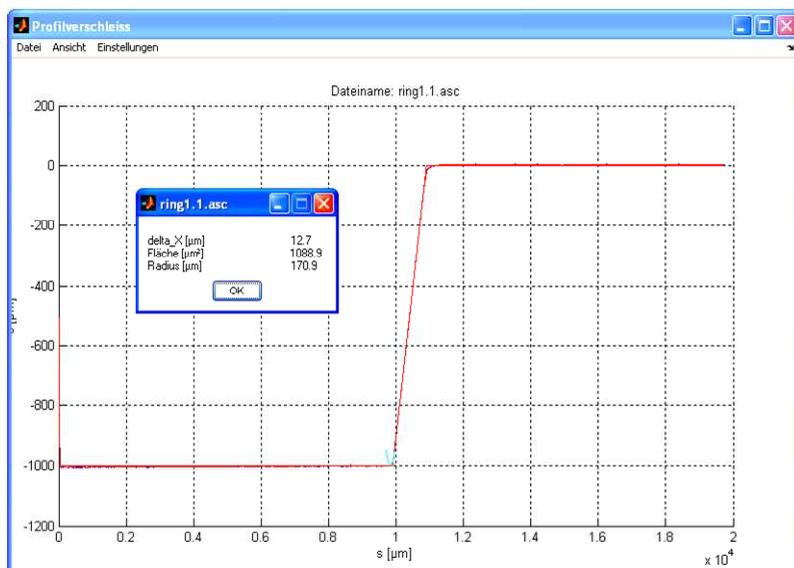
Especificação	R_a / R_z	Contorno / Perfil
Apalpador	WCN1T KE2 / 60GD T6 D10 / 30	WNC1T EL20 / 22H T7 D12 / 30
Tipo	231252	231382
Comprimento	91,701 / 90,253 mm	17,5 / 0,5 mm
Altura da ponta	16,25 / 0,75 mm	17,5 / 0,5 mm
Largura da ponta	6 mm	7,25 mm
Raio da ponta	2 μm	20 μm
Ângulo da ponta	60°	22°
Posição da ponta	90°	90°
Resolução	10 ⁻⁹ m	10 ⁻⁹ m
Fabricante	Hommel - Etamic GmbH	Hommel - Etamic GmbH

O padrão utilizado nas calibrações do sistema de medição de rugosidade foi o Geometriennormal RNDX2 5838 DKD-K 02401 2009-07, Figura 30 (c), da empresa HOMMEL - ETAMIC GmbH, com validade até 26/07/12. As especificações deste padrão são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação do padrão de rugosidade.

Filtro	$R_{m\acute{a}x}$	R_z	R_a	RS_m
M1	3,39	3,36	1,02	0,102

Os valores dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z são obtidos no próprio relatório de medição do rugosímetro e os valores de medição de contorno são processados em um algoritmo no *software* Matlab. A Figura 30 apresenta a interface deste algoritmo.



- * - *Ansicht*: verificar dado;
- *Datei*: busca o dado;
- *Dateiname*: nome do dado analisado (neste caso anel 1.1);
- *Delta*: diferença;
- *Einstellungen*: configurações;
- *Fläche*: área;
- *Profilverschleiss*: nome do algoritmo - desgaste de perfil;
- *Radius*: raio;
- *Ring 1.1*: nome do dado (amostra);
- *s (seit)*: (abscissa) passo;
- *t (tief)*: (ordenada) profundidade.

Figura 30 - Interface do algoritmo de medição de contorno.

Como pode ser observado na Figura 30, são indicados os valores de três variáveis: delta X (variável de interesse desta pesquisa, denominado Δe), área total do desvio e raio do círculo teórico gerado pelo desvio.

A Figura 31 ilustra o Δe , calculado por um algoritmo no *software* Matlab, o qual, através do ajuste das retas do perfil, determina o ângulo

formado por estas (perfil teórico), e através de uma função estabelecida fornece a diferença entre o perfil teórico e o perfil real.

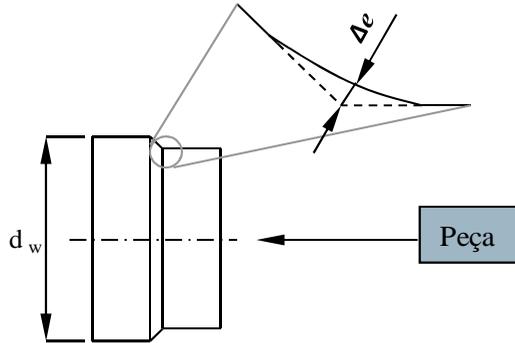


Figura 31 - Representação do desvio de perfil na peça.

3.4 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DANOS TÉRMICOS

Os danos térmicos nos corpos de prova foram mensurados através do método do ruído de Barkhausen. O objetivo foi ponderar o potencial deste método como um ensaio rápido de avaliação dos danos térmicos nas peças em processo.

Para tanto, utilizou-se o analisador digital de ruído Barkhausen Rollscan 300 do fabricante STRESSTECH. A Figura 32 exhibe o sistema de medição de ruído de Barkhausen e na Tabela 5 são apresentadas as especificações deste equipamento.



Figura 32 - Sistema de medição do ruído de Barkhausen.

Tabela 5 - Especificação Rollscan 300.

Especificação	Rollscan 300
Tipo	R 300
Série / N°	1731
Ano	2006
Voltagem	90 - 250 VAC 50 - 60 Hz
Tensão	150 VA
Fusível	3.15 AT
Peso	8 kg

3.5 FERRAMENTAS DE CORTE

Um dos principais objetivos desta pesquisa é a análise do comportamento das forças de retificação, desvio de perfil e danos térmicos quando se utilizam diferentes porcentagens e tipos de grãos na composição de rebolos. Foram utilizados 29 rebolos convencionais, de diferentes fabricantes e fornecedores de grãos abrasivos.

As composições são apresentadas na Tabela 6. As letras 'a' e 'b' utilizadas na especificação desta tabela correspondem à rebolos de diferentes fabricantes que possuem em sua composição grãos abrasivos do fornecedor padrão. Os rebolos atribuídos com o símbolo '*' possuem grãos abrasivos de fornecedor alternativo.

Tabela 6 - Composição dos rebolos.

Rebolos	Al ₂ O ₃ Tipo A	Al ₂ O ₃ Tipo B	Coríndon branco	Dureza / porosidade	Ligante
1a	-	-	100%	J6	V
1b					
1b*					
2a	15%	-	85%	J6	V
2b					
2b*					
3a	30%	-	70%	J6	V
3b					
3b*					

Rebolos	Al ₂ O ₃ Tipo A	Al ₂ O ₃ Tipo B	Coríndon branco	Dureza / porosidade	Ligante
4a	45%	-	55%	J6	V
4b					
4b*					
5a	-	15%	85%	J6	V
5b					
5b*					
6a	-	30%	70%	J6	V
6b					
6b*					
7a	-	45%	55%	J6	V
7b					
7b*					
8a	30%	-	70%	H6	V
8b					
9a	30%	-	70%	L6	V
9b					
10a	-	30%	70%	H6	V
10b					
11a	-	30%	70%	L6	V
11b					

3.6 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos experimentos foram anéis internos de rolamentos fabricados pela empresa JNS-NOSE SEIKO Co. Ltd. Estes anéis são largamente utilizados pela indústria automobilística, portanto possuem significativa importância industrial.

Inicialmente os corpos de prova foram pré-usinados a fim de se obter o perfil de interesse desta pesquisa. A Figura 33 mostra um esquema geral do corpo de prova.

O objetivo da utilização desta geometria é explorar as propriedades dos diferentes rebolos em relação ao desgaste, uma vez que a região com ângulo de 45° aumenta as exigências do rebolo em termos de refrigeração e desgaste (nesta região os grãos abrasivos possuem menor ancoragem).

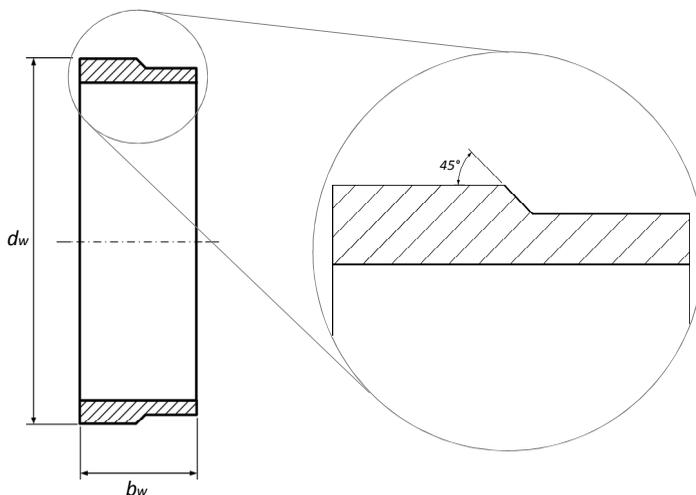


Figura 33 - Representação do corpo de prova.

Através desta geometria é possível determinar e monitorar o desvio de perfil real com o perfil teórico. A Tabela 7 apresenta a especificação dos corpos de prova.

Tabela 7 - Especificação dos corpos de prova.

Especificação	Anel de Rolamento
Tipo	IR 809025
Material	100Cr6
Dureza	60 ± 2 HRC
Diâmetro d_w	87,5 mm
Largura b_w	25 mm

3.7 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE EMISSÃO ACÚSTICA

Visando desenvolver uma metodologia para caracterização do desgaste de rebolos convencionais, foi configurado um sensor de emissão acústica para efetuar a avaliação dos gumes cinemáticos do rebolo nas faixas de deformação elástica e plástica dos grãos abrasivos.

Para estes experimentos foi projetada e utilizada uma ponta de diamante da empresa MÖBNER GmbH. A Tabela 8 apresenta a especificação deste diamante.

Tabela 8 - Especificação da ponta de diamante.

Especificação	Ponta de diamante
Comprimento	30 mm
Raio da ponta	50 μm
Ângulo da ponta	120 $^{\circ}$
Fabricante	Mößner GmbH

A medição do raio da ponta de diamante foi efetuada anteriormente e posteriormente à execução da metodologia desenvolvida, visando detectar possíveis desgastes da ponta em virtude das interações termomecânicas ocorridas com os rebolos durante os ensaios. Para tanto utilizou-se o sistema de medição óptico 3D GFM MikroCAD Pico da empresa GFMESTECHNIK GmbH, o qual oferece uma inspeção rápida e versátil de raios de ponta a partir de 10 μm de borda. A Figura 34 apresenta este sistema.

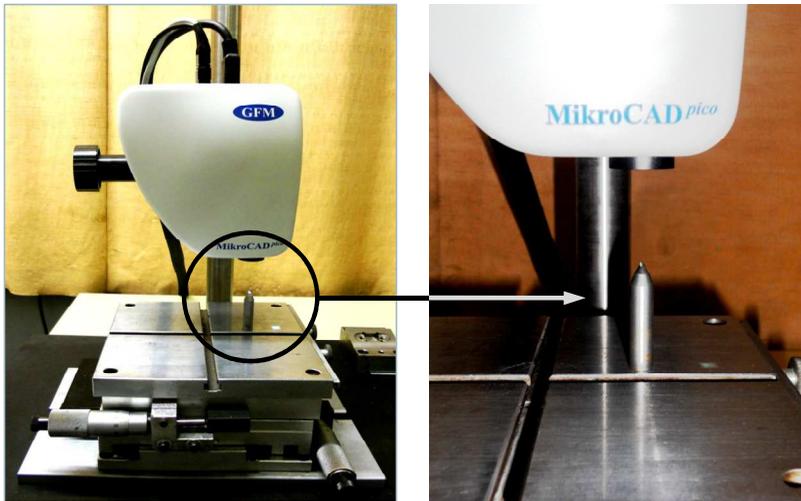


Figura 34 - Sistema de medição óptico 3D GFM MikroCAD Pico GFM.

A ponta de diamante foi instalada no cabeçote contra-ponta da máquina-ferramenta por um dispositivo de fixação, no qual também foi instalado o transdutor de emissão acústica. Na Figura 35 pode ser observada esta instalação.

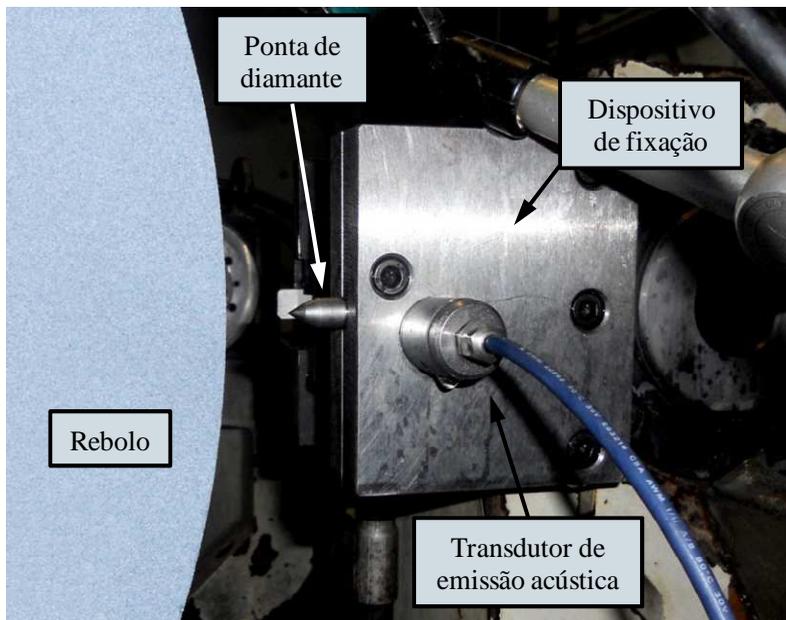


Figura 35 - Alocação da ponta de diamante na máquina-ferramenta.

O transdutor de emissão acústica utilizado neste experimento é um sensor piezelétrico de fixação magnética do fabricante DIETTEL. Os sinais analógicos coletados por este sensor são visualizados pela interface do *software* LabView. Posteriormente são analisados por um algoritmo no *software* Matlab, que relaciona a intensidade de sinal amostrado com o número dos gumes cinemáticos segundo o método proposto. A interface do algoritmo é apresentada na Figura 36.

Nesta figura são observados os sinais de emissão acústica coletados para as seis primeiras leituras referentes às profundidades de avanço da ponta; que são correlacionados com o número de gumes cinemáticos através da intensidade de sinal gerado pela colisão destes com a ponta. Este algoritmo utiliza filtros dinâmicos, e classifica os picos de acordo com o tamanho médio de grão, definidos pelo usuário.

Há a possibilidade de variar os filtros, tamanhos médios de grãos no algoritmo e a frequência de aquisição de dados. Nos experimentos desta pesquisa foram adotados tamanhos médios de grãos de 200 μm (baseado em informações fornecidas pelo fabricante de grãos abrasivos).

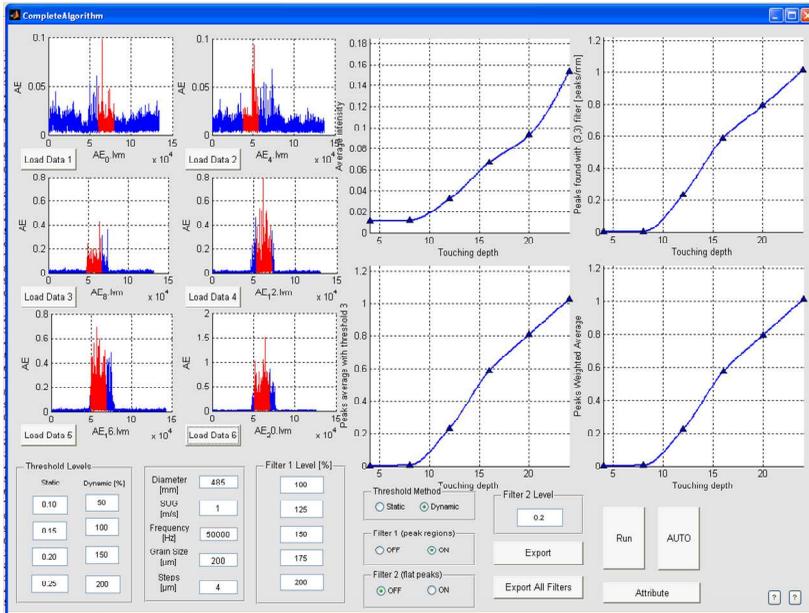


Figura 36 - Interface do algoritmo no *software* Matlab para avaliação dos gumes cinemáticos.

3.8 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos desta pesquisa são divididos em dois tópicos. O primeiro aborda a comparação dos valores característicos de força, desvio de perfil e danos térmicos gerados pelos diferentes rebolos.

O segundo tópico abrange a investigação do comportamento do desgaste de rebolo pela metodologia de avaliação de gumes cinemáticos através da emissão acústica. A seguir são descritos os experimentos efetuados nesta pesquisa.

3.8.1 Medições de força, desvio de perfil e danos térmicos

A Figura 37 esquematiza a metodologia dos ensaios do primeiro tópico. Primeiramente são efetuadas as medições das forças, tanto para o processo de desbaste quanto para o processo de acabamento, de 10 corpos de prova para cada rebolo utilizado nos experimentos.

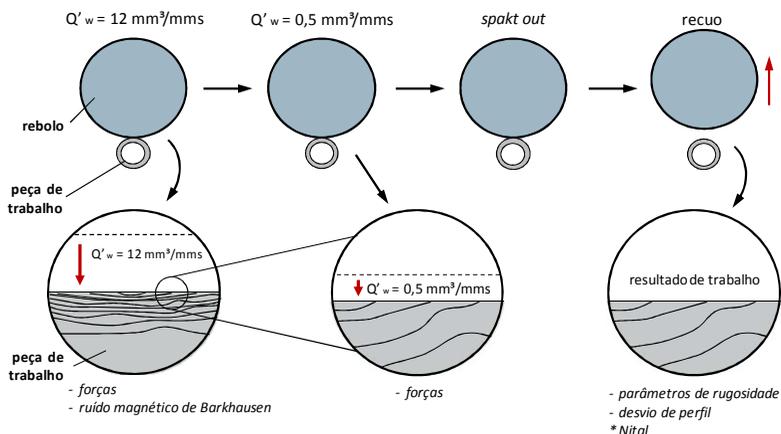


Figura 37 - Esquemática da metodologia dos experimentos.

O parâmetro de rugosidade R_a é o parâmetro mais popular e aplicável na maior parte dos processos de fabricação. Os riscos na superfície referentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor. Contudo o valor de R_a não define a forma das irregularidades do perfil, onde, por este motivo, pode-se ter um mesmo valor de R_a para superfícies originadas por processos diferentes.

Desta forma, os resultados referentes à rugosidade apresentados no item 4.2 são expressos em R_a e R_z . O parâmetro de rugosidade R_z é indicado para avaliação da qualidade de superfícies onde o perfil analisado é periódico^[5] e conhecido.

As medições dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e contorno foram efetuadas após cada ciclo de retificação com a respectiva ferramenta de corte. Cada corpo de prova teve estes parâmetros mensurados em três diferentes pontos, utilizando-se assim uma média destes valores para caracterizar essas variáveis.

Os experimentos foram executados primeiramente avaliando-se as grandezas anteriormente mencionadas em rebolos de diferentes fabricantes, que possuem em sua composição grãos abrasivos do fornecedor padrão. A Figura 38 esquematiza os rebolos e sua composição em termos de fabricantes.

[5] Perfil Periódico: (classificação de orientação das irregularidades que compõe uma superfície) quando os sulcos têm direções definidas na textura [8].

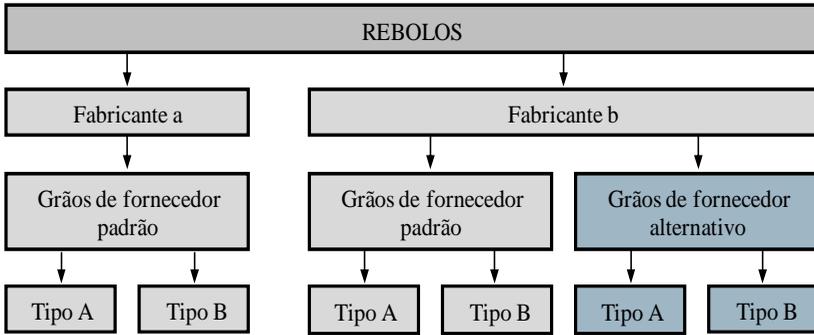


Figura 38 - Esquematização de fabricantes de rebolos.

Avaliaram-se inicialmente os rebolos dos fabricantes ‘a’ e ‘b’, com grãos abrasivos do fornecedor padrão. Na Tabela 9 é apresentada a composição destes rebolos.

Tabela 9 - Rebolos - diferentes fabricantes.

Rebolos	Al ₂ O ₃ Tipo A	Al ₂ O ₃ Tipo B	Coríndon branco
1a	-	-	100%
1b			
2a	15%	-	85%
2b			
3a	30%	-	70%
3b			
4a	45%	-	55%
4b			
5a	-	15%	85%
5b			
6a	-	30%	75%
6b	-	30%	75%
7a	-	45%	55%
7b			
8a	30%	-	70%
8b			
9a	30%	-	70%
9b			

Rebolos	Al ₂ O ₃ Tipo A	Al ₂ O ₃ Tipo B	Coríndon branco
10a	-	30%	70%
10b			
11a	-	30%	70%
11b			

Posteriormente, os experimentos foram efetuados com rebolos do fabricante ‘b’, confrontando grãos abrasivos do fornecedor padrão e fornecedor alternativo. A Tabela 10 apresenta a composição dos rebolos ensaiados nesta etapa da pesquisa, onde o símbolo ‘*’ representa os grãos de fornecedor alternativo.

Tabela 10 - Rebolos - grãos abrasivos de diferentes fornecedores.

Rebolos	Al ₂ O ₃ Tipo A	Al ₂ O ₃ Tipo B	Coríndon branco
1b	-	-	100%
1b*			
2b	15%	-	85%
2b*			
3b	30%	-	70%
3b*			
4b	45%	-	55%
4b*			
5b	-	15%	85%
5b*			
6b	-	30%	75%
6b*			
7b	-	45%	55%
7b*			

O único procedimento que ocorreu entre as medições de força foi a medição dos danos térmicos pelo método de Barkhausen. Entre cada ciclo de retificação de desbaste e acabamento foram efetuadas medições do ruído de Barkhausen em três pontos do corpo de prova, utilizando assim a média destes valores para caracterização desta variável. A voltagem de magnetização utilizada nestes experimentos foi de 5 V.

Os parâmetros dos processos de retificação e dressagem utilizados nos ciclos de retificação cilíndrica de mergulho são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Condições de retificação.

Parâmetros de retificação	
Velocidade de corte - v_c	35 m/s
Taxa de remoção específica - desbaste - Q'_w	12 mm ³ /mm.s
Taxa de remoção específica - acabamento - Q'_{w*}	0,5 mm ³ /mm.s
Relação de velocidade - desbaste - q	-60
Relação de velocidade - acabamento - q^*	-120
Parâmetros de dressagem	
Grau de recobrimento - U_d	3,7
Profundidade de dressagem - a_{ed}	15 μ m
Fluido lubri-refrigerante	
Emulsão óleo - água	5% (óleo)

3.8.2 Configuração do sensor de emissão acústica

Para o desenvolvimento da metodologia de avaliação de gumes cinemáticos através da tecnologia de emissão acústica foi instalada uma ponta de diamante na máquina-ferramenta, conforme descrito na Seção 3.7 deste trabalho.

Basicamente a contra-ponta da máquina-ferramenta, na qual a ponta de diamante está fixada, avança lentamente até haver o primeiro contato da ponta com o rebolo. Este está em velocidade de 1 m/s.

Em virtude do primeiro contato ocorrer na faixa de profundidade entre 0 e 2 μ m, e portanto não ser possível efetuar coleta da intensidade de sinal proveniente das colisões dos gumes com a ponta de maneira precisa neste intervalo, a ponta de diamante avança mais 2 μ m e faz a leitura das colisões dos gumes cinemáticos (na profundidade entre 2 e 4 μ m a partir do ponto inicial), e assim por diante. Com isto, a incerteza gerada pelo primeiro contato é minimizada pelas leituras posteriores com profundidades maiores.

A ponta de diamante foi projetada considerando-se a distância média entre os grãos abrasivos no rebolo e a profundidade de avanço. O comprimento médio de um grão abrasivo é de aproximadamente 200 μ m e a distância de alocação entre grãos é aproximadamente 100 μ m (considerando a distribuição de grãos no rebolo) [56].

Deste modo, a ponta de diamante de forma cônica não deve avançar além de uma profundidade correspondente a uma diretriz de diâmetro com aproximadamente $100\ \mu\text{m}$.

A geometria que atende este requisito é um cone, com ângulo de 120° e raio de ponta de $50\ \mu\text{m}$. Assim, pode-se avançar a ponta de diamante no rebolo até uma profundidade de $20\ \mu\text{m}$ sem que ocorram desgastes termomecânicos no diamante. A Figura 40 esquematiza a ponta de diamante com suas dimensões.

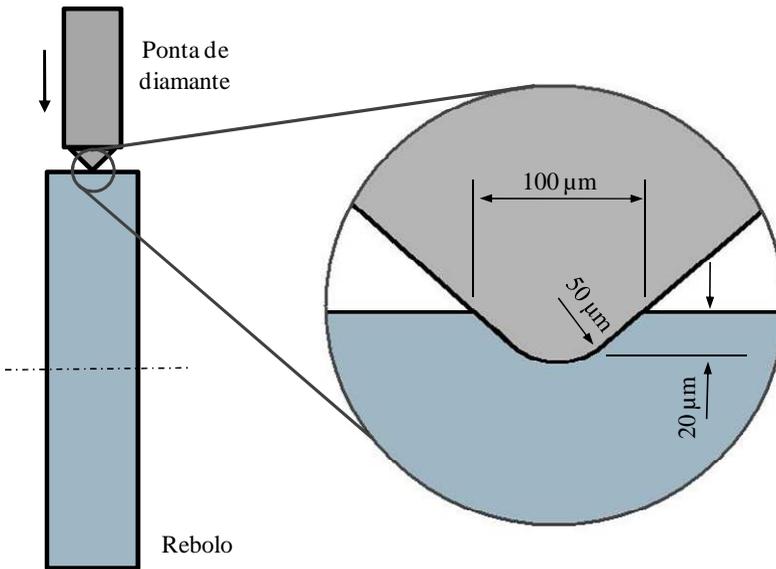


Figura 40 - Representação esquemática da geometria da ponta de diamante.

A frequência de aquisição de dados utilizada nestes experimentos foi de $50\ \text{kHz}$, ou seja, níveis acima de vibrações mecânicas ou outros ruídos que estão envolvidos num ambiente industrial.

Várias propriedades mecânicas e térmicas são exigidas dos grãos abrasivos utilizados em processos de retificação. Os altos valores de tenacidade e dureza dos grãos facilitam a formação de cavacos e proporcionam uma melhor condição de corte. Devido às altas temperaturas que ocorrem durante o processo de retificação, bem como as rápidas mudanças de temperatura, uma elevada resistência térmica é exigida dos grãos abrasivos.

Da mesma forma, uma boa resistência química é necessária para evitar reações de enfraquecimento dos grãos abrasivos, uma vez que o rebolo opera com temperaturas elevadas e em contato com componentes do material da peça, ar de arrefecimento e lubrificante.

Para satisfazer todas estas condições, diferentes combinações de materiais naturais e sintéticos são empregadas em processos de retificação. Contudo, na retificação cilíndrica externa, a influência de diferentes grãos sobre o processo não é bem conhecida. Mensurar com precisão a exatidão de perfil e danos térmicos na peça de trabalho exige um grande número de ensaios, o que dificulta a avaliação destas influências.

Além disto, a fim de obter resultados precisos, o levantamento de dados dos danos térmicos causados pelo processo deve ocorrer de maneira ágil, ou seja, com um ensaio rápido de avaliação. Deve-se levar em consideração que a maioria dos ensaios atuais para danos térmicos são longos e destrutivos.

Assim, neste trabalho, as influências acima mencionadas foram analisadas em diferentes rebolos convencionais, utilizando-se o método de ruído Barkhausen e o método nital para determinação dos danos térmicos.

Pelo fato do ruído Barkhausen ser um teste rápido não destrutivo, uma avaliação do seu potencial para aplicação em processo também foi efetuada. O método de nital foi aplicado em alguns corpos de prova com a finalidade de comparação qualitativa entre os dois métodos de avaliação dos danos térmicos.

O comportamento do desgaste de rebolos convencionais durante o processo é também pouco conhecido. Desta forma, uma metodologia para avaliação de gumes cinemáticos em rebolos empregando a tecnologia de emissão acústica foi desenvolvida. Com isto, foi dado o passo inicial para o desenvolvimento de uma metodologia para a caracterização do desgaste de rebolos convencionais em ambiente industrial.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. Em virtude das diferentes grandezas avaliadas, inicialmente são apresentados os resultados e discussões dos experimentos de medição de força, em seguida os de rugosidade das superfícies usinadas bem como desvio de perfil. Posteriormente os resultados relativos aos danos térmicos são descritos e, por fim, os atingidos pela metodologia de avaliação de grãos cinemáticos em rebolos convencionais.

4.1 FORÇAS NORMAIS DE RETIFICAÇÃO

4.1.1 Rebolos de diferentes fabricantes

Uma vez que não foi efetuado o processo de dressagem antes da usinagem de cada novo corpo de prova, o volume específico usinado V'_w aumentou a cada nova amostra usinada. A Figura 41 apresenta as forças normais mensuradas utilizando-se rebolos com 100% de coríndon branco em sua composição.

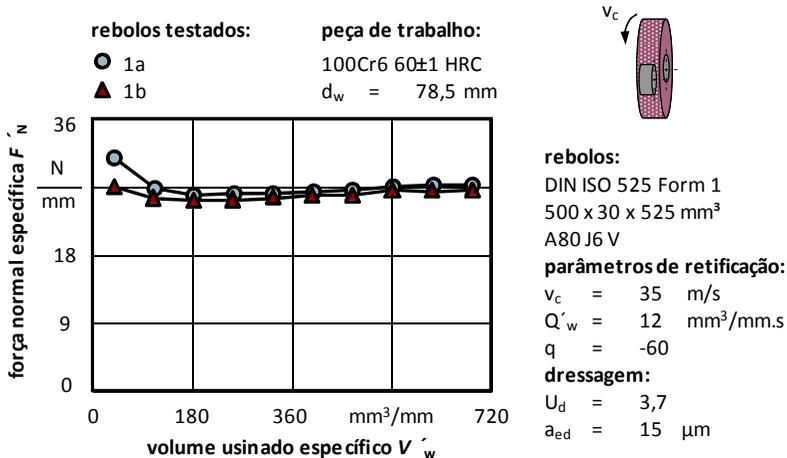


Figura 41 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 100% coríndon branco - [57].

Em virtude da composição dos rebolos avaliados na Figura 41, os valores mensurados foram adotados como referência. Observa-se nesta

figura que as forças normais possuem um comportamento linear a partir do terceiro corpo de prova, ocorrendo uma sobreposição dos valores mensurados. O comportamento das forças apresentados nos primeiros pontos das curvas justifica-se pelo desgaste inicial dos grãos. Forças maiores são exigidas para o microlascamento [12], uma vez que o rebolo foi recém dressado. Com o aumento do volume usinado específico acontece a ruptura parcial dos grãos [1, 12]. Após este processo, ocorre a diminuição das forças. A Figura 42 apresenta as forças medidas com rebolos de 15% de grãos Tipo A.

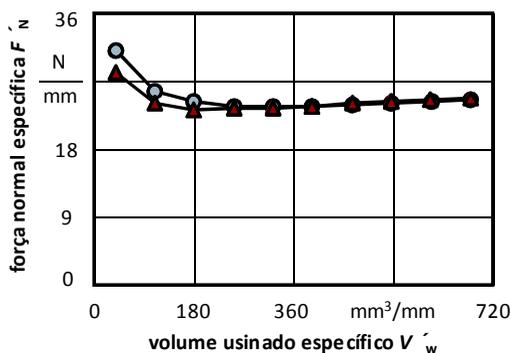
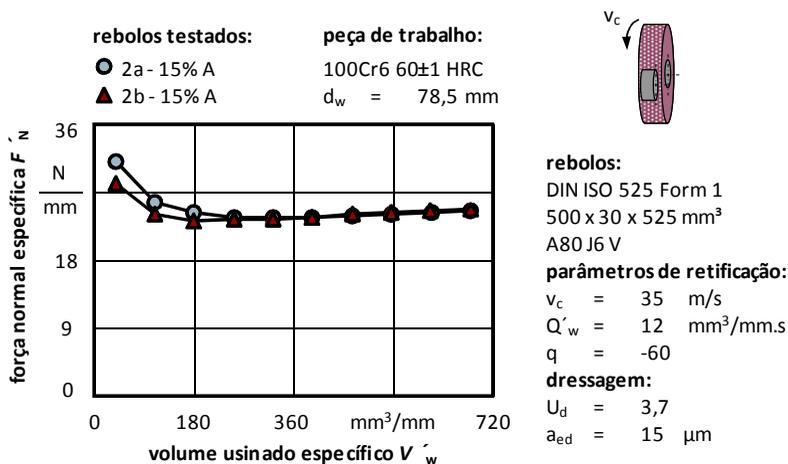


Figura 42 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo A - [57].

Observa-se na Figura 42 que o rebolo '2a' necessitou de maiores forças iniciais para a microfratura dos grãos. Posteriormente ambos os rebolos tiveram comportamentos semelhantes, observado na sobreposição das curvas.

Comparando-se as Figuras 42 e 41, é possível observar a diminuição nos valores médios das forças normais em torno de 9% correspondentes ao rebolo '2a' e 7% para o rebolo '2b'.

A Figura 43 apresenta as forças mensuradas com rebolos compostos de 30% de grãos Tipo A. Nos resultados de força obtidos nesta figura, percebe-se uma diferença de 8% entre os rebolos. A comparação entre as Figuras 43 e 41 mostra que houve uma diminuição nos valores médios das forças normais em 15% na usinagem com o rebolo '3a' e em 4% com o rebolo '3b'.

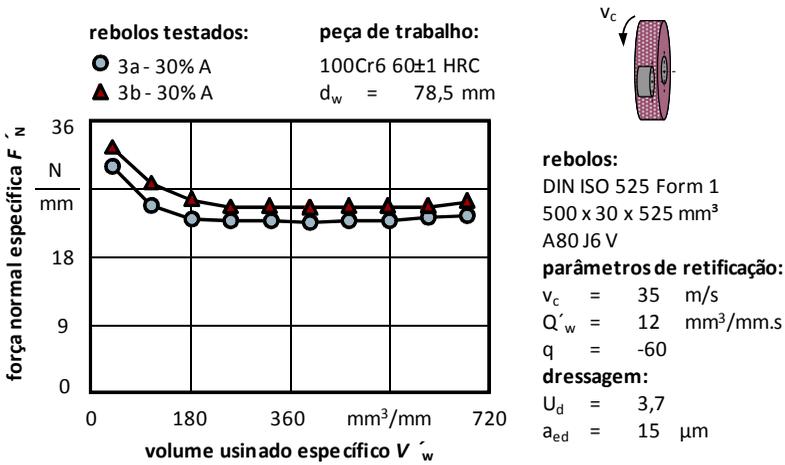


Figura 43 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A - [57].

A Figura 44 apresenta os resultados de força obtidos por rebolos com 45% de grão Tipo A em sua composição. Conforme se observa na Figura 44, as forças necessárias para o microlascamento foram maiores, e este processo se prolongou ao longo do volume usinado específico, basicamente até o quinto ponto de ambas as curvas.

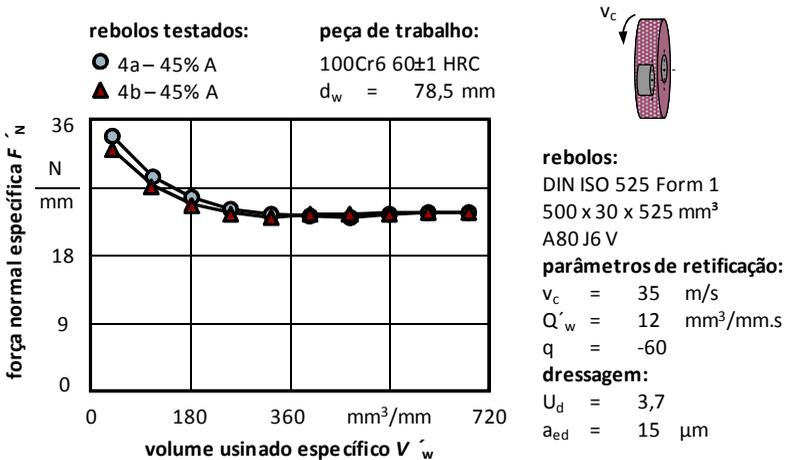


Figura 44 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo A - [57].

Este fato permite concluir que o aumento da porcentagem de grãos Tipo A prolonga o processo de desgaste inicial dos grãos. Os valores médios de força normais diminuíram em torno de 7% para o rebolo '4a' e em 5% para o rebolo '5b', quando efetuada a comparação entre as Figuras 44 e 41.

Na Figura 45 são exibidos os valores de força normais obtidos pela usinagem dos corpos de prova com rebolos com 15% de grãos Tipo B em sua composição.

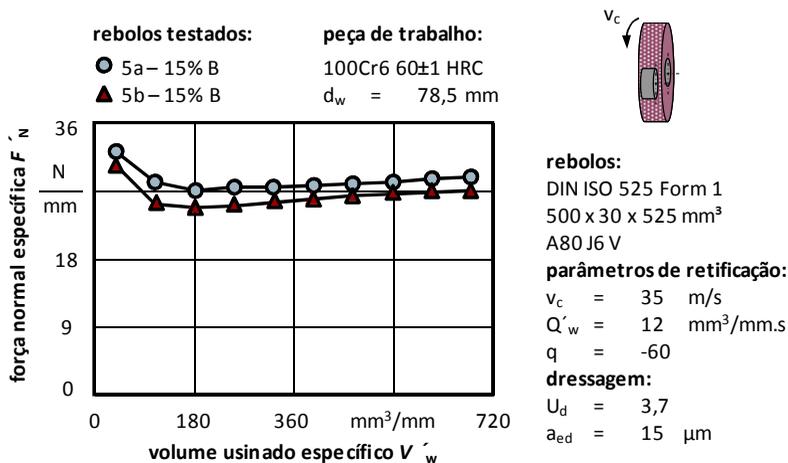


Figura 45 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B - [57].

São observados na Figura 45 os maiores valores de força normal gerados pelo rebolo '5a', cerca de 6% em relação ao rebolo '5b'. Pela comparação das Figuras 41 e 45, observa-se um aumento dos valores médio das forças normais obtidas pelo rebolo '5a' em torno de 5%. No caso dos rebolos do fabricante '5b', esse aumento é de 2% apenas.

A Figura 46 mostra os resultados da medição das forças normais apresentados por rebolos compostos de 30% de grãos Tipo B. Observa-se nesta figura que o rebolo '6a' demandou de uma maior força para o desgaste inicial dos grãos, e posteriormente apresentou menores forças normais ao longo do volume usinado específico.

Através da comparação entre as Figuras 46 e 41, é possível observar que o rebolo '6a' aumentou em 4% os valores da forças normais enquanto que no rebolo '6b' este aumento foi de 6%.

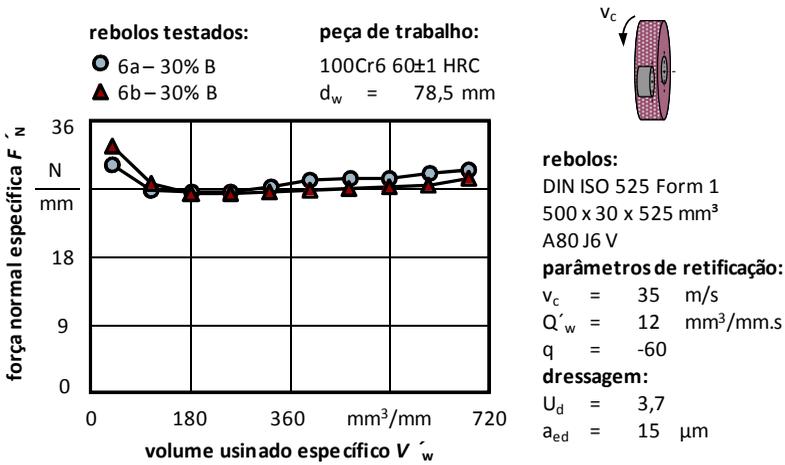


Figura 46 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo B - [57].

Na Figura 47 são observados os valores das forças normais gerados por rebolos compostos com 45% de grão Tipo B. Neste caso, observa-se uma sobreposição dos valores para os rebolos de diferentes fabricantes, comportamento esperado por rebolos de mesma especificação.

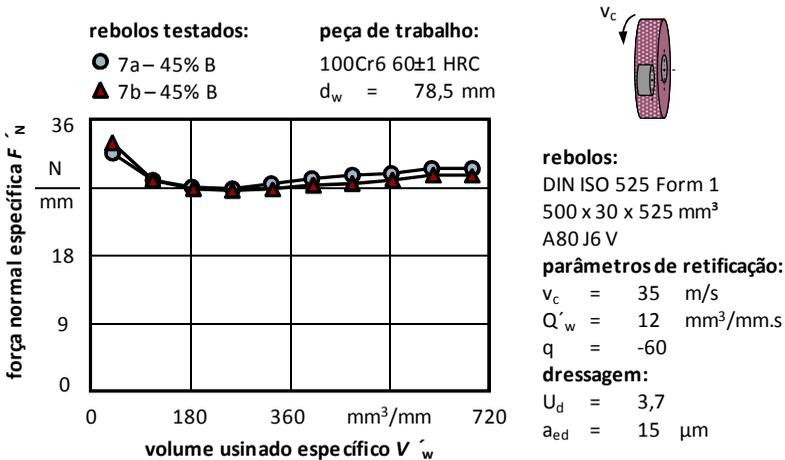


Figura 47 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo B - [57].

Através da comparação entre as Figuras 47 e 41, observa-se o aumento dos valores médios das forças normais para ambos os rebolos: 5% no caso do reboleto '7a' e 7% para o reboleto '7b'.

Todas as curvas de força geradas pelos rebolos composto com grãos do Tipo B apresentaram um leve aumento após o processo de desgaste inicial de grãos. Este comportamento nas curvas permite concluir que esse tipo de grão possui maior desgaste, quando comparado ao grão Tipo A. Em outras palavras, há maior desgaste por abrasão nos rebolos compostos por grãos Tipo B. De acordo com o modelo de forças em um único grão [12, 58] o desgaste por abrasão eleva as forças de retificação. Transferindo esta analogia para a ferramenta de corte, o aumento das forças é justificado pelo desgaste por abrasão dos grãos Tipo B.

A Figura 48 exibe os resultados de forças normais mensuradas na usinagem dos corpos de prova por rebolos com 30% de grãos Tipo A e classe de dureza H [59].

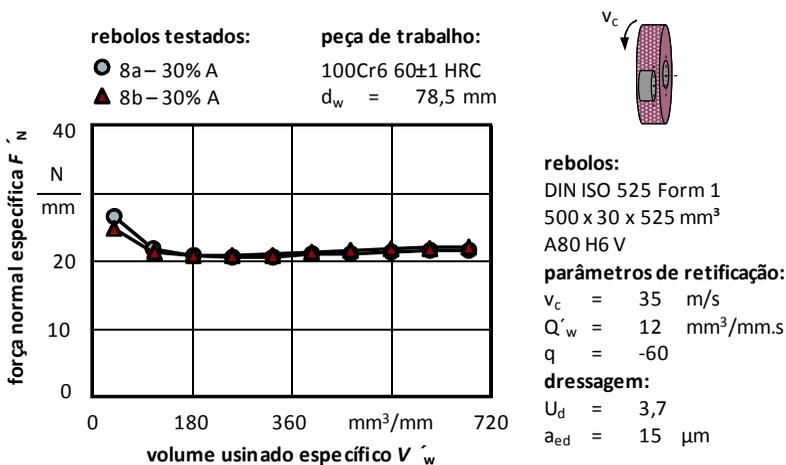


Figura 48 - Forças normais de retificação versus volume usado específico - 30% grãos Tipo A, dureza H - [57].

É observada na Figura 48 a sobreposição das curvas de força normal dos rebolos analisados. Após a quebra inicial dos grãos abrasivos (observadas nos três primeiros corpos de prova), o comportamento das curvas das forças apresentou-se linear.

Comparando-se as Figuras 48 e 43, fica evidente a diminuição da média das forças normais em aproximadamente 6% para o rebolo '9a' e em 13% para o rebolo '9b', quando se varia a classe de dureza J para H.

A Figura 49 exhibe os resultados das medições de força normais pela usinagem com rebolos de classe de dureza L [59] e 30% de grãos Tipo A em sua composição.

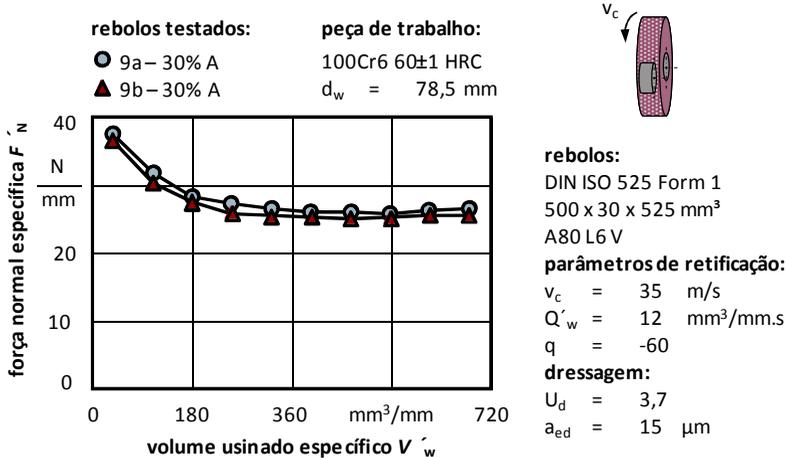


Figura 49 - Forças normais de retificação versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A, dureza L - [57].

Constatam-se na Figura 49 os altos valores das forças iniciais necessários ao processo de desgaste inicial dos grãos abrasivos, o qual se estende até o quinto ponto de ambas as curvas.

Analisando as curvas das Figuras 49 e 43 percebe-se o aumento dos valores médios das forças normais em torno de 22% para rebolo '9a' e 8% para o rebolo '9b'.

A Figura 50 mostra os resultados dos valores de força normais obtidos pela usinagem com rebolos de classe de dureza H [59] e com grãos Tipo B. Como observado nesta figura, o rebolo '10a' gerou valores mais elevados de força normal em relação ao rebolo '10b', apesar de ambos apresentar igual especificação e mesmas condições ensaiadas.

Ao comparar as curvas das Figuras 46 e 50 é possível observar a diminuição do valor médio das forças normais em torno de 10% para o rebolo '10a' e 16% para o rebolo '10b'. Fica evidente a diminuição dos

valores de forças normais de retificação quando se varia a classe de dureza J para H.

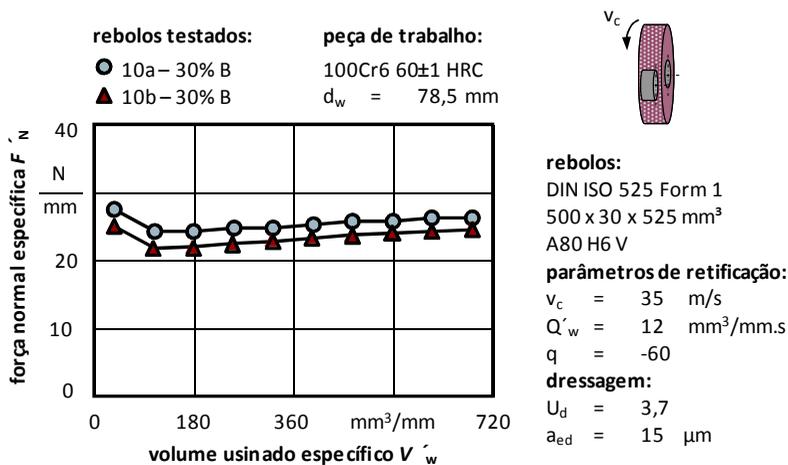


Figura 50 - Forças normais de retificação versus volume usado específico - 30% grãos Tipo B, dureza H - [57].

Os resultados das medições de forças normais de retificação efetuadas em rebolos de classe de dureza L [59] com grãos do Tipo B são apresentados pela Figura 51.

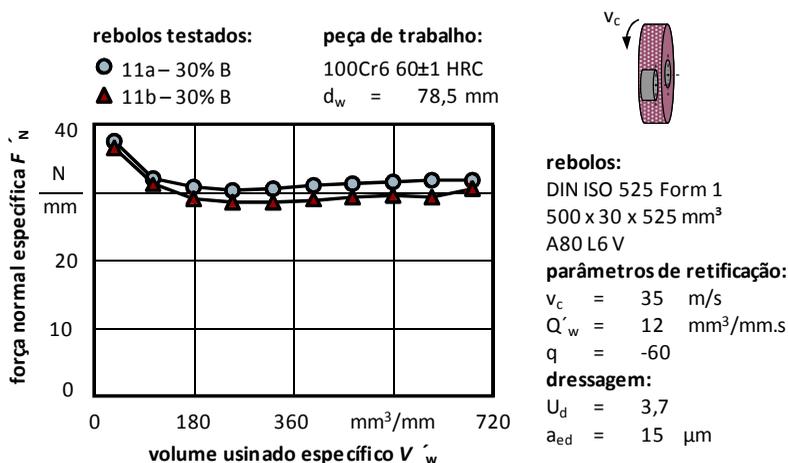


Figura 51 - Forças normais de retificação versus volume usado específico - 30% grãos Tipo B, dureza L - [57].

Comparando a Figura 51 com a Figura 46, nota-se o aumento do valor médio das forças normais em torno de 14% para o rebolo '11a' e 9% para o rebolo '11b' quando se varia a classe de dureza de J para L.

Um apanhado geral destas informações sobre rebolos de diferentes fabricantes permite concluir que tanto a variação da porcentagem de grãos bem como a classe de dureza dos rebolos influencia diretamente o comportamento dos valores das forças normais de corte. Outra consideração que é possível ser feita é que rebolos de mesma especificação de fabricantes distintos podem apresentar comportamentos de força normais diferentes ao longo do volume usinado específico.

4.1.2 Grãos de diferentes fornecedores

Os resultados apresentados a seguir correspondem a rebolos de mesmo fabricante, o qual utilizou grãos de fornecedor padrão e fornecedor alternativo na composição dos rebolos. A Figura 52 mostra os resultados das medições de força normal para rebolos com 100% de coríndon branco, adotados como referência.

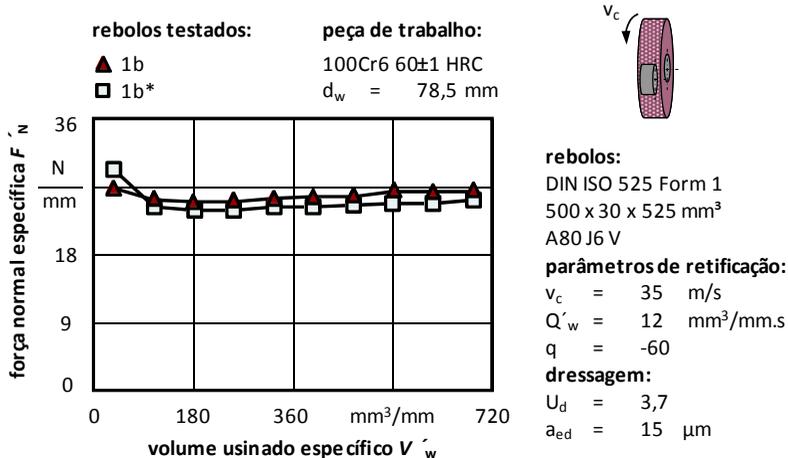


Figura 52 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 100% coríndon branco - [57].

É observado na Figura 52 um comportamento aproximadamente linear nos valores de força a partir do terceiro corpo de prova. O rebolo '1b' demandou menor força para o processo de quebra inicial de grãos

em comparação ao rebolo ‘1b*’, evidenciando que não houve diminuição considerável nos valores de força normal após o desgaste inicial dos grãos.

A Figura 53 apresenta os valores de força gerados por rebolos de composição de grãos 15% Tipo A de diferentes fornecedores. Observam-se nesta figura valores mais elevados na fase inicial até o quarto ponto da curva correspondente ao rebolo ‘2b*’. A diferença no valor da força apresentada no primeiro ponto de cada curva é em torno de 15%. Posteriormente há uma sobreposição dos valores de forças normais mensuradas e comportamento aproximadamente linear ao longo do volume usinado específico.

Comparando-se as curvas das Figuras 53 e 52, observa-se uma diminuição de 8% nos valores médios de força gerados pelo rebolo ‘2b’ e 1% pelo rebolo ‘2b*’. É importante salientar apesar da pequena diferença apresentada nos valores médios das forças normais, o rebolo ‘2b*’ demandou 11% a mais de força inicial para a quebra de grãos em comparação ao rebolo ‘1b*’.

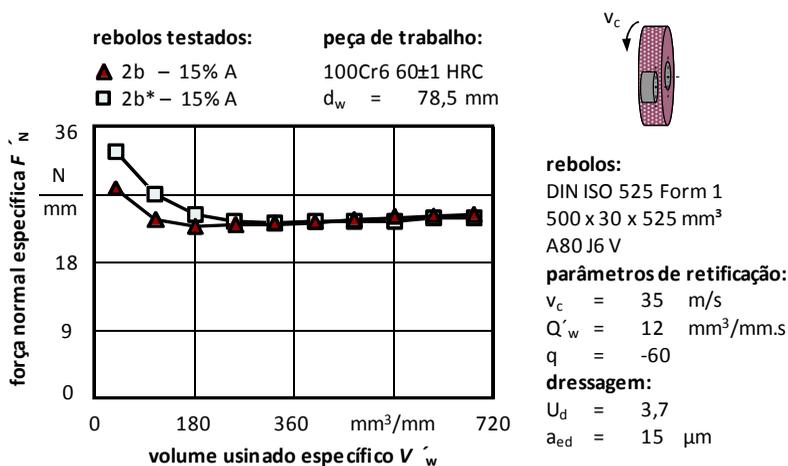


Figura 53 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 15% Tipo A - [57].

Na Figura 54 os valores das medições de força normal efetuadas na usinagem com rebolos compostos de 30% de grãos Tipo A são apresentados.

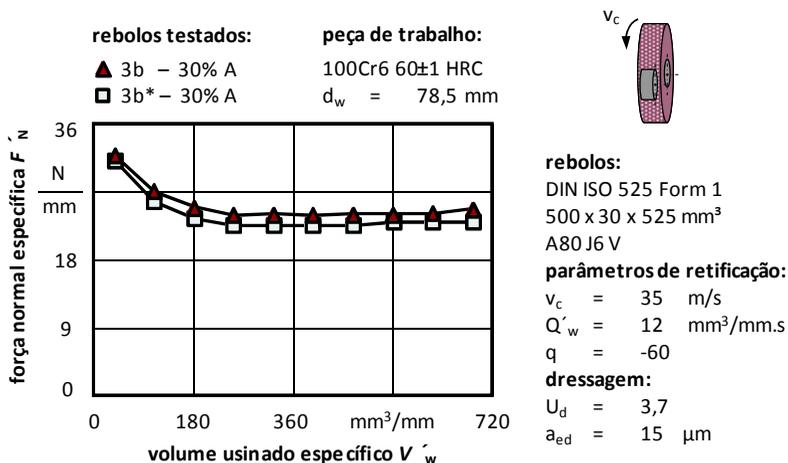


Figura 54 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 30% Tipo A - [57].

Na Figura 54 é observado um comportamento semelhante das forças normais correspondentes a ambos os rebolos, tanto na fase inicial de desgaste de grãos quanto na fase posterior a este processo.

Em relação ao aumento da porcentagem de grãos abrasivos no comportamento das forças normais de retificação, comparando-se a Figura 54 e com a Figura 52, observa-se uma diminuição no valor médio das forças: 4% para a usinagem com o rebole '3b*' e 6% com o rebole '3b'.

A Figura 55 exibe os resultados obtidos na medição das forças normais da retificação com rebolos compostos de 45% de grãos Tipo A. Nesta figura percebe-se a sobreposição das curvas geradas por ambos os rebolos. Observa-se também que esta porcentagem de grãos do Tipo A prolongou o processo de quebra inicial dos grãos abrasivos, ocorrido até o quinto ponto de cada curva.

Comparando-se as Figuras 55 e 52, é visualizado que a inclusão de 45% de grãos Tipo A dos diferentes fornecedores na composição dos rebolos diminuiu os valores médios das forças normais em torno de 5% para ambos os rebolos.

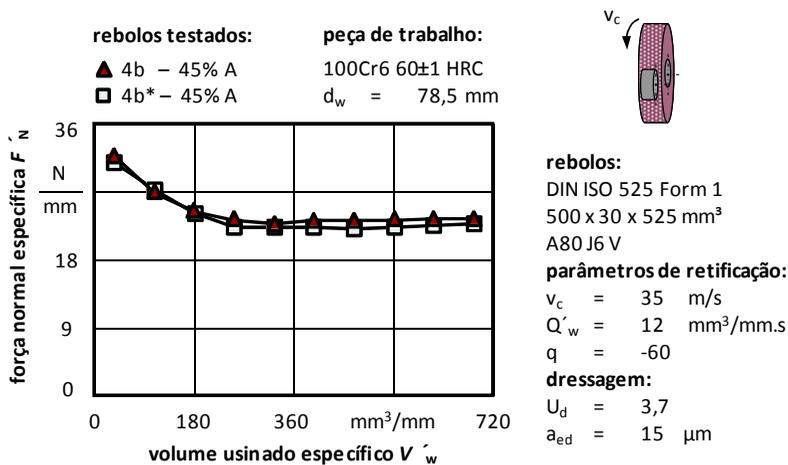


Figura 55 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 45% Tipo A - [57].

A Figura 56 apresenta os resultados de forças normais mensurados na usinagem com rebolos compostos com 15% de grãos Tipo B.

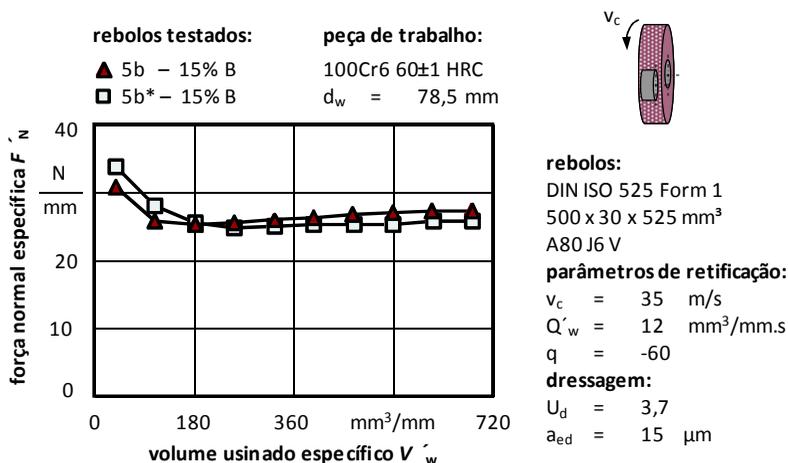


Figura 56 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 15% Tipo B - [57].

Observa-se que as forças normais da Figura 56 aumentam levemente a partir do quarto ponto de ambas as curvas. Este comportamento ocorre devido à diminuição dos gumes ativos ao longo do volume usinado específico.

Comparando-se as curvas da Figura 52 com as curvas da Figura 56 é observado um aumento no valor médio das forças normais de 2% correspondentes ao rebolo '5b' e 4% para o rebolo '5b*'.

A Figura 57 apresenta as curvas geradas pela medição das forças normais geradas por rebolos com 30% de grão Tipo B em sua composição. As curvas desta figura apresentam um comportamento semelhante, apesar de o rebolo '6b*' gerar maiores forças nos pontos iniciais da curva, correspondentes ao processo de desgaste inicial dos grãos. Posteriormente a este processo, ambas as curvas apresentaram um comportamento aproximadamente linear, permitindo concluir que não houve diminuição significativa dos gumes ativos ao longo do volume usinado específico.

Em relação à utilização de 30% de grãos Tipo B na composição dos rebolos, a comparação entre as curvas das Figuras 52 e 56 permite visualizar o aumento do valor médio das forças em torno de 6% para o rebolo '6b' e de 8% para o rebolo '6b*'.

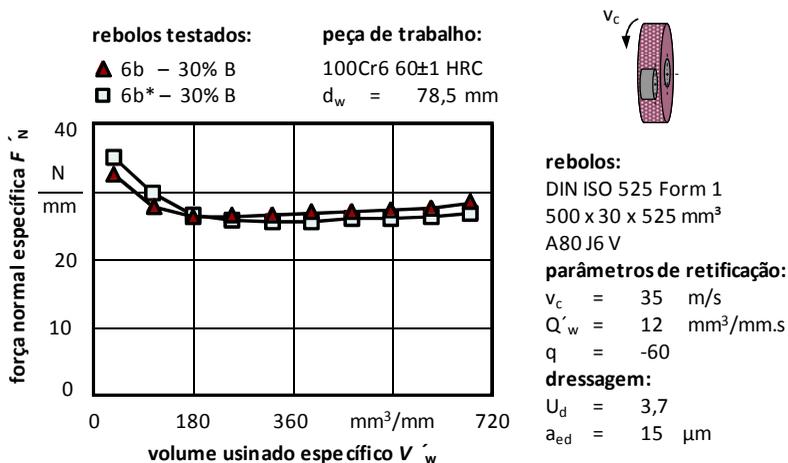


Figura 57 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 30% Tipo B - [57].

A Figura 58 apresenta os resultados das medições de forças normais geradas por rebolos com 45% de grãos Tipo B em sua

composição. Observa-se que os valores correspondentes a curva '7b' foram levemente superiores aos da curva '7b*'.

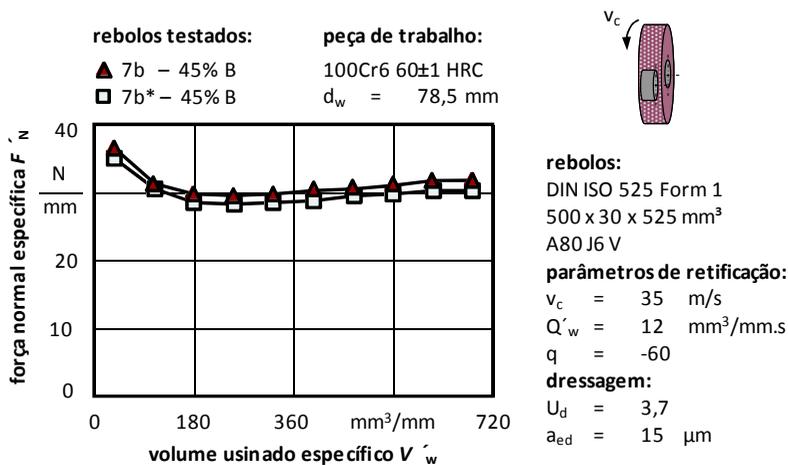


Figura 58 - Forças normais de retificação em relação ao volume usinado específico - 45% Tipo B - [57].

Através da comparação das Figuras 58 e 52, observa-se um aumento nos valores médios das curvas em torno de 7% correspondentes ao reboleto '7b' e 6% ao reboleto '7b*'.

De modo geral, é possível concluir através dos experimentos desta seção que grãos abrasivos de diferentes fornecedores geram diferentes valores de forças normais de retificação em rebolos de mesmo fabricante, sob as mesmas condições ensaiadas. É possível observar que mesmo aumentando as porcentagens de grãos Tipo A nos rebolos, os valores médios das forças normais diminuíram em relação ao reboleto referência com o aumento do volume usinado específico. Por outro lado, os grãos do Tipo B elevaram os valores médios de força normal em relação à referência.

4.2 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E DESVIO DE PERFIL

Em termos gerais, a rugosidade é gerada pela interação da topografia da superfície do reboleto com a peça sob movimentos cinemáticos impostos pela máquina. O acabamento obtido depende de uma forma complexa, do estado da topografia do reboleto (obtida pelo processo de dressamento), parâmetros de retificação e interações

tribológicas entre a peça e os pontos de corte do abrasivo (Xiao e Malkin, 1996 *apud* [60]). A seguir, são apresentados os resultados dos valores de R_a e R_z dos corpos de prova usinados pelas diferentes ferramentas de corte.

4.2.1 Rebolos de diferentes fabricantes

A Figura 59 mostra os valores médios de R_a e R_z dos corpos de prova retificados com rebolos compostos de 100% de coríndon branco dos diferentes fabricantes, adotados como referência. Constata-se nesta figura o aumento dos parâmetros mensurados ao longo do volume usinado específico, em virtude do desgaste inicial dos grãos.

Inicialmente os valores dos parâmetros de rugosidade analisados são mais baixos, uma vez que o rebolo foi recém dressado. Posteriormente há o desgaste dos grãos abrasivos e, portanto, a diminuição de gumes ativos, o que reflete no aumento dos valores dos parâmetros de rugosidade.

É evidente um leve aumento no valor R_z apresentado pelo quarto ponto da curva correspondente ao rebolo '1a', na Figura 59. Posteriormente esta variável apresenta comportamento decrescente. Tal comportamento pode ser explicado pelas interações entre peça e ferramenta de corte, onde houve quebra parcial dos grãos e um processo de auto-afiação do rebolo. Os valores de R_a para os corpos de prova usinados com ambos os rebolos apresentaram comportamento semelhante em quase todos os pontos da curva.

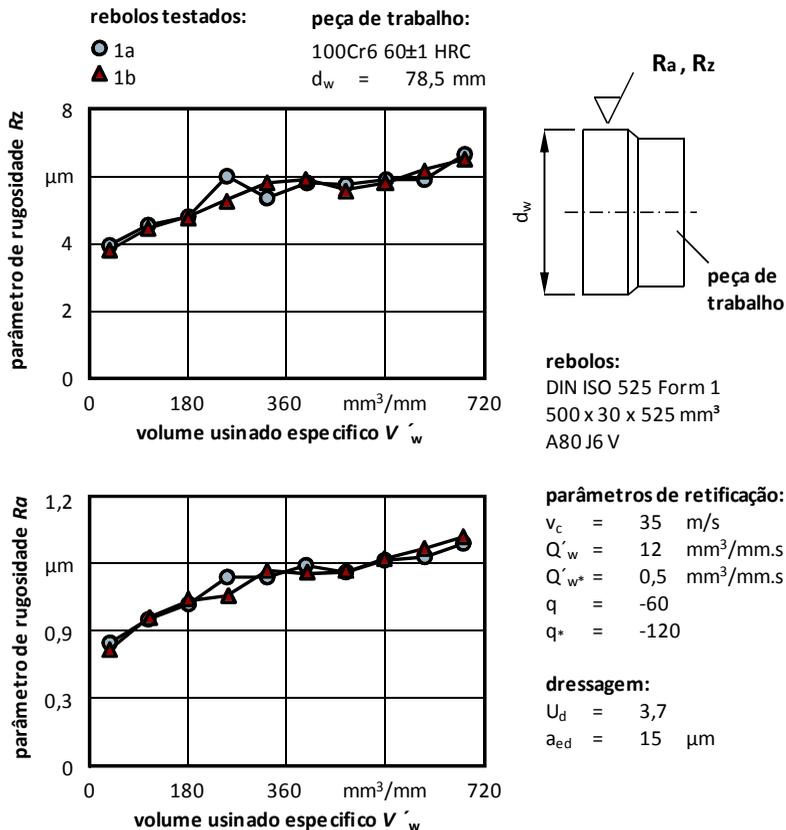


Figura 59 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 100% de coríndon branco.

Na Figura 60 são apresentados os resultados dos valores dos parâmetros de rugosidade gerados por rebolos compostos de 15% de grãos Tipo A. Como pode ser observado nas curvas desta figura, tanto os valores médios de R_a quanto de R_z apresentaram comportamentos distintos. O rebolo '2a' gerou valores superiores dos parâmetros R_a e R_z . A diferença entre os valores médios de R_z é em torno de 24%.

Comparando as curvas das Figuras 60 e 59, é possível observar um aumento de 16% e 19% nos valores médios de R_a e R_z respectivamente, para o rebolo '2a'. No caso do rebolo '2b', os valores médios de R_a e R_z gerados nos corpos de prova diminuíram em 5% e 3% respectivamente.

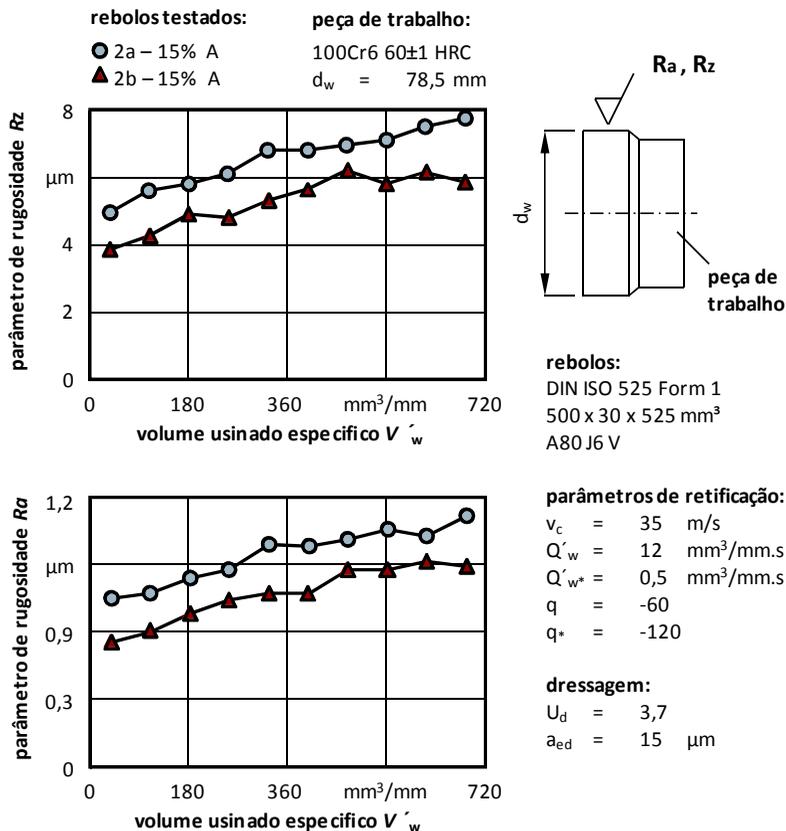


Figura 60 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usado específico - 15% Tipo A.

Os resultados dos valores médios de R_a e R_z gerados nos corpos de prova por rebolos com composição 30% de grãos Tipo A são apresentados da Figura 61. Neste caso os maiores valores dos parâmetros de rugosidade mensurados nos corpos de prova foram gerados pelo rebolo '3b'.

Em termos do uso de 30% de grãos Tipo A, é possível verificar pela comparação entre as Figuras 61 e 59 que os valores dos parâmetros R_a e R_z gerados pelo rebolo '3a' diminuíram em torno de 16%. Por outro lado, houve aumento de 2% nos valores médios de R_z e 6% nos valores médios de R_a gerados pelo rebolo '3b'.

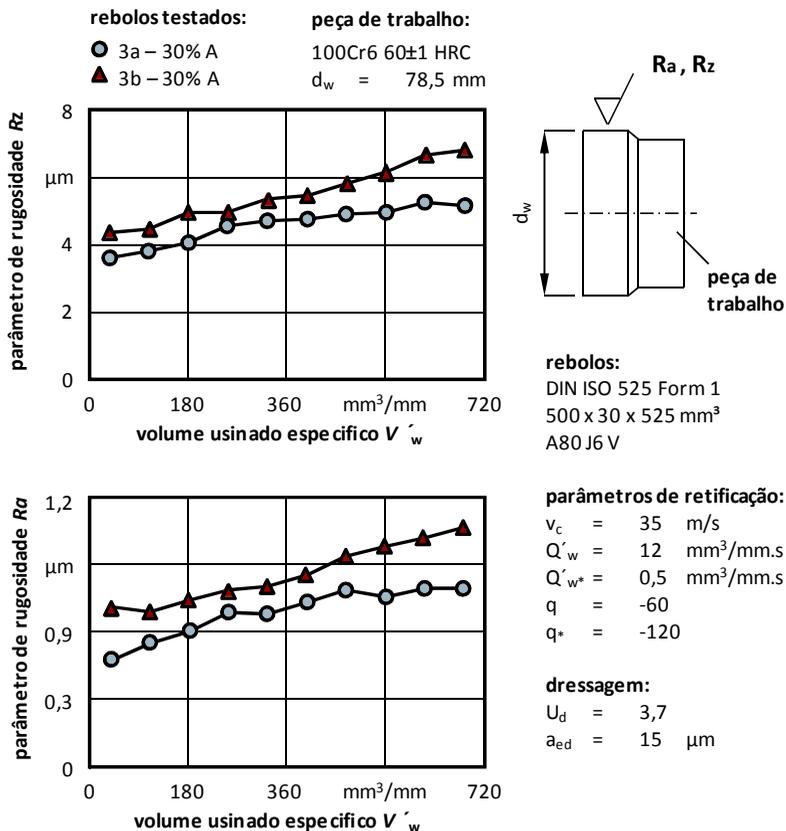


Figura 61 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo A.

A Figura 62 apresenta os valores de R_a e R_z obtidos com rebolos compostos de 45% de grãos Tipo A. Nesta figura se observa a sobreposição da maior parte dos valores nas curvas de R_a e R_z geradas pelos diferentes rebolos. Observa-se também que o comportamento da curva dos valores de R_a , correspondentes ao rebo 4a, é aproximadamente linear e constante. Outro aspecto interessante desta figura é que suas curvas não apresentam coeficiente de inclinação elevado em comparação com as figuras anteriores, o que implica em melhores qualidades de superfície com o aumento do volume usinado específico.

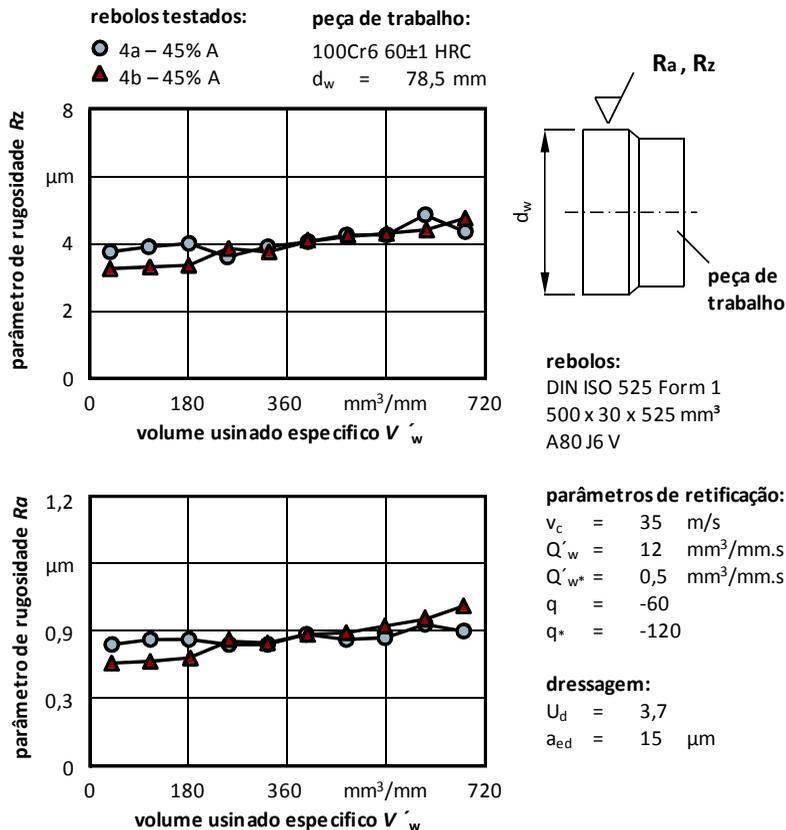


Figura 62 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usado específico - 45% Tipo A.

É possível observar a diminuição dos valores médios de R_a e R_z ao utilizar rebolos com 45 % de grãos Tipo A na usinagem dos corpos de prova, quando são comparadas as Figuras 62 e 59. Os valores médios de R_a gerados pelo rebolo '4a' sofreram queda em torno de 29% e de R_z em torno de 25%.

No caso do rebolo '4b' as quedas nos valores médios foram de 30 e 28% para R_a e R_z respectivamente. Baseado nestas informações é possível afirmar que o aumento da porcentagem de grãos Tipo A na composição do rebolo diminui os valores de R_a e R_z . Os gráficos gerados com rebolos compostos de grãos Tipo A permitem afirmar também que mesmos grãos utilizados na fabricação de rebolos por

diferentes empresas geraram qualidades de superfícies distintas na maioria dos casos.

A Figura 63 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade gerados por rebolos compostos de 15% de grãos Tipo B na usinagem dos corpos de prova.

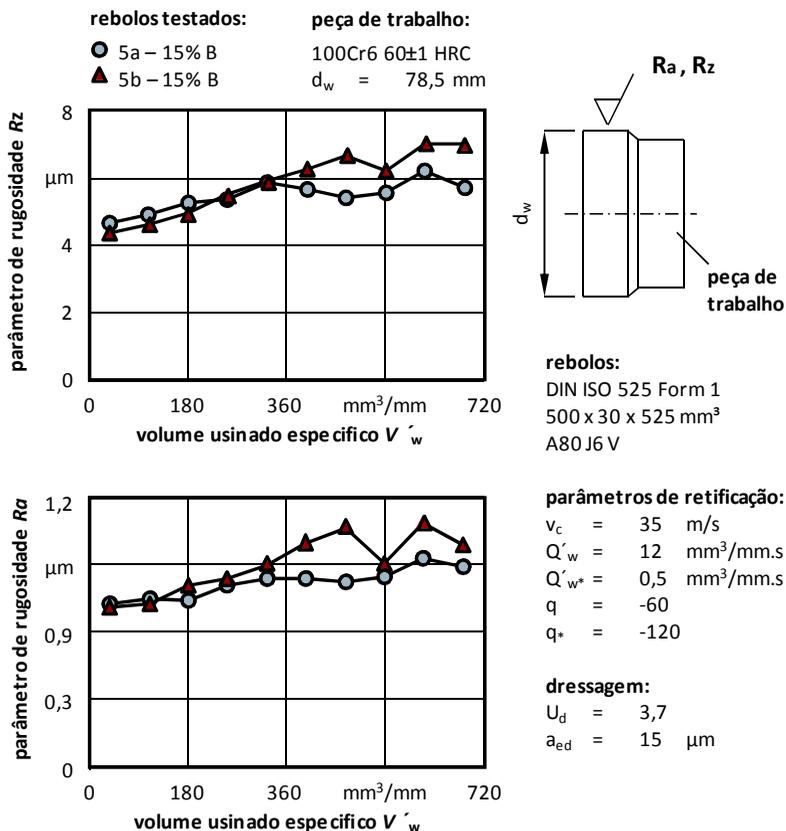


Figura 63 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 15% Tipo B.

Observam-se na Figura 63 valores mais aleatórios dos parâmetros analisados a partir de $V'_w = 360 \text{ mm}^3/\text{mm}$ pelas curvas correspondentes ao rebolo '5b'. Este comportamento pode ter origem nas interações de micro-quebra dos grãos no processo de corte, no qual houve uma auto-afiação nos grãos que consequentemente diminuiu os valores de R_a e R_z .

nos pontos correspondentes das curvas. Posteriormente, os grãos tornam a desgastar-se e refletem este comportamento nesta curva.

Na Figura 64 encontram-se os valores de R_a e R_z , obtidos em corpos de prova com rebolos compostos de 30% de grão Tipo B. Observam-se nesta figura os maiores valores de R_a obtidos pelo rebolo '6b'.

O rebolo '6a' apresentou valores mais baixos de R_a e sua curva de R_z traduz uma melhor qualidade das superfícies ao longo da variação do volume usinado específico em relação ao outro rebolo avaliado.

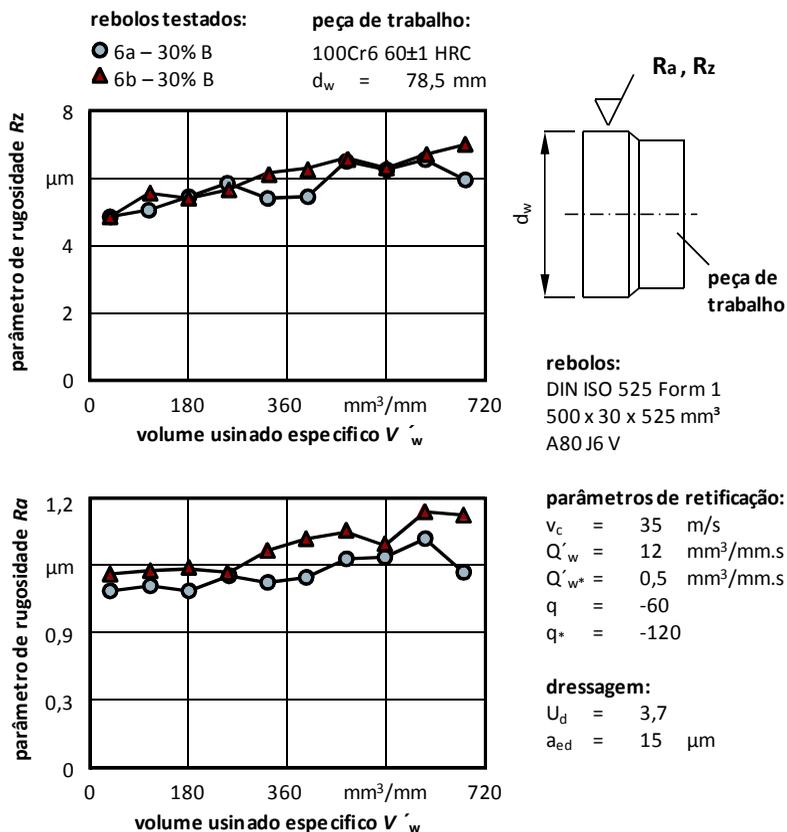


Figura 64 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo B.

No que diz respeito à utilização de 30% de grãos Tipo B, houve um aumento em torno de 24% e 11% nos valores médios de R_a e R_z

respectivamente, gerados pelo rebolo '6b', enquanto que nos valores gerados pelo rebolo '6a', este aumento foi de 10% para R_a e 6% para R_z (comparação entre as Figuras 64 e 59). Na Figura 65 são apresentados os parâmetros de rugosidade avaliados nos corpos de prova usinados com rebolos compostos de 45% de grãos Tipo B.

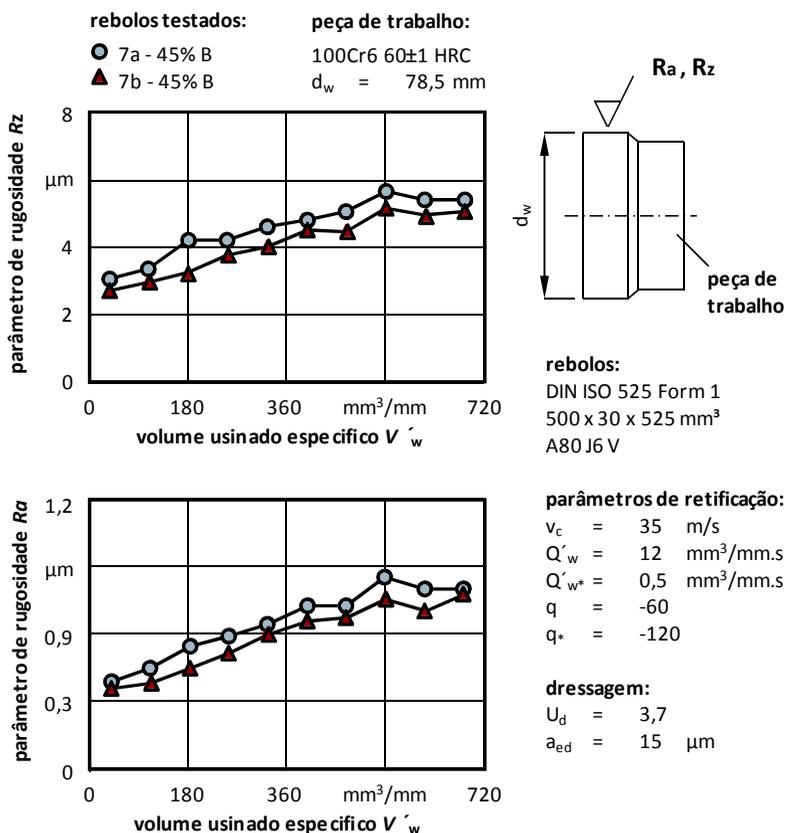


Figura 65 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 45% Tipo B.

Na Figura 65 é visualizado que o rebolo '7b' gerou menores valores de R_z e R_a nos corpos de prova avaliados em relação ao rebolo '7a', fato não ocorrido nos casos anteriores para grãos do Tipo B. Apesar das curvas, tanto de R_a e R_z , apresentarem comportamento semelhante, não houve sobreposição de valores em quase todas as

medições, evidenciando assim as diferentes superfícies geradas por rebolos com as mesmas especificações.

Em termos do uso de 45% de grãos Tipo B, comparando-se a Figura 65 com a Figura 59, houve uma diminuição em torno de 28% nos valores médios de R_a e 26% nos valores médios de R_z , gerados pelo rebolo '7b'. No caso do rebolo '7a', esta diminuição foi de 20% e 17% nos valores de R_a e R_z respectivamente. Isto comprova que o aumento da porcentagem de grãos abrasivos Tipo B causa uma diminuição nos valores dos parâmetros de rugosidade, ou em outras palavras, gera superfícies com melhor acabamento.

A Figura 66 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos por rebolos com 30% de grãos Tipo A em sua composição e classe de dureza H [59].

É evidente a diferença nos valores mostrados na Figura 66 dos parâmetros de rugosidade gerados pelos rebolos com mesma especificação. O rebolo '8a' gerou superfícies com valores de R_a e R_z mais elevados quando comparado ao rebolo '8b'. É importante salientar que este comportamento foi diferente quando a classe de dureza do rebolo analisado era J (comparação entre as curvas da Figura 66 com as da Figura 61).

Em comparação com o rebolo referência (Figura 59) a média dos valores dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z aumentaram em torno de 28% e 25% respectivamente quando utilizado o rebolo '8a' na usinagem. No caso do rebolo '8b', houve uma diminuição do parâmetro R_a em torno de 5% e R_z teve um pequeno aumento nos valores médios de 3%.

Através destes valores é possível constatar as diferentes qualidades das superfícies geradas com rebolos de mesmo fabricante quando apenas é variada a classe de dureza. As diferenças são mais acentuadas quando se consideram os rebolos de fabricantes diferentes.

No caso do fabricante 'a', as superfícies geradas pelo rebolo mole (classe de dureza H) apresentaram diferenças acentuadas nos parâmetros de rugosidade em relação ao rebolo médio (classe de dureza J). Porém, esta diferença entre os parâmetros de rugosidade gerados por rebolos do fabricante 'b' foi baixo, e no caso dos valores médios de R_a houve diminuição.

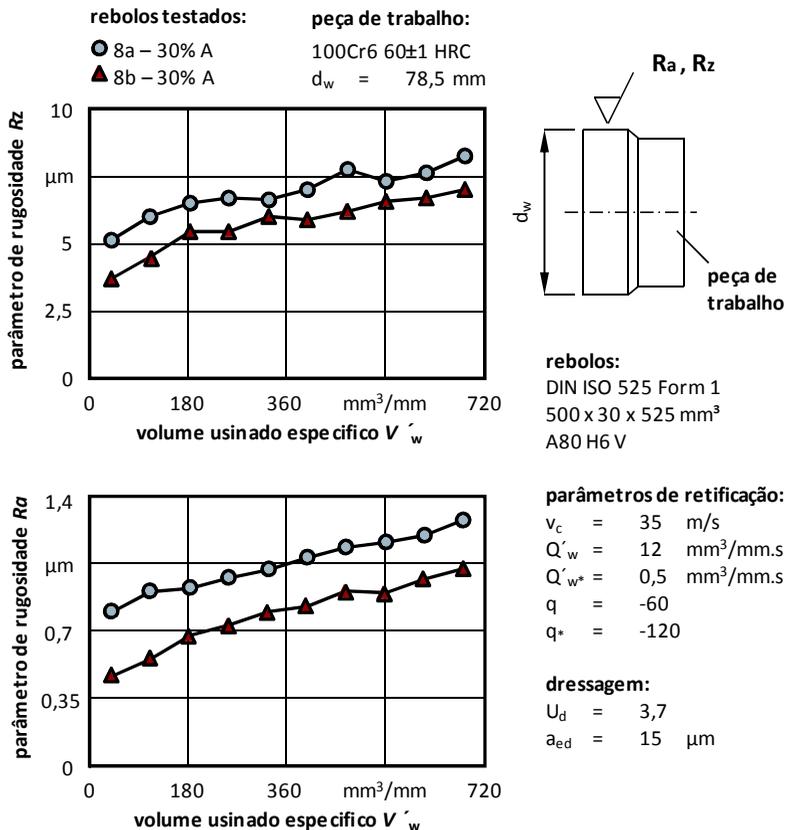


Figura 66 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo A, dureza H.

Na Figura 67 são apresentados os parâmetros de rugosidade gerados nos corpos de prova por rebolos compostos com 30% de grãos Tipo A com classe de dureza L [60].

Nesta figura é possível visualizar a sobreposição de alguns valores das curvas R_z , o que traduz um acabamento semelhante das superfícies geradas por estes rebolos. A curva R_a correspondente ao rebolo '8b' apresentou valores menores na fase inicial do ciclo de retificação, enquanto que o rebolo '8a' apresentou comportamento mais estável ao longo do volume usinado específico.

Em relação à classe de dureza, comparando-se as curvas da Figura 67 com as curvas da Figura 59, onde se variou a classe J (médio)

para L (duro), ocorreu diminuição dos valores médios dos parâmetros de rugosidade somente a partir do quarto corpo de prova para ambos os rebolos. Esta diminuição foi de 4 e 1% para R_a e R_z gerados pelo rebolo '9a' respectivamente. Os valores médios gerados pelo rebolo '9b' diminuíram 2% em R_a e aumentaram 1% em R_z . Por este motivo, é possível constatar que o aumento da classe de dureza de J para classe H não implicou em melhoras significativas na qualidade das superfícies usinadas.

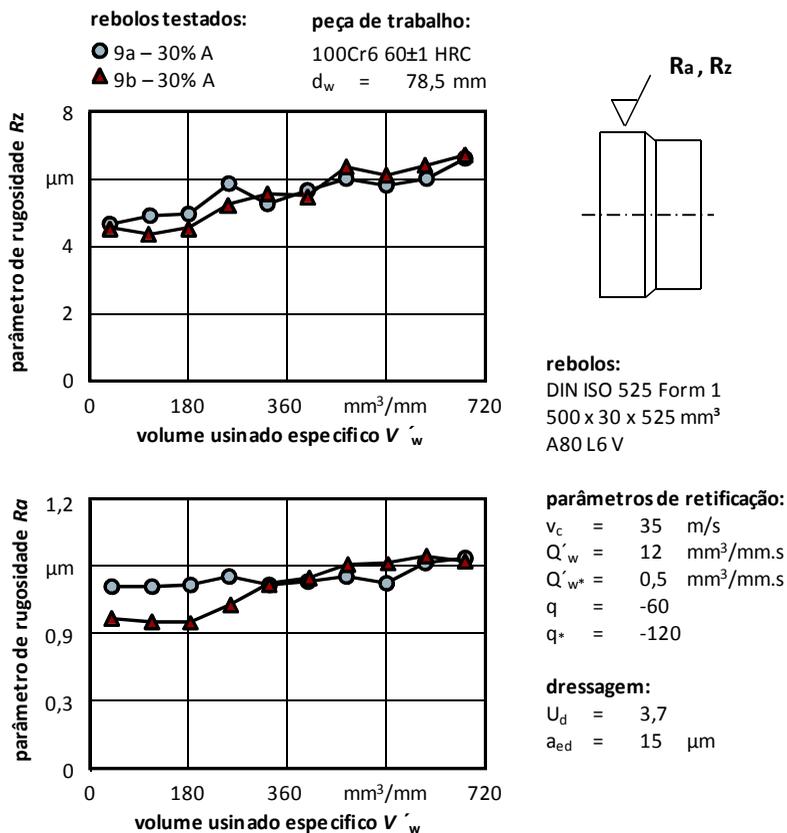


Figura 67 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usado específico - 30% Tipo A, dureza L.

É possível afirmar, por outro lado, que as superfícies geradas pelos rebolos de classe H (duros) apresentaram melhores resultados de

trabalho com o aumento do volume usinado específico devido à inclinação das curvas.

A Figura 68 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade gerados por rebolos com 30% de grãos Tipo B em sua composição e classe de dureza H [60]. É evidente na Figura 68, observando-se o comportamento das curvas, a diminuição da qualidade das superfícies geradas nos copos de prova ao longo do aumento do volume usinado específico, por ambos os rebolos.

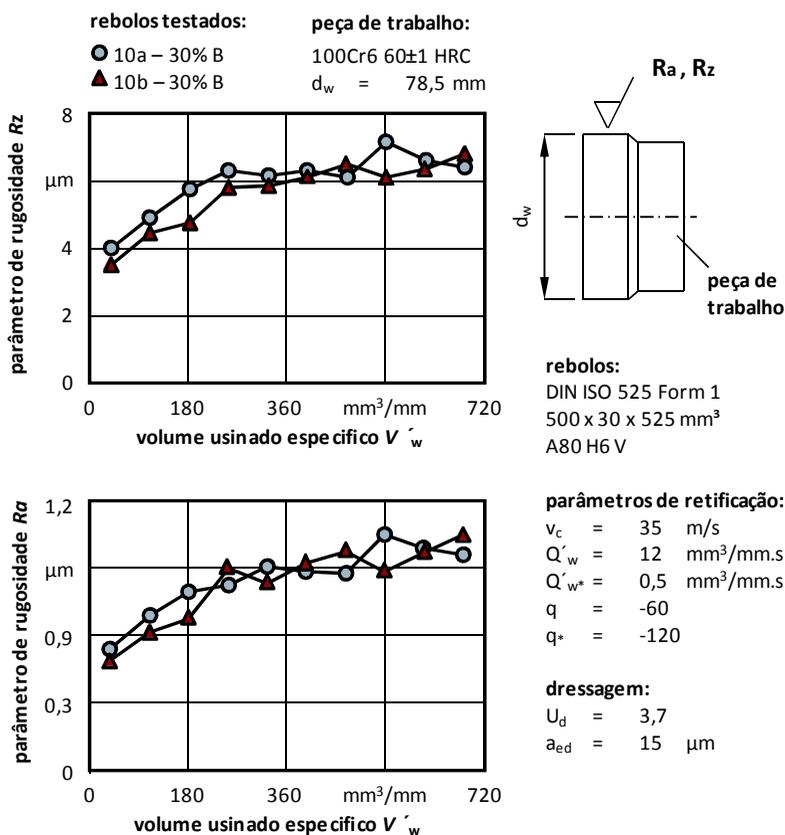


Figura 68 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo B, dureza H.

Quando se variou a classe de dureza de J (Figura 64) para H e mantendo-se os demais parâmetros constantes, houve o seguinte comportamento nos valores médios dos parâmetros de rugosidade: R_a

diminuiu em torno de 2% e R_z aumentou 5% para o caso do rebolo '10a'. No caso do rebolo '10b', os valores de R_a e R_z diminuíram seus valores médios em 16% e 7% respectivamente.

No caso do fabricante 'b', os valores médios dos parâmetros de rugosidade foram diminuídos em maior porcentagem em comparação ao fabricante 'a', ou seja, o rebolo do fabricante 'b' gerou melhor superfícies com maior qualidade. Este resultado é um tanto inesperado, uma vez que na maioria dos casos, rebolos mais moles geram qualidades superficiais inferiores, em virtude do processo de desgaste dos grãos, em comparação a rebolos duros.

Observando-se as curvas R_a e R_z da Figura 68 é possível perceber a influência do desgaste do rebolo refletido nos corpos de prova, os quais iniciam com baixos valores de R_a e R_z e aumentam ao longo do volume usinado específico.

Na Figura 69 são apresentados os valores dos parâmetros de rugosidade gerados nos corpos de prova por rebolos compostos com 30% de grãos Tipo B e classe de dureza L [60].

A variação de classe de dureza J (Figura 64) para L (Figura 69) nos rebolos com 30% de grãos Tipo B na sua composição acarretou em uma diminuição de todos os valores médios dos valores dos parâmetros de rugosidade analisados. No caso do rebolo do fabricante 'a', R_a e R_z diminuíram em torno de 3% e 1,5% seus valores médios, enquanto que no rebolo do fabricante 'b' a diminuição destes valores foi de 15% e 6% respectivamente.

Portanto, é evidente que a utilização de rebolo de classe mais dura gerou melhor qualidade de superfícies nos corpos de prova. É interessante salientar o comportamento aproximadamente constante das curvas de R_a da Figura 69, gerado pelo rebolo mais duro, demonstrando melhores propriedades em termos de resultado de trabalho.

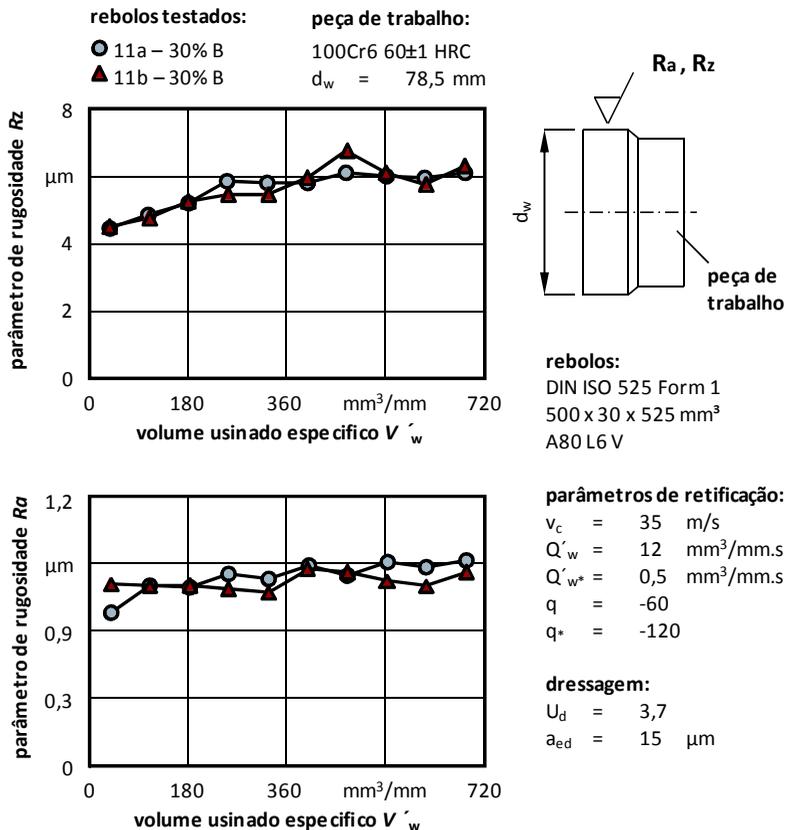


Figura 69 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usinado específico - 30% Tipo B, dureza L.

4.2.2 Grãos de diferentes fornecedores

Os resultados dos valores parâmetros de rugosidade apresentados a seguir correspondem a rebolos de mesmo fabricante, o qual utilizou grãos de fabricante padrão e fabricante alternativo na composição dos rebolos.

A Figura 70 apresenta os resultados das medições dos parâmetros de rugosidade com rebolos compostos de 100% de coríndon branco de diferentes fabricantes. Observa-se que o rebolo '1b' apresentou menores valores de parâmetros de rugosidade do que o rebolo '1b*' (composto de grãos do fornecedor alternativo).

Devido à composição dos rebolos analisados na Figura 70, os resultados desta figura são adotados como referência para as análises posteriores.

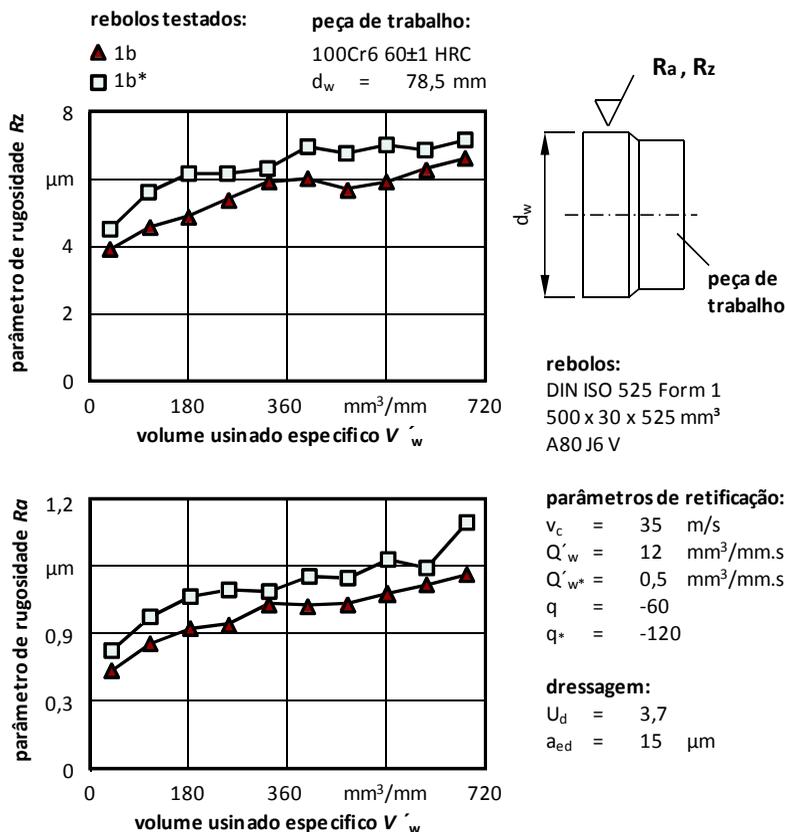


Figura 70 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z versus volume usado específico - 100% coríndon branco.

A Figura 71 apresenta os parâmetros de rugosidade de corpos de prova usinados com rebolos compostos de 15% de grãos Tipo A. Nesta figura pode ser observado que o rebolo '1b' gerou superfícies de melhor qualidade, uma vez que os valores de R_a e R_z foram menores do que os valores gerados pelo rebolo '1b*'. Neste caso houve sobreposição de apenas um ponto nas curvas dos gráficos desta figura.

Em termos da utilização de 15% de grãos Tipo A na composição do rebolo, os valores médios de R_a e R_z foram diminuídos em 5% e 3%

respectivamente no caso do rebolo com grãos de fornecedor padrão. No caso dos grãos de fornecedor alternativo, a diminuição foi de 9% e 6% nos valores médio de R_a e R_z respectivamente (comparação entre as Figuras 71 e 70).

Diante disto, é evidenciada a diminuição dos valores médios dos parâmetros de rugosidade para cada rebolo com diferente composição, bem como a diferença entre os valores médios de R_a e R_z dos rebolos com grãos de fornecedores distintos.

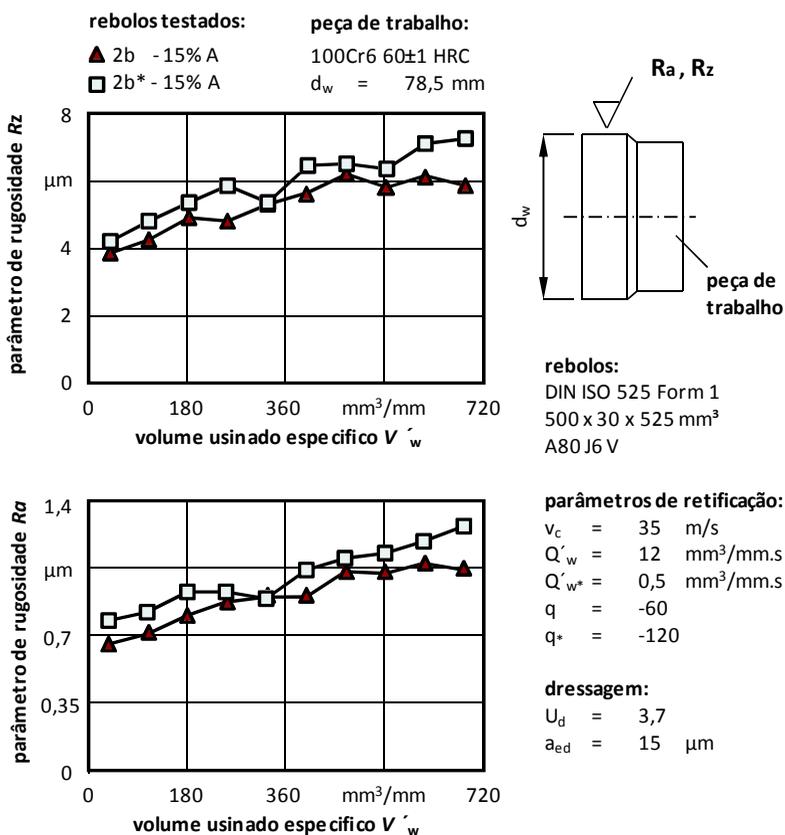


Figura 71 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.

Na Figura 72 são apresentados os parâmetros de rugosidade dos corpos de prova retificados com rebolos compostos de 30% de grãos Tipo A dos diferentes fornecedores.

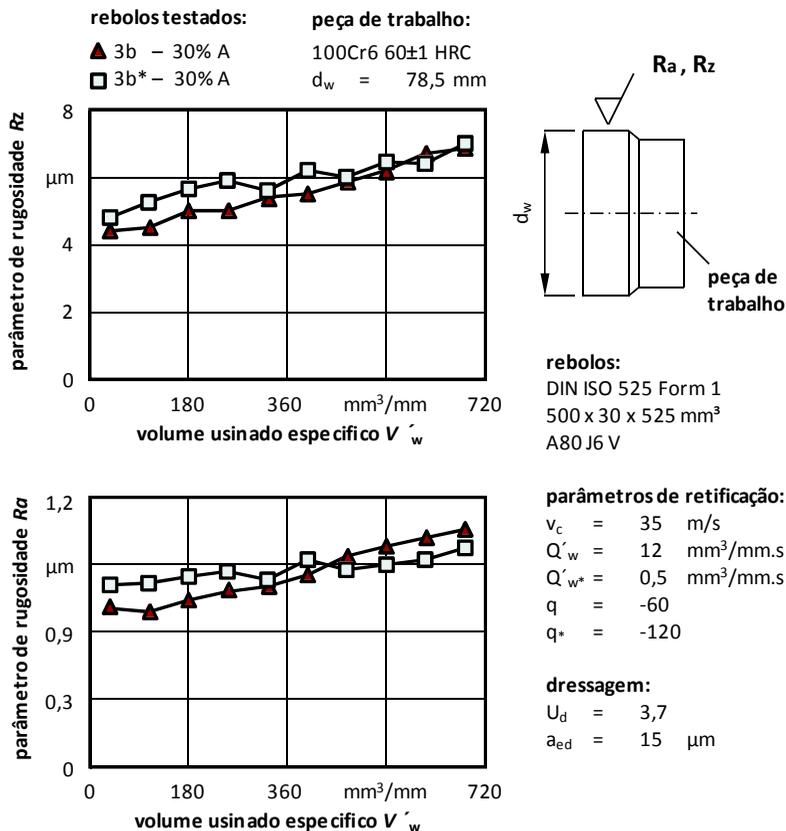


Figura 72 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo A.

É observado na Figura 72 um comportamento aproximadamente constante da curva R_a gerada pelo rebolo '3b*', enquanto que a curva R_a gerada pelo rebolo '3b' inicia com menores valores, os quais aumentam ao longo do volume usinado específico. Para as curvas de R_z desta figura, houve semelhança nos resultados de ambos os rebolos.

Diante disto, considerar a análise de somente o parâmetro R_a pode mascarar o estado da qualidade da superfície dos componentes usinados, o qual para ambos os rebolos foi piorada ao longo do volume usinado específico.

Em termos da utilização de 30% de grãos Tipo A de fornecedores distintos nos rebolos, comparando-se as Figuras 72 e 70, houve um

aumento em torno de 6% nos valores médios de R_a e de 2% em R_z para o rebolo '3b'. No caso do rebolo '3b*' o comportamento foi o oposto, pois ocorreu a diminuição de 6% e 5% nos valores médios de R_a e R_z respectivamente.

A Figura 73 apresenta os resultados dos parâmetros de rugosidade em corpos de prova usinados com rebolos compostos com 45% de grãos Tipo A de diferentes fornecedores.

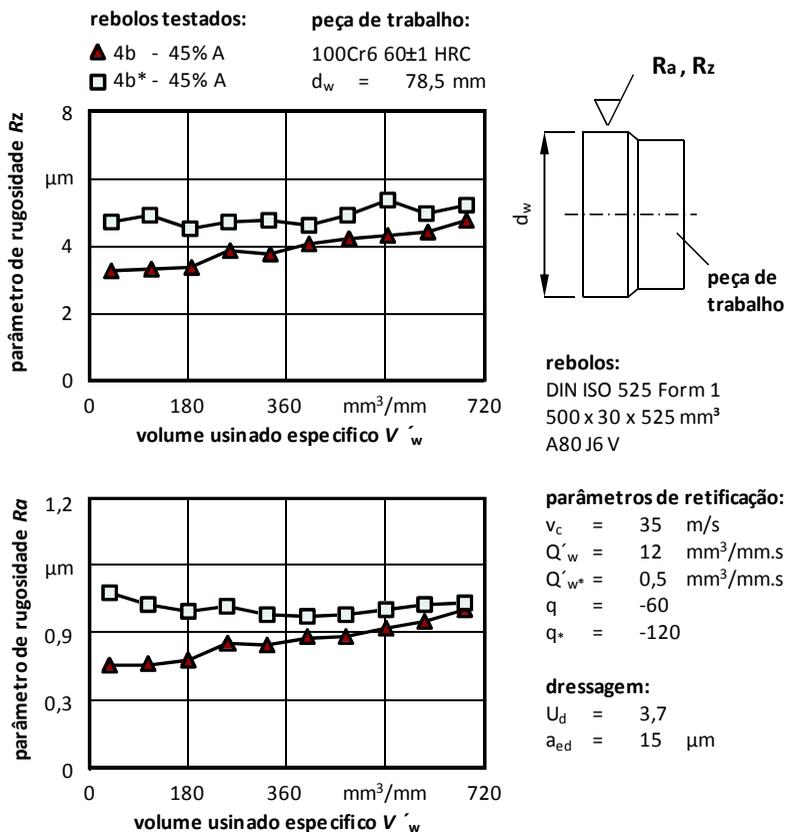


Figura 73 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.

Na Figura 73 são observados os comportamentos distintos tanto das curvas de R_a como de R_z : apesar de apresentar mesma especificação,

houve diferença nas qualidades das superfícies geradas pelos rebolos nos corpos de prova.

É observado que o rebolo '4b' gerou menores valores de R_a e R_z , o que em outras palavras corresponde a uma melhor qualidade das superfícies usinadas em comparação com o rebolo '4b*'.

Ao comparar as Figuras 73 e 70, observa-se a queda dos valores médios dos parâmetros de rugosidade para ambos os rebolos quando se aumentou a porcentagem de grãos Tipo A na composição dos rebolos em 45%. No caso do rebolo '4b', os valores médios de R_a diminuíram em 30% e R_z em torno de 28%. Para o rebolo '4b*', a diminuição foi de 23 e 22% nos valores médios de R_a e R_z respectivamente.

É observada também uma linearidade nas curvas da Figura 73, com valores mais baixos quando se consideram as figuras anteriores. Este fato é consequência da composição do rebolo, com maiores porcentagens de grãos Tipo A, que conferem ao rebolo melhores propriedades de corte e manutenção do poder de afiação.

A Figura 74 apresenta os parâmetros de rugosidade obtidos em corpos de prova com rebolos compostos de 15% de grãos Tipo B de diferentes fornecedores.

Na Figura 74 observa-se uma semelhança nas curvas geradas por ambos os rebolos, com sobreposição de alguns valores. O oitavo ponto de ambas as curvas dos gráficos de R_a e R_z sofreram uma ligeira queda em seus valores. Este fato pode ter origem no processo de micro-quebra de grãos ao longo do aumento do volume usinado específico, onde os grãos sofreram um processo de auto-afiação, uma vez que houve diminuição nos valores dos parâmetros de rugosidade subsequentes a este estágio do experimento.

No que diz respeito à utilização de 15% de grãos Tipo B de diferentes fornecedores, comparando-se as Figuras 74 e 70, observam-se diferenças nos valores dos parâmetros de rugosidade. No caso do rebolo '5b' as superfícies geradas por este rebolo aumentaram cerca de 12% e 6% os valores médios de R_a e R_z respectivamente. Já para o rebolo '5b*' os valores médios de R_a e R_z decaíram em torno de 7% e 9% respectivamente.

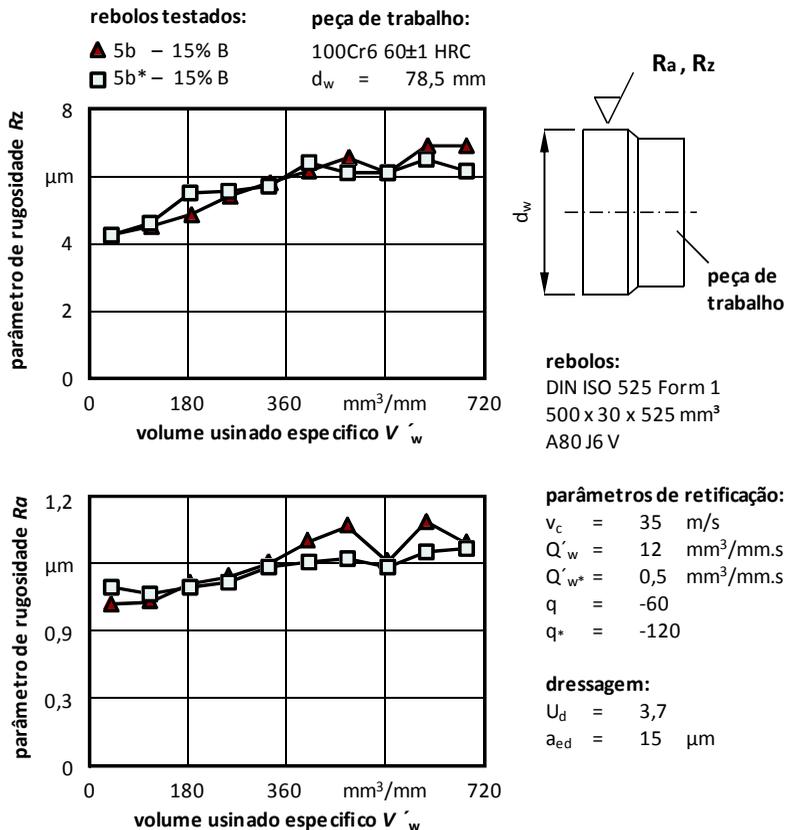


Figura 74 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.

A Figura 75 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade mensurados em corpos de prova com rebolos compostos de 30% de grãos Tipo B de fabricantes distintos.

Na Figura 75 é evidente a diferença obtida nos valores dos parâmetros de rugosidade por ambos os rebolos. A diferença é mais acentuada entre as curvas do gráfico R_a . Neste caso, o reboło '6b*' gerou superfícies com menores valores médios de R_a e R_z , o que significa melhor qualidade das superfícies usinadas com este reboło.

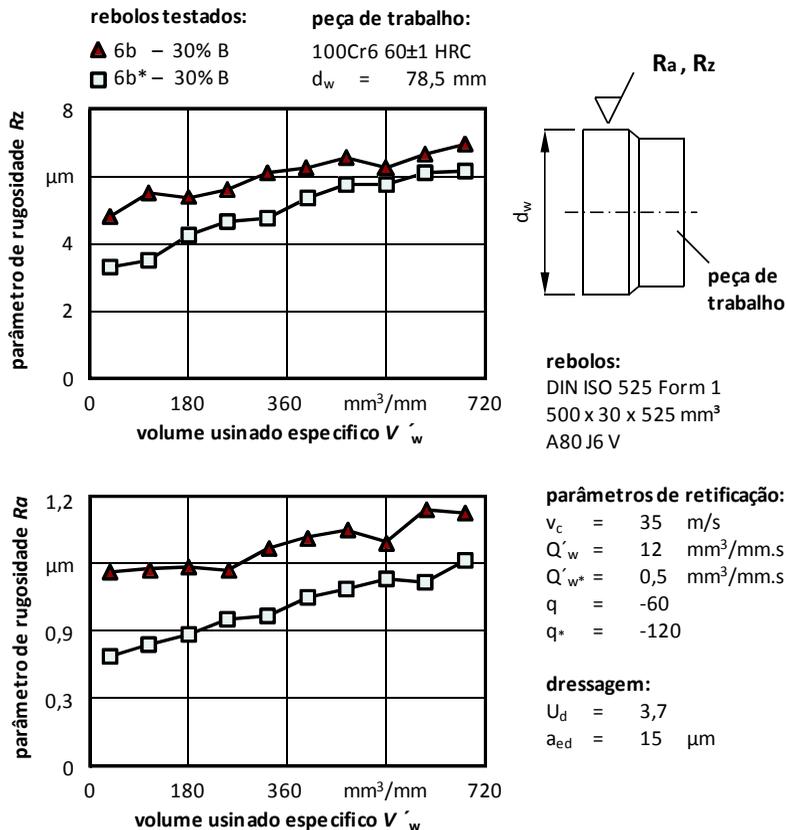


Figura 75 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo B.

Em relação à utilização de 30% de grãos Tipo B na composição do rebolo, ao comparar as Figuras 70 e 75, observa-se novamente comportamentos distintos nos valores médios de R_a e R_z .

No caso do rebolo '6b', os valores médios de R_a e R_z gerados nos corpos de prova aumentaram em torno de 24% e 11% respectivamente. Por outro lado, houve diminuição de 27% nos valores médios de R_a e 22% nos valores médios de R_z das superfícies usinadas com o rebolo '6b*'.

A Figura 76 apresenta os parâmetros de rugosidade mensurados em corpos de prova retificados com rebolos compostos de 45% de grãos Tipo B de diferentes fornecedores.

Observa-se na Figura 76 o comportamento aproximadamente constante da curva a R_a correspondente ao rebolo '7b*'. A curva de R_z , também correspondente a este rebolo, inicia com valores mais baixos que aumentam levemente ao longo do volume usinado específico. São observados também menores valores de R_a e R_z nos pontos finais da curva, quando esta é comparada com as curvas das figuras anteriores.

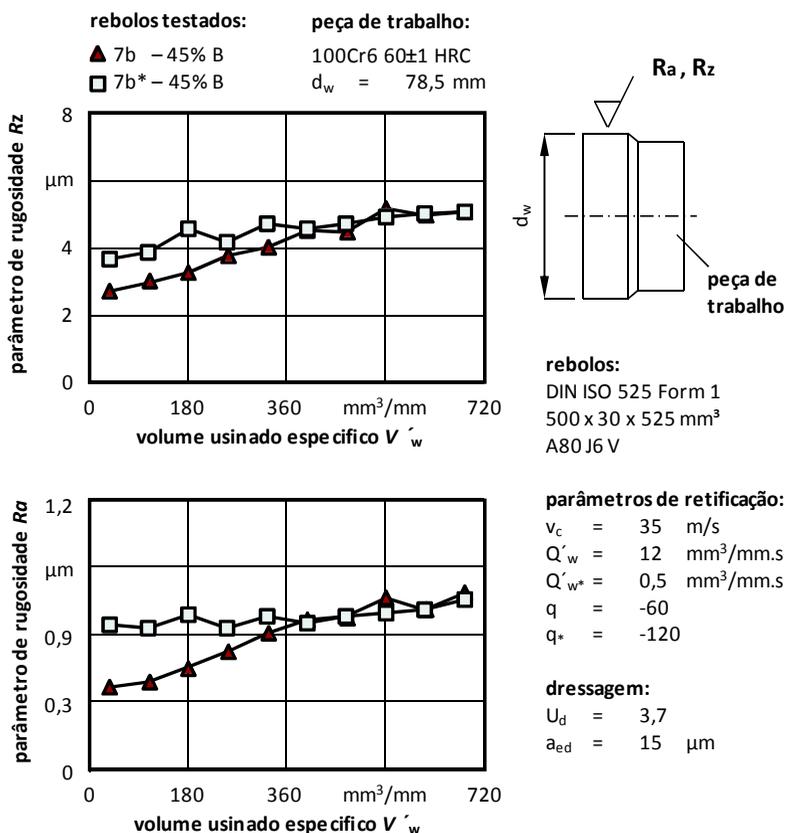


Figura 76 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo B.

Apesar de mesma especificação do rebolo '7b*', observa-se na Figura 76 que o rebolo '7b' gerou menores valores de R_a e R_z nos cinco primeiros corpos de prova usinados. Posteriormente houve sobreposição de alguns valores para ambas as curvas de R_a e R_z .

Analisando-se a utilização de 45% de grãos Tipo B (através da comparação entre as Figuras 70 e 76), observa-se uma diminuição dos valores médios de R_a e R_z gerados por ambos os rebolos nos corpos de prova. Os valores médios obtidos pelo rebole '7b' diminuíram em torno de 28% para R_a e 26% para R_z . No caso do rebole '7b*', a diminuição dos valores médios foi em torno de 26 e 28% para R_a e R_z respectivamente.

A rugosidade consiste fundamentalmente de marcas procedentes do perfil da ferramenta de corte combinada a outras irregularidades na peça usinada, podendo variar de acordo com o material e o tipo de ferramenta empregada [61]. Como não se variou o material dos corpos de prova nos experimentos efetuados, constata-se que ferramentas com mesma especificação, e ferramentas compostas de grãos de fabricantes distintos, geraram valores de parâmetros de rugosidade diferentes nos corpos de prova usinados.

É possível constatar que variações nas propriedades do rebole, neste caso grãos de fabricantes distintos, têm consequências significativas sobre o resultado de trabalho do processo.

Efetuando uma análise geral do parâmetro R_a , foi verificado que todos os valores mensurados estão abaixo de 6,3 μm , valor considerado máximo para uma peça retificada [61].

4.3 DESVIO DE PERFIL

O desgaste da ferramenta é um processo complexo dependente dos parâmetros de processo, assim como da composição da ferramenta de corte e da peça de trabalho. Os efeitos do desgaste da ferramenta no perfil da peça têm sido modelados para várias aplicações do processo de retificação nas últimas três décadas [62]. Há aplicações do processo de retificação em que pequenos desvios de perfil do rebole podem comprometer o resultado de trabalho.

Como um resultado das forças do processo de retificação, os rebolos são submetidos a modificações pelo processo de desgaste. O desgaste leva a mudanças nas condições de processo e desvios no componente usinado. No caso da retificação cilíndrica externa, onde o perfil do rebole é reproduzido na peça de trabalho, desvios de perfil levam a desvios de forma no componente [12].

Cabe lembrar que para retificação de forma, onde o rebole possui um perfil característico, é comum ocorrer desgastes localizados nas extremidades do rebole ou onde houver arestas. Este fato acontece

principalmente porque nestas regiões os grãos abrasivos possuem uma menor ancoragem [11]. Portanto, uma forma interessante de monitorar o desgaste de rebolos é através de rebolos destinados à retificação de forma, os quais são utilizados nesta pesquisa.

O objetivo destes experimentos é monitorar o desvio de perfil ao longo do volume usinado específico, gerado por ferramentas com um perfil característico, mesma especificação, de fabricantes diferentes, e ainda com grãos de fornecedores distintos.

Nesta seção são apresentados os resultados de desvio de perfil mensurados nos corpos de prova usinados com os rebolos analisados, conforme metodologia descrita na Seção 3.8.1 deste trabalho.

4.3.1 Rebolos de diferentes fabricantes

A Figura 77 apresenta os resultados obtidos nos corpos de prova usinados com rebolos compostos de 100% de coríndon branco. Devido a esta composição, os resultados desta figura são adotados como referência para as análises subsequentes.

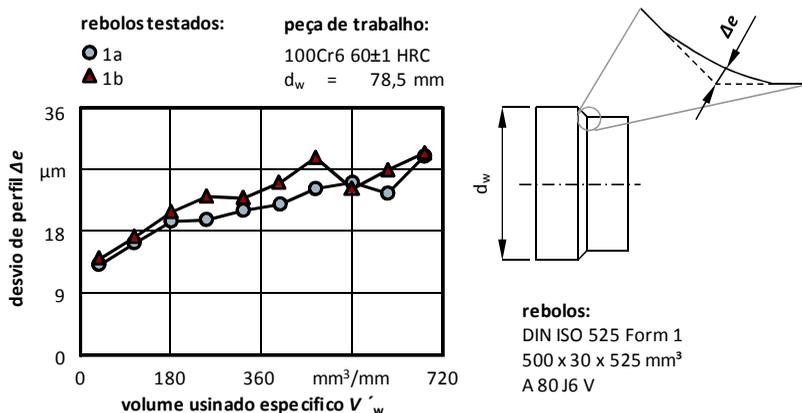


Figura 77 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 100% coríndon branco.

Na Figura 77 é observado o comportamento crescente de ambas as curvas. É interessante salientar que houve sobreposição dos valores inicial e final das curvas, com variação de 15 μm entre o ponto inicial e final das curvas. De um modo geral, o rebo 1a gerou menores valores de Δe ao longo do volume usinado específico.

A Figura 78 exibe os resultados de desvio de perfil correspondentes aos rebolos compostos com 15% de grãos Tipo A. Nesta figura observa-se uma similaridade das curvas, onde o rebolo '1a' gerou maiores valores de Δe .

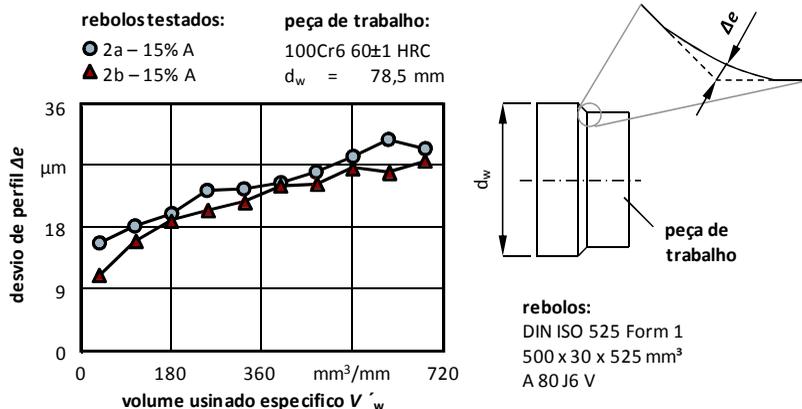


Figura 78 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.

Ao comparar as Figuras 78 e 77, observam-se resultados distintos de Δe quando se utiliza 15% de grãos tipo A: no caso do rebolo '1a' os valores médios do desvio de perfil aumentaram em torno de 14% e para o rebolo '1b' estes valores diminuíram cerca de 6%.

A Figura 79 apresenta os desvios de perfil gerados por rebolos com 30% de grãos Tipo A nos corpos de prova. A curva correspondente ao rebolo '3b' apresenta-se com os mais baixos valores de Δe , com pequena variação ao longo do volume usinado específico, tanto que a diferença entre o primeiro e o último ponto da curva é de 3 μm.

No caso do rebolo '3a', o comportamento da curva mostra um aumento nos valores de Δe ao longo do volume usinado específico, ou seja, este rebolo teve maior desgaste nesta região em relação ao rebolo '3b'.

No que diz respeito a 30% de grãos tipo A na composição dos rebolos, comparando-se a Figura 79 com a 77, observa-se que o rebolo '3a' aumentou os valores médios de Δe em torno de 3%, ou seja, não houve diferença significativa no desgaste desta região no rebolo quando se variou a composição de grãos Tipo A. Já para o rebolo '3b', houve diminuição de 27% nos valores médios de Δe , evidenciando que a

utilização de 30% de grãos tipo A neste rebolo melhorou as propriedades em termos de desgaste na região do perfil.

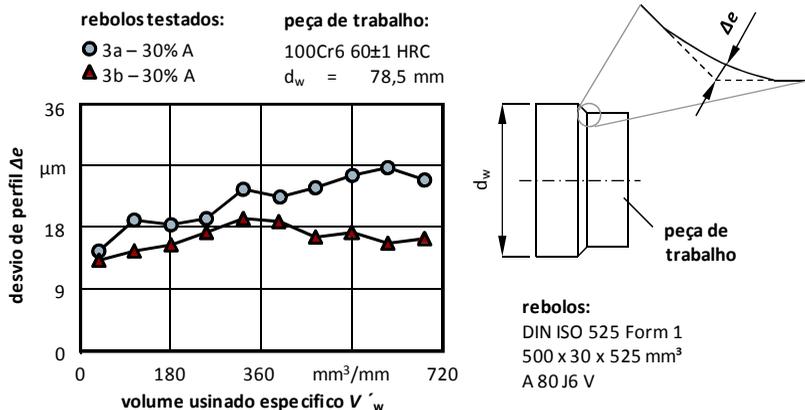


Figura 79 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo A.

A Figura 80 mostra os resultados de Δe correspondentes aos rebolos com 45% de grãos Tipo A em sua composição. É visualizado nesta figura semelhança de Δe nas curvas correspondentes a ambos os rebolos.

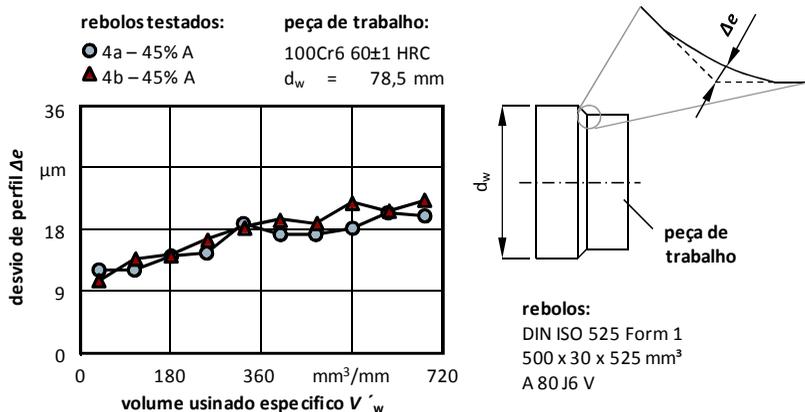


Figura 80 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.

Através da comparação entre as Figuras 80 e 77, percebe-se uma diminuição nos valores de Δe : em torno de 22% para o rebolo '4a' e em torno de 24% para o rebolo '4b'. Por este motivo, fica claro que o aumento da porcentagem de grãos Tipo A na composição do rebolo melhorou suas propriedades de desgaste, o qual não variou significativamente seu perfil ao longo do volume usinado específico.

A Figura 81 exibe os resultados de desvio de perfil nos corpos de prova gerados por rebolos compostos de 15% de grãos Tipo B. É observado nesta figura comportamento semelhante de ambas as curvas, as quais aumentam seus valores ao longo do volume usinado específico.

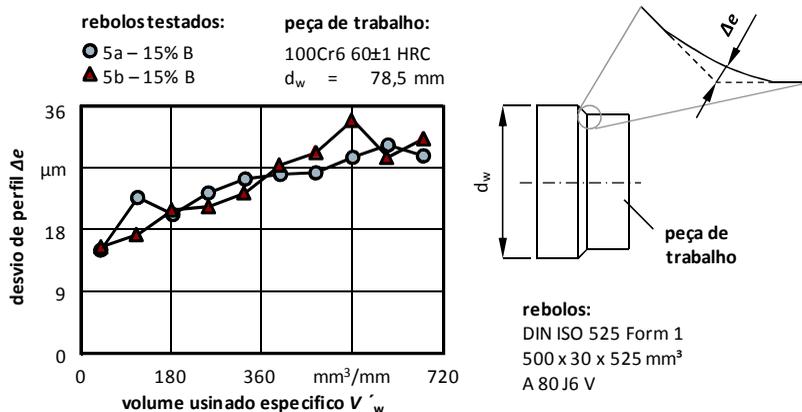


Figura 81 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.

A utilização de 15% de grãos Tipo B na composição dos rebolos elevou os valores de desvio de perfil mensurados, como se observa na comparação entre as Figuras 81 e 77. O rebolo '5a' aumentou os valores médios de Δe em torno de 19%. Já o rebolo '5b' elevou estes valores cerca de 9%.

A Figura 82 apresenta os resultados de desvio de perfil mensurados nos corpos de prova retificados com rebolos compostos de 30% de grãos Tipo B. São evidentes as diferenças nos resultados de Δe visualizados na Figura 82, por exemplo, a diferença entre os sextos pontos de ambas as curvas alcança 17 μm, sendo um valor significativo, uma vez que se avaliam desgaste de rebolos com mesma especificação.

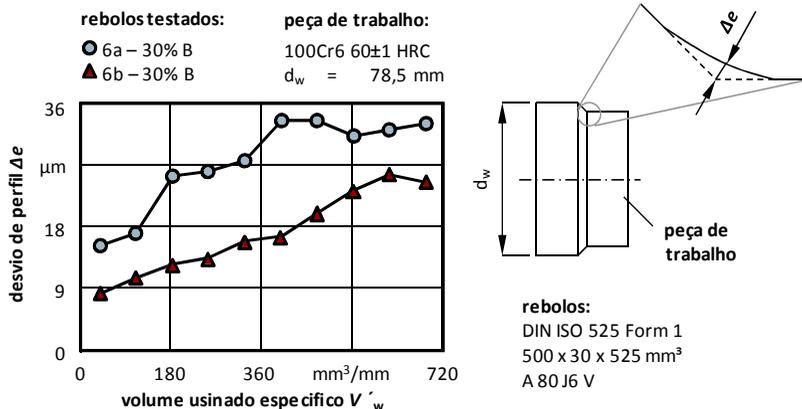


Figura 82 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 30% grãos Tipo B.

Quando se utilizou 30% de grãos Tipo B na composição dos rebolos avaliados, comparando-se as Figuras 82 e 77, é observado um aumento nos valores médios de Δe de 30% correspondentes ao rebolo '6a'. Por outro lado, houve diminuição destes valores em torno de 27% correspondentes ao rebolo '6b'. É constatado, portanto, que o aumento da porcentagem de grãos Tipo B na composição dos rebolos avaliados causa diferentes resultados de Δe , uma vez que melhorou as propriedades de manutenção de perfil em um dos rebolos e piorou em outro.

A Figura 83 mostra os valores de Δe obtidos por rebolos com 45% de grãos Tipo B em sua composição na usinagem dos corpos de prova.

É observado na Figura 83 um comportamento semelhante das curvas correspondentes ao desvio de perfil. Ambas as curvas aumentam levemente seus valores ao longo do volume usinado específico.

Comparando-se a Figura 83 com a Figura 77, é possível visualizar uma queda nos valores médios de Δe quando se utilizou 45% de grãos Tipo B nos rebolos, ou seja, esta porcentagem de grãos melhorou as propriedades relacionadas ao desgaste do rebolo na região do perfil. No caso do rebolo '7a', os valores médios de Δe diminuíram cerca de 8% e o rebolo '7b' esta diminuição foi de 7%.

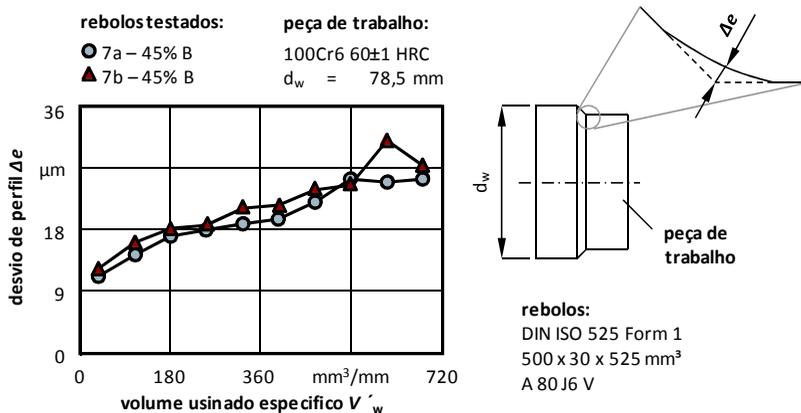


Figura 83 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - 45% grãos Tipo B.

A Figura 84 exibe os resultados de desvio de perfil obtidos dos corpos de prova usinados com 30% de grãos Tipo A e classe de dureza H [60].

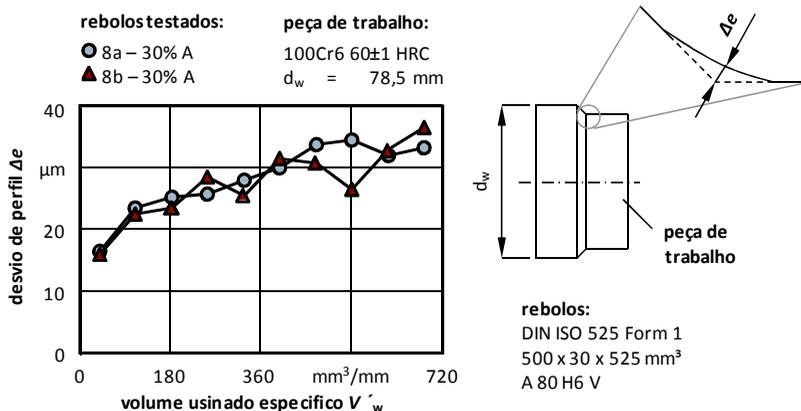


Figura 84 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo A, dureza H.

É observada na Figura 84 uma aleatoriedade nos valores correspondentes a curva do rebolo '8b' em comparação com os do rebolo '8a', entretanto ambos os rebolos aumentaram Δe ao longo do volume usinado específico. Comparando-se as Figuras 84 e 79 (rebolos

com classe de dureza J), observa-se um aumento nos valores médios do desvio de perfil mensurados: 28% para os valores correspondentes ao rebolo ‘8a’ e 66% para os valores correspondentes ao rebolo ‘8b’. Tal aumento nos valores é justificado pela diminuição da classe de dureza, onde neste caso se utilizaram rebolos moles.

A Figura 85 apresenta os resultados de desvios de perfil mensurados em corpos de prova usinados com rebolo de classe de dureza L [60] e 30% de grãos Tipo A.

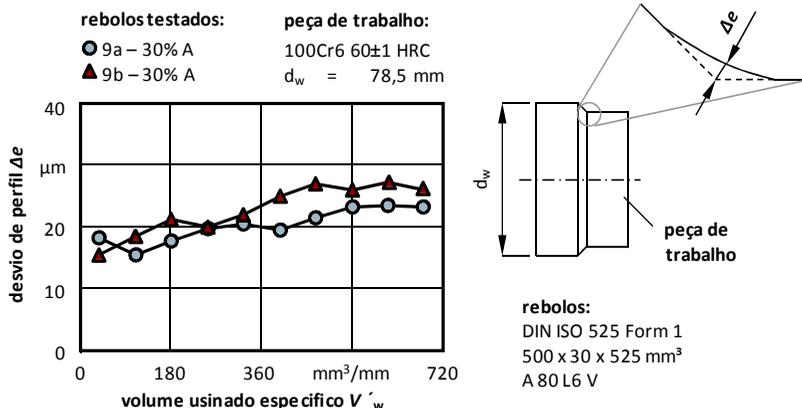


Figura 85 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo A, dureza L.

É observado nesta figura um comportamento semelhante das curvas, pois não há diferenças significativas entre os pontos das curvas. Observa-se também uma menor inclinação das curvas, o que indica menores valores dos desvios de perfil ao longo do volume usinado específico.

Considerando as Figuras 85 e 79 (com rebolos de classe de dureza J), observa-se que o rebolo ‘9a’ gerou menores valores médios de Δe em aproximadamente 15%. Contudo, com o rebolo ‘9b’ obteve-se aumento dos valores médios de Δe em 26%. Este fato enfatiza as diferenças causadas pelo aumento da classe de dureza no desvio de perfil mensurado.

A Figura 86 exhibe os resultados de Δe em corpos de prova retificados com rebolos de classe de dureza H [60] e 3% de grãos Tipo B em sua composição.

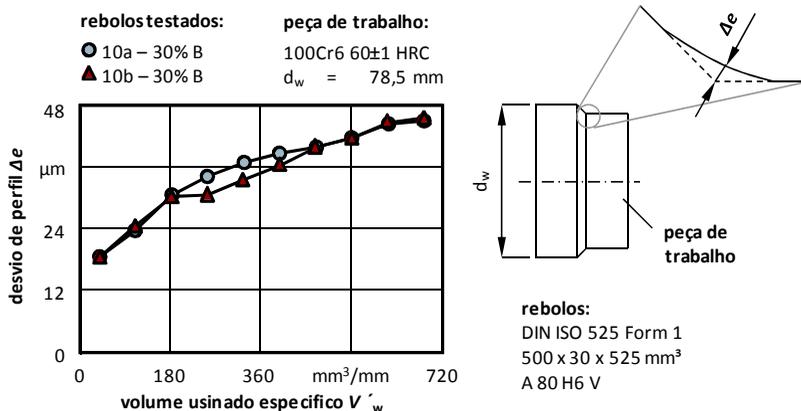


Figura 86 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo B, dureza H.

É observada na Figura 86 a sobreposição das curvas na maioria dos pontos e um aumento acentuado nos valores de Δe ao longo do volume usinado específico por ambas as curvas. Comparando-se a Figura 86 com a 82 (rebolos com classe de dureza J), é observado um aumento nos valores do desvio de perfil gerados por ambos os rebolos. O rebo 10a aumentou os valores médios de Δe em torno de 29% nos corpos de prova, e o rebo 10b aumentou em 108% estes valores.

A Figura 87 exibe os resultados de desvio de perfil gerados nos corpos de prova por rebolos de classe de dureza L e 30% de grãos Tipo B em sua composição. Neste caso os valores médios de Δe correspondentes ao rebo 11a sofreram queda de aproximadamente 21% (comparação entre as Figuras 82 e 87).

No caso do rebo 11b, os valores médios de Δe aumentaram em torno de 27%. Ao considerar a variação de classes de dureza J para L, em rebolos com a mesma composição de grãos, observa-se que houve melhora das propriedades de manutenção do perfil para o rebo do fabricante 'a' e piora destas propriedades para o fabricante 'b'.

Em virtude disto, é possível observar, através dos experimentos realizados nesta seção, que ferramentas com mesmas especificações e de diferentes fabricantes apresentaram diferentes comportamentos de desvio de perfil nos corpos de prova usinados.

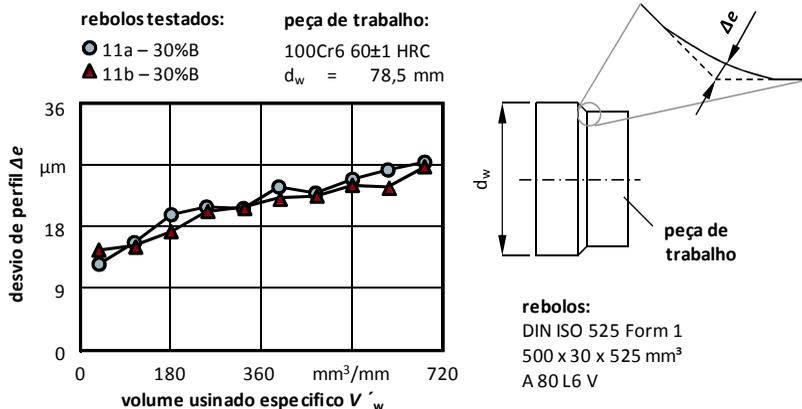


Figura 87 - Desvio de perfil em relação ao volume usinado específico - grãos Tipo B, dureza H.

4.3.2 Grãos de diferentes fornecedores

Os resultados de desvio de perfil apresentados a seguir correspondem a rebolos de mesmo fabricante, o qual utilizou grãos de fornecedor padrão e de fornecedor alternativo na composição dos rebolos.

A Figura 88 apresenta os resultados de desvio de perfil obtidos em corpos de prova usinados com rebolos compostos de 100% de coríndon branco. Devido à composição destes rebolos, os resultados são adotados como referência para as demais comparações.

É possível visualizar na Figura 88 o comportamento distinto das curvas de Δe , onde o rebolo '1b' gerou menores valores de desvio de perfil e, portanto, possui melhores características de manutenção de perfil ao longo do volume usinado específico.

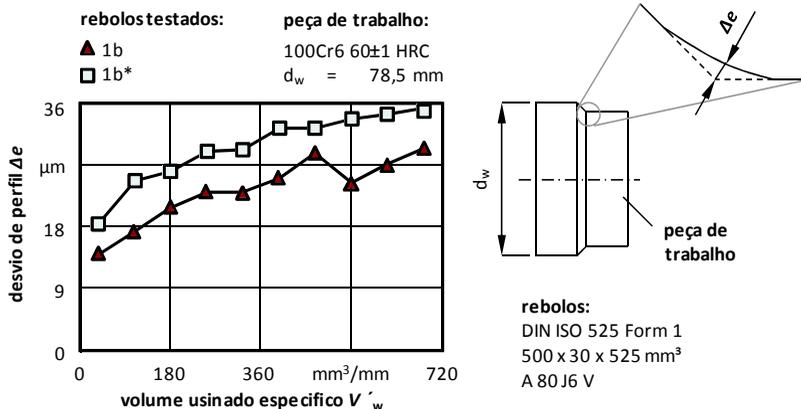


Figura 88 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 100% coríndon branco.

A Figura 89 mostra os resultados de desvio de perfil mensurados nos corpos de prova usinados com rebolos compostos de 15% de grãos Tipo A em sua composição.

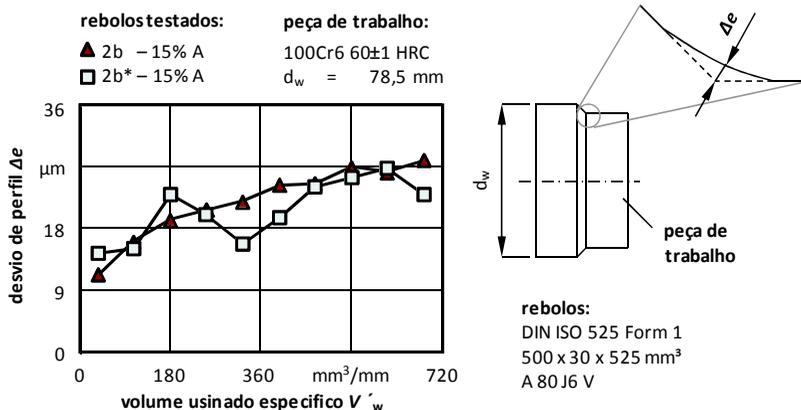


Figura 89 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.

É observado nesta figura um comportamento aleatório dos valores referentes ao rebolo '11b*'. Mesmo com este comportamento, é possível verificar um aumento dos valores desta curva ao longo do volume usinado específico.

Através da comparação entre as Figuras 89 e 88 (variam-se as percentagens de grãos Tipo A em 15% para estes casos), há uma diminuição nos valores de desvios de perfil apresentados por ambos os rebolos. No caso do rebolo '2b', houve a diminuição em torno de 6% nos valores médios de Δe , e para o rebolo '2b*' a diminuição foi mais acentuada, cerca de 30%.

Apesar destas diferenças apresentadas pela utilização de 15% deste tipo de grão, houve sobreposição de alguns pontos das curvas da Figura 89, o que revela um comportamento semelhante dos rebolos em termos do seu desvio de perfil.

A Figura 90 expressa os resultados de Δe obtidos em corpo de provas usinados por rebolos com 30% de grãos Tipo A em sua composição.

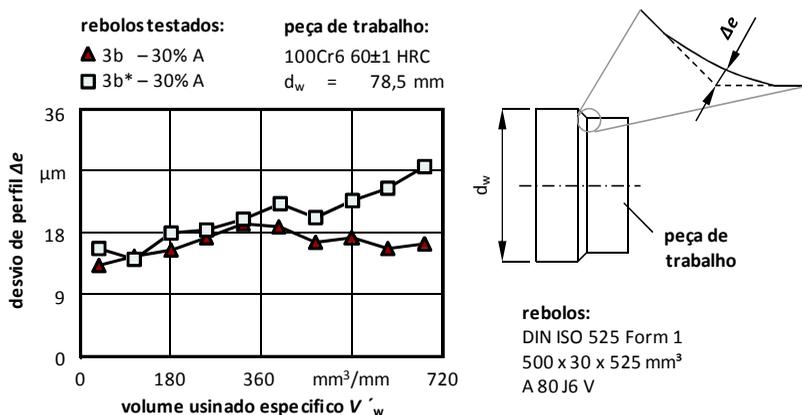


Figura 90 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 30% grãos Tipo A.

Nota-se na Figura 90 o comportamento crescente da curva correspondente ao rebolo '3b*' ao longo do volume usinado específico. A curva correspondente ao rebolo '3b' aumenta seus valores nos pontos iniciais e posteriormente diminui levemente seus valores. Assim, é perceptível que este rebolo apresenta melhores características de desgaste de perfil.

Ao comparar a Figura 90 com a Figura 88, observa-se uma diminuição dos valores de Δe , consequência da utilização de 30% de grãos Tipo A na composição dos rebolos. No caso do rebolo '3b' a queda nos valores médios de Δe foi de 27%, e de 30% nos valores correspondentes ao rebolo '3b*'.

A Figura 91 apresenta os valores de desvio de perfil dos corpos de prova usinados com rebolos com 45% de grãos Tipo A em sua composição. É observada nesta figura a sobreposição da maioria dos pontos das curvas, expressando assim o comportamento do desvio de perfil semelhante gerados por estes rebolos.

Em relação à utilização de 45% de grãos Tipo A na composição das ferramentas de corte, comparando-se as Figuras 91 e 88, é possível observar a diminuição dos valores médios de Δe gerados pelos respectivos rebolos. O rebolo '4b' diminuiu os valores médios de desvio de perfil em torno de 24% enquanto que o rebolo '4b*' diminui estes valores em torno de 45%.

Diante disto, pode-se afirmar que o aumento da porcentagem de grãos Tipo A do fornecedor alternativo gera variação mais acentuada nos valores médios de Δe , quando comparado à porcentagem de grãos do fornecedor padrão.

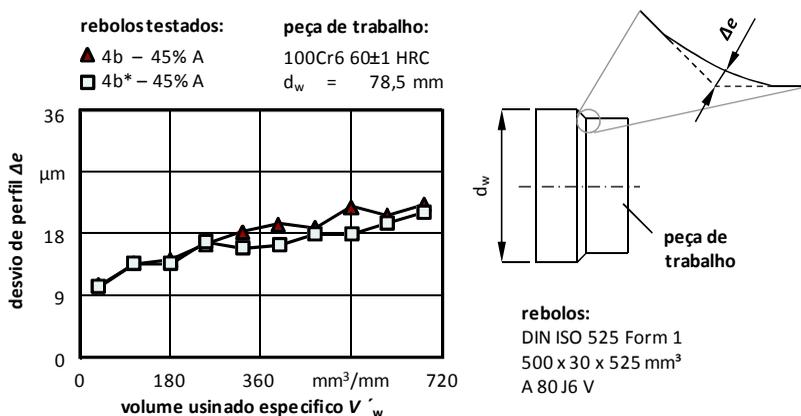


Figura 91 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.

A Figura 92 apresenta os resultados de desvio de perfil correspondentes à usinagem com os rebolos compostos de 15% de grãos Tipo B com grãos de diferentes fornecedores.

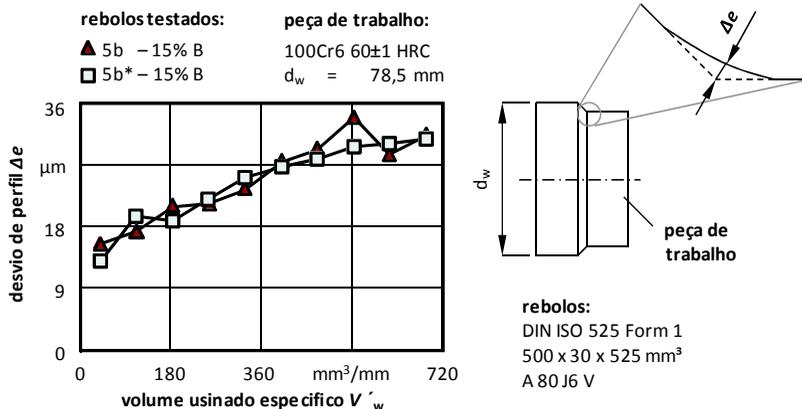


Figura 92 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.

É observado um comportamento semelhante de ambas as curvas nesta figura, as quais aumentam seus valores ao longo do volume usinado específico. Quanto à utilização de 15% de grãos Tipo B, comparando-se as Figuras 88 e 92, observa-se que esta porcentagem aumentou os valores médios de Δe em torno de 9% nos corpos de prova usinados com o rebole '5b*'. Por outro lado, houve diminuição dos valores médios de desvio de perfil em torno de 17% correspondentes ao rebole '5b*'.
 A Figura 93 mostra os resultados de Δe obtidos na usinagem dos corpos de prova com rebolos compostos de 30% de grãos Tipo B. Como pode ser observado nesta figura, o rebole '6b' gerou uma curva com menores valores de desvio de perfil. A diferença entre os valores médios das curvas chega a 30%, lembrando que estes rebolos possuem mesma especificação.

Considerando o uso de 30% de grãos Tipo B, ao comparar a Figura 93 com a Figura 79, percebe-se uma diminuição dos valores médios de Δe gerados pelos rebolos analisados. No caso do rebole '6b', esta diminuição foi de cerca de 30%, e para o rebole '6b*' a diminuição dos valores de Δe foi em torno de 17%.

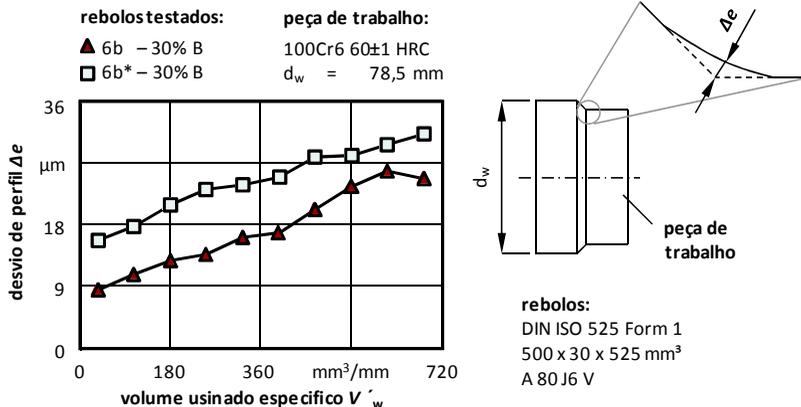


Figura 93 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.

Na Figura 94 são exibidos os resultados de desvio de perfil gerados pela usinagem com rebolos compostos de 45% de grãos Tipo B. É visualizada a sobreposição da maior parte dos pontos das curvas nesta figura, o mostra a semelhança nos desvios de perfil destes rebolos.

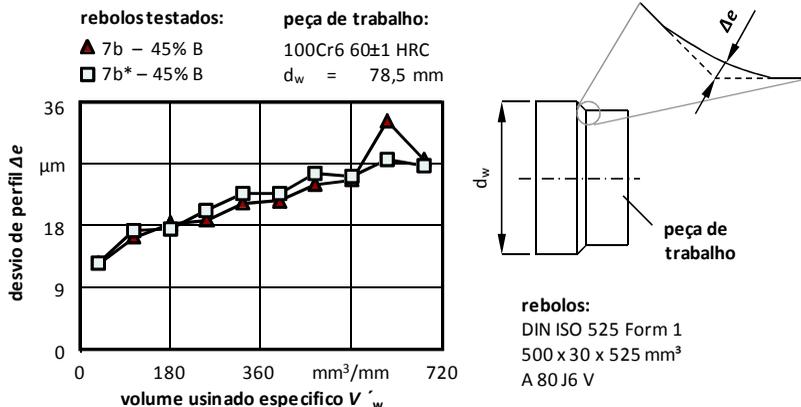


Figura 94 - Desvio de perfil versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo B.

Pela comparação entre as Figuras 79 e 94, observa-se a queda nos valores médios de desvio de perfil dos corpos de prova usinados,

consequência da utilização de 45% de grãos Tipo B na composição das ferramentas de corte.

Diante destes resultados é possível afirmar que o aumento das porcentagens dos tipos de grãos avaliados diminui o desvio de perfil nos rebolos na maioria dos casos. É interessante ressaltar que rebolos de mesmo fabricante, que utilizam grãos de fornecedores distintos, apresentam comportamentos de desvio diferentes, ou seja, somente a mudança de fornecedor já se reflete nas propriedades de desgaste dos rebolos.

4.4 DANOS TÉRMICOS

Nesta seção são apresentados os resultados correspondentes aos danos térmicos gerados nos corpos de prova. Para determinação deste parâmetro, optou-se pela utilização do método de ruído de Barkhausen, devido a suas características de aplicação (descritas na Seção 2.10.1 deste trabalho).

Em virtude do ruído de Barkhausen ser um método de ensaio rápido e não-destrutivo, uma avaliação sobre a potencialidade de utilização deste método em processo foi efetuada.

Os resultados do método de ruído de Barkhausen podem ser convertidos em informações sobre tensões residuais e danos térmicos, uma vez que estão intimamente relacionados. Contudo, neste trabalho somente os valores diretos de RMS são utilizados para avaliar a correlação dos resultados do método de Barkhausen e as diferentes áreas termicamente afetadas.

A Figura 95 apresenta os resultados obtidos através do método de ruído de Barkhausen mensurados nos corpos de prova, usinados pelos rebolos com 100% de coríndon branco em sua composição. Devido a esta composição, estes valores são adotados como referência para as comparações seguintes.

Nesta figura é observado um comportamento semelhante das curvas, tanto para as medições no perímetro como no perfil, salvo os primeiros pontos das curvas correspondentes ao rebolo '1a'. Entretanto, os resultados foram inesperados: os valores dos parâmetros magnéticos (*mp*) mensurados no perímetro foram superiores aos mensurados no perfil. Normalmente os danos térmicos deveriam ser maiores sobre o perfil, uma vez que as maiores solicitações mecânicas e térmicas são aplicadas a este local em virtude da geometria do corpo de prova.

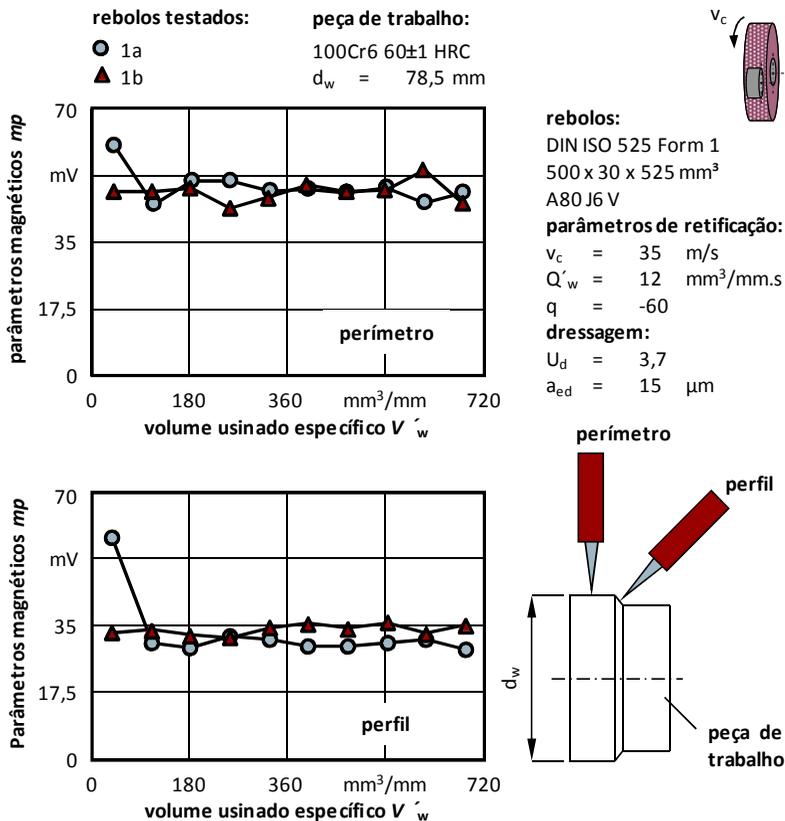


Figura 95 - Parâmetros magnéticos versus volume usado específico - 100% coríndon branco.

A Figura 96 mostra os resultados das medições do método de ruído de Barkhausen correspondentes a usinagem com rebolos compostos de 15% de grãos Tipo A nos corpos de prova. Além dos maiores valores mensurados no perímetro dos corpos de prova, observa-se um comportamento distinto entre as curvas do perímetro e o perfil.

No caso do perfil, há um comportamento semelhante de ambas as curvas, e na região do perímetro as curvas possuem uma diferença acentuada ao longo do volume usinado específico. Estes resultados sugerem que houve maiores danos térmicos gerado pelo rebolo '2b' na região do perímetro, e danos térmicos aproximadamente iguais, para ambos os rebolos, na região do perfil.

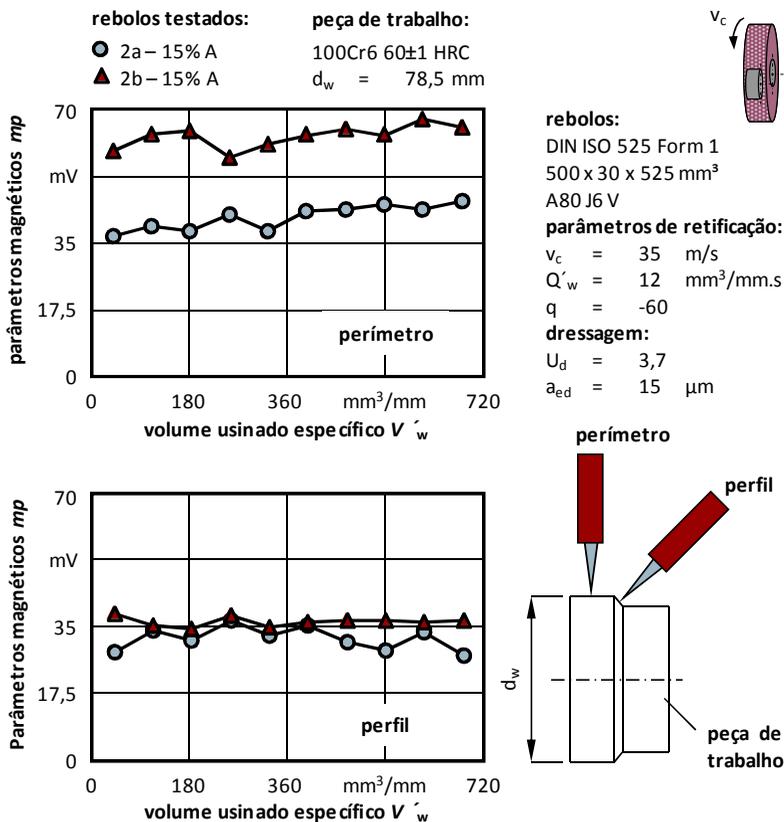


Figura 96 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 15% grãos Tipo A.

A Figura 97 exibe as medições dos parâmetros magnéticos (mp) pelo ruído de Barkhausen nos corpos de prova retificados por rebolos com 30% de grãos Tipo A em sua composição.

Na figura 97 é observado o comportamento semelhante das curvas correspondentes a região do perfil para ambos os rebolos, e também os maiores valores de mp nesta região dos corpos de prova.

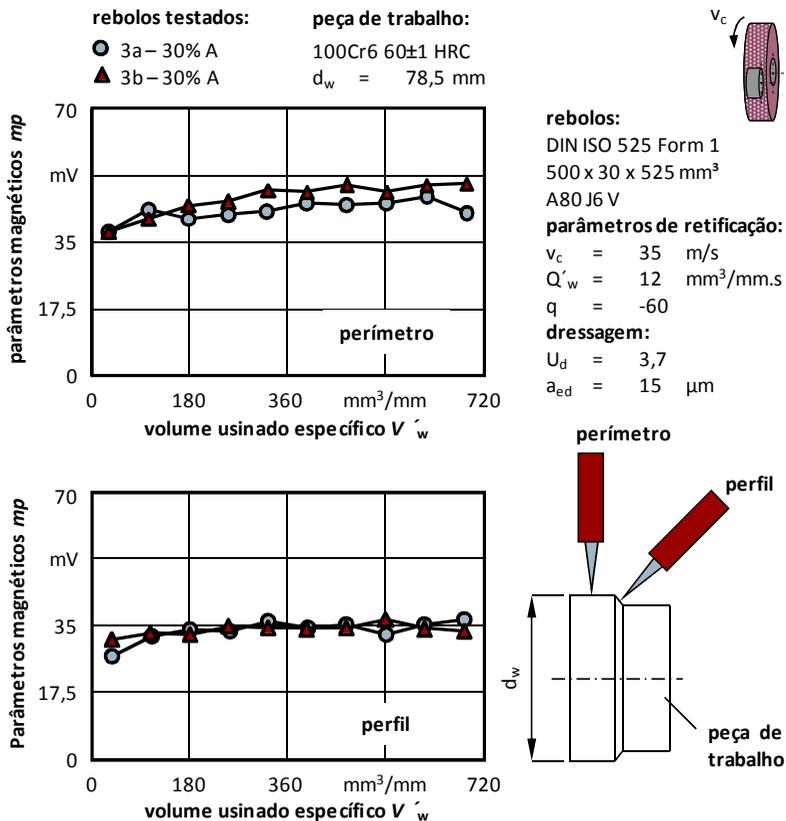


Figura 97 - Parâmetros magnéticos versus volume usado específico - 30% grãos Tipo A.

Na Figura 98 são apresentadas as medições dos parâmetros magnéticos (mp) em corpos de prova usinados com rebolos compostos de 45% de grãos Tipo A, através do método de ruído de Barkhausen.

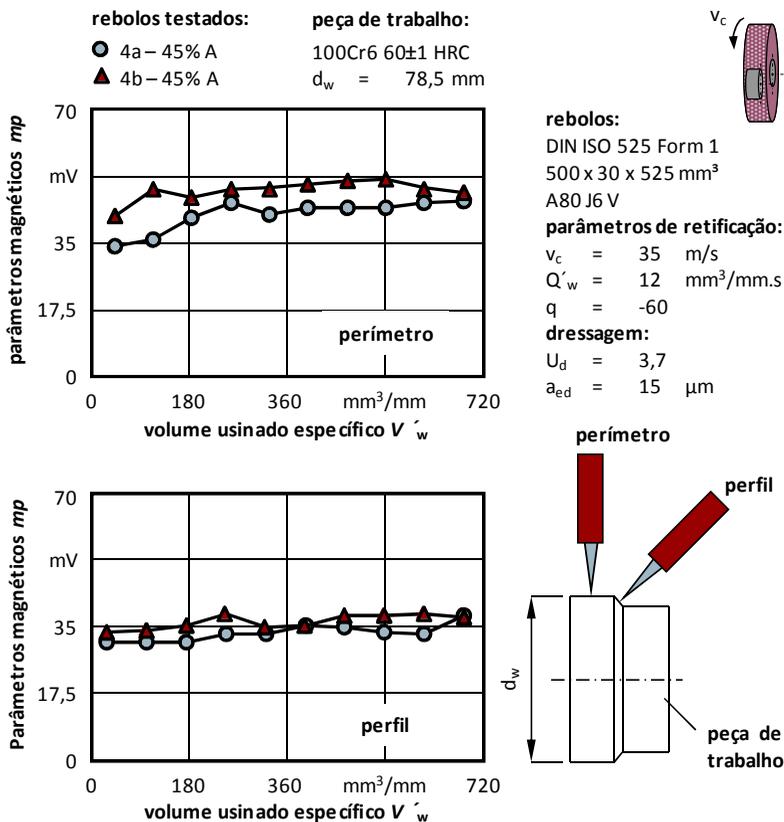


Figura 98 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo A.

Na Figura 99 são mostrados os resultados do método de ruído de Barkhausen, mensurados nos corpos de prova usinados com rebolos compostos de 15% de grãos Tipo B.

Observa-se nesta figura que os valores das mp nas curvas geradas pelo rebolo '5a' foram menores, sugerindo que este rebolo causou menores danos térmicos nos corpos de prova. Entretanto, como nos casos anteriores, os valores de mp mensurados na região do perfil foram menores que na região do perímetro, para ambos os rebolos.

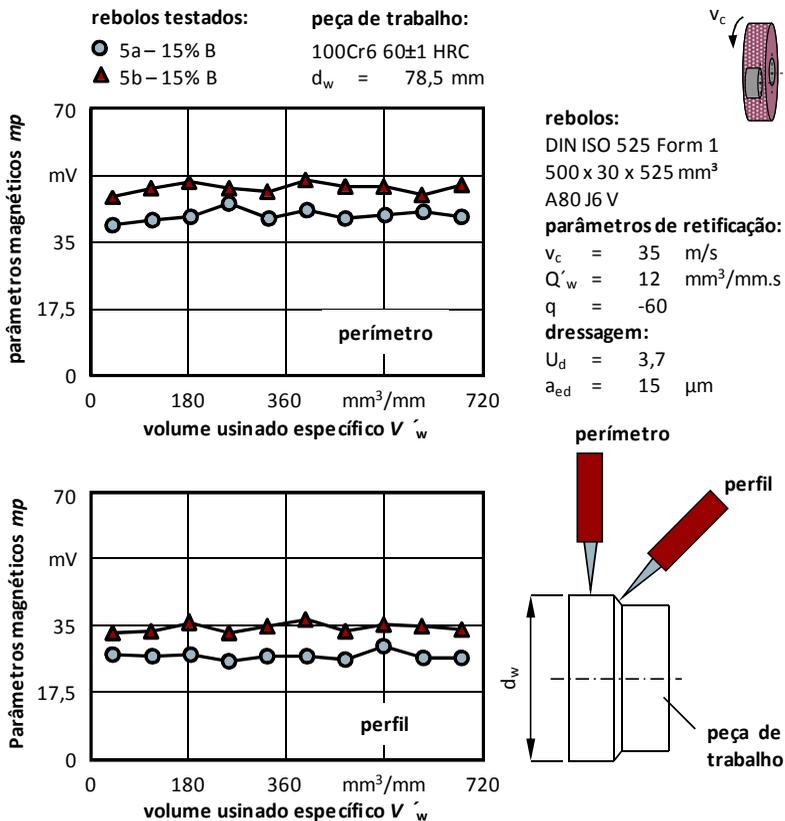


Figura 99 - Parâmetros magnéticos versus volume usado específico - 15% grãos Tipo B.

Os resultados dos parâmetros magnéticos (mp) obtidos nos corpos de prova usinados por rebolos compostos de 30% de grãos Tipo B são exibidos na Figura 100.

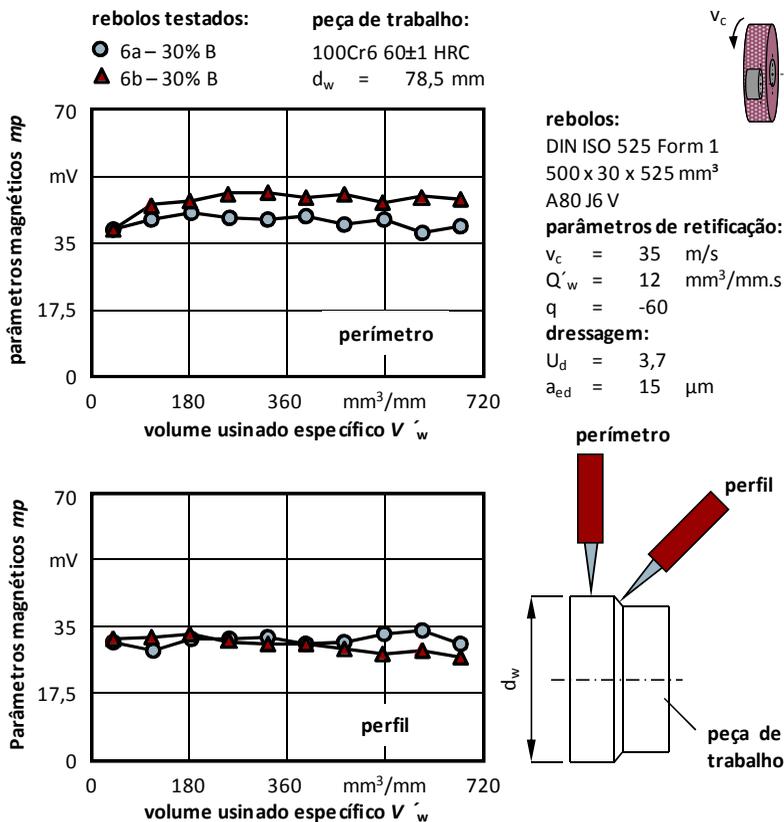


Figura 100 - Parâmetros magnéticos versus volume usado específico - 30% grãos Tipo B.

Na Figura 101 são apresentados os resultados do método de ruído de Barkhausen correspondentes à usinagem dos corpos de prova pelos rebolos compostos de 45% de grãos Tipo B.

Na maioria das medições de mp efetuadas na região do perímetro dos corpos de prova houve sobreposição de resultados, o que dificulta a conclusão sobre os danos térmicos em relação às diferentes composições dos rebolos.

É difícil observar qualquer relação entre os valores dos parâmetros magnéticos com diferentes danos térmicos e tensões residuais gerados por diferentes rebolos. Desta forma, os resultados do método de ruído de Barkhausen não foram conclusivos por si só e,

portanto outro método foi necessário para obter uma conclusão mais adequada.

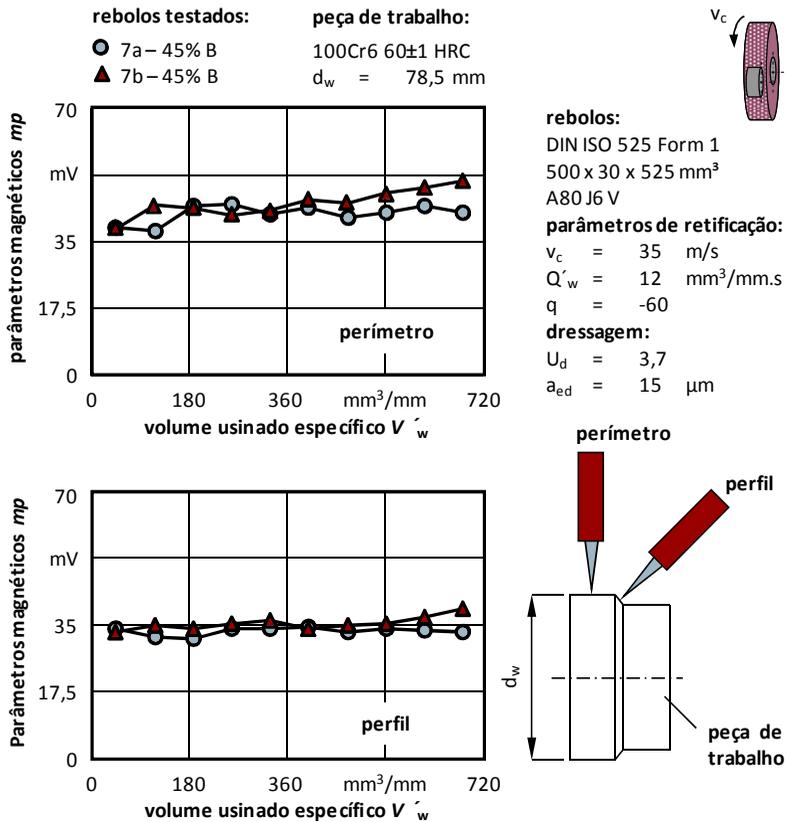


Figura 101 - Parâmetros magnéticos versus volume usinado específico - 45% grãos Tipo B

Neste trabalho, o ataque metalográfico nital foi aplicado a algumas amostras a fim de encontrar uma melhor compreensão sobre o comportamento dos danos térmicos. Para tanto, amostras usinadas na faixa de $V'_w = 32 \text{ mm}^3/\text{mm}$ foram submetidas ao procedimento de nital e posteriormente efetuadas medições pelo método de ruído de Barkhausen.

O ataque metalográfico nital é capaz de identificar a maioria das áreas termicamente afetadas, destacando-as com diferentes cores. Os

valores dos parâmetros magnéticos no corpo de prova foram então mensurados, nas diferentes áreas coloridas, para encontrar uma correlação entre os mesmos.

A Figura 102 (a) exibe uma amostra após os procedimentos do método de nital [53, 54]. De acordo com este método, as áreas de cor laranja indicam as áreas mais termicamente afetadas, enquanto que as cores cinzas representam as áreas menos afetadas. Como podem ser observadas, nesta figura, as áreas do perfil e as ultraperiféricas apresentaram os maiores danos térmicos, de acordo com o método.

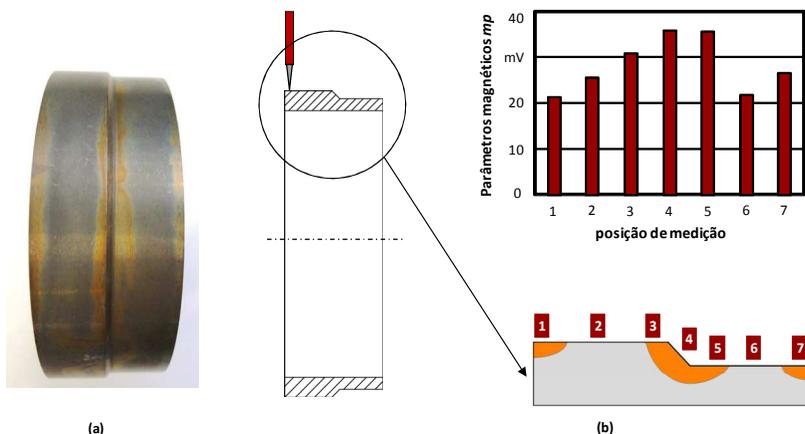


Figura 102 - Medição do ruído magnético de Barkhausen posteriormente ao ataque metalográfico nital.

Sete diferentes regiões foram determinadas para ter seus danos térmicos mensurados pelo método de ruído de Barkhausen. Cada região teve seus valores de parâmetros magnéticos medidos em três locais diferentes, a fim de obter um valor médio. A Figura 102 (b) apresenta os pontos, em um esboço esquemático do corpo de prova, onde cada medição foi efetuada e os resultados dos parâmetros magnéticos.

Um aumento em torno de 50% pode ser observado nas três primeiras colunas da Figura 102 (b). Os maiores valores de parâmetros magnéticos foram obtidos nas regiões 4 e 5 desta figura. Torna-se claro que os valores dos parâmetros magnéticos apresentam muita flutuação, o que pode explicar o comportamento dos resultados dos ensaios anteriores.

Outra provável razão para o comportamento dos resultados são as condições das medições efetuadas. Os ensaios posteriores foram executados em condições controladas de laboratório, coletando-se mais dados de uma única amostra, e mesmo assim, os resultados dos parâmetros magnéticos apresentaram uma flutuação considerável. Os ensaios anteriores foram realizados em condições de trabalho (em processo), logo após a usinagem, em menos pontos de medição. Diante disto, os resultados anteriores podem ter maiores flutuações ainda, sendo inaceitavelmente imprecisos.

Finalmente, outra razão possível para o comportamento dos resultados são os ângulos das medições do ruído de Barkhausen e o procedimento químico realizado na peça, que pode ter mascarado alguns resultados.

No estudo realizado por Silva Júnior *et al.* (2007) [63], foi concluído que o ensaio de materiais baseado na análise do ruído magnético deve ser realizado sob condições padronizadas, mantendo-se constante o valor do campo magnético, o afastamento da sonda à superfície examinada, a direção das realizações das medições e o acabamento da superfície do material. Todos estes fatores tornam complexa utilização deste método.

Diante disto, considerando as condições e propósitos de um ensaio rápido para determinação de danos térmicos em processo, a utilização do método de ruído de Barkhausen não atende às expectativas desta pesquisa, uma vez que não é possível manter todas as condições padronizadas de laboratório em ambiente fabril.

É preciso otimizar os atuais ensaios de danos térmicos, o procedimento de medição ou até mesmo utilizar métodos mais confiáveis, a fim de ser possível implementar a avaliação de danos térmicos em processo na indústria.

4.5 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE GUMES CINEMÁTICOS EM REBOLOS CONVENCIONAIS

Vários projetos e estudos têm sido efetuados visando desenvolver métodos de ensaios para avaliar as reais características de um rebolo, contudo o sucesso quanto à previsão do comportamento no processo foi limitado. Diante desta necessidade, um transdutor de emissão acústica foi configurado para uma metodologia de ensaio rápido, que fornece informações sobre o estado dos gumes cinemáticos da ferramenta de corte em processo.

Através desta metodologia é possível obter informações sobre a topografia do rebolo na máquina-ferramenta, permitindo que a Engenharia de Processos avalie a situação atual do rebolo e, baseado nas especificações fornecidas pelo fabricante, efetuar possíveis correções dos parâmetros de retificação no programa de retificação, possibilitando ganhos pela minimização de refugos e maior estabilidade do processo de retificação.

4.5.1 Descrição da metodologia

O objetivo do método de ensaio é avaliar em processo o número de gumes da ferramenta que entram em contato com a superfície de corte na peça. Basicamente o sistema de medição é composto de uma ponta de diamante, um dispositivo de fixação, um transdutor de emissão acústica de fixação magnética conectado ao sistema DIETTEL DM 6000 e um *laptop*. A Figura 103 mostra uma representação esquemática da bancada.

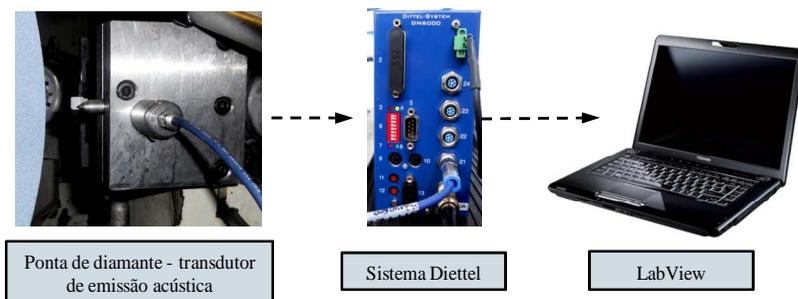


Figura 103 - Esquemática da bancada para avaliação de gumes cinemáticos.

Os sinais de emissão acústica são amostrados no domínio do tempo. Em termos gerais, o sinal bruto de emissão acústica (EA_{raw}) é transformado em RMS pelo sistema DIETTEL, visualizado pela interface do *software* LabView, sendo finalmente analisado em um algoritmo no *software* Matlab R208 (conforme descrito na Seção 3.7 deste trabalho).

Nestes ensaios a interferência entre a ponta de diamante e o rebolo é mantida na faixa entre 0 e 20 μm . Os resultados destes experimentos são avaliados segundo a distribuição da intensidade do

sinal de emissão acústica sobre a superfície do rebolo para diferentes condições: após o dressagem e ao longo do volume usinado específico.

Considerando os fenômenos termomecânicos que ocorrerem na execução dos ensaios e os tempos de execução, foi adotada a penetração passiva de $2\ \mu\text{m}$. Basicamente o ensaio consiste nos seguintes passos:

- Determina-se o primeiro contato da ponta de diamante no rebolo. Posteriormente os demais avanços são comandados numericamente (com velocidade de $0,03\ \text{mm/min}$). A faixa em que se situa o primeiro contato é entre 0 e $2\ \mu\text{m}$. Este contato é efetuado aproximadamente na metade da região de corte (espessura) do rebolo.

- A ponta de diamante avança então de 2 em $2\ \mu\text{m}$ até atingir uma profundidade de $20\ \mu\text{m}$, conforme a Figura 104. De acordo com Oliveira *et al.* (2004) [64], as deformações elásticas que ocorrem em grãos abrasivos situam-se em interferências de $2\ \mu\text{m}$, após isto ocorrem deformações plásticas, ou seja, ocorre o processo de dressagem. Deste modo, tem-se a avaliação dos gumes cinemáticos desde o regime elástico até o processo de dressagem. Cada comprimento de contato da ponta de diamante é relacionado ao diâmetro do rebolo, adotado como $0,3\%$ do perímetro do rebolo.

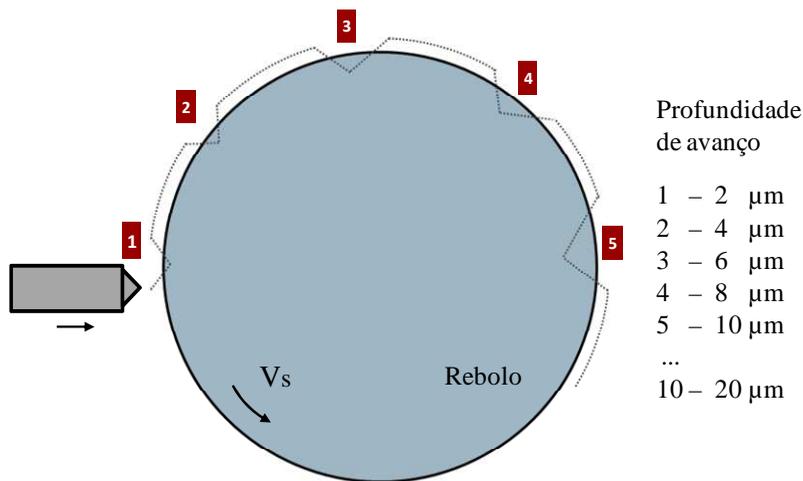


Figura 104 - Esquemática das profundidades de avanço da ponta de diamante no rebolo.

- É efetuado o passo anterior em outros dois pontos na região de corte do rebolo, distanciando-se os pontos de leitura em 300 μm . Desta forma, obtém-se um panorama do comportamento dos gumes cinemáticos em diferentes pontos da região de corte ao longo da penetração passiva.

- Analisam-se os sinais coletados no algoritmo do *software* Matlab R208, desenvolvido para este método.

A análise de sinal de emissão acústica não deve ser efetuada através da comparação direta entre os fenômenos estudados, devido à sua alta frequência de aquisição. Devem-se introduzir parâmetros que possam realizar essa relação sem prejuízos ao que se estuda. Alguns destes parâmetros podem ser o desvio padrão, curtose, função auto-correlação, entre outros parâmetros estatísticos [65].

Neste trabalho foram utilizados filtros dinâmicos, que consideram o valor médio de cada conjunto de dados, minimizando assim parte da incerteza do primeiro contato que ocorre na faixa entre 0 e 2 μm .

Todos os contatos da ponta de diamante com o rebolo devem descrever uma curva, que representa a quantidade de gumes cinemáticos detectados para cada profundidade. O algoritmo efetua a plotagem dos sinais de emissão acústica referentes a cada profundidade avançada pela ponta de diamante no rebolo em um único diagrama.

Esta curva em si não apresenta grande utilidade. Contudo quando comparada com outras curvas oriundas de diferentes condições (de dressagem, por exemplo), pode fornecer informações valiosas sobre o estado de desgaste do rebolo durante o processo.

A velocidade de rotação do rebolo adotada para este experimento foi de 1 m/s. Foi utilizada a menor velocidade possível da máquina-ferramenta em virtude da alta frequência de aquisição de dados (50 kHz), a qual aumenta em velocidades maiores.

Primeiramente é efetuada a metodologia com o rebolo dressado. É obtida assim uma curva que relaciona o número de picos dos sinais de emissão acústica obtidos com a profundidade de avanço da ponta de diamante no rebolo. Esta curva permite observar o comportamento da intensidade de sinal de emissão acústica e correlacioná-los com os gumes cinemáticos ao longo da profundidade da qual a ponta de diamante avança no rebolo.

Ao longo do avanço da ponta de diamante no rebolo, a intensidade de sinal aumenta, pelo fato não ocorrer mais somente a leitura topográfica como também a quebra de grãos do rebolo. Quando este sinal apresenta um comportamento constante, ocorre o processo de dressamento correspondente à profundidade. A Figura 105 esquematiza

a intensidade de sinal gerada pelo avanço da ponta de diamante no rebolo em diferentes profundidades.

A metodologia é repetida posteriormente a alguns ciclos de retificação. Obtém-se então uma curva que mostra o comportamento dos gumes cinemáticos após o desgaste do rebolo. A comparação entre as curvas permite obter um panorama do comportamento de desgaste dos gumes cinemáticos ao longo do volume usinado específico.

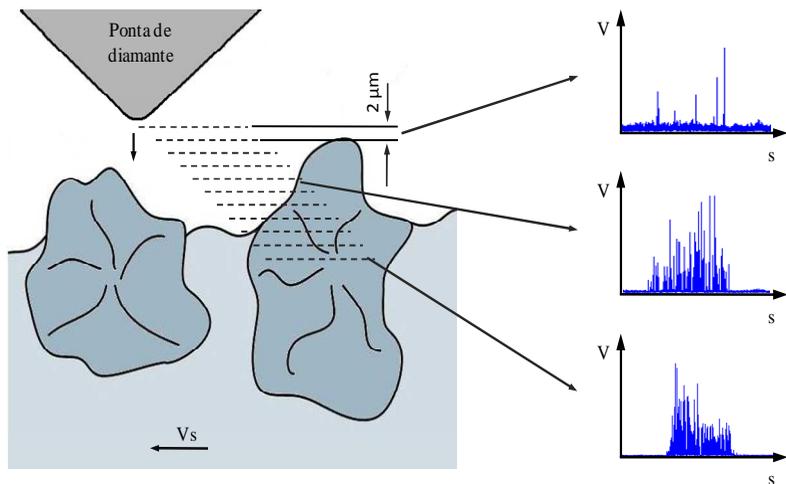


Figura 105 - Esquemática dos sinais de emissão acústica proveniente das leituras ao longo da profundidade de avanço.

Através desta comparação, é possível avaliar com mais propriedade o momento mais propício para efetuar a dressagem do rebolo e assim evitar a queima superficial do componente no processo de retificação. A seguir são apresentados os resultados referentes ao método desenvolvido.

4.5.2 Evolução da metodologia

A metodologia desenvolvida teve como base os experimentos efetuados por Gomes (2001) [30]. Foi estabelecida a base para os ensaios comparativos, definindo-se os parâmetros do processo de retificação e o processo de dressamento. Em termos gerais a metodologia foi definida de acordo com o esquema mostrado pela Figura 106.

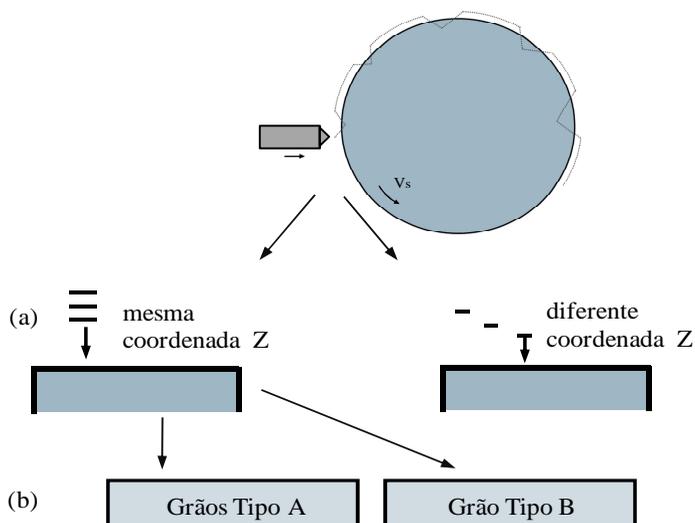


Figura 106 - Estratégias de medição ensaiadas na metodologia de avaliação de gumes cinemáticos.

Conforme a Figura 106 (a), foram exploradas duas formas de penetração passiva: variando-se a coordenada Z a cada avanço e utilizando a mesma coordenada Z. O principal objetivo deste procedimento foi verificar se ocorrem mudanças topográficas no reboło ao se utilizar a mesma coordenada, em virtude de ocorrer eventuais sobreposições de leituras nesta situação.

Na Figura 106 (b) é exibida a estratégia na qual se variam rebołos com os diferentes tipos de grãos, utilizando-se a estratégia de penetração na mesma coordenada Z da máquina-ferramenta.

Estes ensaios foram executados utilizando-se a mínima quantidade de fluido lubrificante (somente na região de contato da ponta de diamante com o reboło), de modo a evitar eventuais desgastes da ponta durante os experimentos. A taxa de retificação utilizada nestes ensaios foi de $Q'_w = 12 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$.

4.5.3 Resultados da metodologia

A Figura 107 apresenta os resultados dos experimentos efetuados avançando-se a ponta de diamante na mesma coordenada Z da máquina-ferramenta.

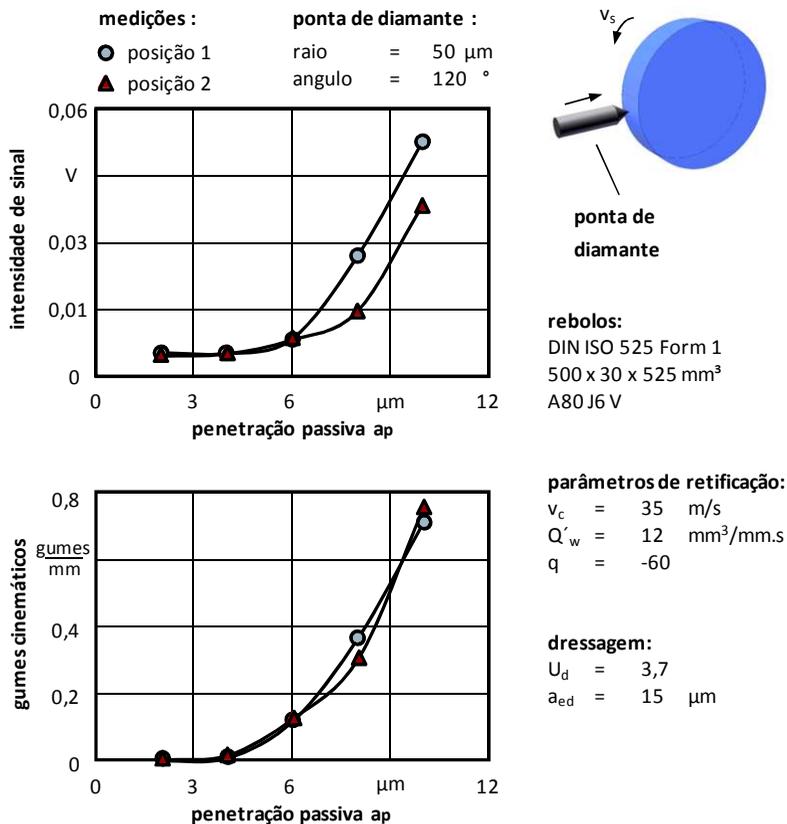


Figura 107 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - mesma coordenada Z da máquina-ferramenta.

A Figura 107 mostra o resultado de duas medições na região de corte (espessura) do rebolo, permitindo visualizar um comportamento semelhante nos resultados destas medições. A Figura 108 exibe os resultados referentes aos experimentos onde foram utilizadas diferentes coordenadas Z da máquina-ferramenta na penetração passiva.

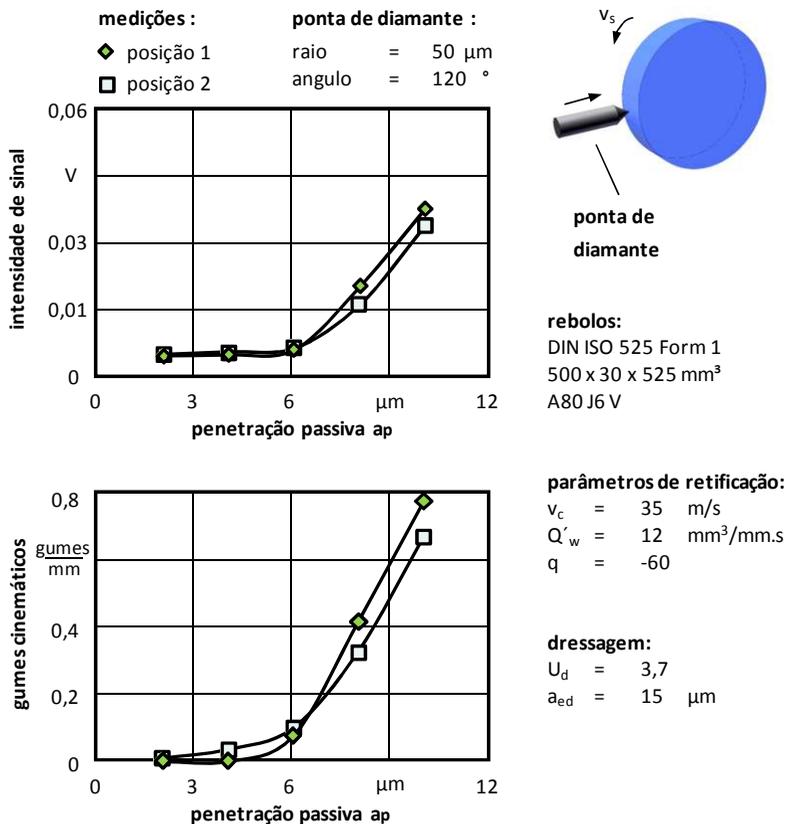


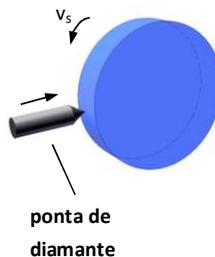
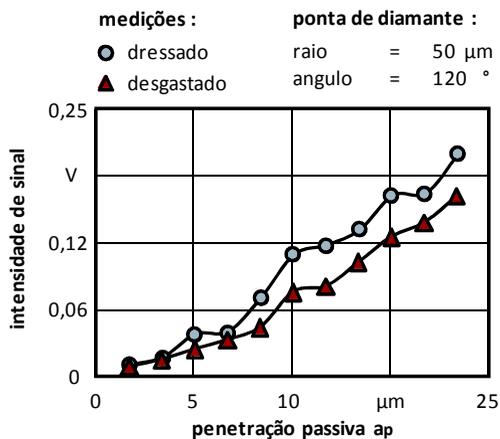
Figura 108 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - diferente coordenada Z da máquina-ferramenta.

Comparando-se as Figuras 106 e 107 não se verificam diferenças consideráveis nas curvas correspondentes. Em virtude dos resultados destas duas estratégias não apresentarem diferenças consideráveis, adotou-se a utilização da mesma posição Z a cada avanço devido ao menor tempo de execução, o qual passou de aproximadamente 20 minutos para 8 minutos.

A Figura 109 apresenta os resultados dos experimentos efetuados utilizando-se o rebolo composto com 30% de grãos abrasivos Tipo A. São observadas nesta figura as tendências apresentadas pelas curvas de número de gumes cinemáticos: na condição dressada o número de

gumes aumenta de maneira acentuada ao longo da penetração passiva em comparação a condição desgastada.

Isto revela que na condição desgastada não ocorrem mais tantas colisões da ponta com o rebolo, pelo fato de não haver mais gumes protusos, como na condição dressada, refletindo assim o comportamento de desgaste do rebolo. Observa-se também um comportamento aproximadamente linear da curva correspondente a condição desgastada, enquanto que a curva correspondente à condição dressada não apresenta esta característica.



rebolos:

DIN ISO 525 Form 1
 500 x 30 x 525 mm^3
 A80 J6 V - 3a-30% A

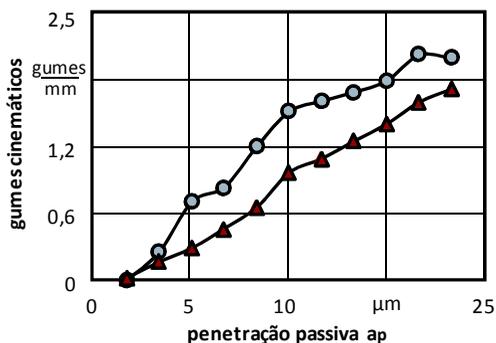


Figura 109 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - grãos Tipo A.

Deste modo é possível deduzir que quanto mais desgastado estiver o rebolo, mais linear e com menor coeficiente angular estará a curva.

A Figura 110 exibe os resultados obtidos utilizando-se um rebolo com 30% de grãos Tipo B em sua composição. Como pode ser observado nesta figura, ocorreu a sobreposição das curvas correspondentes ao número de grãos cinemáticos para ambas as condições.

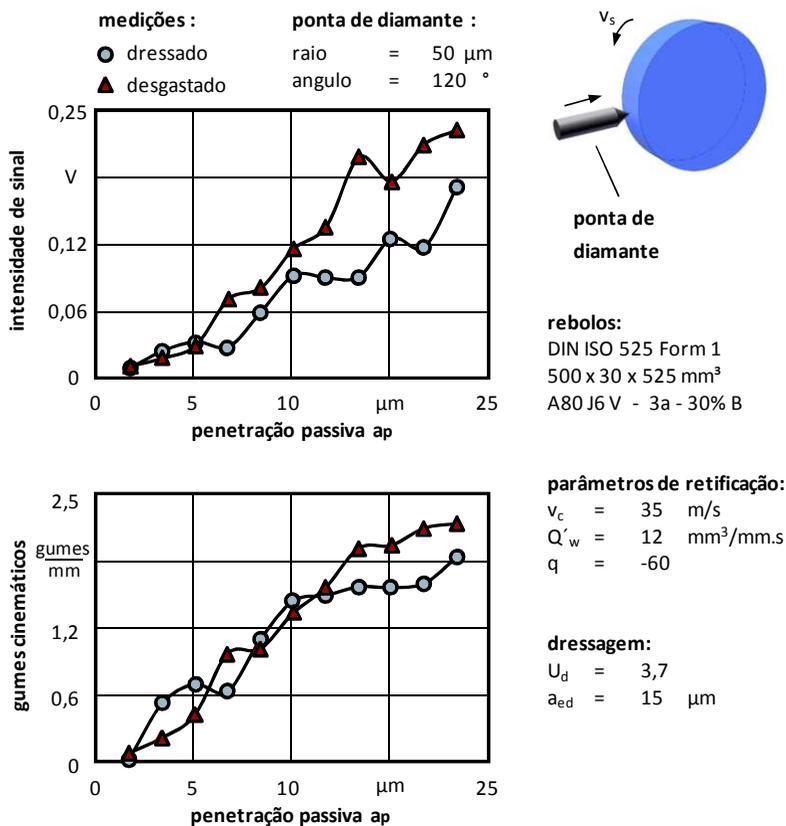


Figura 110 - Número de gumes cinemáticos no rebolo - grãos Tipo B.

Este comportamento reflete o resultado do processo de dressagem em rebolos com grãos Tipo B, os quais são mais difíceis de efetuar este processo, apresentando maior aleatoriedade de gumes cinemáticos ao

longo da penetração passiva em virtude das suas características de desgaste. Contudo, é possível verificar que a condição desgastada apresenta uma tendência linear e não tão complexa do que a condição de dressagem.

Através da análise das curvas correspondentes a condição de dressagem é possível verificar que a intensidade de sinal aumenta ao longo da penetração passiva até em torno de 15 μm . Posteriormente, há uma pequena diminuição da intensidade. Este fenômeno pode estar intimamente relacionado ao fato ocorrer totalmente o processo de dressagem pela ponta de diamante.

A comparação entre as Figuras 109 e 110 permite visualizar a diferença entre os comportamentos de desgaste dos Tipos de grãos A e B. A curva do número de gumes cinemáticos correspondente ao grão Tipo A possui valores menos aleatório em relação à curva do grão Tipo B, que apresenta um comportamento mais complexo. As curvas de ambos os tipos de grãos das condições de dressagem apresentam uma tendência linear em relação às condições do rebolo desgastado.

4.5.2.1 Medição da ponta de diamante

Em virtude do possível desgaste da ponta de diamante por fenômenos termomecânicos durante o contato da ponta de diamante com o rebolo, foram efetuadas medições da ponta antes e depois dos experimentos. A Figura 111 apresenta o relatório de medição da ponta efetuada posteriormente aos ensaios.

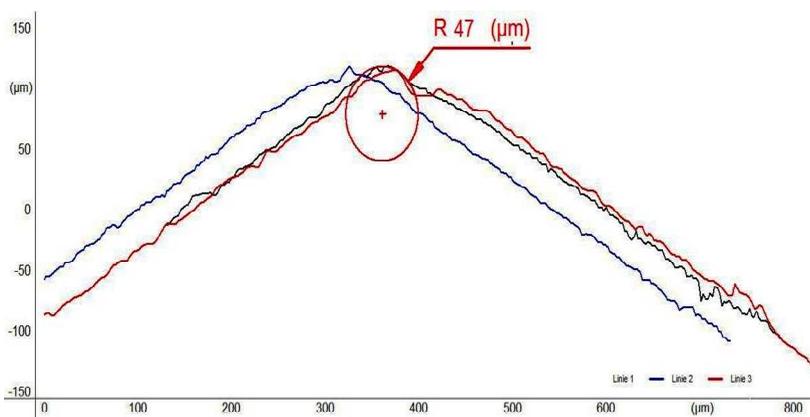


Figura 111 - Relatório de medição da ponta de diamante do sistema de medição óptico GFM MicroCAD Pico.

A ponta de diamante foi projetada com raio de 50 μm . Após os experimentos, verificou-se nas medições que não houve o desgaste da ponta, como pode ser observado no relatório de medição (Figura 111).

Desta forma, como não foram detectados desgastes significativos durante os contatos com o rebolo, garante-se que as medições efetuadas com a ponta não sofrem influência de possíveis desgastes do diamante.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Vinte e nove rebolos convencionais foram utilizados nos experimentos desta pesquisa, variando-se a porcentagem de diferentes tipos de grãos abrasivos, classe de dureza, fabricantes das ferramentas e fornecedores de grãos. Com estes experimentos conclui-se que:

- O tipo de grãos abrasivo de óxido de alumínio exerce influência sobre as forças de usinagem. O grão Tipo B demanda mais forças que o grão Tipo A.

- Rebolos com mesma especificação de diferentes fabricantes geram resultados de trabalho distintos e demandam diferentes valores de força de corte.

- O aumento da porcentagem de grãos abrasivos do Tipo A diminui as forças necessárias ao processo de corte. Esta diminuição é destacada quando se utilizam 30% destes grãos na composição do rebolo.

- O aumento da porcentagem de grãos abrasivos do Tipo B aumenta as forças de usinagem. Este aumento é acentuado quando se utiliza 45% deste tipo de grão na composição dos rebolos.

- O aumento da porcentagem de ambos os tipos de grãos analisados neste trabalho influenciam o processo de desgaste inicial dos grãos. Pelos experimentos efetuados fica evidente que este processo foi prolongado ao longo do volume usinado específico quando se aumentou as porcentagens dos respectivos tipos de grãos abrasivos na composição dos rebolos.

- A classe de dureza influencia diretamente os valores de força de usinagem. Fica claro que classes mais moles de rebolos demandam menores forças de corte e classes mais duras aumentam estes valores. Contudo, a análise dos rebolos de diferentes fabricantes, variando-se apenas a classe de dureza, revela que não há diferenças consideráveis nas forças de corte demandadas.

- Analisando as forças de corte mensuradas nos rebolos de mesmo fabricante com grãos de diferentes fornecedores, não há diferenças consideráveis nos resultados obtidos. Praticamente todos os valores apresentaram diferenças de apenas 2% nos valores médios mensurados.

- O tipo de grão abrasivo exerce influência sobre os parâmetros de rugosidade R_a e R_z . Na maioria dos experimentos, o grão Tipo A

gerou menores valores destes parâmetros, ou seja, melhores resultados de trabalho.

- Rebolos com mesma especificação de diferentes fabricantes geraram qualidades de superfícies distintas. Considerando-se somente os diferentes fabricantes, as diferenças entre valores de rugosidade gerados por rebolos de mesma especificação atingiram valores de até 23%.

- A utilização de 45% de ambos os tipo de grãos abrasivos na composição dos rebolos geram os menores valores dos parâmetros de rugosidade em comparação as demais porcentagens. Ainda, as melhores qualidades de superfície foram geradas pelos rebolos compostos com grãos Tipo A.

- Os grãos Tipo A diminuíram os valores de rugosidade ao variar as classes de dureza dos rebolos de H para L, ou seja, rebolos de classe mais dura com grãos Tipo A geraram melhor qualidade de superfícies. Contudo os grãos do Tipo B aumentaram estes valores quando se variou as classes de dureza dos rebolos. Com isto, fica evidente que a utilização de grãos Tipo A e classe de dureza L é mais interessante quando se deseja melhor acabamento.

- Considerando os rebolos de mesmo fabricante com grãos abrasivos de diferentes fornecedores não se observaram diferenças consideráveis nos parâmetros de rugosidade mensurados, exceto nos valores médios do parâmetro R_z gerados pelos rebolos com 30% de grãos Tipo B, onde a diferença entre valores atingiu 30%.

- Os rebolos compostos com grãos abrasivos do fornecedor padrão geraram melhor qualidade de superfícies em comparação aos do fornecedor alternativo.

- A maioria dos rebolos apresentou um comportamento aproximadamente linear crescente ao longo do volume usinado específico nos parâmetros de rugosidade quando se variou somente a porcentagem dos diferentes grãos abrasivos na composição dos rebolos.

- O tipo e a porcentagem de grãos abrasivos possuem influência direta no desvio de perfil dos rebolos analisados. Os rebolos adotados como referência (com 100% de coríndon branco) apresentaram valores mais elevados. A adição dos grãos abrasivos, tanto do Tipo A quanto B, reduziu estes desvios, uma vez que melhorou as propriedades de manutenção do perfil dos rebolos.

- Os desvios de perfil mensurado nos rebolos de mesma especificação e diferentes fabricantes revelam as maiores diferenças entre resultados em comparação às demais grandezas avaliadas. A maioria dos valores médios apresenta diferenças superiores a 10% entre desvios.

- Diante dos resultados de desvio de perfil é possível constatar que o aumento das porcentagens dos tipos de grãos avaliados diminuiu o desvio de perfil nos rebolos na maioria dos casos.

- Constata-se que o aumento da porcentagem de grãos Tipo A teve maior influência na diminuição dos desvios de perfil dos rebolos em relação aos grãos do Tipo B. Desta forma, a utilização de grãos Tipo A é aconselhada para retificação de forma.

- Ao que tange à variação da classe de dureza, fica evidente que rebolos de classe H aumentam os desvios de perfil do rebole e que classes L diminuem estes desvios.

- A utilização de grãos de diferentes fornecedores exerce influência nos desvios de perfil mensurados nos rebolos de mesmo fabricante. Através dos experimentos efetuados fica evidente que os grãos do fornecedor alternativo diminuíram os desvios de perfil em maior proporção do que os grãos do fornecedor padrão. Os menores desvios de perfil são ainda apresentados pelos rebolos compostos de grãos Tipo A do fornecedor padrão.

- Devido às grandezas acima avaliadas possuir uma forte relação de compromisso entre si, a determinação da melhor composição do rebole e respectivo fabricante depende da aplicação e resultado de trabalho esperado, uma vez que cada composição apresenta tanto aspectos positivos e negativos em termos de consumo e qualidade do resultado de trabalho final.

- Em relação à utilização de grãos de diferentes fornecedores na composição de rebolos de mesmo fabricante, os resultados atingidos revelam que os rebolos compostos com grãos do fornecedor padrão apresentaram melhores resultados de trabalho do que os rebolos com grãos do fornecedor alternativo. Assim, a utilização de rebolos com grãos do fornecedor padrão são mais aconselháveis.

- Os resultados dos danos térmicos obtidos pelo método do ruído de Barkhausen apresentaram uma complexa sobreposição dos valores, causados por fatores como tensões residuais e dureza, os quais devem ser contabilizados. Isto é necessário para otimizar o procedimento de medição, como também efetuar experimentos complementares para geração de dados complementares a fim de alcançar resultados mais conclusivos.

- Ensaio complementares mostraram que as flutuações nos resultados estavam presentes mesmo em condições de laboratório. Deste modo, não se atingiu um bom levantamento dos danos térmicos nos componentes retificados nos experimentos efetuados em processo.

- É necessário otimizar os atuais ensaios de danos térmicos, o procedimento de medição ou desenvolver novas metodologias para determinação de danos térmicos a fim de implementar a determinação dos danos térmicos em ambiente industrial.

Foi desenvolvida uma metodologia de avaliação dos gumes cinemáticos em rebolos convencionais em processo com a concepção de ensaio rápido. Com estas atividades conclui-se que:

- A intensidade de sinal está relacionada com o desgaste do rebolo. Portanto a análise destes sinais pode ser utilizada para descrever o comportamento do desgaste do rebolo.

- Considerando que se analisam sinais de emissão acústica, não é possível definir de maneira precisa se o sinal corresponde à leitura de um grão abrasivo, parte de um grão ou ainda do ligante. Contudo o número de colisões da ponta de diamante com o rebolo está relacionado com os números de gumes cinemáticos. Aumentando-se o número de colisões consequentemente aumentam os sinais de emissão acústica e, portanto, o número de gumes cinemáticos.

- As curvas geradas pelo método proposto apresentam uma tendência do comportamento de desgaste do rebolo. A comparação entre as curvas correspondentes as condições dressada e desgastada gera um panorama sobre o comportamento da topografia ao longo da vida do rebolo. É possível determinar um panorama deste comportamento para diferentes composições de rebolos convencionais.

- Na análise dos rebolos com diferentes tipos de grãos abrasivos, foi verificado que há mais gumes ativos após o processo de dressamento nos rebolos compostos de grãos Tipo A. Através dos experimentos efetuados com o rebolo composto com grãos Tipo B, ficou evidente que o comportamento dos gumes cinemáticos neste material é de caráter estocástico na condição de dressagem.

- As curvas correspondentes ao número de gumes cinemáticos das condições desgastadas apresentam uma tendência de comportamento aproximadamente linear ao longo da penetração passiva. Já as curvas das condições do rebolo dressado revelam um aumento acentuado do número de gumes nas penetrações iniciais, e posteriormente um comportamento mais complexo.

- As flutuações dos resultados podem ser oriundas de erros geométricos na máquina-ferramenta, possível desbalanceamento do rebolo, interações termomecânicas entre diamante e rebolo, e características dos próprios grãos abrasivos. É interessante salientar que os experimentos são efetuados na faixa que abrange tanto as

deformações elásticas e plásticas dos grãos, portanto mínimas alterações nestas variáveis podem refletir na flutuação dos resultados.

- O método desenvolvido apresenta potencial para aplicação industrial. Com os devidos aperfeiçoamentos, complementos na estratégia de medição e automatização do processamento dos dados serão possíveis diminuir ainda mais os tempos de execução da metodologia desenvolvida.

Através dos resultados alcançados nesta pesquisa, é possível desenvolver um modelo do comportamento dos tipos de grãos abrasivos avaliados neste trabalho, pela consolidação das informações dos valores característicos de força, parâmetros de rugosidade, danos térmicos e comportamento do desgaste gerado pelo método desenvolvido.

Sugere-se efetuar o estudo das grandezas analisadas nesta pesquisa variando-se a taxa de retificação, visando estudar o comportamento dos valores característicos de forças, parâmetros de rugosidade e desvio de perfis gerados por rebolos em diferentes taxas de retificação.

Pode-se melhorar a resolução da metodologia do ensaio rápido para avaliação de gumes cinemáticos em rebolos convencionais. Uma sugestão é utilizar outras estratégias, como por exemplo, efetuar o avanço da ponta de diamante na profundidade de 0 a 20 μm em um único passe. Este procedimento reduziria ainda mais os tempos de ensaio.

Outro fator que pode otimizar o método desenvolvido é o estudo do comportamento do processo de dressagem, com o objetivo de verificar quais os impactos deste processo sobre o balanceamento e características das ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS

- [1] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen**. 2. ed. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- [2] HOLZ, R.; SAUREN, J. **Schleifen mit Diamant und CBN**. 1. ed. Deutschland: Winter Diamantwerkzeuge Bornitridwerkzeuge, 1988.
- [3] LEE, J. et al. **Modern Manufacturing. Mechanical Engineering Handbook**. Ed. Frank Kreith. Boca Raton: CRC Press LLC. 1999. 124 p.
- [4] BOARON, A. **Determinação do posicionamento relativo entre rebolo e peça com o auxílio da emissão acústica**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 2009. 167 p.
- [5] SENA, L. **Avaliação do sistema de reposicionamento do carro porta-rebolo de uma retificadora cilíndrica com guias hidrostáticas comandada numericamente**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 2007. 141 p.
- [6] MESQUITA, N. G. M. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 1992.
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN IN ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastchnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit**. Berlin. 2009. 27 p.
- [8] ROSA, L. C. **Acabamento de superfícies - Rugosidade da Superfície**. Apostila de curso. Oficina Mecânica de Automação. UNESP.

[9] SOUZA, A. G. O. **Monitoramento da dressagem no processo de retificação**. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UNESP. Bauru. 2009. 72 p.

[10] WUNDER, S. **Modelagem e simulação da microtopografia de superfícies retificadas com ferramentas estruturadas**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 2006. 106 p.

[11] HASSUI, A. **Estudo da Vibração durante a corte e centelhamento na retificação cilíndrica**. Tese de Doutorado. Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP. 2002. 179 p.

[12] MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. 1. ed. Boca Raton FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2007. 629 p.

[13] BERTALAN, C. **Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas-ferramenta convencionais**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 1997. 213 p.

[14] SAINT GOBAIN. **Abrasivos**. Disponível em <<http://www.sgabrasivos.com.br/portugues/abrasivos/default.asp>> Acesso em 17 Maio. 2011.

[15] TELECURSO 2000 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO. **Preparação de máquina**. Disponível em <<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/55proc3.pdf>> Acesso em 26 Março. 2011.

[16] JACKSON, M. J.; MILLS, B. Micro scale Wear of Vitrified Abrasive Materials. **Journal of Material Science**. v. 39. 2004. p. 2131 - 2143.

[17] SEVERIANO, A. C. **Retificação de aços com rebolos de CBN ligado galvanicamente sobre corpo de alumínio**. Dissertação de

mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 2002. 140 p.

[18] WEINGAERTNER, E. **Influência do sistema de alimentação de fluido lubrificante na retificação com rebolos de CBN.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 2009. 173 p.

[19] LEME, S. P. L. **Dressamento por toque de rebolos de CBN.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 1999. 156 p.

[20] CHEN, X.; ROWE, W. B.; CAI, R. Precision Grinding using CBN Wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 42. p. 585 - 593. 2002.

[21] GUO, C.; WU, V.; VARGHESE, V.; MALKIN, S. Temperatures and Energy Partition for Grinding with Vitrified CBN Wheels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.** v. 48, n. 1. p. 247 - 254. 1999.

[22] WANG, J. P. **Avaliação da retificação com rebolos de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica de São Carlos. USP. 2008. 123 p.

[23] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II.** 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC. 1992. 314 p.

[24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51385:** Schmierstoffe; Kühlsmierstoffe; Begriffe. Berlin. 1991. 2 p.

[25] BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.** v. 48, n. 2. p. 581 - 597. 1999.

[26] BASTOS, F. **Retificação cilíndrica externa para diferentes condicionamentos do rebole de nitreto de boro cúbico.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 1999.

- [27] TABORGA, A. R. M. **Análise e monitoramento da retificação do ferro fundido nodular com rebolos convencionais**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 2002. 147 p.
- [28] WALTER, A.; JANSSEN, R. Pro und Kontra: KSS - Emulsion und KSS - Öle? **ABAG Tagungsband Kühlschmierer und Reinigen**. v. 15. 1996. s. 83 - 87.
- [29] DA SILVA, J. C. L. **Retificação cilíndrica externa de mergulho do aço 100Cr6 com rebolo 38A120MVS**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC. 1999.
- [30] GOMES, F. J. J. **Identificação em processo de mecanismo de desgaste de rebolos**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica de São Carlos. USP. 2001.
- [31] TÖNSHOFF, H. K.; KARPUSCHEWSKI, B.; MANDRYSCH, T. Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunites. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v. 47, n. 2. 1998. p. 651 - 668.
- [32] SCHÜHLI, L. A. **Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica de São Carlos. USP. 2007. 119 p.
- [33] MEOLA, T.; DUARTE M.; BACCI, M. S. Estimativa de forças no processo de tonrneamento via monitoramento de sinais de vibração. **17º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**. FEMEC/UFU. Uberlândia. 2007. 10 p.
- [34] LANÇONI, P. N.; BOSO, D. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Estudo comparativo da força de corte no processo de retificação. **12º Simpósio de Engenharia de Produção**. UNESP. Bauru. 2005. 12 p.
- [35] HARA, C. M. **Uma contribuição para o monitoramento de retificação cilíndrica de mergulho**. Tese de doutorado. Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP. 1999. 178 p.
- [36] DORNFELD, D. A.; LIU J. J. Abrasive texturing and burnishing process monitoring using acoustic emission. **CIRP Journal of**

Manufacturing Science and Technology. v. 42, n. 1. 1993. p. 337 - 340.

[37] FRANÇA, T. V. **Estudo das vibrações em peça de baixa rigidez no processo de retificação cilíndrica externa de alta velocidade utilizando rebolo de CBN**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica de São Carlos. USP. 2009. 184 p.

[38] SREEJITH, P. S.; NGOI B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**. 2000. p. 287 - 291.

[39] TÖNSHOFF, H. K.; INASAKI, I. **Sensors in manufacturing, Sensors Applications**. v. 1. Wiley and Sons. 2001. 383 p.

[40] INASAKI, I. Sensor Fusion for monitoring and controlling grinding processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 15. 1999. p. 730 - 736.

[41] BYRNE, G.; DORNFELD, D.; INASAKI, I.; KETTELER, G.; KÖNIG, W.; TETI, R. Tool condition monitoring (TCM) - The status of research and industrial application. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v. 44, n. 2. 1995. p. 541 - 567.

[42] MARGOT, Y. D. R. **Strategische Signalerfassung mit Piezoelektrischen Sensoren für die Prozessüberwachung in der Zerspanung**. Doktor Arbeit. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. ETH. 2005. 149 s.

[43] TÖNSHOFF, H. K.; FREIMUTH, T.; BECKER, J.C. Process monitoring in grinding. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v. 51, n. 2. 2002. p. 1 - 21.

[44] FUSSE, R. Y. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial. UNESP. 2005. 118 p.

[45] GARSTKA, T. The influence of product thickness on the measurements by Barkhausen Noise method. **Journal of Achievements**

in materials and Manufacturing Engineering, v. 27, n. 1. 2008. p. 47 - 50.

[46] SERNA-GIRALDO, C. P. **Avaliação de juntas soldadas de aços carbon através do Ruído Magnético de Barkhausen**. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Politécnica de São Paulo. USP. 2007. 140 p.

[47] GÜR, C. H.; YELBAY, H. I.; CAM, I. **Prediction of surface Residual stresses in Butt - Welded steel plates by magnetic Barkhausen Noise Analysis**. The Open Access NDT Database. Disponível em <<http://www.ndt.net/>> Acesso em 27 Jan. 2011

[48] GRIJALBA, F. A. F. **Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído de Barkhausen par caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços**. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Politécnica de São Paulo. USP. 2010. 163 p.

[49] WOJTAS, A. S.; SUOMINEN, L.; SHAW, B. A.; EVANS, J. T. **Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method**. The Open Access NDT Database. Disponível em <<http://www.ndt.net/>> Disponível em 27 Jan. 2011.

[50] LIU, Z. L.; MIAO, Q.; ZUYI, L.Y. Theoretical analysis of the influence of different microstructure on Barkhausen Noise. **Proceedings of the 15th World Conference on Nondestructive Testing**. Roma. 2000.

[51] TING, M. L.; WAH, H.; WONG, S. Inspection of aircraft landing gear components by Barkhausen Noise measurement. **NCATMC - New Challenges in Aerospace Technology & Maintenance Conference**. Singapore. 2006.

[52] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE ARP4462: Barkhausen Noise Inspection for Detecting Grinding Burns in High Strength Steel Parts**. 1991.

[53] BAUSCH, T. Nitalätzung zum Nachweis von Schleifbrand. **Antriebstechnik**. v. 21, n. 3. 1982. p. 89 - 91.

- [54] REICHENBACH, M. Schleifbrandprüfung an Zahnrädern als Service der Härtereie. **Antriebstechnik**. v. 38, n. 12. 1999.
- [55] GRINKO, S. **Thermo-mecanisches Schädigungsmodell für das (Zahnfranken-) Profilschleifen**. Doktor Arbeit. Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. IFK. 2006. 147 p.
- [56] KASSEN, G. **Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges**. Doktor Arbeit. Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. RWTH. 1969. 125 s.
- [57] HASPER, G. **Bearbeitungskräfte und Profilgenauigkeit beim Schleifen mit unterschiedlichen Sinterkorundschleifscheiben**. Interner Ergebnisbericht. IWF - TU Berlin. 2011.
- [58] UHLMANN, E.; STARK, C. **Potentiale von Schleifwerkzeugen mit mikrokristalliner Aluminiumoxidkörnung** **Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren Verfahren und Maschinen**. Band 58, Essen, Vulcan. 1997. p. 281 - 309.
- [59] DE PAULA, W. C. F. **Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais. UNESP. 2007. 168 p.
- [60] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN IN ISO 525:1999** Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel Allgemeine Anforderungen. Berlin. 2000. 22 p.
- [61] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4766-2, Ausgabe:1981-03** Herstellverfahren der Rauheit von Oberflächen; Erreichbare Mittenrauhwerte R_a nach DIN 4768 Teil 1. Allgemeine Anforderungen. Berlin. 1982.
- [62] LI, Y.; FUNKENBUSCH, P. D.; GRACEWSKI, S. M.; RUCKMAN, J. Tool wear and profile development in contour grinding of optical components. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 44. 2003. p. 427 - 438.

[63] SILVA JUNIOR, S. F.; ALENCAR, D. A.; NETO, M. M. Variáveis que influenciam os resultados do ensaio de materiais ferromagnéticos pela análise do ruído magnético pela análise do ruído magnético Barkhausen. **9º COTEQ - Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos**. Salvador. 2007. 5 p.

[64] OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D. A.; WINTER, B. Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v. 43, n. 1. 1994. p. 291 - 294.

[65] BOMBONATO, S. G.; LUSTOSA, A. A.; DA SILVA, M. B. **Análise do desgaste de ferramentas via emissão acústica com aplicações de redes neurais**. Disponível em <<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4061/3024>> Acesso em 20 de Maio 2011.

[66] WEINGAERTNER, W. L.; UHLMANN, E. U.; HASPER, G.; BENINI, L. Influence of different microcrystalline Al_2O_3 on thermal damage and profile accuracy of the workpiece in cylindrical plunge grinding. **21ST International Congress of Mechanical Engineering**. Natal. 2011. 8p.