

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DRESSAMENTO POR TOQUE DE REBOLOS DE CBN

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

SANDRO PETRY LAUREANO LEME

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1999

DRESSAMENTO POR TOQUE DE REBOLOS DE CBN

SANDRO PETRY LAUREANO LEME

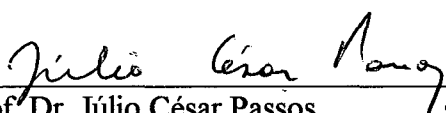
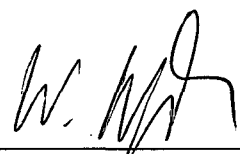
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

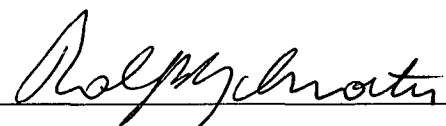

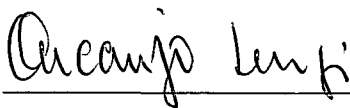
ESPECIALIDADE MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO,

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Júlio César Passos,
Coordenador do curso de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica
Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Eng. João Fernando Gomes de Oliveira
Deptº de Engenharia Mecânica / USP-São Carlos
Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter
Prof. Dr. Eng. Carlos Henrique Ahrens
Prof. Arcanjo Lenzi, PhD

Aos meus pais,
Nilo e Leocádia,
meu irmão
Marco,
minha esposa
Dores Cristina,
e ao meu filho
Lucas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, chefe do Departamento de Engenharia Mecânica e orientador deste trabalho, pelo apoio e confiança mostrados em todos os momentos da realização deste trabalho.

À Capes - pela concessão de bolsas de estudos e incentivo à atividade de desenvolvimento no ensino superior nacional.

Ao professor Dr. Eng. João Fernando Gomes de Oliveira pela visita à USP de São Carlos e pela orientação muito valiosa para a realização deste trabalho.

Aos colegas do GENDEF, em especial ao estagiário graduando em Eng. Mec. José Steil Neto, pelo trabalho em conjunto e por todas as coisas que aprendi no convívio durante a execução deste trabalho.

Ao técnico em desenho da Universidade Federal de Santa Catarina Hélio Irineu José pelo apoio na execução de figuras deste trabalho.

Ao Doutorando em Engenharia Mecânica Cláudio Bertalan pela grande ajuda na compra da resina na Alemanha.

Ao responsável pelo planejamento tecnológico de ferramentas de geometria não-definida Eng. Marco Antônio e ao responsável pela parte de equipamentos eletrônicos José Jefferson de Goes Silva, ambos da firma Robert Bosch Ltda, pela ajuda no conserto de equipamentos e acessórios da máquina-ferramenta. Ao representante da firma Winter do Brasil - Ferramentas Diamantadas e de Bornitrid Ltda Eng. Antônio Carlos Severiano pelo dressamento inicial das ferramentas. A firma Robert Bosch cedeu as ferramentas principais e a firma Winter as ferramentas de afiação.

Aos técnicos em Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina Valtair Garcez, Sérgio Ari dos Santos, Tomaz Fidélis Monteiro Neto e Joe Schmitz pelo empréstimo de algumas ferramentas, construção de vários dispositivos e grande apoio técnico em certos momentos.

Ao Mestrando em Eng. Mec. Márcio Braghini de Rezende pela grande ajuda com a língua inglesa.

Aos técnicos do NUMA (Núcleo de Manutenção) da Universidade Federal de Santa Catarina André Cúrcio, Jair Rodrigues Prudêncio e Paulo Ricardo Schmitt.

E a todas as outras pessoas que de certa forma contribuíram para execução deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE QUADROS.....	xvii
SIMBOLOGIA.....	xix
RESUMO.....	xxiv
ABSTRACT.....	xxv
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 – ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 - RETIFICAÇÃO.....	3
2.1.1 - ABRASIVOS.....	3
2.1.2 - LIGANTES.....	7
2.1.3 - ESPECIFICAÇÃO DE REBOLOS.....	11
2.1.4 – EMBASAMENTO MATEMÁTICO BÁSICO PARA A RETIFICAÇÃO.....	15
2.1.5 - GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO.....	19
a) Influência da velocidade de avanço do rebolo v_f.....	21
b) Influência da velocidade da peça v_w.....	22

c) Influência da velocidade periférica do rebolo v_s	24
2.1.6 – FLUIDO DE CORTE.....	26
2.1.7 – MECANISMOS DE DESGASTE DO REBOLO.....	29
2.1.8 - APLICAÇÕES DOS REBOLOS CBN.....	33
2.2 - CONDICIONAMENTO DE REBOLOS.....	40
2.3 - DRESSAMENTO POR TOQUE EM REBOLOS DE CBN.....	55
2.3.1 - INFLUÊNCIA DA PENETRAÇÃO PASSIVA DE DRESSAMENTO SOBRE O RESULTADO DE TRABALHO....	66
2.3.2 - DETECÇÃO DO PRIMEIRO TOQUE.....	70
3 - OBJETIVOS DO TRABALHO.....	73
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
4.1 – MÁQUINA-FERRAMENTA.....	75
4.2 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POSICIONAMENTO.....	78
4.3 - EQUIPAMENTOS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	80
4.4 - FERRAMENTAS - REBOLOS DE CBN.....	85
4.5 - FERRAMENTA DE DRESSAMENTO - ROLO DRESSADOR DIAMANTADO.....	87
4.6 - CORPOS DE PROVA.....	88
4.7 - EQUIPAMENTOS AUXILIARES.....	91
4.7.1 - EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE.....	91
4.7.2 - EQUIPAMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA TOPOGRAFIA DO REBOLO.....	93

4.8 - EQUIPAMENTO PARA AFIAÇÃO DO REBOLO.....	96
4.9 - PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS.....	97
4.9.1 - CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR DO REBOLO E	
DA PEÇA.....	97
a) Velocidade angular do rebolo.....	97
b) Velocidade angular da peça.....	99
4.9.2 - CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO.....	100
a) Velocidade transversal (mergulho do rebolo).....	100
b) Velocidade longitudinal (deslocamento longitudinal da mesa)..	101
4.9.3 - AJUSTE DE PARALELISMO.....	102
4.9.4 - BALANCEAMENTO ESTÁTICO DO REBOLO.....	103
4.9.5 - CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DO FLUIDO DE CORTE.....	105
4.10 - DETERMINAÇÃO DOS VALORES DAS GRANDEZAS DE	
ENTRADA DO PROCESSO.....	106
4.10.1 - GRANDEZAS DE ENTRADA PARA A RETIFICAÇÃO.....	107
a) Velocidade periférica do rebolo (v_s).....	107
b) Velocidade de avanço do rebolo (v_f).....	107
c) Velocidade da peça (v_w).....	108
d) Profundidade de corte (a_e).....	109
e) Tempo de faiscamento ou “spark-out” (t_a).....	109
f) Vazão de fluido de corte (V_{fcr}).....	109
4.10.2 - GRANDEZAS DE ENTRADA PARA O DRESSAMENTO POR	
TOQUE.....	110
a) Velocidade periférica do rebolo (v_{sd}).....	110

b) Velocidade do rolo dressador (v_r).....	110
c) Penetração de dressamento (a_{ed}).....	111
d) Vazão de fluido de corte (V_{fcd}).....	111
4.11 - METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	112
5 - DESENVOLVIMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	114
5.1 - ENSAIOS PRELIMINARES.....	114
6 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	119
6.1 - ENSAIOS COM O REBOLO DE CBN DE DUREZA “J”.....	119
6.2 - ENSAIOS COM O REBOLO DE CBN DE DUREZA “N”.....	137
7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	150
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 1 - Dureza Knoop para diferentes materiais de grãos abrasivos.....	6
FIGURA 2 - Efeito da temperatura nos diferentes materiais de grãos abrasivos.....	7
FIGURA 3 - Especificação de rebolos superabrasivos.....	12
FIGURA 4 - Mecanismo de formação do cavaco.....	16
FIGURA 5 - Dependência entre a penetração de corte e as variáveis de entrada devido as diferentes condições de contato.....	17
FIGURA 6 - Influência da velocidade de avanço sobre as grandezas características do processo e resultado de trabalho.....	22
FIGURA 7 - Influência da velocidade tangencial da peça sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho na retificação cilíndrica externa de mergulho.....	24
FIGURA 8 - Influência da velocidade periférica do rebolo sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho.....	25
FIGURA 9 - Formas de desgaste no grão e no ligante.....	29
FIGURA 10 - Influência dos mecanismos de desgaste sobre a velocidade de desgaste radial.....	31
FIGURA 11 - Comparação entre rebolo CBN resinóide e rebolo convencional de corindum para uma caso prático de usinagem de canais de brocas.....	35
FIGURA 12 - Influência do tamanho de grão na relação G na retificação.....	37
FIGURA 13 - Rugosidade média na peça retificada com diferentes granulometria de rebolos resinóides de CBN.....	38

FIGURA 14 - Influência das condições de dressamento sobre a rugosidade para diversos processos de dressamento.....	41
FIGURA 15 - Operação de dressamento com dressador de ponta única de diamante....	43
FIGURA 16 - O processo de dressamento diferencia-se consideravelmente através do desgaste da ferramenta de dressamento.....	47
FIGURA 17 - Perfilamento de rebolo de CBN com rolo diamantado.....	48
FIGURA 18 - Perfilamento convencional de rebolo de CBN resinóide com rolo diamantado.....	49
FIGURA 19 - Condicionamento de rebolos de CBN resinóides: processo de perfilamento e de afiação.....	50
FIGURA 20 - Afiação do rebolo de CBN com bloco de óxido de alumínio.....	51
FIGURA 21 - Rugosidade transmitida para o rebolo no processo de dressamento com rolo diamantado.....	52
FIGURA 22 - Região de contato do processo de dressamento por toque com rolo diamantado.....	58
FIGURA 23 - Diminuição da profundidade de rugosidade do rebolo com o aumento da penetração passiva de dressamento segue uma reta com coeficiente angular $m = -1$.....	60
FIGURA 24 - O dressamento de um rebolo galvânico leva a uma clara estabilização da profundidade de rugosidade do rebolo durante o processo de retificação.....	61
FIGURA 25 - Rebolos de CBN com revestimento galvânico diferenciam-se dos outros pela especificação de dressamento por causa da disposição do ligante.....	62

FIGURA 26 - Ferramentas de retificar interno de CBN com ligante cerâmico	
apresentam um valor mínimo para a profundidade de rugosidade do	
rebolo em função da penetração passiva de dressamento.....	63
FIGURA 27 - Influência da penetração passiva de dressamento por toque sobre o	
comportamento da profundidade de rugosidade do rebolo durante o	
processo de retificação.....	65
FIGURA 28 - Relação entre a profundidade de rugosidade da peça R_{tw} e as	
profundidades de rugosidades do rebolo R_{tb} e de final de curso R_{ta}	
na retificação plana.....	67
FIGURA 29 - A dependência linear da profundidade de rugosidade da peça com a	
profundidade de rugosidade do rebolo dá-se também na retificação	
cilíndrica externa.....	68
FIGURA 30 - As profundidade de rugosidade da peça bem como a profundidade de	
rugosidade do rebolo, mostram um curso de queda linear com a	
penetração passiva de dressamento com coeficiente angular $m = -1$.....	70

CAPÍTULO 4

FIGURA 31 - Retificadora Studer - OC.....	76
FIGURA 32 - Sistema de fornecimento de fluido.....	77
FIGURA 33 - Painel frontal do mostrador de deslocamento da régua ótica.....	79
FIGURA 34 - Régua ótica e dispositivo de fixação.....	79
FIGURA 35 - Representação esquemática do transdutor de emissão acústica AE 30	
Prometec.....	80
FIGURA 36 - Fixação do sensor acústico na máquina-ferramenta.....	81

FIGURA 37 - Aparelho de monitoramento Prometec GD 200.....	82
FIGURA 38 - Aparelho de aquisição de dados HP 3563 A.....	83
FIGURA 39 - Diagramas de fluxo dos sinais.....	83
FIGURA 40 - Representação esquemática dos corpos de prova.....	88
FIGURA 41 - Microdureza Vickers do corpo de prova do aço C15PbK em função da profundidade na peça.....	90
FIGURA 42 - Rugosímetro modelo Perthometer S8P - PRK, Feinprüf Perthen GmbH.	92
FIGURA 43 - Medição da rugosidade da resina com a sonda Focodyn, Feinprüf Perthen GmbH.....	92
FIGURA 44 - Microscópio Eletrônico de Varredura XL 30 (MEV).....	93
FIGURA 45 - Moldagem da resina flexível numa posição periférica do rebolo.....	94
FIGURA 46 - Imagem MEV de um rebolo (acima) e de sua cópia (abaixo).....	95
FIGURA 47 - Dispositivo de afiação do rebolo.....	96
FIGURA 48 - Conversor de frequência Danfoss modelo VLT 2050 e aparelho de medição da velocidade angular Schenck, modelo VB 41, na calibração da velocidade angular do rebolo.....	98
FIGURA 49 - Medição da velocidade de deslocamento da mesa.....	101
FIGURA 50 - Ajuste do paralelismo da mesa.....	103
FIGURA 51 - Balanceamento estático dos rebolos.....	104

CAPÍTULO 5

FIGURA 52 - Gráfico da emissão acústica do ruído de base do ambiente.....	115
FIGURA 53 - Gráfico da emissão acústica durante um processo de primeiro contato entre rebolo de CBN e peça.....	116

FIGURA 54 - Gráfico da emissão acústica durante um processo de primeiro contato entre rebolo de CBN e rolo dressador diamantado.....	118
---	------------

CAPÍTULO 6

FIGURA 55 - Topografia do rebolo de dureza “J” condicionado convencionalmente....	120
FIGURA 56 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de C15PbK pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado convencionalmente pelo fabricante.....	122
FIGURA 57 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado convencionalmente.....	123
FIGURA 58 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado automaticamente, segundo Bertalan [2].....	126
FIGURA 59 - Sinal acústico do 1º processo de dressamento por toque realizado no rebolo de dureza “J”.....	127
FIGURA 60 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado através do primeiro dressamento por toque.....	130
FIGURA 61 - Profundidade média de rugosidade R_z das peças para rebolo dressado automaticamente, segundo Bertalan [2], e rebolo dressado pelo 1º dressamento por toque.....	131
FIGURA 62 - Defeito produzido na peça pelo rebolo dressado através do dressamento por toque.....	133

FIGURA 63 - Região de medição das peças retirada a região do defeito provocado no dressamento.....	134
FIGURA 64 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado através do segundo dressamento por toque.....	136
FIGURA 65 - Topografia obtida no rugosímetro do rebolo de dureza “N” dressado convencionalmente pelo fabricante.....	138
FIGURA 66 - Parâmetros verticais de rugosidade das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “N” dressado convencionalmente pelo fabricante.....	139
FIGURA 67 - Parâmetros verticais de rugosidade das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “N” após o primeiro dressamento por toque.....	142
FIGURA 68 - Captação do primeiro contato entre rolo dressador e rebolo de dureza “N” para o segundo dressamento por contato.....	143
FIGURA 69 - Captação do sinal de emissão acústica de toques entre rolo dressador e rebolo após o primeiro contato.....	144
FIGURA 70 - Topografia do rebolo de CBN de dureza “N” após retificação de um volume usinado específico de 4000 mm³/mm do material 100Cr6.....	146
FIGURA 71 - Topografia do rebolo de CBN de dureza “N” após dressamento por toque com rolo dressador diamantado e penetração passiva de 6 µm.....	146
FIGURA 72 - Parâmetros verticais de rugosidade das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “N” após 2º dressamento por toque.....	147

FIGURA 73 - Profundidade média de rugosidade R_z das peças para rebolo de CBN de dureza “N” dressado convencionalmente e dressado pelos dressamentos por toque.....	149
---	------------

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 2

QUADRO 1 - Dependências principais no processo de retificação.....	19
---	-----------

CAPÍTULO 4

QUADRO 2 - Valores geométricos para cada corpo de prova.....	89
QUADRO 3 - Composição química dos aços C15 Pb K e 100 Cr 6.....	89
QUADRO 4 - Calibração da rotação do rebolo.....	98
QUADRO 5 – Calibração da rotação do porta-peça e rolo dressador.....	99
QUADRO 6 - Calibração do avanço porta-rebolo v_f [$\mu\text{m/s}$].....	100
QUADRO 7 - Calibração da velocidade de deslocamento longitudinal da mesa [mm/s].	101
QUADRO 8 - Calibração da vazão do fluido de corte.....	105

CAPÍTULO 6

QUADRO 9 - Parâmetros verticais de rugosidade do rebolo de dureza “J” dressado convencionalmente pelo fabricante.....	120
QUADRO 10 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia da resina do rebolo de dureza “J” após a retificação de um volume usinado específico de $7000 \text{ mm}^3/\text{mm}$.....	124
QUADRO 11 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “J” dressado com rolo dressador e afiado automaticamente, segundo Bertalan [2].....	125

QUADRO 12 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “J” antes e após o primeiro processo de dressamento por toque.....	128
QUADRO 13 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “J” antes e após o segundo dressamento por toque.....	132
QUADRO 14 - Medições de rugosidade com diferentes comprimentos de medições.....	135
QUADRO 15 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “J” dressado pelo segundo dressamento por toque no seu estado final após o processo de retificação.....	137
QUADRO 16 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” dressado convencionalmente pelo fabricante.....	138
QUADRO 17 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” antes e após o primeiro processo de dressamento por toque.....	141
QUADRO 18 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” antes e após o segundo processo de dressamento por toque.....	145
QUADRO 19 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” dressado pelo 2º dressamento por toque no seu estado final após o processo de retificação.....	148

SIMBOLOGIA

a_e	[mm/passos]	Penetração de corte na retificação
a_d, a_{ed}	[mm]	Penetração de dressamento
a_p	[mm]	Penetração normal à superfície de trabalho
b	[mm]	Largura do rebolo
b_d	[mm]	Largura de-ação do dressador
b_{dr}	[mm]	Largura real de ação do dressador
c_k	[mm ⁻³]	Densidade de grãos no revestimento do rebolo
c_p	[J/g.K]	Capacidade térmica específica
d_k	[μ m]	Diâmetro do grão de CBN
d_s	[mm]	Diâmetro do rebolo
d_{se}	[mm]	Diâmetro equivalente do rebolo
d_w	[mm]	Diâmetro da peça
f	[mm/U]	Avanço por rotação da peça
f_d	[mm]	Avanço da ferramenta de dressar por rotação do rebolo
h_{eq}	[μ m]	Espessura de corte equivalente
h_{cu}	[mm]	Espessura de usinagem; Espessura do cavaco não deformado
h_{cuf}	[mm]	Espessura de usinagem efetiva; Espessura do cavaco deformado
h_{sb}	[mm]	Altura do bloco de afiação
k	[-]	Fator de proporcionalidade

l_k	[mm]	Comprimento de contato
m	[-]	Coefficiente angular da reta
n_w	[rpm]	Rotação da peça
q	[-]	Relação de velocidades
q_d	[-]	Relação de velocidades no dressamento
r_p	[mm]	Raio de ponta do dressador
t_a	[s]	Tempo de faiscamento
t_c	[s]	Tempo de corte
v_c	[m/s]	Velocidade de corte
v_{cd}	[m/s]	Velocidade de corte no dressamento
v_d	[m/s]	Velocidade de avanço no dressamento
v_e	[m/s]	Velocidade da ponta de um grão abrasivo
v_f	[mm/s]	Velocidade de avanço do rebolo
v_{fad}	[mm/min]	Velocidade de avanço de dressamento
v_{fd}	[mm/min]	Velocidade de avanço no dressamento do rolo dressador
v_{fSb}	[mm/s]	Velocidade de avanço do bloco de afiação
v_M	[m/min]	Velocidade da mesa na retificação plana
v_r	[m/s]	Velocidade do rolo dressador
v_s	[m/s]	Velocidade periférica do rebolo
v_{sd}	[m/s]	Velocidade periférica do rebolo no dressamento
v_w	[rpm]	Velocidade da peça
A	[mm]	Dimensão do corpo de prova
A_{sd}	[mm ²]	Área de dressamento

B	[mm]	Dimensão do corpo de prova
C	[mm]	Dimensão do corpo de prova
$C_{\text{estatístico}}$	[mm ⁻³]	Distribuição estatística de grãos no rebolo
C_u	[-]	Constante de sobreposição
D	[mm]	Dimensão do corpo de prova
E	[mm]	Dimensão do corpo de prova
EA	[V]	Sinal de emissão acústica
EA_{RMS}	[V]	Sinal de emissão acústica no valor RMS
F	[mm]	Dimensão do corpo de prova
F_{ns}	[N]	Força normal sobre o grão do rebolo
F_{ts}	[N]	Força transversal sobre o grão do rebolo
F_n'	[N/mm]	Força normal específica
G	[mm]	Dimensão do corpo de prova
G	[mm ³ /mm ³]	Relação de remoção
HRC	[-]	Dureza Rockwell
HV	[-]	Dureza Vickers
K_N	[DM/canal]	Custo de produção de canais de broca na retificação
K_{100}	[N/mm ²]	Dureza Knoop
P_c	[kW]	Potência de corte
P_{est}	[bar]	Pressão de estagnação do fluido
Q_w'	[mm ³ /mm.s]	Taxa de retificação específica
Q_{sb}'	[mm ³ /mm.s]	Taxa de remoção específica do bloco de afiação
R_a	[μm]	Desvio médio aritmético de rugosidade
R_{max}	[μm]	Profundidade máxima isolada de rugosidade

R_p	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de alisamento
R_{ta}	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de rugosidade de final de curso na retificação plana
R_{tb}	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de rugosidade do rebolo obtida na chapelona
R_{tb0}	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de rugosidade do rebolo inicial
R_{tb1}	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de rugosidade do rebolo final
R_{ts}	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de rugosidade principal do rebolo
R_{tw}	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de rugosidade da peça
R_{twmax}	$[\mu\text{m}]$	Profundidade de rugosidade máxima da peça admitida
R_z	$[\mu\text{m}]$	Profundidade média de rugosidade
T_μ	$[\mu\text{m}]$	Profundidade crítica de corte
U_d	$[-]$	Grau de recobrimento no dressamento ou coeficiente de sobreposição
V	$[\text{mm}^3]$	Volume total do rebolo
V_B	$[\text{mm}^3]$	Volume de ligante
V_{fed}	$[\text{l}/\text{min}]$	Vazão de fluido utilizado no dressamento
V_{fer}	$[\text{l}/\text{min}]$	Vazão de fluido utilizado na retificação
V_K	$[\text{mm}^3]$	Volume de grãos
V_P	$[\text{mm}^3]$	Volume de poros
V_s	$[\text{mm}^3]$	Volume desgastado do rebolo
V_w	$[\text{mm}^3]$	Volume usinado
V_w'	$[\text{mm}^3/\text{mm}]$	Volume usinado específico

α	[graus]	Ângulo do furo de centro dos corpos de prova
α	[-]	Expoente
β	[-]	Expoente
γ	[-]	Expoente
η	[-]	Ângulo de direção efetiva

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma técnica de condicionamento para rebolos de CBN resinóides denominada de dressamento por toque (“touch-dressing”). Essa tecnologia, relativamente nova, de dressamento visa otimizar o emprego de rebolos de superabrasivos e melhorar a qualidade dos componentes retificados devido à diminuição dos erros macro-geométricos do rebolo.

O termo dressamento por toque refere-se a um dressamento com mínima penetração de avanço entre rolo dressador e rebolo. Esse micro-condicionamento tem como objetivo retirar apenas os gumes protusos dos grãos do rebolo. Essa pequena retirada de material acarreta no rebolo uma re-obtenção da condição macro-geométrica otimizada, sem a necessidade de um processo de afiação subsequente devido à manutenção parcial da protusão dos grãos abrasivos. Os ganhos globais deste processo podem alcançar de 25 a 30% em relação a outros processos de condicionamento. A principal razão para estes ganhos é a eliminação do processo de afiação.

O objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade da utilização do processo de dressamento por toque para rebolos resinóides de CBN em máquinas-ferramentas convencionais. Para este tipo de máquina, as dificuldades de implementação do processo são maiores devido as dificuldades operacionais, como o reconhecimento do contato entre rebolo e ferramenta de dressamento. A adequação de uma metodologia para o dressamento por toque faz com que esse estudo se tornasse muito importante na tecnologia de retificação.

Os resultados obtidos com a utilização do dressamento por toque em rebolos de CBN resinóides mostraram, no final deste trabalho, que os ganhos em relação a rugosidade das peças retificadas ficaram em torno de 30 % quando comparados às peças retificadas com os mesmos rebolos dressados convencionalmente. A economia de camada abrasiva ficou em torno dos 80 %.

ABSTRACT

This work presents a conditioning technique for CBN resin bond grinding wheels, denominated “touch-dressing”. This relatively new technology of dressing intends to optimize the use of expensive tools such as superabrasives CBN grinding wheels, in such a way that the benefits brought by its acquisition can overcome the high initial cost of the tool the soonest possible.

The name “touch-dressing” refers to the dressing process with minimal infeed between rotary truer and CBN-wheel. This micro-dressing process tries only to affect the top of the grains of CBN making with that the grinding wheels return to the better condition to the grinding. The sharpening process becomes unnecessary because the protrusion of the grains of the wheel is not affected. Theoretically, there is an global enhancement of about 30% when applying “touch-dressing” instead of conventional methods. The main reason for this enhancement would be the elimination of sharpening process, making the tool life longer and also giving an increasing on the gains by lower preparation times of the tools

The possibility of the use of “touch-dressing” for CBN resin bond grinding wheels in conventional machines is discussed. It’s well known that the difficulty to achieve good results in these cases is larger.

The results obtained with the process of “touch-dressing” for CBN-resins wheels had showed, at the end of this work, that the enhancement on the final quality of the grinding-pieces surfaces were approach 30 % bigger when compared with results from CBN-resins grinding wheels applying conventional methods of dressing. The economy on the grinding wheels are approach 80 %.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Na indústria a tecnologia de retificação é de grande importância na produção de peças metálicas, principalmente para as peças que requerem uma elevada precisão geométrica e dimensional, como também um bom acabamento superficial. As ferramentas deste processo pertencem à classe de ferramentas de geometria não-definida, denominadas rebolos. Os rebolos podem ser de abrasivos convencionais (óxido de alumínio ou carboneto de silício), ou de superabrasivos (diamante ou nitreto de boro cúbico (CBN)).

Os rebolos de óxido de alumínio vêm sendo substituídos pelos rebolos superabrasivos à base de CBN na mesma velocidade com que as técnicas de utilização desses novos rebolos vão sendo dominadas. O domínio das propriedades e das variáveis de corte para o processo de retificação com CBN está intimamente ligado ao domínio da tecnologia de condicionamento para este tipo de ferramenta.

Vários processos de condicionamento de rebolos superabrasivos foram desenvolvidos e aprimorados ao longo dos últimos anos. Apenas o domínio das variáveis de entrada destes processos permitirão a otimização do condicionamento para aplicações específicas de retificação.

Este trabalho visa qualificar e principalmente verificar a aplicabilidade do processo de condicionamento denominado de dressamento por toque (“touch-dressing”) para rebolos de CBN com ligante resinóide em máquinas retificadoras convencionais, através da determinação da importância das variáveis de condicionamento sobre o resultado de trabalho obtido na retificação

de componentes. Esse processo de dressamento baseia-se na retirada de uma quantidade mínima dos gumes dos grãos abrasivos de modo que a superfície do rebolo não sofra influência considerável na protusão dos grãos abrasivos.

Para o entendimento do presente trabalho, no capítulo referente ao estado da arte é inicialmente apresentada uma explanação sobre o processo de retificação e o modo de dressamento convencional para rebolos de CBN com ligante resinóide. Com este conhecimento é apresentado então o condicionamento de rebolos superabrasivos, denominado de dressamento por toque (“touch-dressing”).

No Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina já foram desenvolvidos três trabalhos de mestrado na área de retificação, e o domínio do processo de condicionamento de dressamento por toque para rebolos de CBN com ligante resinóide visa ampliar o acervo de informações do LMP, bem como permitir sua transferência para a indústria nacional.

O trabalho foi desenvolvido em rebolos de CBN com ligantes resinóides, por esses serem de interesse crescente por parte da indústria e de parceiros em estudos anteriores, como a firma Robert Bosch Ltda.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

2.1 - RETIFICAÇÃO

Para se entender a importância do processo de dressamento na retificação, é necessário se fazer primeiramente uma explanação sobre o processo de retificação. O processo de retificação é essencial quando existem exigências muito grandes de acabamento superficial e de precisão dimensional, principalmente para peças de aço endurecidas.

2.1.1 - ABRASIVOS

Um aspecto importante no estudo da tecnologia de retificação é o tipo de abrasivo utilizado para o processo. Existem cinco tipos de materiais abrasivos naturais empregados na fabricação de rebolos: quartzo, corindum, granada, esmeril e diamante. A importância desses materiais abrasivos naturais é apenas secundária [1]. Os materiais sintéticos tem importância muito maior, já que se consegue uma produção com qualidade de forma eficiente e com reprodutibilidade não encontrada nos materiais naturais.

Os abrasivos normalmente usados na retificação são abrasivos sintéticos, eles podem ser convencionais ou superabrasivos. Dentre eles os mais comuns são:

- Abrasivos Convencionais:
 - Óxido de Alumínio;
 - Carboneto de Silício.

- Superabrasivos:
 - Nitreto de Boro Cúbico (CBN);
 - Diamante.

Dentre os materiais abrasivos convencionais sintéticos, os mais comuns são o óxido de alumínio e o carboneto de silício. Para valores de dureza Knoop, tem-se para óxido de alumínio (Al_2O_3) $K_{100} = 2000$ e para o carboneto de silício (SiC) $K_{100} = 2500$.

Tanto o carboneto de silício quanto o óxido de alumínio têm variações de pureza na sua fabricação e com isso existem também variações nas propriedades e no custo destes tipos de abrasivos [1].

Para o diamante sintético, deve-se mencionar a extrema dureza como propriedade mais relevante deste tipo de abrasivo. A dureza Knoop do diamante varia de $K_{100} = 5000$ a 7000, isto é, aproximadamente três vezes maior que a dureza dos materiais abrasivos convencionais. A condutividade térmica do diamante em relação aos abrasivos convencionais é muito grande. A condução de calor da região de corte para dentro do ligante no caso de ferramentas de diamantes é muito rápida, o que pode ocasionar uma destruição do ligante e o grão de diamante pode ser perdido rapidamente. Além disso, o diamante não pode atuar em aços hipoeutéticos, pois ocorre uma difusão de carbono do diamante para a peça durante a retificação, fazendo com que a estrutura cristalina do diamante se altere e sua resistência diminua consideravelmente, a ponto de impossibilitar o processo de usinagem. Outro problema existente para ferramentas de diamantes é a temperatura do processo de retificação. A temperatura no rebolo deve mantida abaixo dos $650\text{ }^\circ\text{C}$ durante o processo, porque temperaturas maiores causam uma mudança na estrutura

cristalina do diamante, diminuindo consideravelmente sua dureza. Em aproximadamente 800 °C o diamante se grafitiza alterando totalmente sua estrutura cristalina.

O último material abrasivo sintético desenvolvido foi o nitreto de boro cúbico (CBN). Ele apresenta uma dureza Knoop de $K_{100} = 4700$. A vantagem do nitreto de boro cúbico em relação ao diamante é sua elevada resistência à temperatura [1]. O surgimento deste material na forma de grãos abrasivos possibilitou a usinagem de aços endurecidos, especialmente aços hipoeutéticos, menos saturados de carbono [2]. A retificação com CBN é usada hoje principalmente para a usinagem de aço-ferramenta e aplicada mais extensivamente a outros materiais ferrosos e ligas aeronáuticas.

O abrasivo à base de CBN é diferenciado pela estrutura dos seus grãos. Os grãos de CBN podem ser: monocristalinos e polimicrocristalinos.

Os grãos monocristalinos são oferecidos em maior número de especificações. Eles apresentam a estrutura em forma de blocos, enquanto que os grãos polimicrocristalinos apresentam uma estrutura muito mais irregular.

A Figura 1 mostra um gráfico comparativo, para o estado de temperatura e pressão ambientes normais, da dureza Knoop dos materiais sintéticos mais comumente utilizados para a fabricação de ferramentas de geometria não-definida [3].

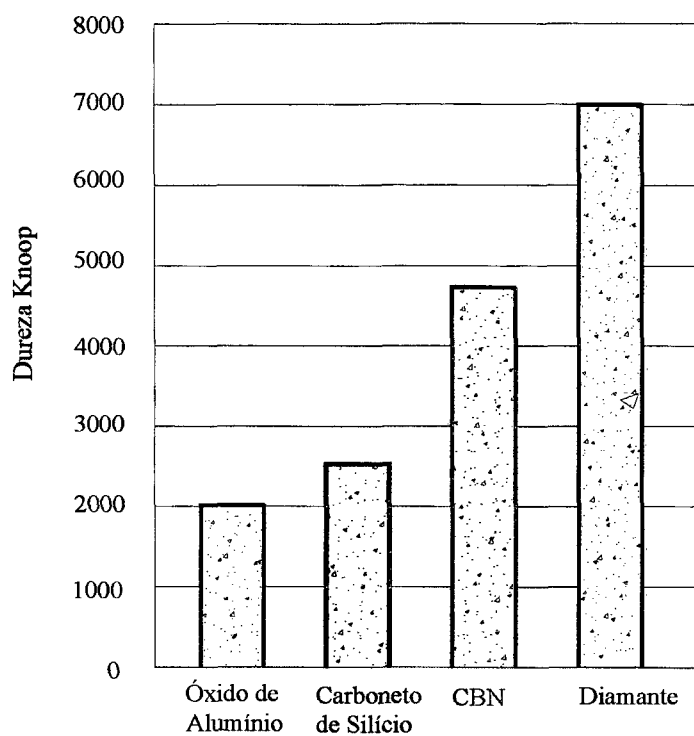


Figura 1 - Dureza Knoop para diferentes materiais de grãos abrasivos [3]

A Figura 2 mostra o comportamento do diamante, do CBN, da alumina e do carbureto de silício quando a temperatura é aumentada [3]. Nesse gráfico pode-se ver a variação da dureza de cada material com o aumento de temperatura.

A estabilidade do CBN é maior que a do diamante, tanto que a dureza do CBN supera a do diamante a aproximadamente 700 °C [4].

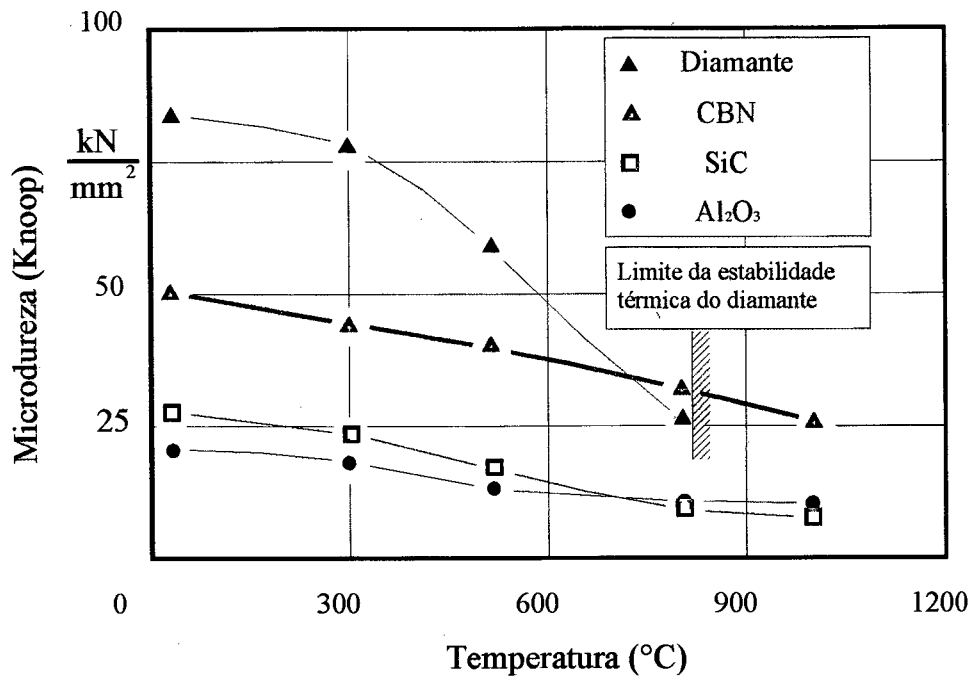


Figura 2 - Efeito da temperatura nos diferentes materiais de grãos abrasivos [3]

2.1.2 - LIGANTES

Os ligantes têm a função de manter o grão aprisionado até que este esteja sem capacidade de corte. Neste instante, o ligante deve liberar o grão abrasivo para que os grãos posicionados em camadas mais profundas, ainda afiados, possam entrar em ação. Os ligantes podem ser inorgânicos ou orgânicos:

- Ligantes inorgânicos:
 - Ligantes Cerâmicos ou Vitrificados;
 - Ligantes Minerais;
 - Ligantes Metálicos.
- Ligantes orgânicos:
 - Gomas;
 - Lacas;
 - Resinas Sintéticas ou Resinóides.

Mais da metade de todos os rebolos fabricados são produzidos com ligantes cerâmicos ou vitrificados [1]. Esse tipo de ligante tem as seguintes características: frágeis (em decorrência disso susceptíveis a impactos); grande módulo de elasticidade, resistentes à temperatura (mas altamente susceptíveis às variações de temperatura) e resistentes quimicamente em relação ao óleo e à água.

Os outros ligantes inorgânicos não apresentam um uso muito geral e são por isso fabricados de forma muito restrita. Sua participação na fabricação total de rebolos pode ser considerada muito pequena.

Os ligantes orgânicos também podem ser reduzidos apenas a ligantes resinóides, pois esses são produzidos em números cada vez maiores e podem daqui a algum tempo alcançar a produção de rebolos com ligantes vitrificados. A vantagem deste tipo de reboło está principalmente na maior facilidade para formar a superfície ativa de retificação, que para retificação de forma mostra-se muito importante. No perfilamento do reboło, a precisão alcançada com ligantes resinóides é maior do que rebolos vitrificados, pois o ligante vitrificado se mostra mais quebradiço e acaba sendo difícil alcançar a precisão dimensional no dressamento. As características do ligante resinóide são: duráveis; resistentes a impactos e, se forem melhorados tecnologicamente, podem apresentar alta resistência a temperatura e serem utilizados em operações com altas taxas de remoção [4].

Os ligantes resinóides foram especialmente desenvolvidos para rebolos de diamantes, já que esse abrasivo não resiste às altas temperaturas necessárias à sinterização de rebolos cerâmicos. Hoje em dia são largamente usados também como ligantes de rebolos de CBN. Com o surgimento dos rebolos vitrificados de CBN, pensou-se que estes iriam substituir totalmente os rebolos de CBN resinóides, pelo fato de serem mais duros e possibilitarem um condicionamento facilitado, já que o ligante apresenta porosidade intrínseca na sua estrutura. Isto não aconteceu

devido ao fato da dificuldade de obter uma precisão dimensional com rebolos vitrificados de CBN, fazendo com isso que rebolos resinóides permanecessem no mercado.

A dureza do rebolo equivale à resistência que ele oferece à remoção dos grãos. A dureza é dependente do tipo do ligante, do material abrasivo e da estrutura do rebolo, isto é, da sua composição volumétrica em termos do percentual de grãos, ligantes e poros. O volume total de um rebolo (V) pode ser expresso como a soma das parcelas: volume de grãos (V_K), volume do ligante (V_B) e volume de poros (V_P).

$$V = V_K + V_B + V_P \quad (1)$$

O CBN foi sintetizado pela primeira vez em 1957 pela General Electric Company sob altas pressões e altas temperaturas. Desde então, estudos vêm sendo realizados em um número cada vez maior no desenvolvimento da tecnologia de retificação com CBN, para rebolos com vários tipos de ligantes.

Primeiramente foram oferecidos rebolos de CBN com ligante metálico, resinóide ou com deposição galvânica, e em seguida foram desenvolvidos também os ligantes cerâmicos. Para esse tipo de material de ligante aparecem vantagens, principalmente na preparação da ferramenta. Enquanto que rebolos de CBN com ligante resinóide ou metálico apresentam uma estrutura fechada após o dressamento, rebolos com ligante cerâmico ou vitrificado podem ser tratados como ferramentas de abrasivos convencionais, pois possuem uma porosidade típica dos rebolos cerâmicos ou vitrificados. O rebolo vitrificado necessita apenas de um processo de perfilamento para seu condicionamento. Já o rebolo resinóide necessita de uma afiação após o perfilamento.

Comercialmente os rebolos de CBN são oferecidos nas formas descritas a seguir:

- Rebolo de liga resinóide (sigla KSS): para a fabricação deste tipo de rebolo parte-se de uma resina termofixa (fenol) em pó. A resina é misturada com o CBN e outros

aditivos e despejada na cavidade do molde. Passa-se a um processo de prensagem a quente, tipicamente com temperaturas da faixa de 200 °C e pressão de 1000 kgf/cm². Neste ponto ocorrem simultaneamente a conformação da camada abrasiva, bem como a sua adesão ao corpo do rebolo. O processo é irreversível, isto é, não se pode, por meio de um novo aquecimento, retornar à forma de pó ou soltar a camada do corpo. No entanto, futuros aquecimentos a temperaturas da ordem de 250 °C levam a uma mudança na estrutura da camada abrasiva, com deterioração da liga e correspondente perda da capacidade de retenção de grãos [5]. Rebolos de CBN resinóides podem retificar vários aços com alta capacidade de retificação e apresentam vidas moderadas da ferramenta. Devido à elasticidade do ligante, rebolos resinóides são usados para retificação de acabamento de aços, normalmente endurecidos com dureza superior a 50 HRC [6].

- Rebolos de liga metálica (sigla MSS): as ligas metálicas, tipicamente de bronze, são muito mais resistentes ao desgaste que as resinóides. Apresentam vida mais longa, porém, devido ao desgaste platafórmico acentuado dos grãos, geram mais calor e maiores forças de corte. Na fabricação parte-se de pó metálico que é misturado com os grãos abrasivos. Os moldes são daí preenchidos e seguem para sinterização, que ocorre em fornos elétricos com atmosfera levemente redutora. As temperaturas chegam a aproximadamente 800 °C. A seguir passa-se à fase de compactação em prensas hidráulicas, atingindo-se pressões da ordem de 1500 kgf/cm² [6].

- Rebolos de liga cerâmica ou vitrificado (sigla VSS): entre os componentes da camada, além do CBN e da liga, encontram-se componentes orgânicos. O rebolo é moldado a frio e depois colocado em um forno para queima. Nesta operação os componentes orgânicos volatizam produzindo uma estrutura porosa necessária ao trabalho do rebolo [6]. Rebolos vitrificados são caracterizados pela sua alta rigidez e considerável volume de poros. Com isso, os rebolos vitrificados podem ser facilmente perfilados e dressados por rolos dressadores na retificadora durante o próprio processo de retificação (“continuous dressing”). Os rebolos

vitrificados apresentam alta capacidade de retificação e, por causa da sua alta rigidez, são empregados também para retificação de precisão. Os poros no ligante reduzem as forças de retificação favorecendo a retificação interna [6].

- Rebolos de liga galvânica (sigla GSS): na confecção destas ferramentas deposita-se, por processo eletrolítico, uma camada de níquel sobre um corpo de aço, ficando os grãos abrasivos “aprisionados” pelo níquel. A ancoragem dos grãos é tão firme que estes podem ficar até 50% protusos (em relação à sua dimensão principal) conferindo grande agressividade à ferramenta e garantindo a exigência de grandes espaços para a remoção de cavaco. 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. A precisão geométrica atingível é função do tamanho de grão utilizado e da precisão do corpo [5].

Os rebolos resinóides, devido ao seu ligante mais mole, permitem alcançar maior precisão e, quando condicionados de modo otimizado, por exemplo através do dressamento por toque, podem ter uma elevação considerável de sua vida. Para o estudo deste trabalho foram utilizados dois rebolos resinóides de CBN, com mesma granulometria de grão abrasivo e mesma concentração de grão, diferenciando-se na dureza de seu ligante e no material do corpo de base.

2.1.3 - ESPECIFICAÇÃO DE REBOLOS

Para rebolos superabrasivos as especificações são essencialmente as mesmas que para rebolos convencionais, observando-se particularidades para a concentração do abrasivo e especificação da espessura da camada superabrasiva.

Não existe uma norma única que padronize a especificação de rebolos com revestimento de diamante ou de nitreto de boro cúbico. De acordo com as indicações dos fabricantes e do padrão FEPA (Federação Européia de Produtos Abrasivos), a especificação desses rebolos é constituída por uma parte que caracteriza a forma e as dimensões, e por outra que caracteriza o revestimento abrasivo [2].

Um exemplo é mostrado na Figura 3 indicando cada parcela da especificação de um rebolo superabrasivo.

	Modificação no abrasivo	Abrasivo	Tamanho de grão	Dureza	Concentração	Ligante	Modificação no ligante	Prof. camada
Exemplo:	AS	D	126	J	C50	K	99	1/8"

Diamante	(D)
CBN	B

1181	213
1001	181
851	151
711	(126)
601	107
501	91
426	76
356	64
301	54
251	46

(J)	mole
N	média
R	dura
T	muito dura

	Kl/cm ³	Designação
Diamante	1,1	C 25
	1,65	C 38
	2,2	(C 50)
	3,3	C 75
	4,4	C 100
	5,5	C 125
CBN	6,0	C 135
	6,5	C 150
	Vol %	Designação
	12	V 120
18	V 180	
24	V 240	

Diamante	(K)	Resinóide	
	Bz	Metálico	
	M		
	G		
S	CBN	KSS	Resinóide
GSS		Metálico galvânico	
MSS		Metálico sinterizado	
VSS		Cerâmico	

Figura 3 - Especificação de rebolos superabrasivos [2]

As parcelas da especificação são geralmente organizadas de forma que as informações sobre os abrasivos precedem as informações sobre o ligante e a estrutura do rebolo. As partes da especificação dos rebolos incluem:

- modificação no abrasivo (opcional),
- tipo do abrasivo,

- tamanho de grão,
- dureza do rebolo,
- concentração do abrasivo,
- tipo do ligante,
- modificação do ligante (opcional) e
- profundidade da camada.

A modificação do abrasivo especifica que tipo de abrasivo foi usado. A modificação do abrasivo pode ser representada por qualquer letra do alfabeto, e não existem padrões para o uso industrial dessa especificação.

O tipo de abrasivo é geralmente limitado a: (A) para óxido de alumínio, (C) para carboneto de silício e (D) para diamante e (B) para CBN. O tipo de abrasivo pode também designar uma mistura de tipos de abrasivos, por exemplo (AC) como uma mistura de óxido de alumínio e carboneto de silício.

O tamanho de grão para superabrasivos é descrito pelo tamanho do grão em micrometros. Os tamanhos diferem-se apenas levemente e podem ser considerados tamanhos padrões industriais. Uma combinação do número de tamanho de grão, se mostrado, designa que houve ou não uma mistura de tamanhos de grãos diferentes. Normalmente, um número 1 colocado após o número do tamanho de grão designa que não ocorreu qualquer mistura de tamanhos de grão, qualquer outro número fixado após o número de tamanho de grão refere-se a uma mistura dessa característica. Não há nenhum padrão industrial para combinação de tamanho de grão.

A dureza do rebolo é normalmente descrita por um simples caracter alfabético de J a T, com J correspondendo a rebolo mole e T correspondendo a rebolo duro.

A concentração de grãos abrasivos de rebolos superabrasivos indica qual o percentual do volume da camada abrasiva que é ocupado por grãos abrasivos. Por causa dos altos custos dos superabrasivos, apenas uma fina camada ativa de retificação é colocada sobre o corpo base. A Figura 3 mostra uma concentração C50 para rebolo diamantado. Isto significa uma concentração de $2,2 \text{ kt}^d/\text{cm}^3$ (Quilates de diamante/ cm^3). A concentração de superabrasivos à base de CBN na camada é designada por um número, usualmente inteiro acima de 200. Não existem padrões para a concentração. Nos rebolos utilizados a concentração 240 significa um conteúdo de abrasivo de $4,4 \text{ kt}^{\text{CBN}}/\text{cm}^3$ (Quilate de CBN/ cm^3). A concentração de um rebolo superabrasivo pode ser considerada como um aspecto importante para a determinação da dureza do rebolo, desde que a quantidade de grãos no rebolo afete a característica de desgaste do rebolo. Um rebolo com concentração mais alta normalmente requer forças de corte mais altas e apresenta um desgaste mais lento.

A estrutura do rebolo (distância entre as partículas de abrasivos) é usualmente um número entre zero e 25. Se a estrutura é omitida, o tipo de ligante especial dita uma estrutura particular, e desde que a estrutura seja fixa, não precisa ser mostrada. Nem todos os ligantes são produzidos em todas as estruturas. Os ligantes são usualmente muito limitados nas suas áreas de fabricação.

O tipo de ligante de um rebolo desenvolvido é geralmente designado com um simples caracter alfabético: (V) para vitrificado, (K) para resinóide, (BZ) para bronze, (S) para sinterizado, (M) para latão e (G) para galvânico.

A modificação do ligante define o tipo de ligante utilizado. Similar à modificação do abrasivo, a modificação do ligante, em caracter alfanumérico, não tem uma padronização única na indústria [4].

2.1.4 – EMBASAMENTO MATEMÁTICO BÁSICO PARA A RETIFICAÇÃO

Um entendimento matemático do processo de retificação é necessário para se entender mais facilmente as correlações dos parâmetros envolvidas no processo.

Os parâmetros principais de entrada na retificação são:

- Velocidade periférica do rebolo v_s [m/s];
- Velocidade de avanço do rebolo v_f [mm/s];
- Velocidade da peça v_w [rpm].

Destes resultam a:

- Espessura de cavaco não deformada h_{cu} [μm] e a
- Espessura de corte equivalente h_{eq} [μm].

Para análise econômica freqüentemente é avaliada a relação de desgaste:

- G [mm^3/mm^3].

Na retificação o estudo e a compreensão dos microfenômenos que ocorrem durante a formação do cavaco são fundamentais para a otimização de seu desempenho. Os mecanismos da formação do cavaco na retificação são bem diferentes dos observados para processos de usinagem com ferramenta de geometria definida. Na retificação, os gumes apresentam um grande número de formatos diferentes. A relação entre o raio do gume e a profundidade de corte para cada grão é muito grande quando comparado com a relação do raio de gume e profundidade de corte para ferramentas de corte de geometria definida. Durante a formação do cavaco na operação de

retificação, distinguem-se três estágios: deslizamento inicial, deformação plástica sem remoção e corte como mostrado de forma esquemática na Figura 4.

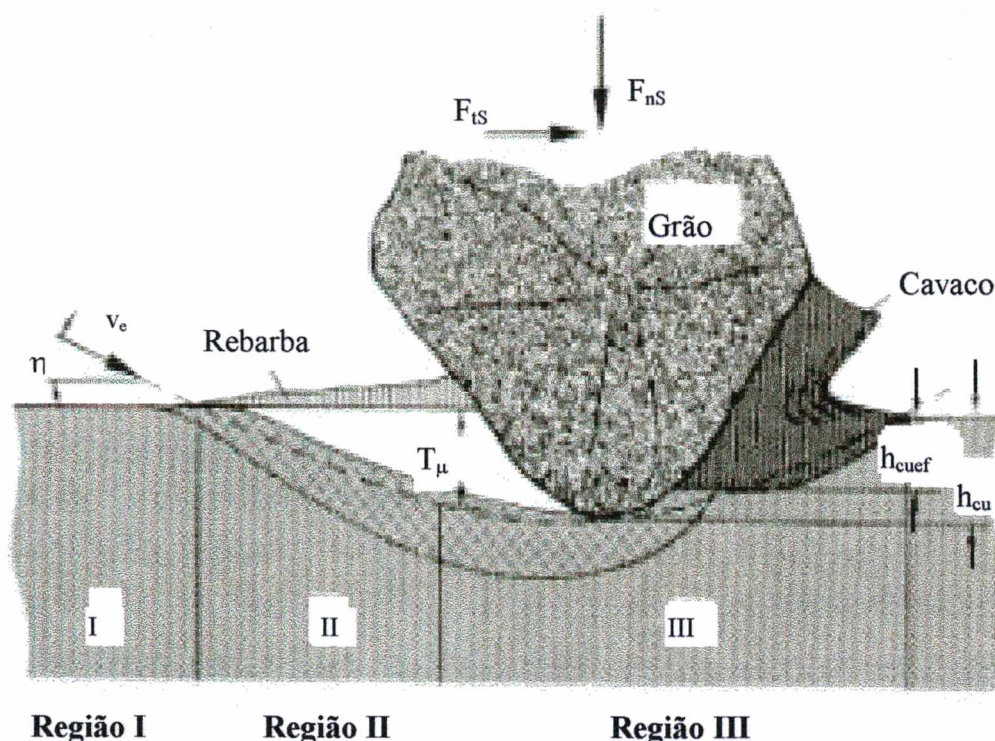


Figura 4 - Mecanismo de formação do cavaco [7]

Na Região I, caracterizada pelo deslizamento inicial do gume sobre a peça apenas com deformação elástica, os gumes do grão abrasivo penetraram a superfície da peça seguindo sua trajetória com velocidade v_e e um ângulo η . Devido à elasticidade do grão, do ligante e principalmente da peça, nesta região ocorre apenas deformação elástica. Na Região I a energia é gasta em atrito. A Região II é caracterizada pela deformação plástica, sem produção de um cavaco. Rebarbas são formadas ao lado dos sulcos. Finalmente, na Região III, a formação do cavaco se inicia. Esta é a região de corte propriamente dita e se inicia no ponto onde o gume do grão abrasivo alcança a profundidade crítica de corte T_μ [7].

Para melhorar o desempenho na retificação o gume do grão abrasivo tem que estar afiado para que a maior parte da energia disponível seja dissipada nesta terceira região e para alcançar com isso a maior espessura de corte efetiva h_{cuf} .

A dependência funcional entre a espessura de cavaco não deformada (h_{cu}) e as variáveis de entrada, velocidade de periférica do rebolo (v_s), velocidade tangencial da peça (v_w) e a penetração de trabalho (a), bem como o diâmetro equivalente do rebolo (d_{se}) e a distribuição estatística de grãos no rebolo ($C_{estatístico}$) é mostrada na Figura 5.

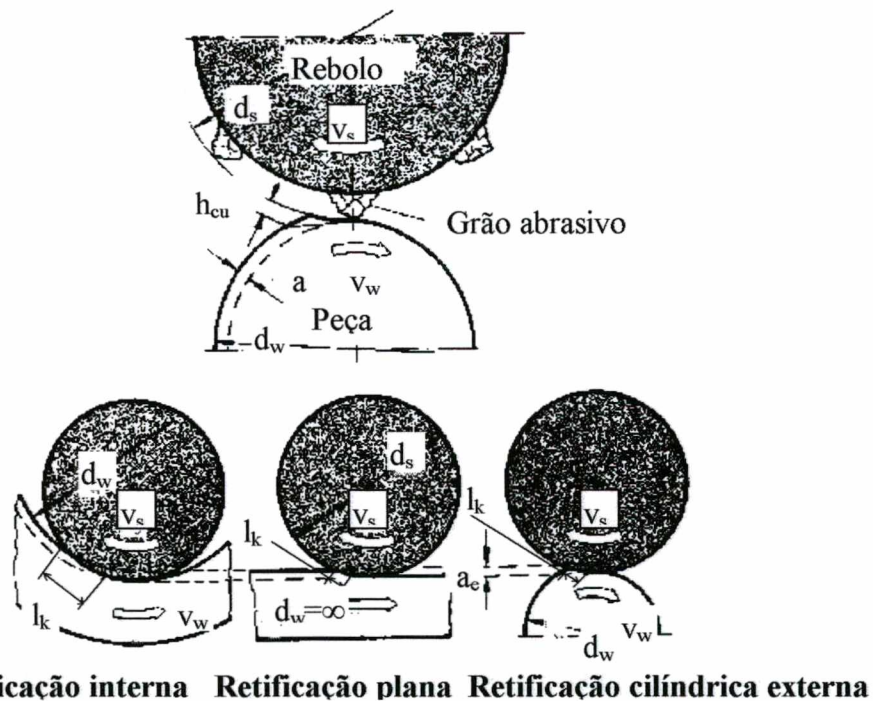


Figura 5 - Dependência entre a penetração de corte e as variáveis de entrada devido as diferentes condições de contato [1]

Na retificação a remoção de cavacos é procedida por um grande número de gumes geometricamente não-definidos [1]. Fazendo uma consideração estatística do processo de remoção do cavaco, obtêm-se leis que podem ser deduzidas da cinemática do processo.

De grande importância é a espessura não deformada de cavaco h_{cu} . Ela é descrita pela função exponencial:

$$h_{cu} \approx k [1 / C_{\text{estatístico}}]^\alpha [v_w / v_s]^\beta [a / d_{se}]^\gamma \quad (2)$$

onde o diâmetro equivalente (d_{se}) é calculado pela equação:

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

onde o sinal (+) na fórmula (3) é usado para retificação externa e (-) para retificação interna.

O comprimento de contato indicado na Figura 4, com a designação l_k , é aproximado pela equação:

$$l_k \approx [a d_{se}]^{1/2} \quad (4)$$

A Equação (2) é a equação mais completa e pode caracterizar o processo de retificação levando em conta variações como diâmetro do rebolo e a concentração de grãos abrasivos. Quando se trabalha com um rebolo apenas, alguns autores utilizam uma expressão mais simplificada que, de certo modo, facilita a utilização da equação. A expressão passa a ser denominada então h_{eq} apenas, e pode ser calculada por:

$$h_{eq} = f \cdot v_w / v_s \quad (5)$$

2.1.5 - GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

Para generalizar a tecnologia da retificação de uma forma esquemática, o Quadro 1 mostra as dependências principais no processo de retificação [1].

Quadro 1 - Dependências principais no processo de retificação [1]

Parâmetros de Entrada		Processo de Retificação	Resultados de Trabalhos
Sistema	Variável	Características de	Tecnologia
Máq.-Ferramenta		Processo	Peça
- Tipo	Avanço		- Precisão de forma
- Propriedades	Vel. de avanço		- Precisão de medida
Peça		Força de usinagem	- Qualidade superficial
- Geometria	Velocidade da	Potência	- Camada limite influen.
- Composição	Peça	Desgaste	Rebolo
Rebolo		Temperatura	- Desgaste
- Geometria	Velocidade de	Duração do Processo	- Empastamento
- Composição	Corte		Fluido de corte
Fer. De Dressamento			- Contaminação
- Tipo	Condições de dress.	Influências externas	- Variação das prop.
Fluido de Corte			Economia
- Tipo	Pressão e vazão do	- Vibrações	Produtividade
- Alimentação	fluido de corte	- Temperatura	Custo de fabricação

O Quadro 1 mostra a relação entre os parâmetros de entrada divididos em grandezas de sistemas e variáveis. Com a interação dessas grandezas tem-se o resultado de trabalho alcançado em cada processo de retificação. O processo em si pode ser caracterizado por grandezas como força de corte, potência, desgaste do rebolo, temperatura e duração do processo. As influências externas como vibrações e temperaturas alternantes também atuam sobre o resultado do trabalho [1].

As principais grandezas características para descrever o processo de retificação são:

- As componentes da força de usinagem;
- A potência de corte (potência de entrada no motor da retificadora);
- O desgaste do rebolo;
- A temperatura na região de contato.

Deve-se ter noção também de como as grandezas de entrada variáveis atuam no processo de retificação. As grandezas de entrada variáveis, mais significativas para a retificação cilíndrica externa, são a velocidade de avanço v_f , a velocidade da peça v_w , a velocidade periférica do rebolo v_s , o dressamento do rebolo e a quantidade de refrigeração aplicada no processo. Para este trabalho é levado em conta o que cada variável de entrada causa na espessura de cavaco equivalente h_{eq} . Esse parâmetro permite caracterizar o grau de solicitação de um rebolo sob determinadas condições de corte. Vários pesquisadores na área de retificação exprimem os resultados de retificação, tomando por parâmetro de base a espessura de corte equivalente.

A espessura de corte equivalente h_{eq} permite caracterizar o grau de solicitação de um rebolo [8]. Esse parâmetro exprime uma relação que as variáveis de entrada causam no formato do cavaco no processo de retificação. Um valor elevado desse parâmetro está relacionado com um cavaco mais espesso que afeta mais a estrutura do rebolo. Um valor mais reduzido desse

parâmetro indica um cavaco menos espesso e que afeta principalmente a estrutura do ligante do rebolo. Este parâmetro, portanto, deverá ser mantido baixo, pois só assim pode-se tornar o processo com CBN economicamente viável.

A espessura de corte equivalente é, portanto, um parâmetro muito importante na determinação dos parâmetros de corte na retificação. A utilização prática de h_{eq} se justifica pelo fato de ela ser facilmente calculada e constante em cada fase da operação (desbaste, acabamento).

O desgaste de rebolo não exerce influência sobre a espessura de corte equivalente teórica, que, então, pode ser considerada constante ao longo de toda a operação. A espessura de corte equivalente pode ser utilizada como parâmetro de base para a escolha racional das condições de corte na retificação [8].

a) Influência da velocidade de avanço do rebolo v_f

Um aumento da velocidade de avanço, mantendo-se as demais variáveis de entrada constantes, leva a um aumento da espessura de cavaco equivalente e , assim, a um aumento das componentes da força de usinagem. A potência de corte é diretamente proporcional à força de usinagem e em decorrência disso tem o mesmo comportamento desta. O valor de h_{eq} se eleva com o aumento da velocidade de avanço, fazendo com que o formato do cavaco se torne mais espesso ocasionando um maior desgaste do rebolo devido à maior agressividade desse em relação ao ligante do rebolo. A temperatura do processo se eleva. O tempo de corte é reduzido graças ao aumento da taxa de retificação [1].

No resultado de trabalho tem-se um aumento do erro de forma, um aumento também dos valores de rugosidade da peça e um aumento da camada limite influenciada termicamente. A Figura 6 mostra a interdependência entre uma das grandezas variáveis de

entrada, as grandezas características do processo e o resultado de trabalho na forma de um diagrama de bloco. A velocidade de avanço é variada nesta figura [1].

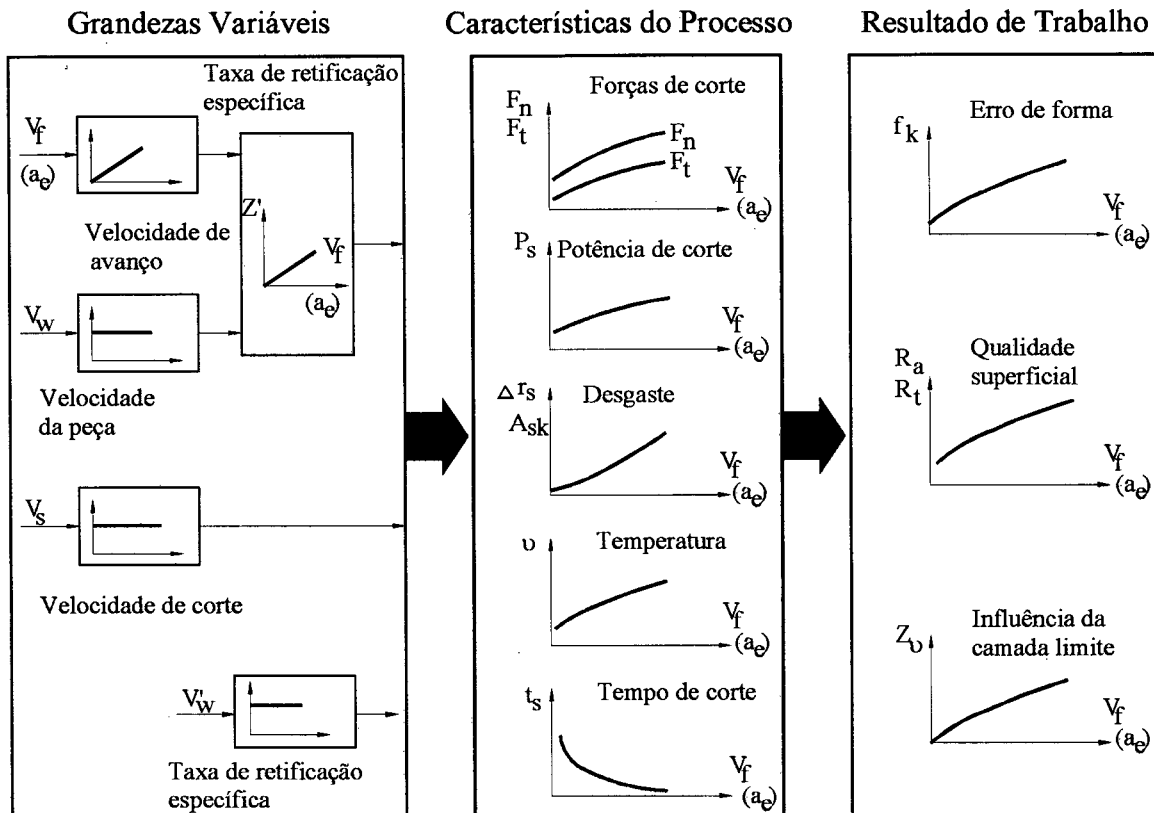


Figura 6 - Influência da velocidade de avanço sobre as grandezas características do processo e resultado de trabalho [1]

b) Influência da velocidade da peça v_w

Um aumento da velocidade tangencial da peça (v_w) na retificação externa cilíndrica de mergulho, de uma forma geral, só é procedida associada a um aumento da velocidade tangencial periférica do rebolo (v_s). Desta forma a influência da velocidade de corte sempre se superpõe a uma variação da velocidade tangencial da peça. Para aspectos de estudo, variando-se apenas a velocidade tangencial da peça, tem-se uma pequena variação das forças de corte,

potência de corte e desgaste do rebolo. Inicialmente, apresentam um pequeno crescimento e após superarem um valor máximo, novamente apresentam um pequeno decréscimo [1].

Velocidades tangenciais da peça crescentes diminuem a influência localizada das fontes térmicas. Com isso ocorre uma diminuição da influência da camada limite. A qualidade superficial e os erros de forma são pouco influenciados pela variação da velocidade da peça, mas apresentam quase sempre um melhora para maiores valores de velocidade da peça. Como o valor absoluto na fórmula do h_{eq} é muito pequeno para a variação da velocidade periférica da peça, ela quase não tem influencia sobre valor final da espessura equivalente, mas um aumento apenas dessa variável indicaria de qualquer forma um aumento no valor de h_{eq} , podendo trazer com isso maiores prejuízos para a estrutura do rebolo [1].

A Figura 7 mostra esquematicamente a influência da velocidade tangencial da peça sobre as características do processo e do resultado de trabalho [1].

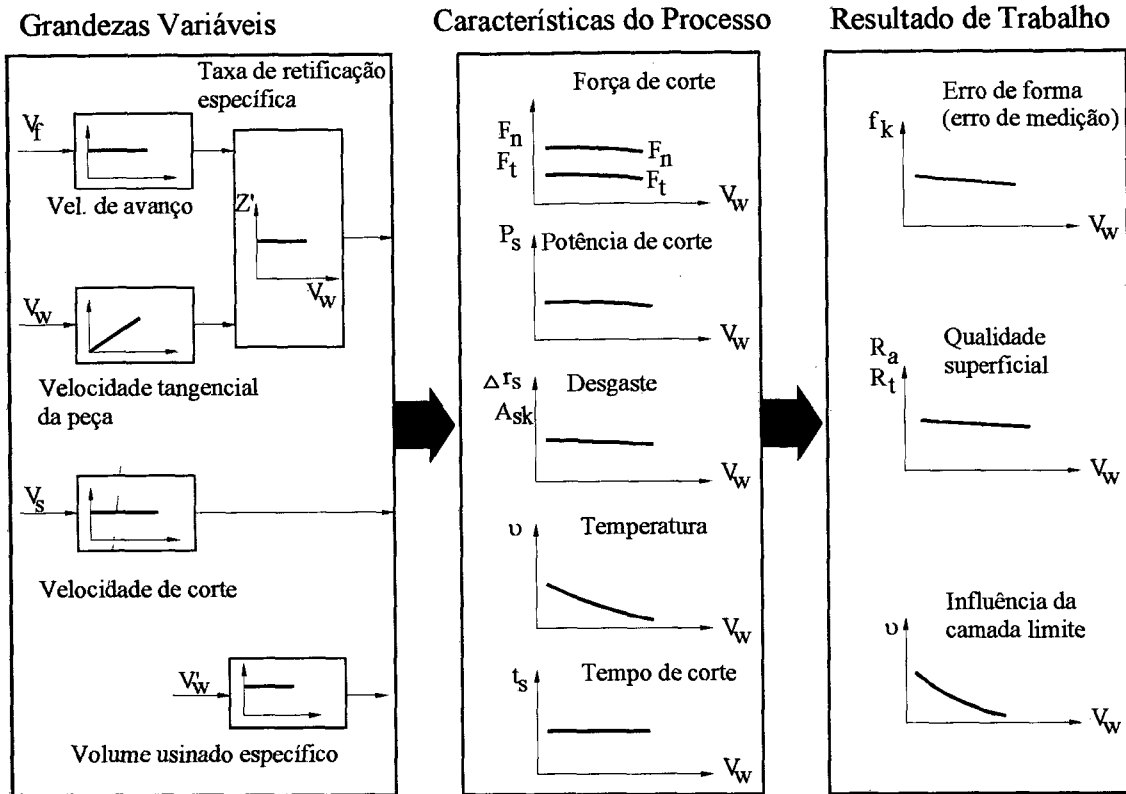


Figura 7 - Influência da velocidade tangencial da peça sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho na retificação cilíndrica externa de mergulho [1]

c) Influência da velocidade periférica do rebolo v_s

Um aumento da velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo tem influência positiva sobre as forças de corte, desgaste e qualidade superficial. No entanto, também tem-se problemas, como por exemplo uma sollicitação térmica mais elevada da peça e a exigência de uma segurança mais elevada para o emprego de altas velocidades de corte [1].

As forças de corte têm um decréscimo com o aumento da velocidade de corte. Isso está relacionado com a diminuição da seção do cavaco. A potência de corte de uma forma geral aumenta com o aumento da velocidade de corte. O valor da espessura de cavaco equivalente

cai para maiores valores da velocidade de corte, o que ocasiona menores solicitações para o rebolo e com isso menores variações do resultado de trabalho [1].

Os erros de medida e os parâmetros de rugosidade tendem a apresentar valores menores, enquanto a influência da camada limite tende a aumentar para valores maiores de velocidade de corte [1].

A Figura 8 mostra uma visão geral da dependência das grandezas características do processo e do resultado de trabalho em relação a velocidade de corte [1].

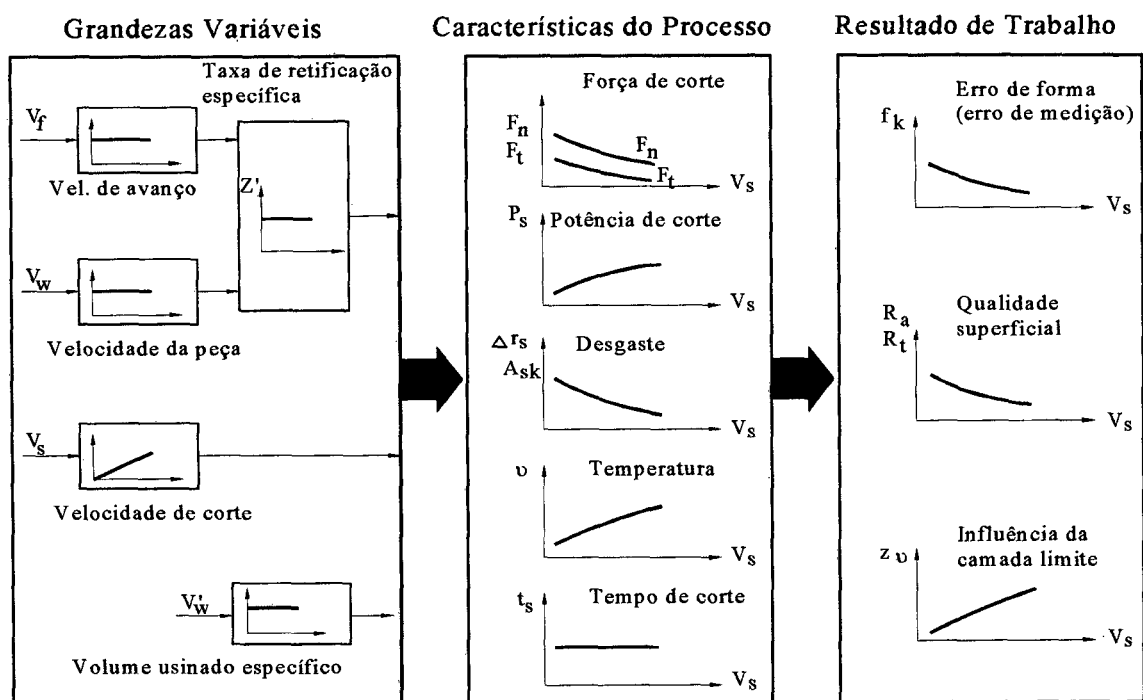


Figura 8 - Influência da velocidade de periférica do rebolo sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho [1]

Outro parâmetro de muito interesse na retificação é a relação G . A relação G é o valor numérico da relação entre o volume retirado da peça (V_w) e o volume desgastado do rebolo (V_s). Para peças de aço endurecidas a relação G do processo é menor quando comparada à relação G

de peças de aço melhor usinabilidade, porque o cavaco gerado na usinagem de materiais endurecidos normalmente causa um grande desgaste no ligante. Isso favorece o arrancamento dos grãos. Procura-se sempre obter um valor maior para a relação G , de modo que o processo de retificação fique menos dispendioso, em se tratando de desgaste de ferramenta e material usinado. Uma maneira de se obter com uma relação G maior é diminuir a espessura de cavaco equivalente, para que o desgaste do rebolo seja pequeno (dominantemente abrasivo).

A retificação neste trabalho é abordada apenas com importância secundária. Um embasamento mais detalhado para o processo de retificação pode ser visto com maiores detalhes nos trabalhos de Bertalan [2], da Silva [9] e Basto [10].

2.1.6 – FLUIDO DE CORTE

A grande quantidade de calor produzida na retificação pode levar a consideráveis solicitações térmicas na ferramenta e na peça. Pelo lado da ferramenta, a falta de uma lubrificação e refrigeração adequada leva a um desgaste mais acentuado. Pelo lado da peça, podem ser produzidos problemas como alterações de dureza, áreas queimadas e manchadas, trincas, empenamentos e deformações. Além disso, os poros do rebolo, que tem a função de alojar momentaneamente os cavacos formados, são relativamente pequenos e, para que se mantenha a capacidade de corte do rebolo, eles devem ser desobstruídos continuamente. Deste modo, quase sempre são empregados fluidos de corte na retificação.

O fluido de corte tem as seguintes funções:

- Redução do atrito entre o grão abrasivo e peça e entre ligante e peça pela formação de um filme de lubrificante estável,

- Refrigeração da superfície da peça por absorção e o transporte do calor,
- Limpeza do rebolo e
- Formação de um filme protetor contra corrosão para máquina-ferramenta e para a peça.

As propriedades físicas, químicas e biológicas do fluido de corte influenciam o processo de fabricação de uma maneira considerável. Em decorrência disso a escolha da ferramenta e também a escolha do fluido de corte correto tem uma importância fundamental [1].

Os fluidos de corte podem ser classificados nos seguintes tipos:

- Não-miscíveis em água ou óleos,
- Emulsões de óleo em água e
- Soluções aquosas.

Em relação aos fluidos de corte à base de água, os óleos apresentam a vantagem de uma melhor lubrificação. A sua viscosidade cinemática, para temperatura de 40 °C conforme especificação, varia entre 20 e 60 mm²/s e com isso é aproximadamente 50 vezes maior que a viscosidade cinemática da água. A boa propriedade de lubrificação do óleo apresenta a vantagem de reduzir a força de corte e melhorar a qualidade da superfície. Para mesmos valores de taxa de retificação específica, a força normal específica (F_n') e a rugosidade média (R_a) são menores quando se utiliza óleo ao invés de emulsões. Como na retificação as temperaturas mais elevadas são decorrentes de atrito, o efeito de lubrificação do óleo leva a uma diminuição da temperatura máxima maior que a redução da temperatura obtida pela ação refrigerante da emulsão. De forma correspondente, a solicitação térmica da peça é menor empregando-se óleo [1].

Como desvantagens do óleo são citadas a refrigeração relativamente baixa, e principalmente seu tratamento como resíduo de processo de usinagem. Por isso, nas indústrias, a utilização de emulsão de óleo em água é preferida em relação à aplicação de óleo de corte puro. Usualmente, para se evitar gastos maiores com retrabalho do fluido, são utilizadas emulsões com concentração de óleo de até 20 % dependendo do caso do processo de retificação.

Neste trabalho foi usada uma emulsão de óleo em água com 5% de concentração de óleo. Para a faixa de velocidade de corte empregada a utilização de uma emulsão é satisfatória. Apenas para velocidades de corte acima de 80 m/s, óleos puros e aditivados são aconselháveis. As emulsões tem maior ação refrigerante e se apresentam bem funcionais em termos de lubrificação para a porcentagem de óleo em água de 5 %. A qualidade superficial fica um pouco reduzida, mas não o efeito da temperatura que principalmente na peça é praticamente todo eliminado.

Não só o tipo de fluido de corte, mas também a potência do sistema de alimentação do fluido de corte, tem importância marcante na retificação. Atualmente as vazões específicas empregadas na retificação por 1 mm de largura do rebolo estão na ordem de 1 l/min e podem ser consideradas muito baixas. O aumento na vazão de 5 a 10 vezes leva a uma melhora do resultado de trabalho [1].

Para a manutenção das características de um processo de retificação, a limpeza de um fluido de corte é indispensável. O tamanho da partícula que deve ser eliminada depende do tipo de serviço que esta sendo realizado.

Para este trabalho será realizada a limpeza através de filtros de papel. Na filtragem do fluido de corte é possível atingir um certo grau de limpeza, de acordo com a malha do filtro empregado. Com o fechamento dos poros do filtro, no decorrer do tempo a capacidade de uma filtragem se desloca cada vez mais para partículas menores, isto é, para uma filtragem melhor. Para evitar um fechamento total do filtro precocemente, os poros ou a malha do filtro deverá ser

escolhida de um tamanho mínimo, apenas necessário. Quando então a malha do filtro existente é entupida ela deve ser substituída de modo que a nova malha colocada possa novamente filtrar satisfatoriamente.

2.1.7 – MECANISMOS DE DESGASTE DO REBOLO

Não só a peça é afetada pelas elevadas temperaturas localizadas e pelas altas pressões da região de corte, mas também a ferramenta é influenciada por essas características do processo de corte. No desgaste da ferramenta pode-se verificar desgaste no grão e no ligante. A Figura 9 mostra as formas de desgaste.

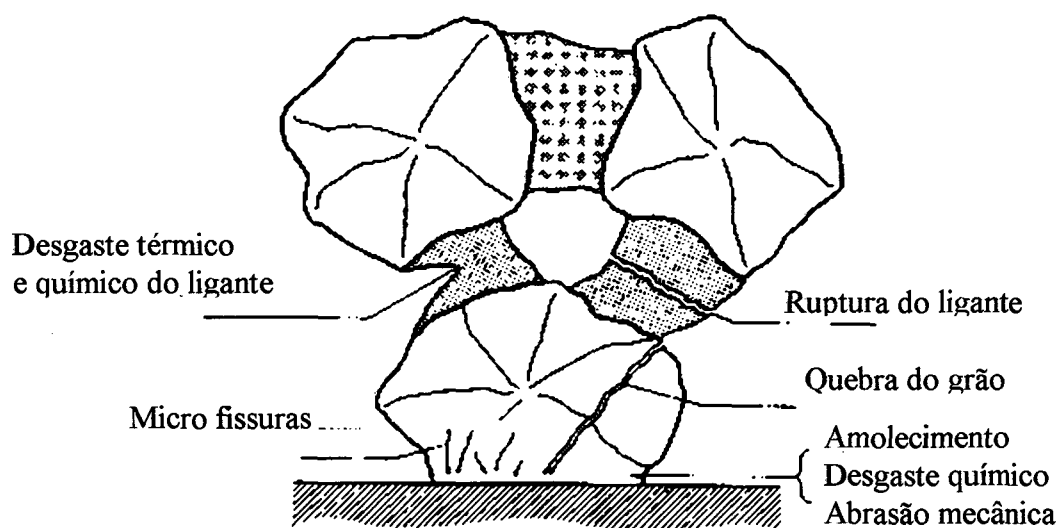


Figura 9 - Formas de desgaste no grão e no ligante [1]

O desgaste dos grãos abrasivos tem início nas camadas cristalinas próximas à camada superficial do grão abrasivo. Nessas camadas, as pressões e temperaturas extremamente altas

levam a fenômenos de oxidação e de difusão. Isto reduz a resistência abrasiva do material, formando uma camada menos resistente à compressão, que devido à ação mecânica subsequente é removida por abrasão e com isto, novas camadas cristalinas do grão abrasivo serão submetidas a este tipo de desgaste [2].

Além disso, pela ação mecânica e térmica alternante é possível ocorrer uma fadiga da estrutura cristalina em locais com falhas que podem ser encontrados em todos materiais (na forma de impurezas na estrutura cristalina, em contornos de grãos, variações de dureza, etc.), onde iniciam fissuras de fadiga. Essas fissuras podem propagarem-se e levar ao lascamento de partes do grão ou podem provocar a formação de uma macro fissura levando ao fissuramento de grandes partes dos grãos abrasivos [2].

Em muitos casos o desgaste dos grãos abrasivos é causa imediata para o desgaste do ligante, pois devido ao achatamento do gume tem-se um aumento da força de atrito, que leva a um aumento localizado da força de corte e com isto, ultrapassa-se a resistência mecânica do ligante. É possível ocorrer a quebra de vários grãos em cadeia. Dependendo de como o grão está ancorado no ligante, esse desgaste pode estar mais localizado no grão ou mais no ligante. O ligante também pode sofrer um desgaste sem a atuação do grão abrasivo, diretamente pela ação química ou térmica do meio.

Resumindo pode-se diferenciar as seguintes causas de desgaste de rebolos:

- O cegamento dos grãos isolados, decorrente do desgaste abrasivo pela adesão, corrosão e difusão e por microfissuramento condicionado pelas tensões residuais térmicas;
- A quebra de grãos inteiros, decorrentes da solicitação excessiva do ligante, bem como pela ação térmica ou química sobre o ligante.

A interligação desses dois mecanismos de desgaste caracteriza o comportamento de desgaste do rebolo. Fala-se de um efeito de auto-afiação quando os gumes cegos, em decorrência da maior ação da força, quebram no tempo certo para fora do ligante e permitem a ação de novos gumes.

Para taxas de retificação específica pequenas ou espessuras de cavaco equivalentes também pequenas, tem-se a dominância do desgaste abrasivo e micro-lascamentos, ao passo que com um aumento da taxa de retificação específica ou da espessura de cavaco equivalente o fissuramento de pedaços maiores dos grãos caracterizam mais as formas de desgaste, inclusive chegando a quebra total dos grãos [1].

A Figura 10 mostra a influência dos mecanismos de desgaste sobre a velocidade de desgaste radial do rebolo.

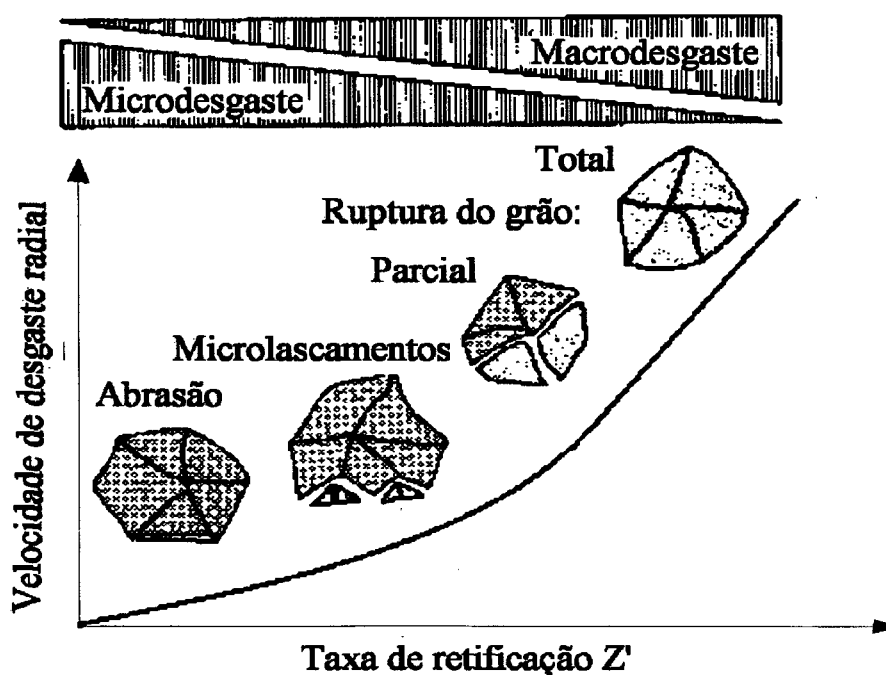


Figura 10 - Influência dos mecanismos de desgaste sobre a velocidade de desgaste radial [1]

Para rebolos de abrasivos superduros o interesse por um desgaste abrasivo é mais pronunciado, mesmo que os demais mecanismos, típicos para os abrasivos convencionais também possam ocorrer.

A abrasão dos cristais de CBN ocorre devido à ação abrasiva do material da peça e de cavacos durante o processo de retificação. A difusão só tem importância significativa quando a afinidade entre os parceiros de atrito é pronunciada. Através da abrasão contínua dos cristais de CBN ocorre um crescente arredondamento e aplainamento dos grãos, levando com isso a uma elevação da força de corte e da energia exigida pelo processo de retificação [5]. Devido à elevada dureza dos materiais superabrasivos em relação ao material das peças a velocidade de progressão do desgaste abrasivo é muito pequena. Para um desgaste abrasivo muito pronunciado podem ocorrer micro e macrolascamentos.

O lascamento dos cristais de CBN é o segundo tipo de desgaste que ocorre em um rebole de CBN. Este tipo de desgaste proporciona a formação da geometria afiada dos gumes, elevando a capacidade de corte dos grãos e reduzindo com isso as forças exercidas sobre eles. O lascamento de cristais de CBN é desejado de forma limitada como modo de desgaste. No caso otimizado ocorrem predominantemente o desgaste de abrasão e de forma secundária o desgaste de lascamentos [5].

O terceiro tipo de desgaste, isto é, o arrancamento do grão de CBN, ocorre quando a carga sobre um grão ultrapassa a resistência do ligante. O arrancamento de grãos de CBN só é desejada quando a capacidade de corte de cada gume está esgotada. O arrancamento prematuramente significa uma ajustagem errada dos parâmetros do processo e deve ser totalmente evitada, pois ocasiona uma drástica elevação dos custos de ferramenta do processo [5].

Essas considerações básicas do processo de desgaste em rebolos de CBN mostram que é necessário ajustar a propriedade do ligante à resistência do grão e aos parâmetros do processo de retificação. Apenas assim pode-se utilizar as vantagens tecnológicas da dureza extrema dos grãos de CBN, muito mais caros que grãos abrasivos convencionais. Num uso otimizado de um rebole de CBN, o ligante solta o grão apenas quando sua capacidade de corte estiver esgotada [5]. Para alcançar esse modo de desgaste o valor do parâmetro h_{eq} deve ser baixo, pois deste modo reduz-se o efeito do desgaste sobre o ligante.

2.1.8 - APLICAÇÕES DOS REBOLOS CBN

Rebolos de CBN permitem o uso de velocidades periféricas em aplicações industriais superiores a 200 m/s, para a qual apresentam melhores resultados [11,12]. A retificação com rebolos de CBN normalmente provoca altos valores de rugosidade nas peças no início da utilização do rebole. Com o desgaste dos grãos abrasivos mais protusos a rugosidade da peça é melhorada. Uma variação da qualidade superficial da peça no decorrer da utilização do rebole é geralmente indesejada na fabricação de peças. Através do controle dos parâmetros e da forma de condicionamento do rebole de CBN a rugosidade da peça pode ser mantida numa faixa de tolerância mais estreita.

Rebolos de CBN permitem uma taxa de retificação muito mais alta do que as taxas de retificação empregadas para rebolos convencionais, devida principalmente às velocidades de corte admitidas para este grão superabrasivo serem da faixa de até cinco vezes o valor da velocidade de corte para rebolos convencionais de óxido de alumínio. A alta dureza do grão de CBN com sua extrema resistência ao desgaste, capacidade térmica e estabilidade química fizeram com que a

tecnologia de retificação de peças metálicas fosse levada a um passo a frente em relação a sua situação convencional [11].

As ferramentas de CBN são a chave tecnológica para este desenvolvimento, particularmente porque elas permitem, não apenas a usinagem de superfícies de alta precisão técnica, mas também reduzidos tempos de retificação graças às suas altas taxas de remoção de material.

O desenvolvimento de novas máquinas de alto desempenho, projetadas para elevadas velocidades de avanço, de corte e da peça, permitiu que a taxa de remoção de material se multiplicasse por mais de quatro vezes nos últimos quinze anos. O domínio do processo de retificação para máquinas com velocidade de corte de 120 a 170 m/s é ainda largamente baseado em experiências práticas. Particularmente bons níveis de desempenho podem ser alcançados com rebolos de CBN onde altas velocidades periféricas são aplicadas em conjunto com altas velocidades de avanço. A alta taxa de remoção alcançada com esta tecnologia de retificação permite, algumas vezes, o remanejamento de técnicas de corte previamente usadas, como torneamento e fresamento. Por isso, hoje a retificação é mais que somente uma técnica de acabamento, pois alcançou um nível de produtividade alto, enquanto que ao mesmo tempo gera uma qualidade de acabamento superficial excelente e precisão na peça [13].

Os primeiros trabalhos realizados, avaliando o comportamento de rebolos de CBN na retificação com forças de corte controladas, mostraram resultados similares àqueles obtidos com grãos abrasivos convencionais [14]. Outros trabalhos têm mostrado um comportamento transiente com CBN, acusando altas forças e altas taxas de desgaste do rebolo durante o estágio inicial da retificação logo após o condicionamento do rebolo e depois reduzindo progressivamente e mostrando por fim um estado mais estável [15]. Este comportamento instável da retificação com

CBN dificulta o uso destas ferramentas e é uma das razões principais do CBN não estar sendo mais frequentemente aplicado na indústria [16].

O gráfico da Figura 11 compara os resultados obtidos com rebolos CBN com ligante resinóide e rebolos convencionais de corindum, na retificação de canais de brocas de aço rápido M2 (S-5-6-5-2) com 64 HRC [17].

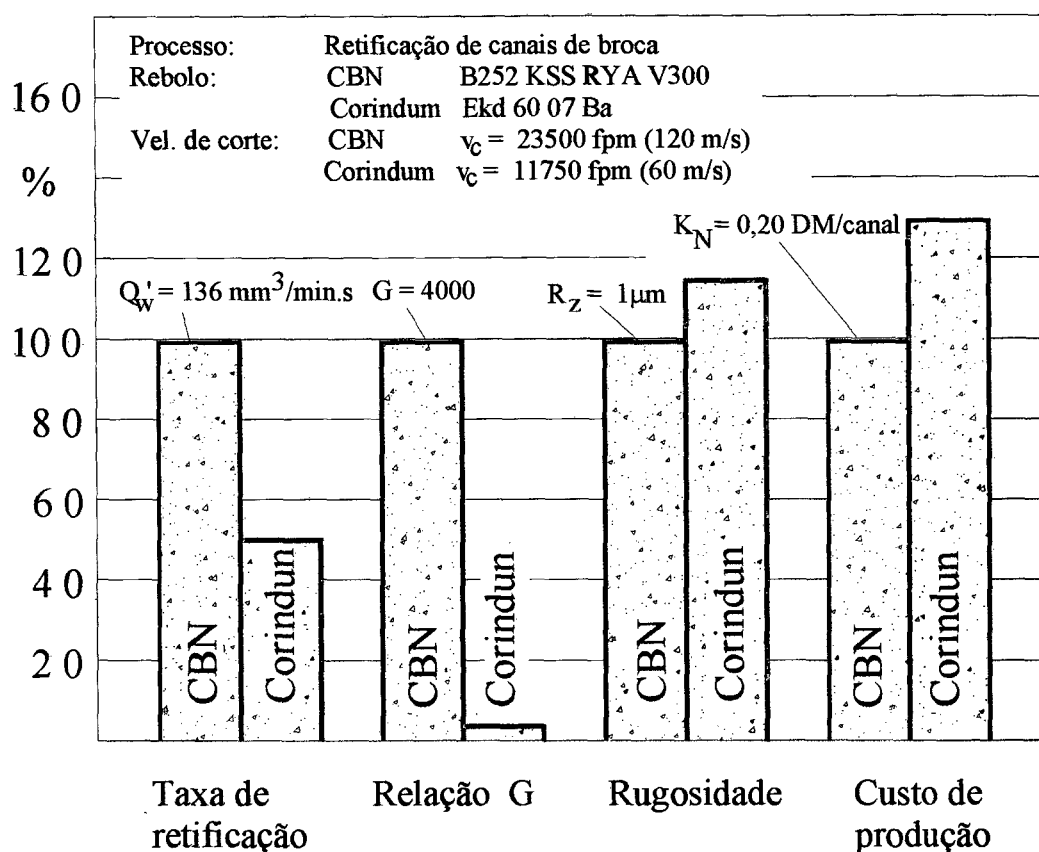


Figura 11 - Comparação entre rebolo CBN resinóide e rebolo convencional de corindum para uma caso prático de usinagem de canais de brocas [17]

O rebolo de CBN em condições de corte otimizado apresenta resultados melhores que os rebolos de corindum, principalmente na relação G, bem como na qualidade das peças obtidas, na taxa de retificação e nos custos de cada peça. Verifica-se um melhoria de 55 % em relação a taxa

de retificação, 95 % em relação a relação G, 15 % em relação a rugosidade da peça e em 30 % aproximadamente em relação ao custo de produção por canal de broca quando se emprega o CBN.

Um outro exemplo de aplicação para retificação com CBN citado na bibliografia é a retificação de eixos de engrenagens. Comparado com o uso de rebolos convencionais, a retificação com rebolo de CBN utilizando o condicionamento através de dressamento por toque permitiu uma redução do tempo de retificação de 30 segundos para 2 segundos, permitindo a obtenção de rugosidades R_z menores que $4 \mu\text{m}$ com tamanho de grão de CBN de $151 \mu\text{m}$. Um volume de material de $V_w \approx 20000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ foi removido entre o intervalo de duas operações de dressamento. Os intervalos de dressamento na retificação mostraram-se maiores na bibliografia para maiores tamanhos de grãos de CBN quando condicionados através de dressamento de toque. A Figura 12 mostra a variação da relação G para diferentes tamanhos de grão de CBN. Nesta análise não aconteceu necessariamente uma piora da qualidade superficial [13].

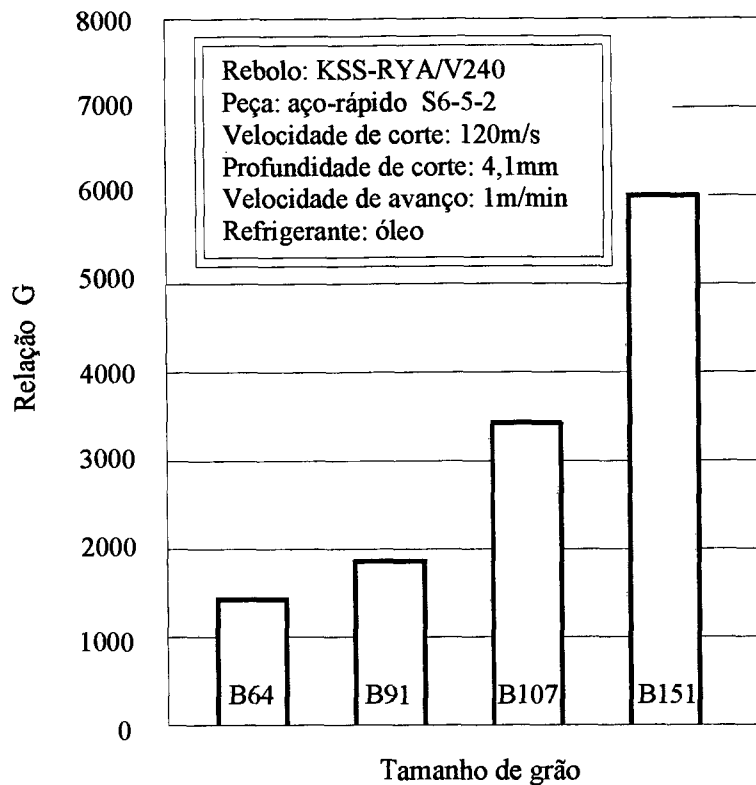


Figura 12 - Influência do tamanho de grão na relação G na retificação [13]

Grãos de rebolos mais finos danificam termicamente menos a peça, pois pequenos cristais de CBN são muito pouco arrancados do ligante no processo de dressamento, principalmente aqueles que não encontraram grãos de diamantes do rolo dressador durante seu condicionamento. Esses grãos são quebrados no início do processo de retificação devido às altas cargas nos cristais. Essa alteração da topografia do rebolo diminui o dano térmico da região de retificação na peça, mas aumenta consideravelmente a rugosidade alcançada na peça, como é mostrado na Figura 13 [18].

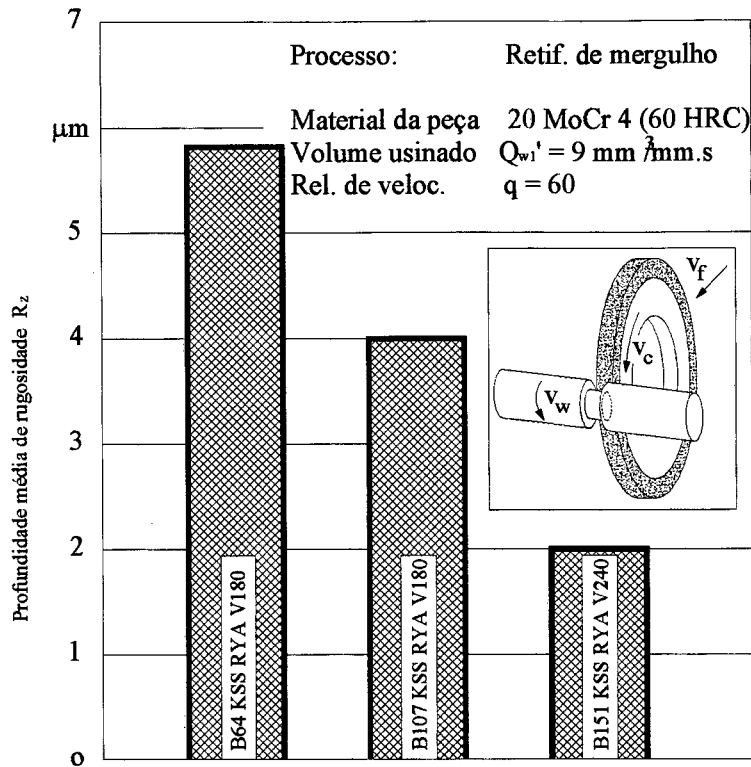


Figura 13 - Rugosidade média na peça retificada com diferentes granulometria de rebolos resinóides de CBN [18]

Os parâmetros de retificação como a própria especificação dos rebolos de CBN devem ser escolhidos com base principalmente no tipo de desgaste ocorrido nestes rebolos de superabrasivos. Deste modo deve-se dar uma atenção especial para os tipos de desgaste que podem ocorrer nos rebolos e o que eles acarretam. Uma escolha de parâmetros errados ou uma má especificação do rebolo pode inviabilizar a implantação da retificação com CBN.

O CBN é um excelente abrasivo para ferramentas de retificação. Falhas em alcançar resultados esperados é raramente um problema do abrasivo, mas frequentemente, ou quase sempre, devido às deficiências no maquinário, na escolha do rebolo, na preparação do rebolo ou na seleção de parâmetros de retificação [19].

Os valores dos parâmetros de retificação utilizados neste estudo foram definidos baseados em trabalhos já realizados e escolhidos conforme os valores para as propriedades fixadas devido à utilização de uma máquina convencional. A retificação foi empregada aqui apenas para simular o desgaste da ferramenta e o comportamento desta com o volume usinado, sendo que os parâmetros escolhidos foram mantidos constantes para que qualquer alteração na qualidade da peça retificada pelo rebolo no dressamento não fosse influenciada pelo processo de retificação, mas somente devido a variações no processo de dressamento.

2.2 - CONDICIONAMENTO DE REBOLOS

Entende-se por condicionamento todo processo de preparação do rebolo para o trabalho. Dressamento está quase sempre relacionado a um processo de perfilamento e afiação de um rebolo. No caso específico para dressamento de toque, elimina-se o processo de afiação do rebolo. O perfilamento refere-se ao condicionamento geométrico do rebolo. A afiação de um rebolo superabrasivo refere-se à retirada de ligante entre grãos para aumentar a protusão dos grãos abrasivos e assim capacitar o rebolo para o corte.

A qualidade de uma peça é influenciada não só pelos parâmetros de entrada, mas também pela topografia do rebolo e, em decorrência disso, do processo de dressamento.

Rebolsos de retificação de abrasivos convencionais são regularmente submetidos a dressamentos com uma ferramenta de diamante para deste modo sanar as falhas micro e macrogeométricas. Rebolsos convencionais possuem uma porosidade intrínseca que permite que qualquer que seja a quantidade da profundidade de dressamento, a porosidade continue existindo, não necessitando com isso qualquer processo de afiação. Em consequência o processo de dressamento de rebolos convencionais se resume a um processo de perfilamento [5].

As ferramentas para o dressamento aplicadas para rebolos convencionais são normalmente dressadores planos de diamante de gume único ou múltiplos gumes, dressadores com aglomerados de diamantes ou rolos rotativos.

A Figura 14 mostra a influência das condições de dressamento e do tipo de ferramenta empregada de dressamento sobre as grandezas características, sobre o comportamento do processo de usinagem e sobre o resultado de trabalho [1].

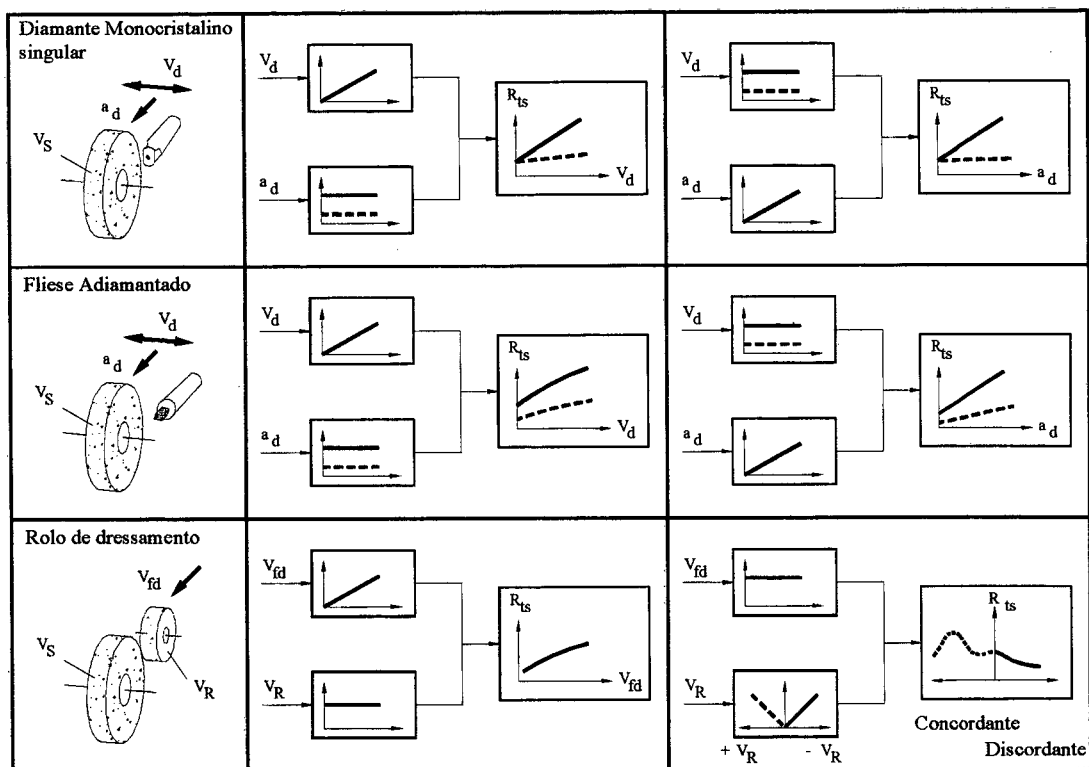


Figura 14 - Influência das condições de dressamento sobre a rugosidade para diversos processos de dressamento [1]

Para ferramentas de dressamento fixas (“Fliese” diamantado e diamante singular ou multigranular) a velocidade de avanço de dressamento (v_d) tem uma influência dominante sobre o resultado de trabalho. O aumento da velocidade de avanço aumenta a rugosidade efetiva obtida no rebolo durante o dressamento. Para um avanço demasiadamente grande, obtém-se um perfil semelhante ao de uma rosca na superfície do rebolo com uma rugosidade efetiva muito grande, o que tem uma influência negativa sobre o processo. Com velocidades de avanço de dressamento pequenas, tem-se uma diminuição da rugosidade efetiva, isto é, uma boa qualidade superficial, mesmo para rebolos com uma granulometria grosseira.

A rugosidade efetiva também varia com a penetração de dressamento. Pode-se verificar um pequeno aumento da rugosidade para pequenas velocidades de avanço e um grande aumento

para grandes velocidades de avanço, para valores crescentes da penetração de dressamento. Uma limitação da penetração do dressamento é dada pela limitação do desgaste admissível no diamante, de forma que as penetrações por curso de dressamento geralmente devem ser selecionados em níveis abaixo de $40 \mu\text{m}$ [1].

Para dressadores de diamante de ponta única, o dressador se desloca ao longo da superfície do rebolo, e é criada uma “rosca” que tem suas características dependente da velocidade de passagem do dressador, rotação do rebolo e penetração passiva de corte [20].

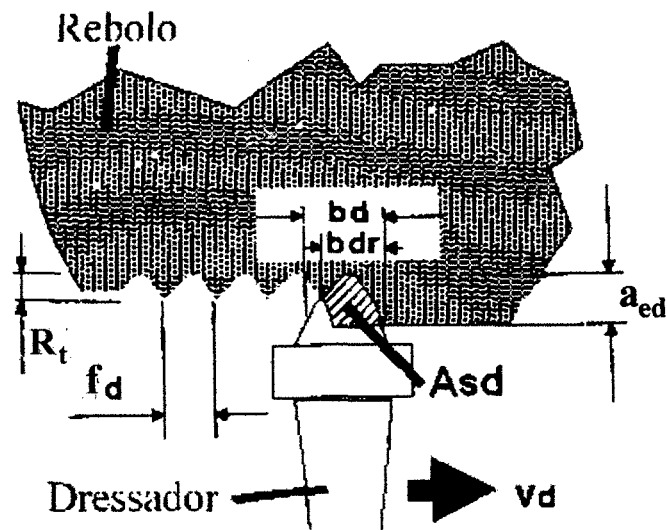
O dressamento pode alterar o desempenho de rebolos de retificação pela mudança da densidade dos gumes dos grãos abrasivos e suas afiações. Quando por exemplo um rebolo de óxido de alumínio vitrificado é dressado por um dressador de diamante de ponta única, dois efeitos podem resultar desta operação: os macroefeitos e os microefeitos. O macroefeito é causado pela forma da ponta do dressador e pelos parâmetros de dressamento. Desde que o rebolo de retificação tenha um movimento de rotação e o dressador tenha um movimento de translação, uma rosca é fabricada na superfície do rebolo. O macroefeito causa uma menor densidade de gumes e uma redução da retenção entre o ligante e o grão abrasivo para os grãos localizados no topo do perfil da rosca.

Por outro lado, o microefeito é causado pela fratura do grão, o que ocorre quando novos gumes são gerados pelo dressador. A afiação desses novos gumes depende da fragilidade do grão e da penetração passiva de dressamento. Usando condições de dressamento leves, isto é, pequenas penetrações passivas de dressamento a_{ed} e pequeno passo de avanço f_d , apenas muito poucas partículas são removidas ou quebradas, o que gera superfície de grãos planificados levando a uma menor afiação dos grãos abrasivos.

Verificou-se que para os parâmetros de dressamento, com predomínio do macroefeito, isto é, penetrações passivas a_{ed} e avanço grandes, a densidade de gumes gerados na superfície do

rebolo é baixa e a afiação de cada uma é alta. Para esta condição verificaram-se baixas forças de retificação, maiores vidas das ferramentas e rugosidade mais uniforme nas peças [7].

A Figura 15 mostra o esquema da macrotopografia característica de um rebolo no processo de dressamento com uma ferramenta de dressar de diamante de ponta única.



b_{dr} = largura real de ação do dressador; b_d = largura de ação do dressador;
 r_p = raio de ponta do dressador; R_t = profundidade de rugosidade teórica
(macro-efeito); f_d = passo de avanço de dressamento;
 a_{ed} = penetração passiva de dressamento; A_{sd} = área de dressamento.

Figura 15 - Operação de dressamento com dressador de ponta única de diamante [7]

A profundidade de rugosidade teórica (macroefeito) pode ser avaliada pela equação:

$$R_t = f_d / 8r_p \quad (7)$$

Para caracterizar as condições de dressamento um importante parâmetro utilizado é o coeficiente de sobreposição ou grau de recobrimento U_d , que é obtido pela relação entre a largura de ação do dressador b_d e o passo de avanço f_d :

$$U_d = b_d / f_d \quad (8)$$

Para menores coeficientes de sobreposição o rebolo é mais agressivo e são possíveis maiores taxas de remoção de material.

No dressamento com rolo diamantado, o sentido de rotação e a velocidade de corte têm uma importância muito grande sobre a característica topográfica superficial do rebolo. Com o aumento da velocidade de avanço de dressamento (v_{fd}) tem-se um aumento da rugosidade efetiva. Nisto, o aumento é maior para o dressamento concordante do que para o discordante. Com as demais condições mantidas constantes e variando-se apenas o sentido de rotação do rolo dressador, tem-se rugosidade efetiva menor para dressamento discordante do que para concordante. Para casos de trabalho que exigem uma elevada taxa de retificação específica, recomenda-se dressar em movimento concordante, ao passo que para obter uma boa qualidade superficial para pequenas taxas de retificação específicas recomenda-se o dressamento discordante. A transmissão de agressividade do rolo para o rebolo foi determinada experimentalmente em ensaios onde foi-se constatado que o movimento discordante resulta em topografias menos agressivas do que para movimento concordante do rolo com o rebolo.

Rebolos convencionais são produzidos na maioria dos casos com ligantes vitrificados, pois estes apresentam as melhores características para a aplicação na retificação convencional. Os rebolos vitrificados possuem uma alta rigidez e uma porosidade intrínseca em toda a sua profundidade.

Como visto anteriormente o modo de dressamento tem muita influência sobre o resultado de trabalho alcançado na peça retificada. Além do resultado de trabalho, o dressamento de rebolos de retificação tem também influência significativa na avaliação da ferramenta. Considerando o custo-benefício envolvido na sua aquisição, o dressamento passa a ter papel fundamental no consumo da parte ativa do rebolo. Principalmente para rebolos de CBN, o dressamento correto do rebolo é de suma importância para uma utilização otimizada da ferramenta. O grão abrasivo de CBN possui alta resistência ao desgaste e elevada estabilidade térmica, fazendo com que no processo de retificação o desgaste do rebolo seja muito pequeno. Por isso, o dressamento passa a ter papel fundamental no consumo do rebolo e sua otimização pode trazer alterações muito grande na avaliação final da ferramenta [7].

Para rebolos de CBN normalmente o perfilamento é feito por rolo dressador ou dressador estático denominado “Fliese” (ponta policristalina de diamante) e a afiação com mergulho de barras de óxido de alumínio sobre o rebolo.

O condicionamento de rebolos superabrasivos difere do condicionamento de rebolos convencionais. Mas eles também se diferem entre si devido às diferenças existentes nos ligantes de cada tipo de rebolo de CBN. Os rebolos com ligantes vitrificados tem o condicionamento mais semelhante ao de rebolos convencionais, isto é, apresentam apenas o processo de perfilamento. Diferem-se principalmente nas penetrações de dressamento, que são muito menores para rebolos de CBN.

Os rebolos superabrasivos com ligantes metálicos são normalmente utilizados no corte de pedras e mesmo sem apresentarem inicialmente qualquer porosidade são empregados nesta condição inicial no trabalho. Ocorre, então, uma afiação em processo sem a necessidade de uma afiação inicial.

Rebolos superabrasivos galvânicos não são normalmente dressados, pois apresentam apenas uma camada de grãos. Esse tipo de disposição de grãos em rebolos é normalmente utilizado em ferramentas de dressar, por isso a agressividade desse tipo de reboło não é normalmente problemática.

Para rebolos superabrasivos com ligante resinóide, normalmente são necessárias duas etapas no dressamento. A primeira é conhecida como perfilamento e tem como objetivo dar a forma ao reboło. Essa etapa do condicionamento deixa a parte ativa do reboło fora de condições de uso, com uma estrutura fechada. O ligante e grãos abrasivos estão na mesma altura na superfície do reboło. É necessária uma segunda etapa do condicionamento, denominada de afiação. A afiação retira parte do ligante abrindo com isso a estrutura do reboło, que se torna então apto a retificar. Os poros nos rebolos são necessários para armazenar os cavacos. Para todas as situações, em que depois de um processo de perfilamento seja necessário um processo de afiação, como nas ferramentas de CBN com ligantes resinóides, a principal desvantagem está na necessidade de um processo adicional, a afiação com bloco de óxido de alumínio, que nem sempre apresenta um domínio seguro [18].

A utilização cada vez mais freqüente de rolos diamantados para o perfilamento de rebolos CBN é decorrente da possibilidade de utilização destes na própria retificadora. A principal vantagem deste processo de perfilamento ainda está no seu curtíssimo tempo de processo, pois o rolo permite a realização de uma alta taxa de retirada de material. Além disso o grande número de diamantes no processo de perfilamento com rolo diamantado faz com que o perfil obtido seja de alta confiabilidade. A relação de material desgastado da ferramenta de dressar por material retirado do reboło é mostrada no gráfico da Figura 16 para diferentes ferramentas de dressamento [18].

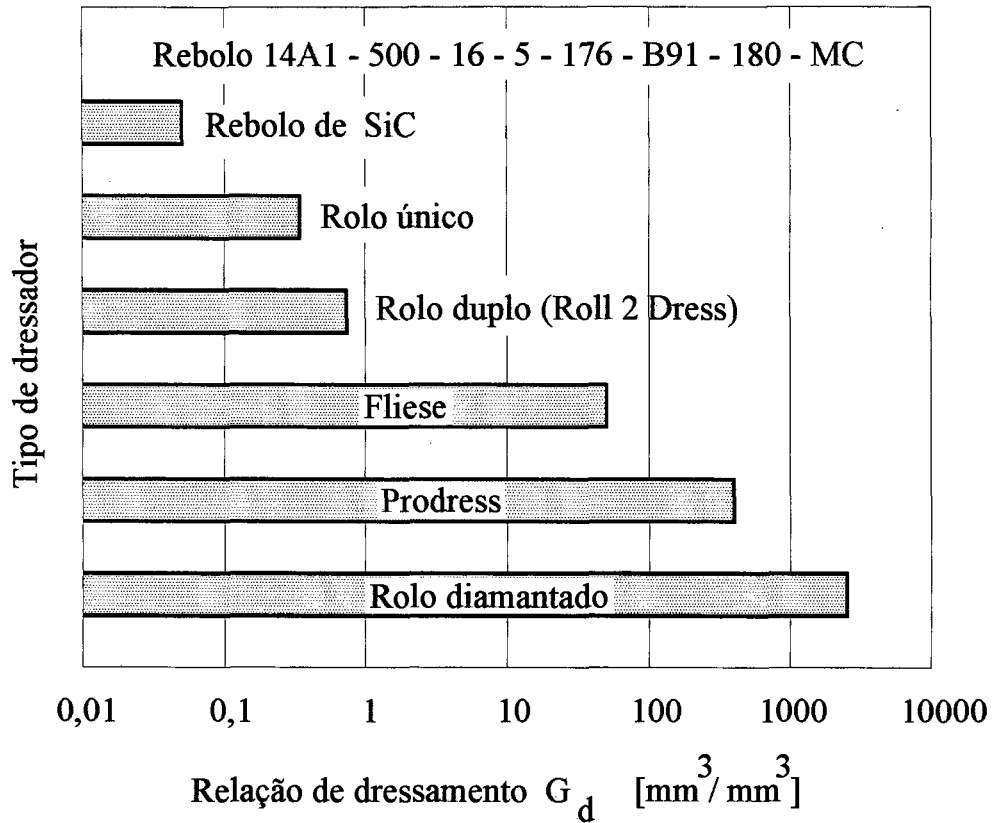


Figura 16 - O processo de dressamento diferencia-se consideravelmente através do desgaste da ferramenta de dressamento [18]

O perfilamento com rolo diamantado é esquematizado na Figura 17. A penetração de dressamento do rolo diamantado no rebolo superabrasivo está situada normalmente na faixa de 1/3 do tamanho de grão do rebolo. Esta dimensão representa normalmente a protusão do grão do rebolo.

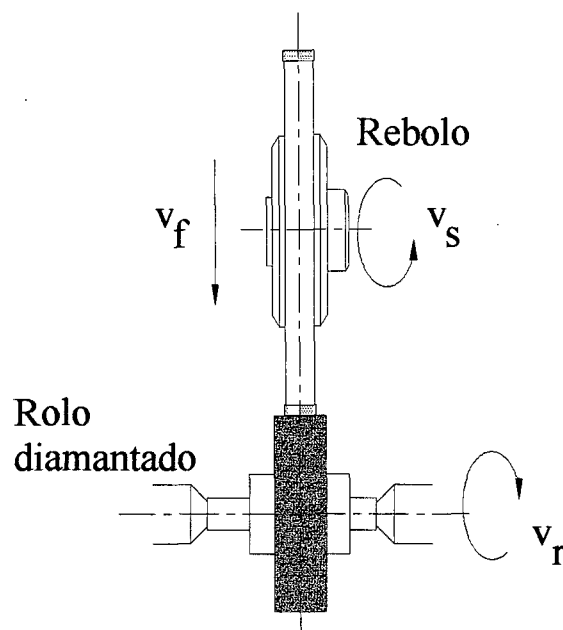


Figura 17 - Perfilamento do rebolo de CBN com rolo diamantado [2]

Após o perfilamento os grãos de CBN podem se encontrar mais ou menos arredondados. O grau deste arredondamento depende das condições do processo escolhidas para o perfilamento. Com um avanço elevado tem-se a produção de mais fraturas nos grãos e esses passam, assim, a ser menos arredondados. Com um menor avanço os grãos passam a sofrer maior abrasão no processo e se arredondam mais. Uma condição ótima de dressamento pode ser alcançada, desde que se saiba para que o rebolo deve se prestar após o condicionamento. Normalmente se tem uma estrutura um pouco mais arredondada quando se quer usar o rebolo para acabamento e uma estrutura mais agressiva dos grãos quando se pretende realizar um desbaste e conseqüentemente ter maiores taxas de retificação.

A Figura 18 mostra a atuação do rolo diamantado no processo de perfilamento de modo que este deixa a superfície do rebolo resinóide totalmente fechada. Grãos de CBN e ligante passam a ter a mesma altura no rebolo. Deste modo não é possível realizar a retificação, já que o

rebolo não possui espaço para armazenamento dos cavacos. Esses espaços serão produzidos no segundo passo do condicionamento, a afiação.

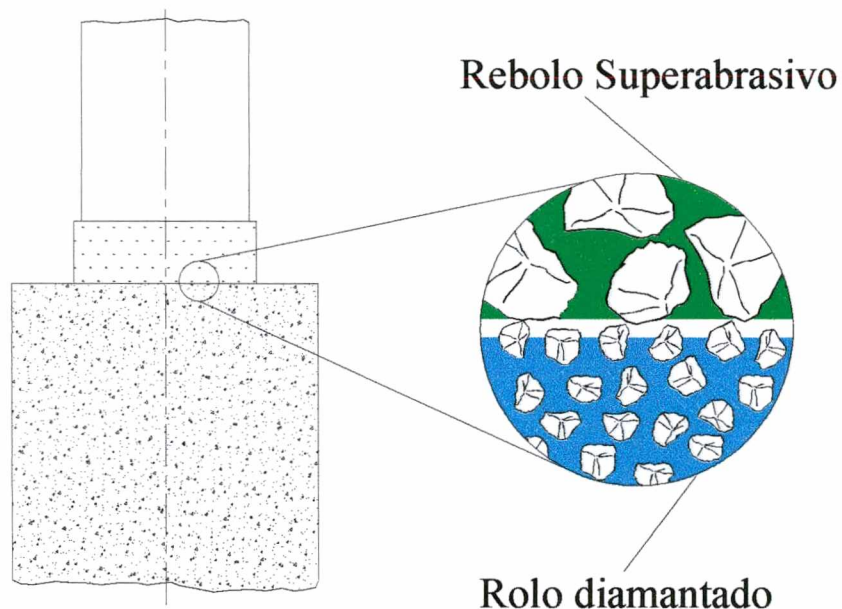


Figura 18 - Perfilamento convencional de rebolo de CBN resinóide com rolo diamantado

A afiação do rebolo superabrasivo com bloco de óxido de alumínio não tem como objetivo alterar o formato de CBN, já que o bloco de óxido de alumínio é bem mais mole que o CBN. O ligante resinóide é, então, removido neste passo até o ponto em que a estrutura esteja o suficientemente aberta para a realização do processo de retificação. Os grãos de CBN permanecem no formato em que foram deixados no perfilamento. A afiação tem como variáveis a quantidade de barra utilizada, o avanço da barra sobre o rebolo e velocidade de corte do rebolo [2,10].

Classicamente o recondicionamento de rebolos de CBN seguia o procedimento do dressamento de rebolos convencionais de óxido de alumínio. Os rebolos de CBN eram usados no processo de retificação até que um novo processo de condicionamento fosse necessário. A

penetração passiva de dressamento era igual ao valor para as ferramentas de corindum. Com isso a protusão dos grãos era totalmente retirada e uma nova afiação se fazia necessária. A Figura 19 mostra o condicionamento de rebolos de CBN, dividido em processo de perfilamento e depois de afiação [18].

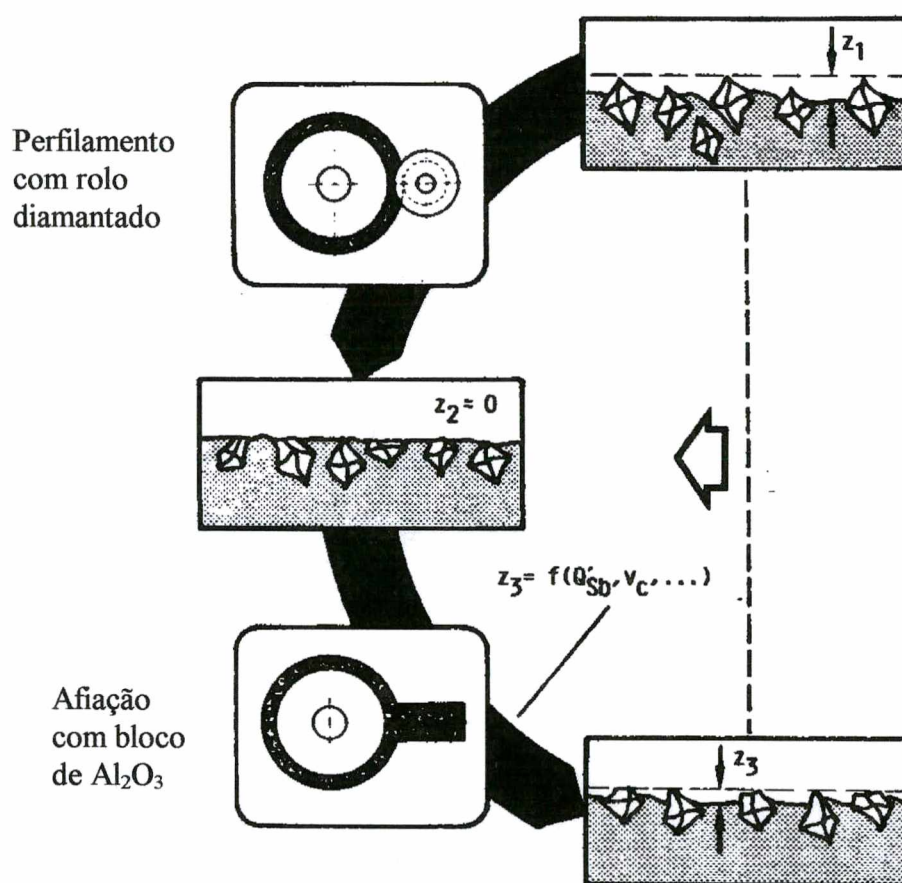


Figura 19 - Condicionamento de rebolos de CBN resinóides: processo de perfilamento e de afiação [18]

Na Figura 20 é mostrado o processo de afiação de um rebolo de CBN com um aparelho desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão, baseado em Schleich [21] e empregado em outros trabalhos [2,10].

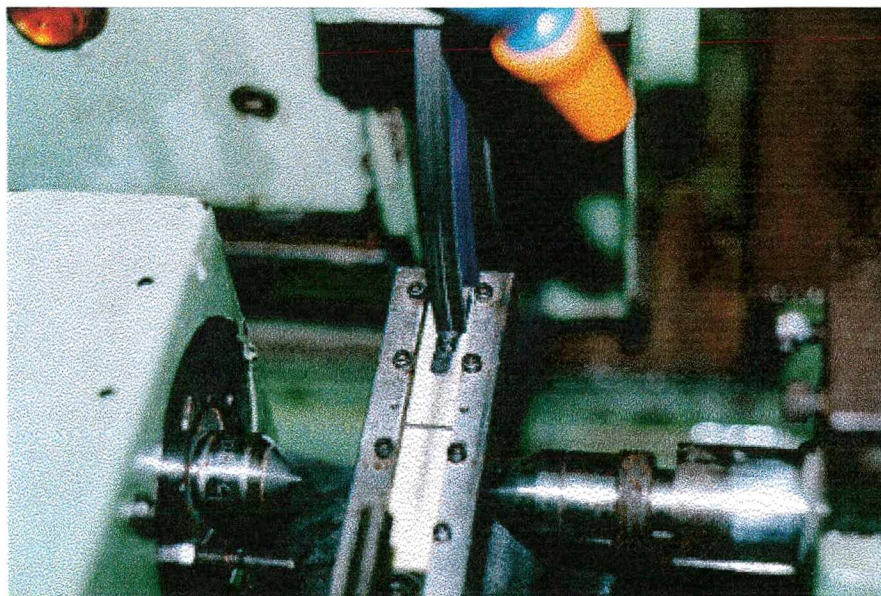


Figura 20 - Afiação do rebolo de CBN com bloco de óxido de alumínio [2]

A topografia do rebolo de CBN obtida nesta forma de condicionamento diferencia-se consideravelmente da situação quase estacionária que o rebolo assume em uso. Isto ocasiona uma variação considerável das grandezas de processo e do resultado de trabalho principalmente depois de cada processo de condicionamento. No início do processo da retificação as forças de corte e a temperatura da região de contato diminuem, mas a rugosidade da peça aumenta. Com o decorrer do uso retornam-se às condições estacionárias. Esta variação inicial é normalmente alta, de forma que a qualidade da peça apresenta uma variação considerável [18].

Um fato importante para a caracterização da superfície do rebolo no processo de condicionamento é a relação de velocidades utilizada no processo. A variação desta relação bem como o sentido das velocidades, isto é, concordante ou discordante, transmite uma estrutura mais

ou menos agressiva para a superfície do rebolo. Esta relação é mostrada no gráfico da Figura 21, desenvolvido na Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha. O eixo horizontal é a relação da velocidade do rolo diamantado e rebolo de retificação, v_r/v_s . À esquerda o rebolo e o rolo diamantado estão com velocidades concordantes, e à direita (números negativos) o rebolo e o rolo dressador estão com velocidades discordantes na região de contato [22].

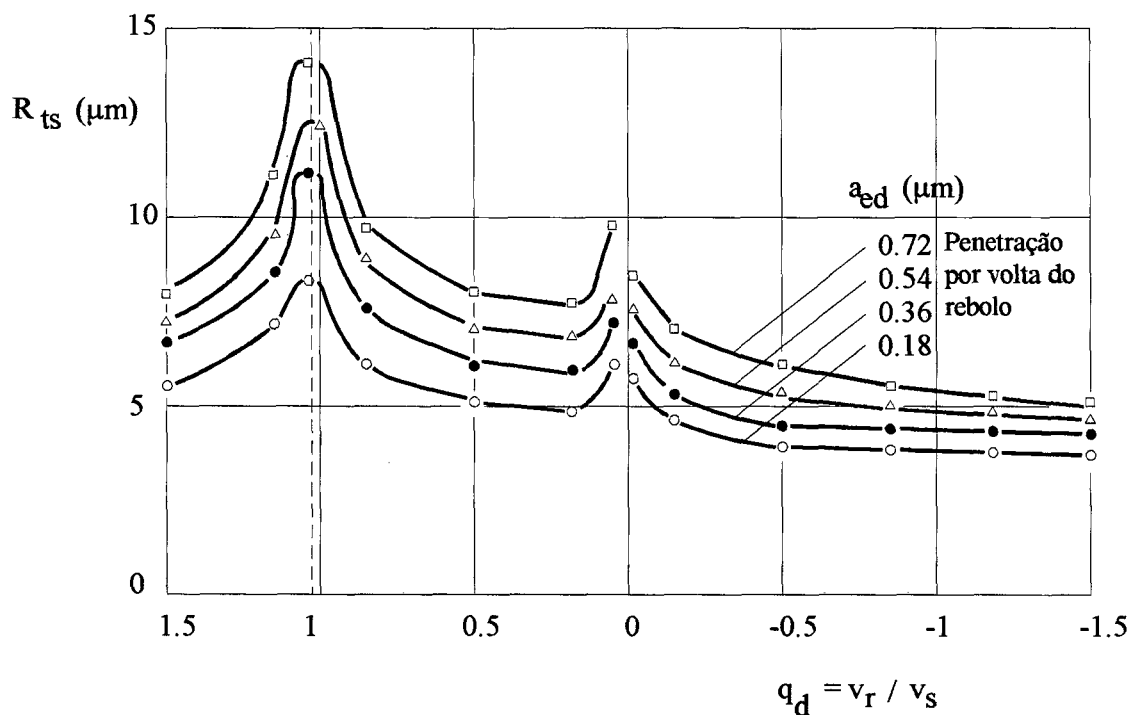


Figura 21 - Rugosidade transmitida para o rebolo no processo de dressamento com rolo diamantado [14]

De acordo com publicações anteriores [23,24] a variação da relação de velocidades apropriada diminui a temperatura localizada na região de contato da peça durante o processo de retificação. Relação de velocidade positiva perto de $q_d = 1$ resulta numa alta rugosidade R_{ts} do rebolo, o que indica um rebolo com alta capacidade de corte, causando também uma menor temperatura da região de contato.

A última variável no processo de dressamento convencional de rebolos de CBN com rolo diamantado é a penetração passiva de perfilamento. Para o perfilamento convencional de rebolos de CBN com ligante resinóide, retira-se normalmente cerca de 1/3 do tamanho de grão ou seja, de 30 a 35 μm , caso os grãos tenham tamanhos da ordem de 100 μm , garantindo-se que a estrutura dos grãos seja renovada.

Na retificação a protusão dos grãos tem influência muito grande na qualidade superficial alcançada na peça retificada, portanto o volume de ligante removido na afiação do reboło pode alterar de forma muito significativa o resultado no processo.

Devido ao condicionamento são deduzidos os seguintes problemas para o processo de retificação:

- O uso de ferramentas de diamantes rotacionais para o perfilamento de rebolos de CBN leva juntamente com altas penetrações passivas de perfilamento, a uma situação não satisfatória da protusão dos grãos abrasivos, e ocorrem altas forças de retificação ligadas a uma alta potência do processo. A qualidade da peça retificada altera-se consideravelmente com a quantidade de material retificado, pois a topografia do reboło de CBN alcançada no condicionamento é muito diferente da topografia da condição de regime do processo de retificação.

- Como para rebolos de ligante metálico ou resinóide a protusão dos grãos é totalmente retirada num perfilamento com profundidade convencional, requer-se um processo adicional de afiação para que o reboło esteja novamente em condição de retificar. Para rebolos com ligantes vitrificados o processo de afiação pode ser dispensado.

- A recuperação da protusão é possível através do processo de afiação, mas representa uma etapa adicional de trabalho. A recuperação da protusão do ajuste dos parâmetros

de retificação, mas para isso é necessária uma redução na taxa de retificação trazendo desvantagens automáticas no tempo de usinagem principal [18].

Por causas desses problemas é necessário o desenvolvimento de outras técnicas de condicionamento para os rebolos de CBN, e assim evitar os problemas e ganhar em relação à economia no processo. Uma destas técnicas é denominada de dressamento de toque (“touch-dressing”), e será abordada em mais detalhes no decorrer deste trabalho.

2.3 – DRESSAMENTO POR TOQUE EM REBOLOS DE CBN

O emprego cada vez maior de superabrasivos como o CBN nos processos de retificação de aços faz com que a atenção dada ao processo de condicionamento do rebolo aumente consideravelmente. Isso se deve ao fato do alto custo de aquisição e condicionamento ligado a esses rebolos.

Apesar do desenvolvimento muito grande na tecnologia de retificação com o desenvolvimento do grão abrasivo de CBN, os problemas da preparação destas ferramentas agem como limitadores para sua utilização satisfatória [18]. A evolução dos equipamentos e máquinas disponíveis na indústria possibilitaram o desenvolvimento de técnicas mais aprimoradas para o condicionamento dos rebolos. Principalmente no caso de superabrasivos, diamante ou CBN, um controle do processo de condicionamento pode garantir uma economia muito grande no custo do ferramental na retificação, que representa na retificação com superabrasivos uma grande parte do custo total do processo.

Durante um processo de retificação com CBN a condição da protusão dos grãos abrasivos do rebolo diferencia-se consideravelmente entre a protusão do rebolo dressado da protusão do rebolo na condição estável de processo. Essa oscilação da protusão causa uma variação das grandezas do processo e do resultado de trabalho. Essa variação da qualidade das peças muitas vezes pode não ser aceitável. Resultados obtidos na indústria e de estudos dão indicações que através de uma redução da penetração passiva de dressamento pode-se otimizar consideravelmente a preparação dos rebolos de CBN, dispensando, com isso, o processo de afiação [18].

O modo de condicionamento denominado de dressamento por toque tem como objetivo a recuperação do rebolo de retificação através de microperfilamento do rebolo provocando a

remoção parcial dos grãos do rebolo. Esta forma de perfilamento tem influência muito pequena sobre a protusão dos grãos, de modo que torna-se desnecessária a etapa de afiação, mesmo em rebolos resinóides. Devido a este fato esta técnica de condicionamento, onde tem-se apenas uma etapa de perfilamento, passa a ser denominada também de dressamento. Pelo fato da penetração passiva de dressamento se situar na faixa de alguns micrometros o processo é denominado de dressamento por toque. O dressamento por toque proporciona um consumo menor do rebolo durante o condicionamento, fazendo com que a durabilidade global deste aumente. Com isso, o processo pode ser regulado de uma maneira tal que o custo final do rebolo de CBN por peça se torne muito inferior ao do rebolo convencional por peça, mesmo sendo o rebolo de CBN mais caro que o rebolo de abrasivo convencional.

De acordo com a bibliografia existente [18] o dressamento por toque é melhor quando realizado com rolos dressadores de diamantes, devido a alta dureza dos grãos de CBN causar um desgaste demasiado nas ferramentas diamantadas de dressamento estáticas. O rolo diamantado tem um número muito grande de grãos cinemáticos. Este fato faz com que o desgaste total do rolo não seja acentuado no processo de dressamento. Como o dressamento por toque é caracterizado por uma pequena penetração passiva de dressamento, isto causa um desgaste pouco acentuado nos grãos de CBN. Este desgaste pode diminuir a agressividade do rebolo, fazendo com que os altos valores iniciais da rugosidade das peças retificadas com rebolos de CBN após o condicionamento convencional não ocorram. Para rebolos de CBN dressados por toque pode-se evitar a variação muito grande da qualidade da peça que normalmente se apresenta em processos que empregam os rebolos de CBN condicionados convencionalmente. Rebolos dressados por toque apresentam uma estrutura semelhante à estrutura quase estacionária de retificação [18].

Todos rebolos de superabrasivos podem ser dressados com sucesso através dessa técnica de dressamento. Rebolos galvânicos podem ter sua agressividade diminuída no início do processo

através da aplicação do dressamento por toque, e rebolos vitrificados podem ter sua vida consideravelmente aumentada quando dressados também desta maneira. Com rebolos metálicos e principalmente com rebolos resinóides pode-se suprimir o processo posterior de afiação quando condicionados pelo dressamento por toque.

Trabalhos realizados anteriormente com rebolos de CBN mas com ligante vitrificado mostraram que a penetração passiva de dressamento menor que $2\ \mu\text{m}$ não consegue alterar a geometria do rebolo apropriadamente. Porém penetrações passivas de dressamento maiores que $8\ \mu\text{m}$ levam a uma piora do resultado no processo de retificação e faz-se necessário então um novo processo de dressamento do rebolo. Chegou-se a conclusão, então, que para rebolos de CBN vitrificados a faixa da penetração passiva de dressamento está situada entre 3 a $6\ \mu\text{m}$. Com esta penetração passiva de dressamento otimizada alcançou-se uma elevação da vida do rebolo, menores oscilações nas componentes das forças de usinagem e qualidades superficiais mais homogêneas das peças retificadas [8].

A técnica denominada de dressamento por toque baseia-se numa mínima penetração passiva de dressamento, atuando apenas nos gumes mais protusos dos grãos abrasivos do rebolo e fazendo com que a forma geométrica original do rebolo seja retomada. Isto faz com que se aumente o número de gumes ativos no rebolo, fazendo com que a rugosidade alcançada nas peças seja baixa desde o reinício do processo de retificação.

O processo de dressamento por toque pode ser confundido com um microperfilamento no rebolo. Este dressamento atinge apenas as pontas dos grãos de CBN fazendo com que novos gumes sejam criados. A Figura 22 mostra esquematicamente a região de dressamento ampliada.

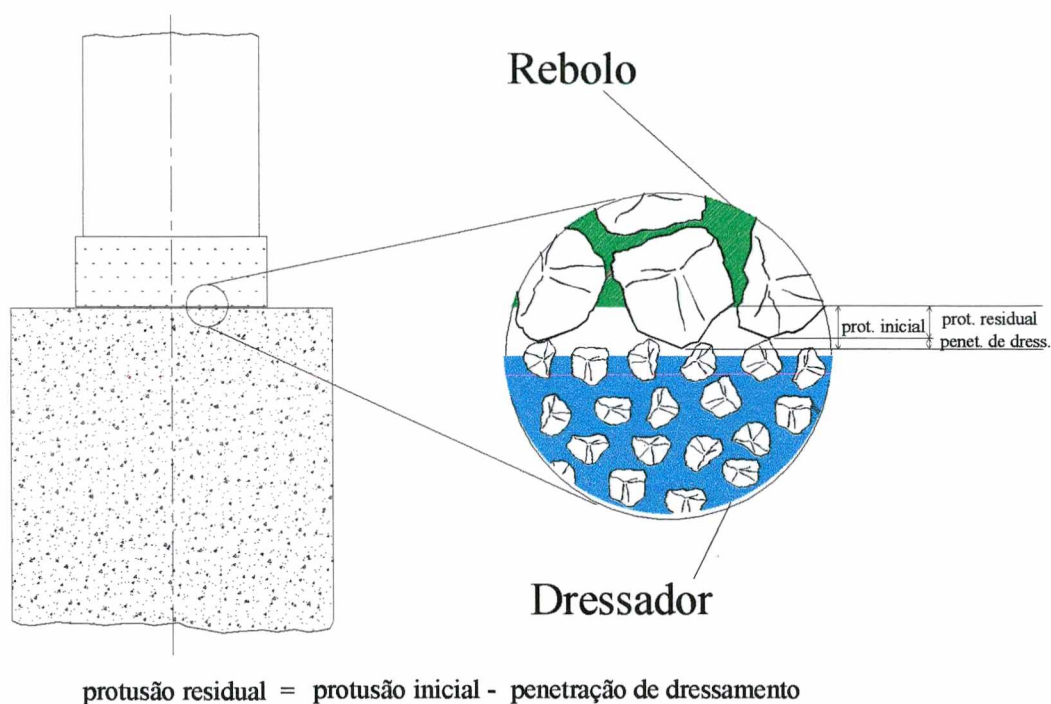


Figura 22 - Região de contato do processo de dressamento por toque com rolo diamantado

Como o próprio nome diz, o condicionamento por toque baseia-se numa mínima retirada de material do rebolo. Isso permite um rebolo dressado por toque possa manter a capacidade de corte, pois a protusão residual é ainda suficiente para garantir o alojamento dos cavacos.

Esta técnica de condicionamento apresenta uma diminuição do tempo secundário na retificação, isto é, tempo de preparação da ferramenta. Mesmo com o fato de um maior número de paradas para o condicionamento da ferramenta em intervalos de tempo menores ser necessário, o tempo de condicionamento passa a ser menor pois o processo de afiação é eliminado. Um outro aspecto a ser considerado é que o rebolo tem valor agregado muito alto. Uma economia feita com a otimização do uso de rebolos pode representar uma redução no custo do processo.

De acordo com trabalhos realizados anteriormente em rebolos de CBN com ligantes cerâmicos e com revestimentos galvânicos [18], a profundidade de rugosidade no rebolo é reduzida pelo valor da penetração passiva de dressamento, desde que não ocorra uma quebra

acentuada dos grãos durante o processo de dressamento. A relação da penetração passiva de dressamento e a redução da rugosidade do rebolo é:

$$\Delta R_{tb} = R_{tb0} - R_{tb1} = a_{ed} \quad (9)$$

O gráfico da Figura 23 mostra ensaios de dressamento por toque em rebolos para retificação interna com revestimento galvânico realizados por Stuckenholtz [18]. Nesses ensaios pode-se comprovar a relação linear entre a penetração passiva de dressamento e a profundidade de rugosidade R_{tb} do rebolo. O coeficiente angular da reta correspondeu exatamente ao valor unitário $m = -1$. Os valores iniciais diferentes para o início de cada reta são devidos aos diferentes tamanhos de grãos. Verificou-se que quando se mantém o diâmetro do rebolo constante, para maiores grãos tem-se maiores valores de rugosidade inicial. Mas a queda dessa rugosidade frente ao aumento da penetração passiva de dressamento se mantém linear com o mesmo valor de coeficiente angular.

Não foi verificada a influência do tamanho de grão com a rugosidade mínima alcançada no rebolo, visto que todas as ferramentas tenderam ao mesmo valor. Dois rebolos de tamanho de grão 252 foram fornecidos com diferentes profundidades de rugosidade inicial, o que levou também a valores de profundidades de rugosidade R_{tb} variáveis para estes dois rebolos.

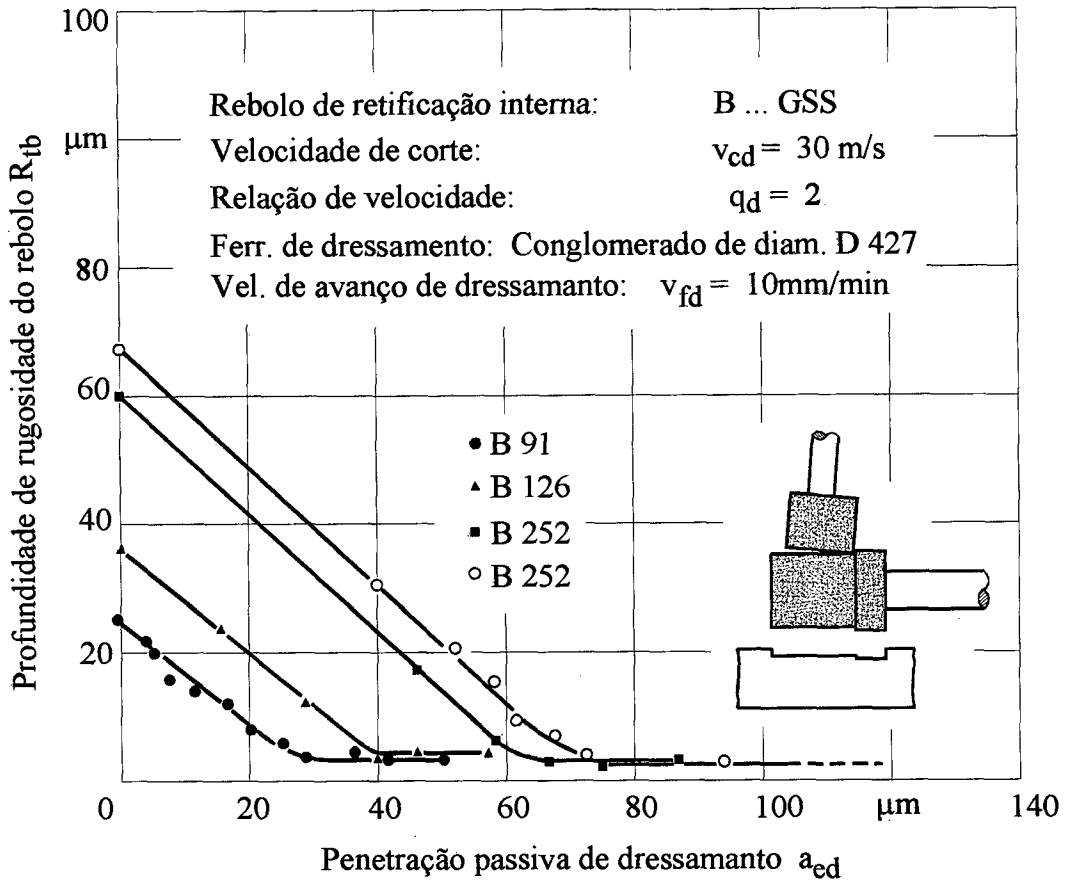


Figura 23 - Diminuição da profundidade de rugosidade do rebolo com o aumento da penetração passiva de dressamento segue uma reta com coeficiente angular $m = -1$ [18]

O significado prático que o dressamento por toque de ferramentas de CBN revestidas galvanicamente tem torna-se claro para retificação de séries de peças e é mostrado no gráfico da Figura 24. Para o processo onde não foi aplicado o dressamento por toque, devido à quebra dos grãos mais protusos no início do processo, tem-se uma variação muito grande da rugosidade do rebolo no decorrer da usinagem. Já para o processo onde houve previamente um processo de dressamento por toque, nota-se que a rugosidade do rebolo adquire uma condição quase-estacionária [18].

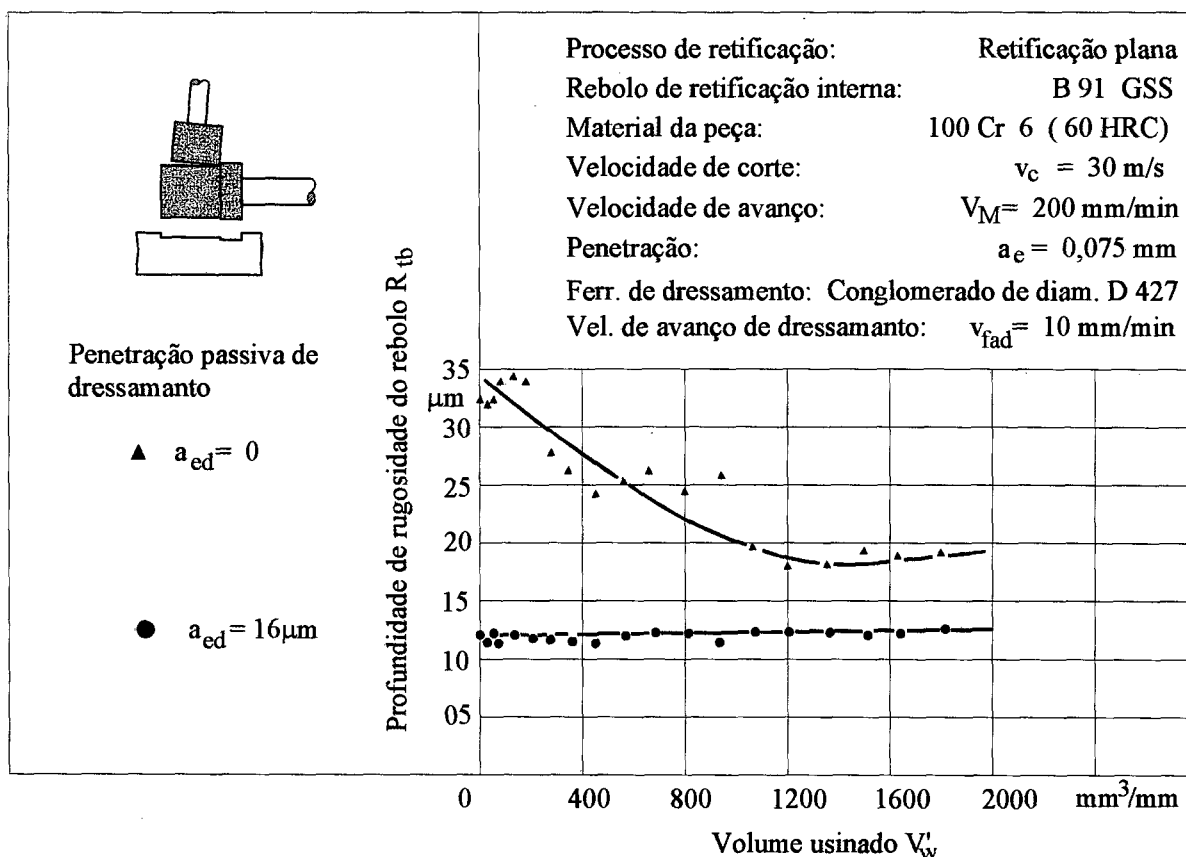


Figura 24 - O dressamento de um rebolo galvânico leva a uma clara estabilização da profundidade de rugosidade do rebolo durante o processo de retificação [18]

A profundidade de rugosidade do rebolo está intimamente relacionada com a rugosidade obtida nas peças. Neste caso ficou claro que o dressamento por toque com pequenas penetrações passivas de dressamento oferece a possibilidade de empregarem-se ferramentas revestidas galvanicamente também para casos de trabalhos que não permitam grande oscilações dos resultados de trabalho.

A comparação da estrutura dos rebolos galvânicos de apenas uma camada com rebolos cerâmicos que apresentam mais camadas é mostrada na Figura 25. Observa-se uma diferença marcante na disposição dos grãos, onde para rebolos revestidos galvanicamente eles se

apresentam bem protusos para fora do ligante, enquanto que para outros ligantes se mostram ancorados pelo ligante [18].

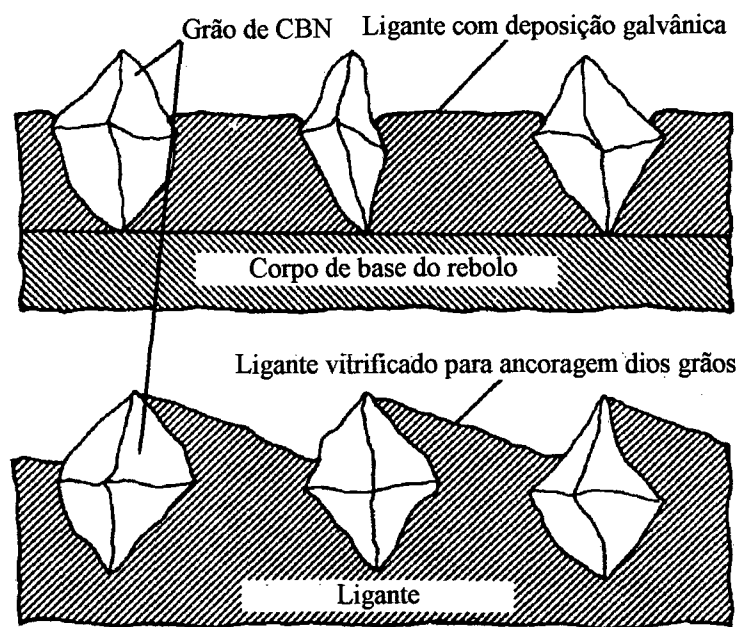


Figura 25 - Rebolos de CBN com revestimento galvânico diferencia-se dos outros pela especificação de dressamento por causa da disposição do ligante [19]

Com o dressamento por toque de um rebolo com ligante cerâmico, aumentando-se a penetração passiva de dressamento, devido à disposição do ligante, acontece uma separação no mesmo plano que os gumes dos grãos de CBN. Neste caso, em alguns pontos o ligante alcança localmente o mesmo nível da ponta dos grãos, podendo assim entrar em contato com a peça durante o processo de retificação. Isso acarreta uma diferença considerável do processo quando comparado com rebolos de revestimento galvânico.

Ensaio de dressamento por toque realizados com ferramentas de CBN com ligante cerâmico com uma profundidade de rugosidade inicial do rebolo de $17 \mu\text{m}$, conseguida convencionalmente, mostram um comportamento semelhante ao de rebolos com revestimento

galvânico, isto é, uma queda da profundidade de rugosidade do rebolo linear com coeficiente angular igual a $m = -1$. Essa queda mantém-se até um mínimo da rugosidade, representando um valor máximo de dressamento. A partir daí, o comportamento estável dos rebolos galvânicos nesse valor, mesmo com maiores valores de dressamento, não foi mais repetido. Ocorreu então uma elevação da profundidade de rugosidade do rebolo para maiores valores de dressamento aplicados. A Figura 26 mostra este comportamento diferenciado de rebolos com revestimento cerâmico [18].

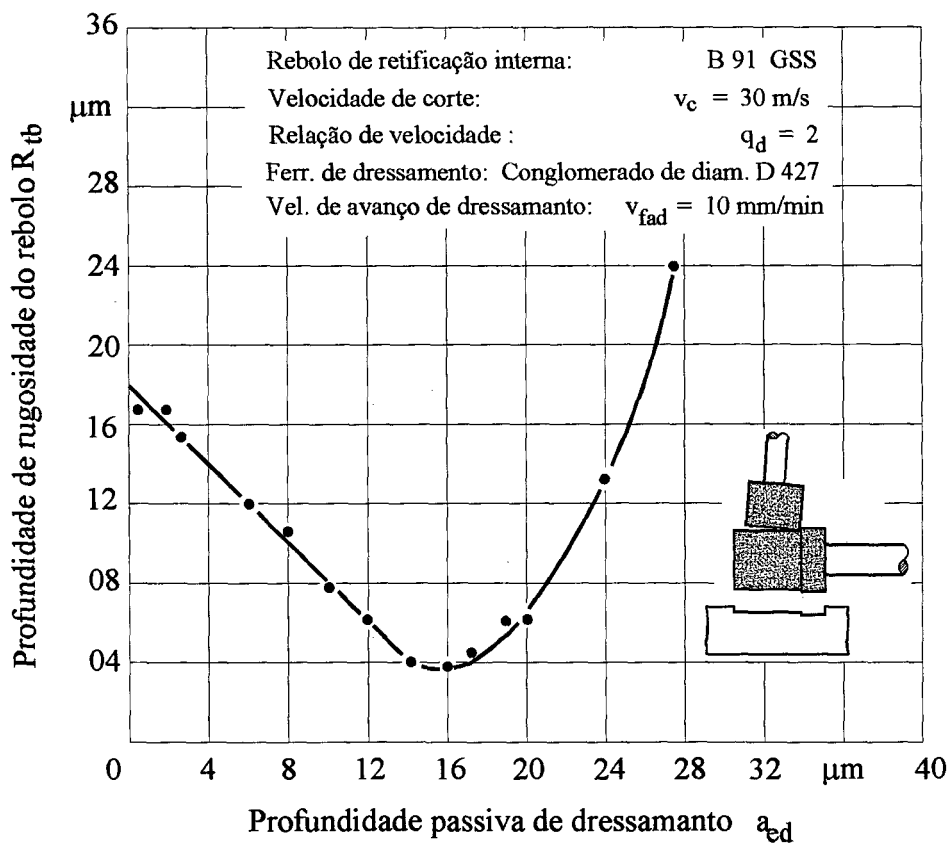


Figura 26 - Ferramentas de retificar interno de CBN com ligante cerâmico apresentam um valor mínimo para a profundidade de rugosidade do rebolo em função da penetração passiva de dressamento [18]

A Figura 27 mostra a variação da profundidade de rugosidade do rebolo de CBN com ligante cerâmico durante o processo de retificação. As ferramentas foram dressadas por toque com diferentes penetrações passivas de dressamento partindo de um mesmo estado inicial conseguido convencionalmente, já citado de $R_{tb} = 17 \mu\text{m}$. Observou-se que para um rebolo não dressado ($a_{ed} = 0$) houve um estado inicial de redução da profundidade de rugosidade do rebolo até este apresentar uma estabilização do valor, em torno de $13 \mu\text{m}$. Para penetração passiva de dressamento igual a $a_{ed} = 4$ e $8 \mu\text{m}$, ocorreu uma maior linearidade do comportamento da profundidade de rugosidade do rebolo, demonstrando uma situação quase-estacionária do processo. Essa estabilização se deu na faixa de 7 e $10 \mu\text{m}$, respectivamente. Com o aumento da penetração passiva de dressamento para $a_{ed} = 14 \mu\text{m}$, ocorreu uma desestabilização do processo inicialmente e, depois, se estabilizou na região de $7 \mu\text{m}$. Para um valor de penetração passiva de dressamento de $21 \mu\text{m}$, ocorreu um aumento muito grande da rugosidade do rebolo sem uma estabilização do processo [18].

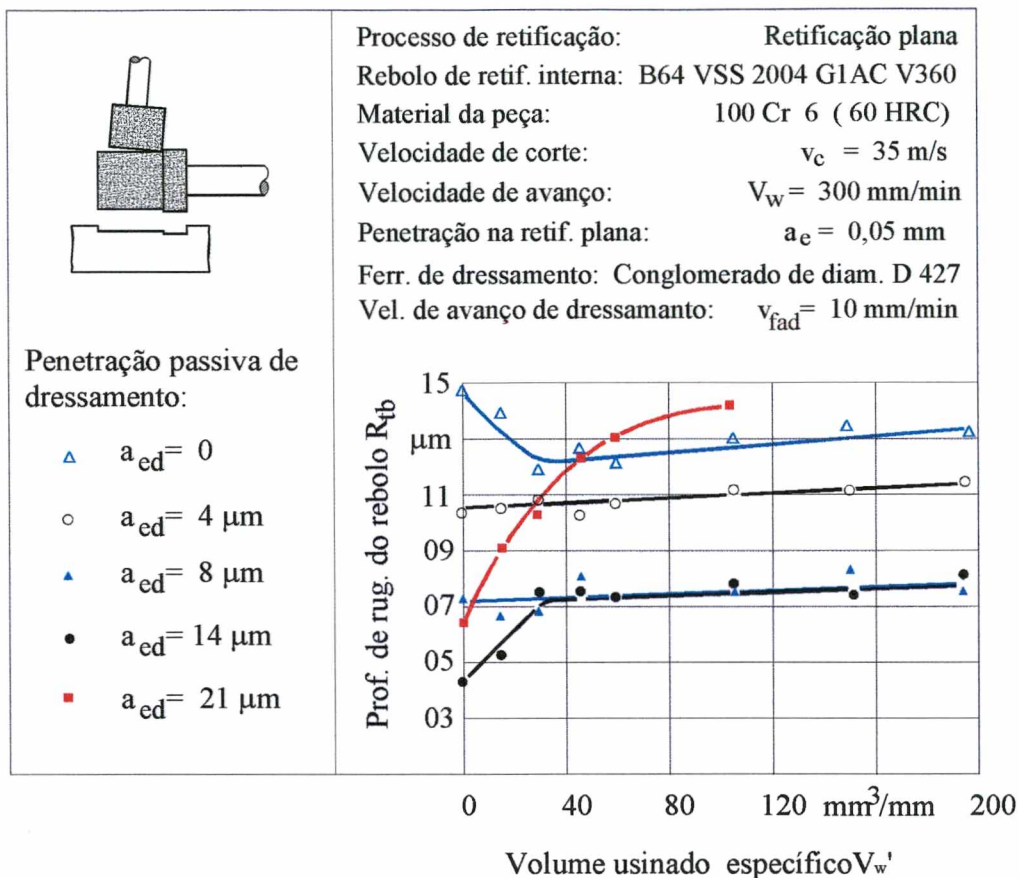


Figura 27 - Influência da penetração passiva de dressamento por toque sobre o comportamento da profundidade de rugosidade do rebolo durante o processo de retificação [18]

A conclusão que pode ser retirada dos gráficos acima é que o dressamento por toque com pequena penetração passiva não apenas melhorou a profundidade de rugosidade do rebolo alcançada, mas também serviu para a manutenção da porosidade.

Um dos principais problemas encontrados para a adaptação do processo de dressamento por toque na retificação é o reconhecimento preciso do primeiro contato do rebolo com o rolo dressador ou dressador estático. Esse ponto deve ser detectado com a maior precisão possível, devido ao próprio entendimento do processo de dressamento, que prevê retirada mínima da parte

ativa do rebolo para retorno às suas condições de corte. Esse assunto será abordado mais detalhadamente no item 2.3.2.

Outro fato importante para a execução com sucesso do dressamento por toque é a precisão de posicionamento que deve-se ter na máquina-ferramenta para se garantir que a quantidade retirada do rebolo seja mesmo a quantidade especificada. Uma colisão ou um erro de posicionamento pode destruir a capacidade de corte do rebolo.

2.3.1 - INFLUÊNCIA DA PENETRAÇÃO PASSIVA DE DRESSAMENTO SOBRE O RESULTADO DE TRABALHO

Para se correlacionar a profundidade de rugosidade obtida no rebolo com o dressamento por toque e a rugosidade a ser obtida na peça durante o processo de retificação, muitos trabalhos foram realizados [18,25,26]. Primeiramente, devido à simplicidade do processo, foi estudada essa relação para a retificação plana [25,26]. A rugosidade da peça foi relacionada primeiramente com uma profundidade de rugosidade obtida no final do curso da retificação plana, denominada de R_{ta} . Depois, através da usinagem de chapelonas, verificou-se que a profundidade de rugosidade R_{ta} era idêntica à profundidade de rugosidade do rebolo obtida na chapelona R_{tb} .

Os resultados encontrados nos trabalhos [25,26] mostraram uma dependência linear da profundidade de rugosidade da peça com a profundidade de rugosidade do rebolo. O coeficiente angular dessa reta é igual a $m = 1$, e a diferença entre as duas grandezas de rugosidade é descrita através de uma constante aditiva, dada pela seguinte equação:

$$R_{tw} = R_{tb} + C_u \quad (10)$$

C_u é denominado como constante de sobreposição e abrange as influências cinemáticas resultantes do processo. A Figura 28 mostra a relação das grandezas obtidas para a retificação plana.

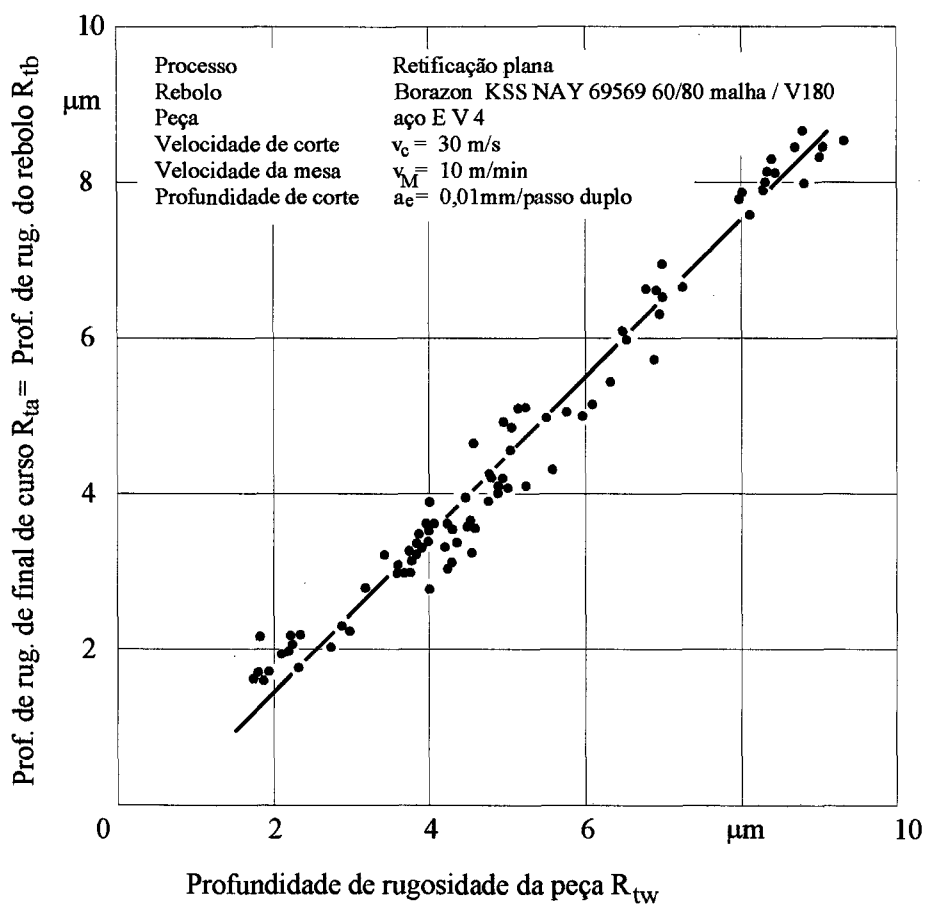


Figura 28 - Relação entre a profundidade de rugosidade da peça R_{tw} e as profundidades de rugosidades do rebolo R_{tb} e de final de curso R_{ta} na retificação plana [18]

Para se estender esses resultados para retificação circular, outros ensaios foram realizados [18]. No gráfico da Figura 29 os ensaios com rebolos de ligante cerâmico mostraram que também existe uma correlação linear entre a rugosidade do rebolo R_{tb} e a rugosidade da peça R_{tw} .

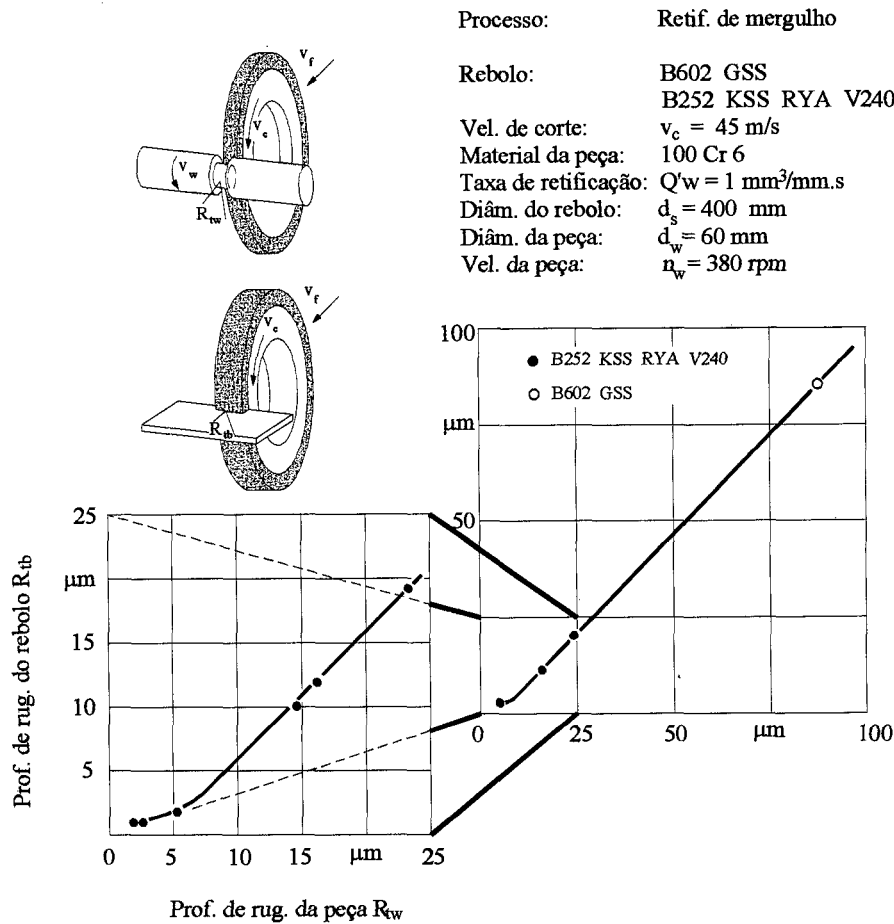


Figura 29 - A dependência linear da profundidade de rugosidade da peça com a profundidade de rugosidade do rebolo dá-se também na retificação cilíndrica externa [18]

Para a utilização prática desse dado, é de melhor visualização a relação existente entre a profundidade de rugosidade da peça retificada antes e depois do processo de dressamento por toque. O gráfico da Figura 30 mostra a relação da profundidade de rugosidade da peça com a penetração passiva de dressamento do rebolo. Tem-se, para valores baixos da penetração passiva, uma relação também linear com coeficiente angular $m = -1$. Nesta faixa de penetração passiva de dressamento tem-se que a equação regente do processo é:

$$R_{tw} = R_{twmax} - a_{ed} \quad (11)$$

Esta função diz que a profundidade da rugosidade da peça é comandada pela penetração passiva de dressamento. Com o processo de retificação a profundidade de rugosidade das peças retificadas tende a aumentar, então, através de um novo processo de dressamento por toque, pode-se diminuir a profundidade de rugosidade obtida nas peças retificadas, sendo que essa relação obedece a Equação (11) para pequenas penetrações passivas de dressamento, fazendo com que a penetração passiva de dressamento possa ser escolhida de acordo com a rugosidade existente nas peças antes do dressamento por toque e o valor rugosidade desejada para as peças após o processo de dressamento [18].

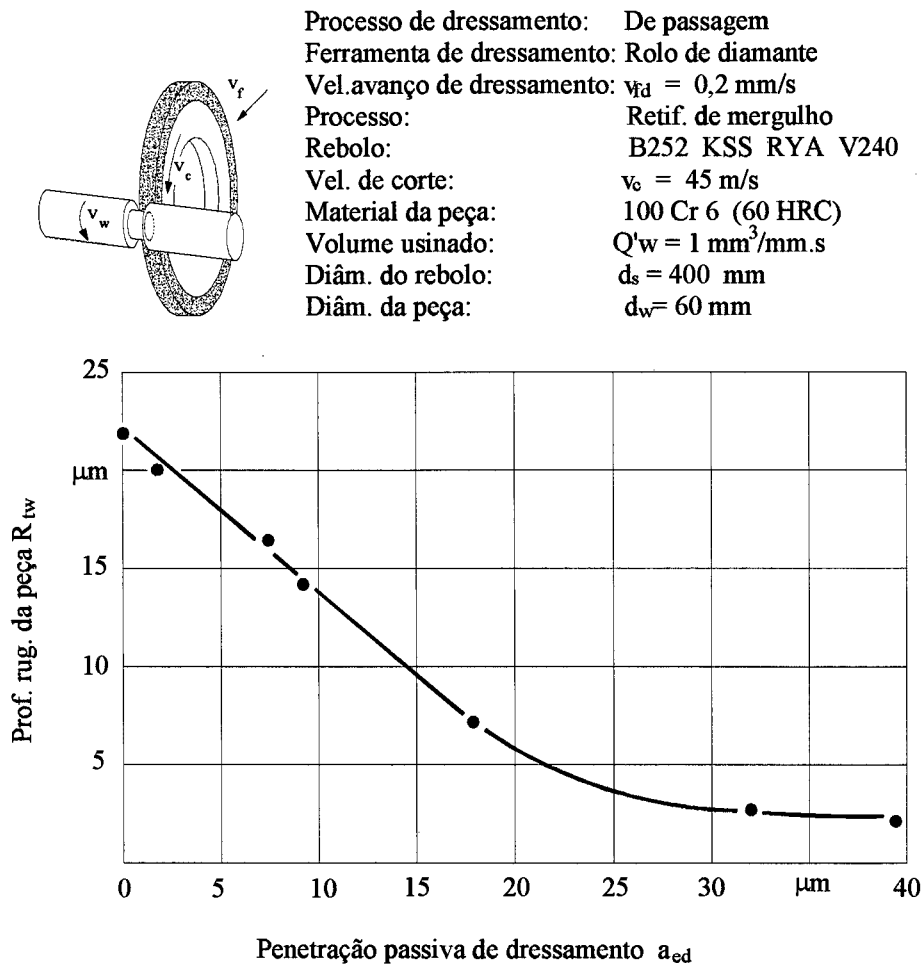


Figura 30 - As profundidades de rugosidade da peça, bem como a profundidade de rugosidade do rebolo, mostram um curso de queda linear com a penetração passiva de dressamento com coeficiente angular $m = -1$ [18]

2.3.2 - DETECÇÃO DO PRIMEIRO TOQUE

O dressamento por toque remove profundidades passivas mínimas de material do topo dos grãos abrasivos protusos para fora do ligante. Para garantir esta remoção mínima deve-se ter o conhecimento real da posição das superfícies envolvidas do rebolo e do rolo dressador

diamantado em relação às coordenadas da máquina-ferramenta ou reconhecer o primeiro contato entre o rebolo e a ferramenta de dressamento. Em decorrência do desgaste do rebolo, bem como das variações dimensionais do sistema da máquina-ferramenta em um ambiente industrial, o reposicionamento do rebolo em relação à ferramenta de dressamento não pode ser garantido na faixa requerida de $\pm 1 \mu\text{m}$ nem em máquinas-ferramentas comandadas numericamente. O reposicionamento pode ser feito apenas de forma grosseira (em média - $10 \mu\text{m}$) e a aproximação final deve ser feita de forma assistida.

A forma de detectar o primeiro contato entre o rolo dressador e o rebolo de retificação de CBN utilizada normalmente é um equipamento de monitoramento através de emissão acústica. A emissão acústica é definida como sendo o sinal de alta frequência (normalmente acima de 100 kHz) oriundo da deformação de materiais sólidos (deslocamentos da estrutura cristalina e propagação de trincas). Este sinal, dependendo do caso, é muito fraco e tem que ser amplificado. Frequências baixas tem que ser filtradas por filtros passa-alta ou passa-banda para facilitar o reconhecimento do sinal de emissão acústica de interesse específico.

Na retificação, assim como no dressamento, é gerado um sinal de emissão acústica que se compõe da soma dos sinais oriundos da ação individual de cada grão abrasivo. Conseqüentemente, o sinal não apresenta uma linha definida no monitor de um osciloscópio e sim uma banda mais larga ou mais estreita. Uma forma simplificada do reconhecimento do sinal pode ser feita pela determinação da intensidade do sinal (em decibéis - dB).

No dressamento por toque a ferramenta de dressamento inicia o contato com os grãos mais protusos do rebolo. O primeiro sinal de contato em decorrência é um sinal muito fraco e requer uma amplificação forte para o reconhecimento. Normalmente o ruído de fundo também é pronunciado e se requer um sistema elaborado para o reconhecimento do sinal. À medida que a

ferramenta de dressamento avança sobre o rebolo o número de “contatos” aumenta e, assim, também aumenta o sinal oriundo dos lascamentos dos grãos abrasivos do rebolo.

Para obter um sinal confiável de emissão acústica, além de sensores e amplificadores adequados, os sensores devem ser instalados o mais próximo da origem do sinal. Quando se trabalha com ferramentas de dressamento estáticas, o sensor de emissão acústica pode ser instalado na própria haste da ferramenta de dressamento. Quando se trabalha com ferramentas de dressamento rotativas a posição de instalação do sensor deve ser procurada nas proximidades da ferramenta de dressamento ou do rebolo. Existe a possibilidade de embutir o sensor no rebolo ou no rolo dressador e transmitir o sinal de emissão acústica por sinal de rádio ou infravermelho para o equipamento amplificador. Entretanto esta opção ainda é cara e pouco difundida. Outra opção é a condução do sinal de emissão acústica por um fluxo laminar de fluido de corte despejado sobre a região de interesse. O sensor de emissão acústica é montado no interior da canalização de adução de fluido de corte [27].

Capítulo 3

OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de aplicação da técnica de dressamento denominada de dressamento de toque em máquinas convencionais. Esta técnica de dressamento foi desenvolvida para rebolos de superabrasivos, e visa minimizar os altos custos associados a essas ferramentas. A viabilidade da utilização de rebolos de CBN em máquinas convencionais já foi estudada no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina e os resultados se mostraram apropriados [2]. A verificação da viabilidade da utilização da técnica de condicionamento de dressamento por toque apropriada a esses rebolos a ser executada nestas mesmas máquinas convencionais visa ampliar os conhecimentos na área de retificação com superabrasivos.

Outro objetivo do trabalho está na verificação do primeiro contato entre reboło e rolo dressador diamantado em máquinas convencionais. A determinação exata deste ponto, já esclarecido anteriormente, é importante para a realização segura do processo de dressamento por toque. A verificação do primeiro contato é realizada neste trabalho através do monitoramento da emissão acústica do processo. Como se trata de uma retificadora convencional, a parada do avanço do carro porta reboło não será realizada automaticamente, usando os recursos do aparelho de emissão acústica, mas sim manualmente pelo operador da retificadora. A aproximação do reboło à ferramenta de dressamento é feita de forma interativa. Para se ter uma informação segura

do avanço do rebolo em relação à ferramenta de dressamento foi instalada uma régua óptica na retificadora, com uma resolução de 0,2 μm .

Capítulo 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – MÁQUINA-FERRAMENTA

O trabalho foi desenvolvido em uma retificadora Studer, modelo OC (Figura 31). Trata-se de uma máquina-ferramenta convencional com acionamento eletro-mecânico dos eixos de movimento. O carro transversal (porta-rebolo) e longitudinal (porta-peça) são acionados por motores de corrente contínua acoplados a fusos de esferas recirculantes. O motor trifásico de acionamento do rebolo está ligado em um variador de frequência Danfoss, modelo VLT 2050, permitindo uma variação contínua da rotação e, para um rebolo de 300 mm de diâmetro, possibilitando o trabalho na faixa de velocidades de retificação de 30 até 40 m/s. A velocidade foi mantida inferior a 40 m/s, pois a segurança para velocidades superiores a esta se torna muito reduzida. A peça, apoiada sobre dois pontos fixos, é rotacionada por um arrastador acionado por um motor de corrente contínua com rotação variável.

Os acionamentos dos fusos da mesa e do carro porta-rebolo bem como do arrastador da peça dispõem de uma regulação contínua de valores de avanço ou rotação através de potenciômetros instalados no painel da máquina.

A retificadora permite dois estágios de retificação em mergulho, isto é, uma etapa de desbaste com $v_f > 0$, ajustada para a peça em trabalho, e um estágio de faiscamento. O tempo de faiscamento é regulado por um atraso do sistema de recuo automático do carro porta-rebolo,

contado a partir do momento em que a chave elétrica de fim de curso é acionada. Esse atraso, referente ao tempo de faiscamento, também pode ser variado de forma contínua por meio da regulagem de um relê temporizador.

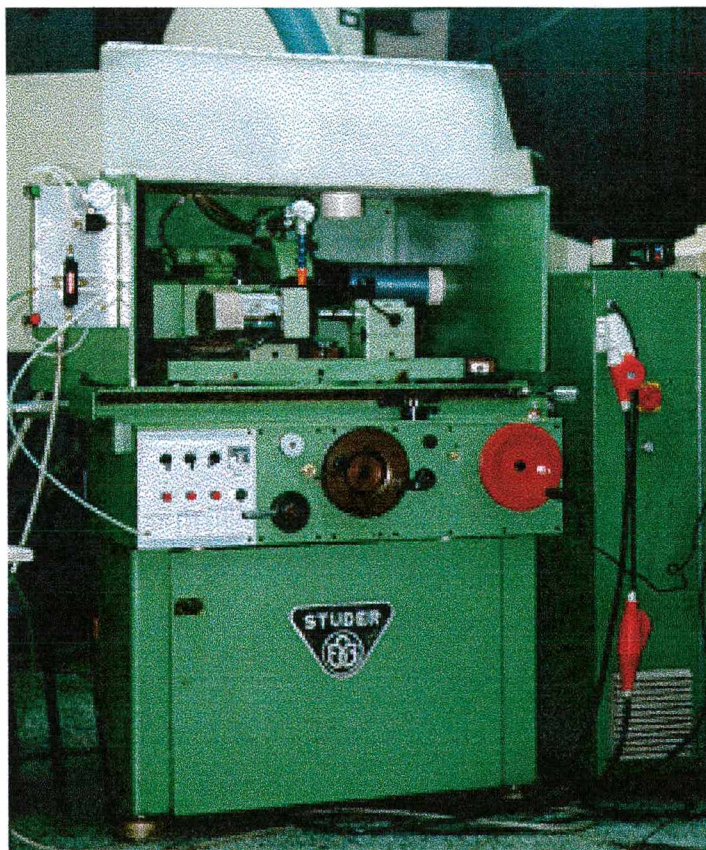


Figura 31 - Retificadora Studer - OC [2]

O fluido de corte é bombeado e filtrado por um sistema auxiliar (Figura 32). Este sistema é composto por uma moto-bomba de 4 CV e munido de um reservatório com capacidade de 250 litros de fluido. Para a filtração do fluido é utilizado papel microporoso para a separação de partículas.

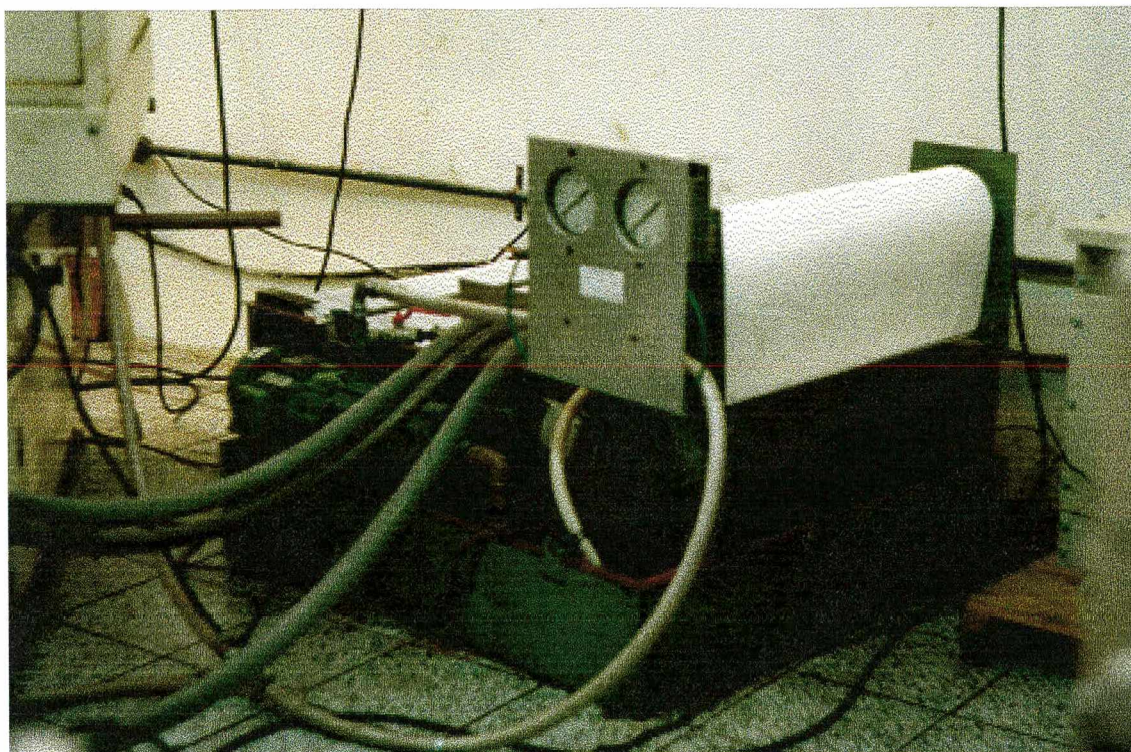


Figura 32 - Sistema de fornecimento de fluido [2]

A vazão é medida por um sistema tipo placa de orifício com dois manômetros, da marca Willy, modelo PBIN - GL. 114 (glicerinado) com faixa de indicação de 0 a 10 kgf/cm^2 , com menor divisão de 0,1 kgf/cm^2 , instalados em série na canalização. Este sistema foi projetado e calibrado primeiramente por da Silva [9].

A concentração da emulsão empregada na retificação foi de 5 % de óleo em água.

4.2 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POSICIONAMENTO

A precisão de posicionamento exigida pelo processo de dressamento por toque é muito maior que a precisão possível apenas com o comando convencional da máquina-ferramenta utilizada. Por isso, tornou-se necessária a instalação de uma régua óptica para controle de posicionamento do rebolo em relação ao rolo dressador diamantado durante o processo de dressamento por toque.

A precisão de posicionamento e avanço requeridos para o processo de dressamento por toque se encontram na faixa micrométrica, necessitando a precisão de posicionamento e deslocamento seguro do rebolo em relação ao rolo dressador diamantado de no mínimo 1 μm .

Optou-se por uma régua óptica Heidenheim com denominação LS 903, um mostrador do deslocamento acoplado à régua e um contador com denominação VRZ 380 A, também da firma Heidenheim. Este sistema tem uma precisão de deslocamento de 0,2 μm , suficiente para suprir as exigências do processo de dressamento por toque em máquinas-ferramentas convencionais. A Figura 33 mostra o painel frontal do mostrador de deslocamento da régua óptica.

Para a instalação da régua óptica foi necessária a construção de um dispositivo para fixação da régua na máquina. Esse dispositivo foi alinhado segundo o eixo de deslocamento do carro transversal da retificadora. A Figura 34 mostra a régua e o dispositivo instalado sob o carro transversal na parte traseira da máquina-ferramenta.



Figura 33 - Painel frontal do mostrador de deslocamento da régua ótica [28]

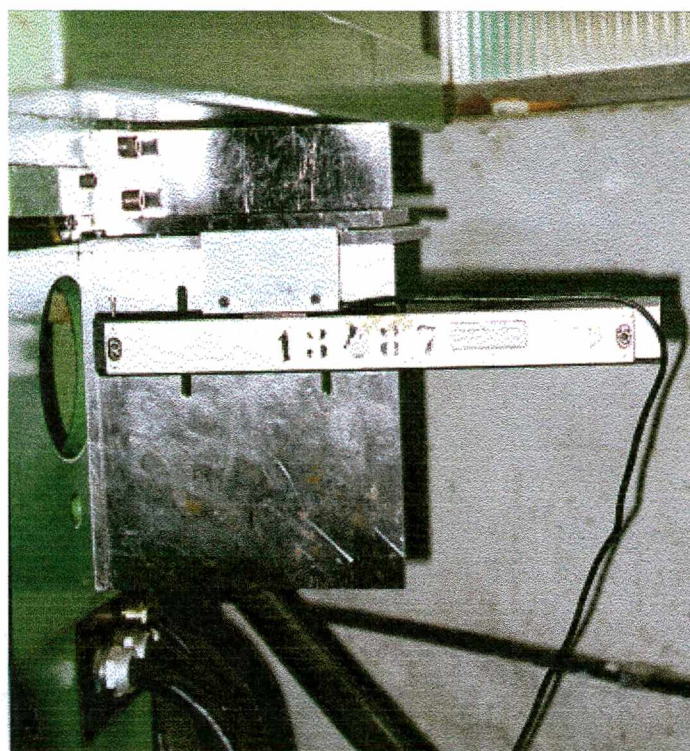


Figura 34 - Régua ótica e dispositivo de fixação

4.3 - EQUIPAMENTOS DE EMISSÃO ACÚSTICA

Para obtenção e tratamento do sinal de emissão acústica foi utilizado o aparelho de monitoramento Prometec GD 200, munido de um transdutor AE 30 de emissão acústica anelar com 30 mm de diâmetro e um furo central para a fixação com parafuso M6. A Figura 35 mostra, de forma esquematizada, a estrutura do sensor de emissão acústica utilizado.

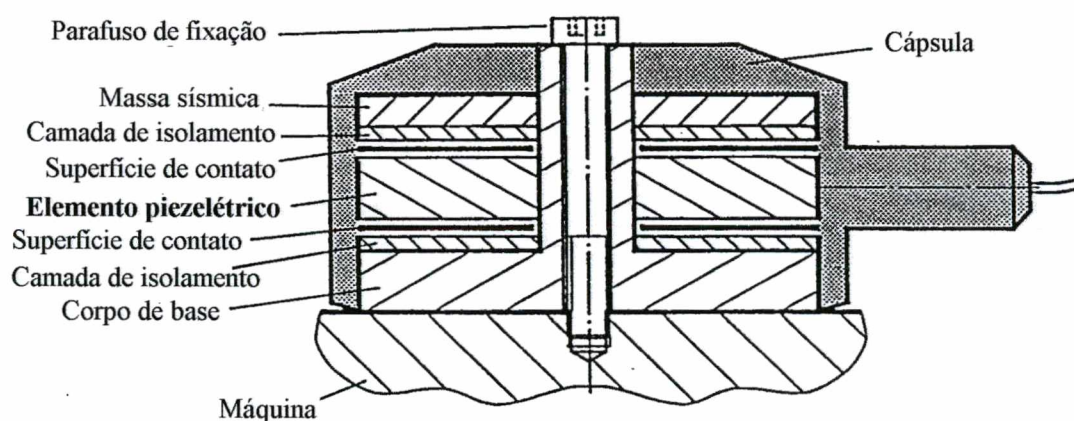


Figura 35 - Representação esquemática do transdutor de emissão acústica AE 30 Prometec [29]

O sinal de ruído é melhor trabalhado pelo sensor em frequências acima de 100 kHz. O aparelho GD 200 Prometec foi conectado a um aparelho de aquisição de dados CSA HP 3563 A. Os dados são enviados analogicamente para o aparelho de aquisição de dados, este processa-os e apresenta na tela o gráfico retirado das medições.

O sensor de emissão acústica foi instalado sobre o contraponto (cabeçote móvel) do sistema de fixação da peça/rolo dressador diamantado. Para facilitar a instalação e otimizar a posição para a obtenção do melhor sinal o transdutor foi montado sobre uma base magnética e encontra-se na estrutura do contraponto (Figura 36).

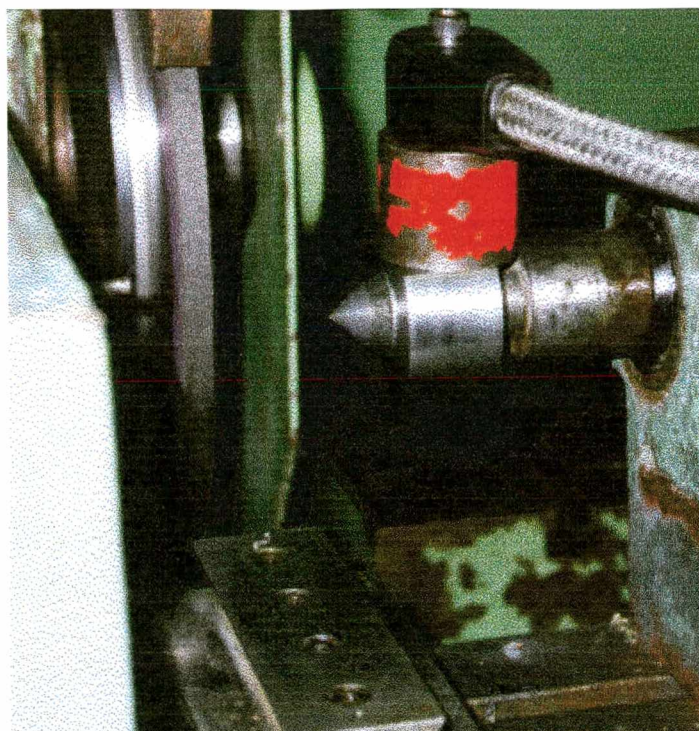


Figura 36 - Fixação do sensor acústico na máquina-ferramenta

O aparelho de monitoramento GD 200 (Grinding and Dressing) da firma Prometec foi desenvolvido para monitorar o processo de retificação e dressamento em máquinas de comando numérico. Para isso o aparelho permite a programação de níveis de amplificação de sinal para cada fase de comando e estabelece níveis de sinal, para os quais o sistema interage com o comando da máquina-ferramenta. A interface para comunicação com o operador é simples e está representada de forma esquematizada na Figura 37.

O aparelho GD 200 permite uma escolha de filtros externos para serem utilizados entre o sensor e o aparelho, de acordo com o trabalho a ser realizado. Para o presente trabalho o filtro escolhido foi um passa-alta com frequência de corte em 40 kHz, próprio para processos de dressamento de rebolos.

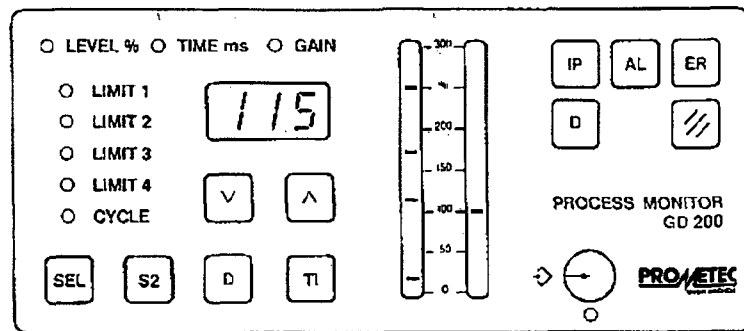


Figura 37 - Aparelho de monitoramento da Prometec GD 200 [27]

A interface de comunicação com o CLP da máquina-ferramenta de comando numérico é interna e apenas é necessária na instalação do sistema em máquinas-ferramentas CNC. Para máquinas-ferramentas convencionais, como neste trabalho, as saídas de sinal do sistema de monitoramento são usadas apenas para a obtenção do sinal, tanto no painel do sistema GD 200, como também para a visualização no sistema de aquisição de sinais, CSA 3563 A da Hewlett Packard, mostrado de forma esquemática na Figura 38. A programação do sistema de aquisição de dados foi realizada de forma que o aparelho mostrasse o comportamento do sinal de emissão acústica no tempo. Tanto o aparelho de monitoramento GD 200 como o aparelho CSA tinham filtros e amplificadores internos que atuavam no sinal acústico. Esse tratamento foi controlado externamente apenas com a colocação de filtros passa-alta entre o sensor e o aparelho GD 200. As demais alterações do sinal se procederam internamente nos aparelhos.

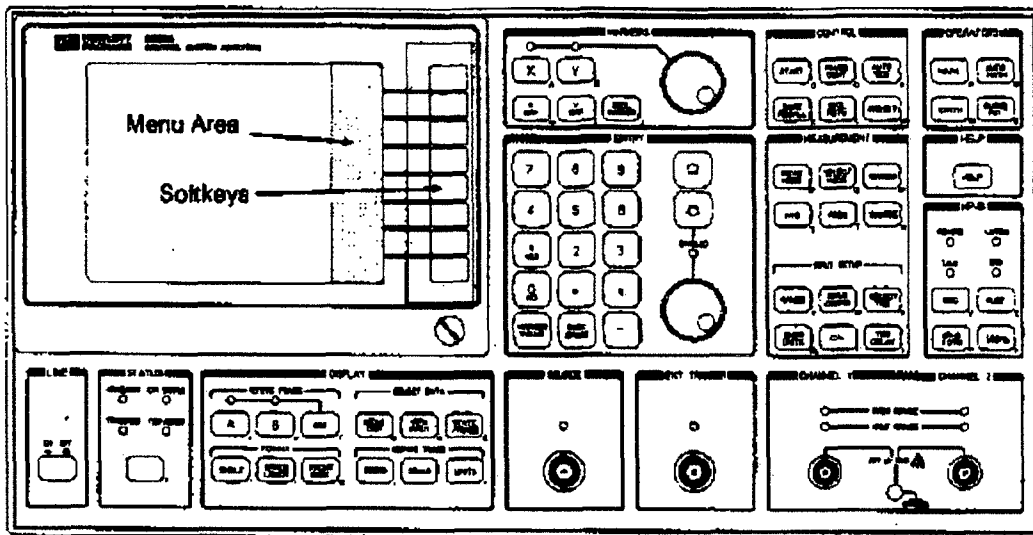


Figura 38 - Aparelho de aquisição de dados HP 3563 A [30]

A Figura 39 mostra um diagrama de blocos para a obtenção e tratamento dos sinais.

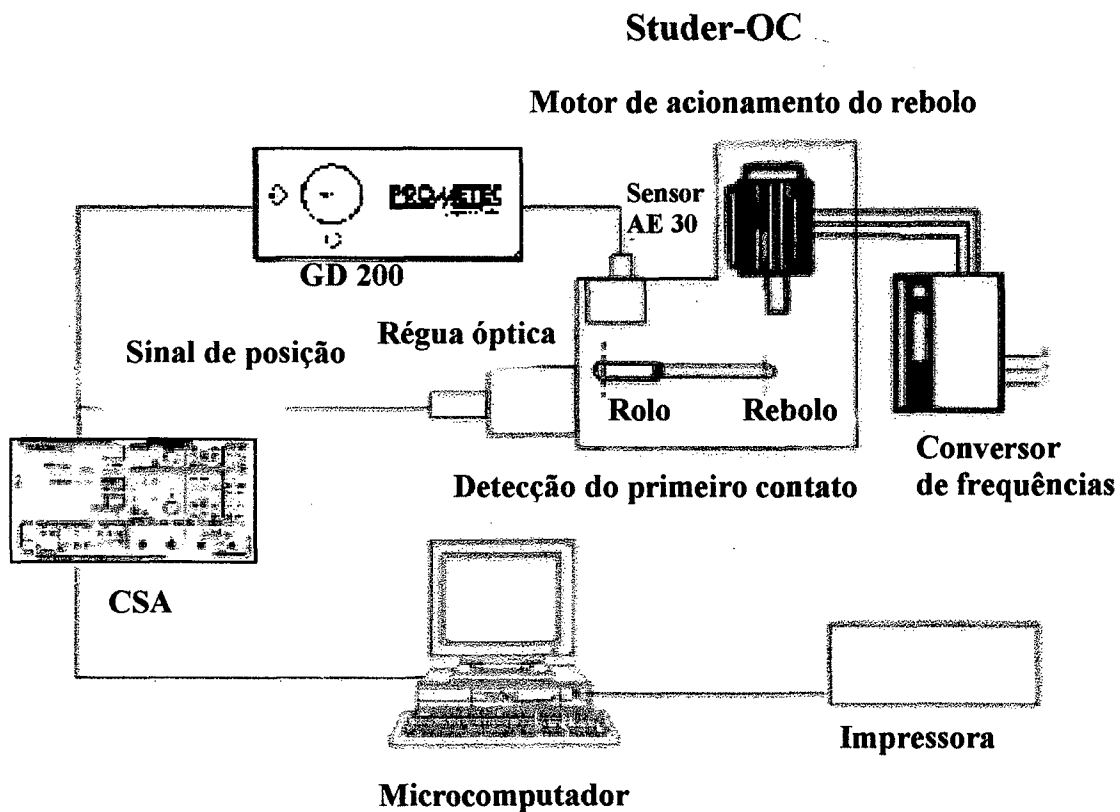


Figura 39 - Diagramas de fluxo dos sinais

O sinal armazenado no sistema de aquisição de dados pode ser transferido a um microcomputador onde, após um tratamento, é possível a edição dos gráficos a serem impressos ou armazenados em disquetes para visualização posterior.

4.4 - FERRAMENTAS - REBOLOS DE CBN

Para os ensaios de dressamento por toque foram utilizados rebolos de nitreto de boro cúbico de fabricação da firma Winter do Brasil - Ferramentas Diamantadas e de Bornitrid Ltda. Os dois diferem entre si na dureza do ligante e no material do corpo de base. A especificação dos rebolos é 1A1 - 300 - 8,7 - 3 - 127 - B126 - KSS 10 J A V240 e 1A1 - 300 - 8,7 - 3 - 127 - B 126 - KSS 10 N B V240, o que corresponde às seguintes características:

- forma reta (1A1);
- diâmetro de 300 (mm);
- largura do revestimento de 8,7 (mm);
- espessura do revestimento de 3 (mm);
- furo de 127 H7 (mm);
- granulometria B126 de 126 (μm);
- ligante resinóide (KSS 10);
- dureza do ligante, classificação: primeiro rebolo mole (J) e segundo rebolo média (N);
- corpo do rebolo: primeiro rebolo alumínio (A) e segundo rebolo resina (B);
- concentração dos grãos, 24% em volume de grãos de CBN no revestimento (V240).

A especificação dos rebolos foi feita em acordo com as aplicações previstas no escopo do projeto cooperativo entre as empresas Robert Bosch Ltda, Winter do Brasil e o Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP. O primeiro rebolo especificado acima já havia sido amplamente testado no trabalho de dissertação de mestrado de Bertalan [2], tanto no perfilamento convencional com rolo diamantado e afiação com bloco de alumina bem como em ensaios de

vida. O segundo rebolo, mais duro, não apresentava uso anterior ao deste trabalho. A estrutura do corpo do rebolo com resina reforçada apresenta uma característica melhor de amortecimento de vibrações que o rebolo com corpo de alumínio [31].

4.5 - FERRAMENTA DE DRESSAMENTO - ROLO DRESSADOR DIAMANTADO

No desenvolvimento deste trabalho foi empregado um rolo dressador com revestimento diamantado com a especificação 1 A1 - 100- 10- 3- 20, D301 BZ 469-E C100, onde:

- rolo dressador de perfil reto 1A1;
- diâmetro do rolo dressador 100 (mm);
- largura da parte ativa do rolo 10 (mm);
- profundidade da camada do abrasivo 3 (mm);
- diâmetro do furo 20 (mm);
- tamanho de grão de diamante D301 de 301 (μm);
- ligante metálico BZ 469;
- corpo do rolo de aço E;
- concentração volumétrica de diamante C110.

Com a escolha desse rolo dressador diamantado é reforçada a opção pelo posicionamento do sensor de emissão acústica nas proximidades do contra-ponto, já que o sinal de emissão acústica é menos amortecido no corpo do rolo dressador que no corpo do rebole resinóide (com corpo de alumínio ou resina reforçada).

O rolo dressador diamantado tem um corpo de base de aço. De acordo com o fabricante, o amortecimento de vibrações é baixo, e apresenta uma dissipação de calor e resistência mecânica muito boa.

A concentração de diamante C110 informa que 25 % do volume são grãos de diamantes, o que equivale a $4,4 \text{ kt/cm}^3$.

4.6 - CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados foram confeccionados em aço C15PbK e 100Cr6. Os corpos de prova C15PbK foram fabricados a partir de barras trefiladas a frio, cementados, temperados e revenidos. Os corpos de prova de 100Cr6 foram temperados e revenidos. A Figura 40 mostra as dimensões dos corpos de prova.

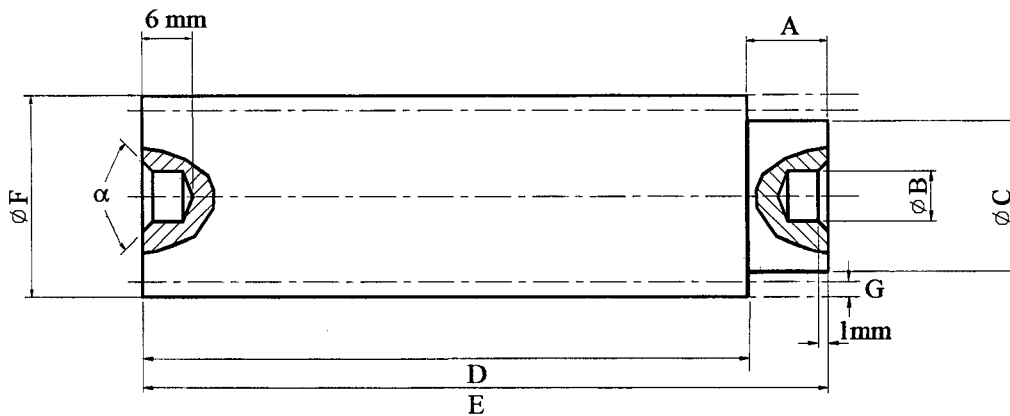


Figura 40 - Representação esquemática dos corpos de prova

As linhas tracejadas representam a profundidade de cementação. O rebaixo das peças de C15PbK tinha a finalidade de possibilitar uma aproximação do rebolo à peça sem o risco de colisão do rebolo com a contraponta, para a retificação lateral que foi executada no trabalho anterior [2].

O Quadro 2 mostra os valores geométricos das variáveis da Figura 40 para os dois corpos de prova. O corpo de prova do material 100Cr6 não apresenta nenhum rebaixo e a cementação ocorreu em toda a profundidade do corpo. Os furos de centro para os corpos de prova de 100Cr6

seguem a norma DIN 332. Para os corpos de prova de C15PbK os ângulos dos furos de centro são de 90 °, cujo valor é um padrão interno da firma Robert Bosch Ltda.

Quadro 2 - Valores geométricos para cada corpo de prova

Variável	Material C15PbK	Material 100Cr6
A	8 mm	-
B	5 mm	5 mm
C	15 mm	-
D	57 mm	-
E	65 mm	43,2 mm
F	20 mm	24,5 mm
G	≈ 1,35 mm	-
α	90 °	60 °

O Quadro 3 fornece a composição química dos materiais empregados na fabricação dos corpos de prova. Ressalta-se que a porcentagem de carbono nos corpos de C15PbK na região de trabalho é maior que 0,8 %, devido à cementação.

Quadro 3 - Composição química dos aços C15PbK e 100Cr6

Elemento químico	Material C15PbK [%]	Material 100Cr6 [%]
C	0,10 até 0,20	0,98 até 1,10
Si	máx. 0,43	0,15 até 0,35
Mn	0,26 até 0,64	0,25 até 0,45
P	máx. 0,05	≤ 0,03
S	máx. 0,05	≤ 1,03
Pb	0,15 até 0,30	-
Cr	-	1,35 até 1,65
Fe	Resto	Resto

O gráfico da Figura 41 mostra o comportamento da microdureza dos corpos de prova de C15PbK. Até uma profundidade de ± 1,35 mm tem-se uma dureza de 700^{± 150} HV. Para profundidade maiores a dureza cai sensivelmente, não sendo mais recomendada para os ensaios.

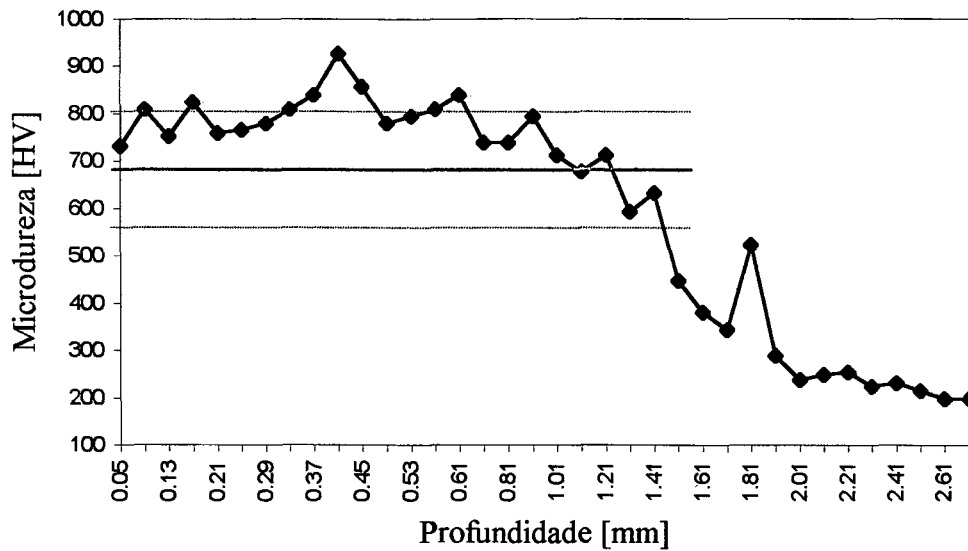


Figura 41 - Microdureza Vickers do corpo de prova do aço C15 Pb K em função da profundidade [2]

Os corpos de prova de 100Cr6 foram temperados e revenidos para uma dureza final de 62 HRC com uma tolerância ± 5 HRC em toda seção transversal. O tratamento térmico foi efetuado com aquecimento acima da temperatura de austenitização (840 °C) e resfriado em óleo a 50 °C. O revenimento foi efetuado em forno a 180 °C em duas etapas com resfriamento intercalado em nitrogênio líquido a -196 °C [10].

4.7 - EQUIPAMENTOS AUXILIARES

No decorrer dos trabalhos se faz necessária a obtenção de informações em equipamentos auxiliares ou preparação de amostras que devido à sua importância são detalhados a seguir.

4.7.1 - EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Para a medição da rugosidade nas peças retificadas foi utilizado um rugosímetro da marca Feinprüf Perthen GmbH, modelo Perthometer S8P - PRK (Figura 42), com uma sonda tipo estilete FRW 750. Devido à grande protusão dos grãos na resina na medição da rugosidade das resinas moldadas na superfície do rebolo usou-se uma sonda óptica FOCODYN (Figura 43).

Mesmo assim foram encontradas dificuldades na medição da rugosidade no rebolo, pois para o funcionamento preciso da sonda, é necessário que o material analisado tenha um índice uniforme de refração da luz. O rebolo entretanto, não é um material uniforme, pela existência de materiais distintos entre os grãos e o ligante. Para a medição ser realizada, recobriram-se as amostras retiradas de um rebolo de 20 mm de diâmetro, bem como o próprio rebolo com ouro, como feito para a análise no MEV. Isto permitiu a medição satisfatória da profundidade de rugosidade do rebolo. Ficou demonstrado que através do método de dupla moldagem e da medição de R_p na cópia em resina de uma região do rebolo é possível obter uma informação precisa da topografia do rebolo [2].

O erro na medição alcançada pelo Focodyn é de acordo com o fabricante de no máximo 1 μm . Para medições com parâmetros acima dos 50 μm , esse erro é considerado pelo fabricante insignificante para a análise da superfície.

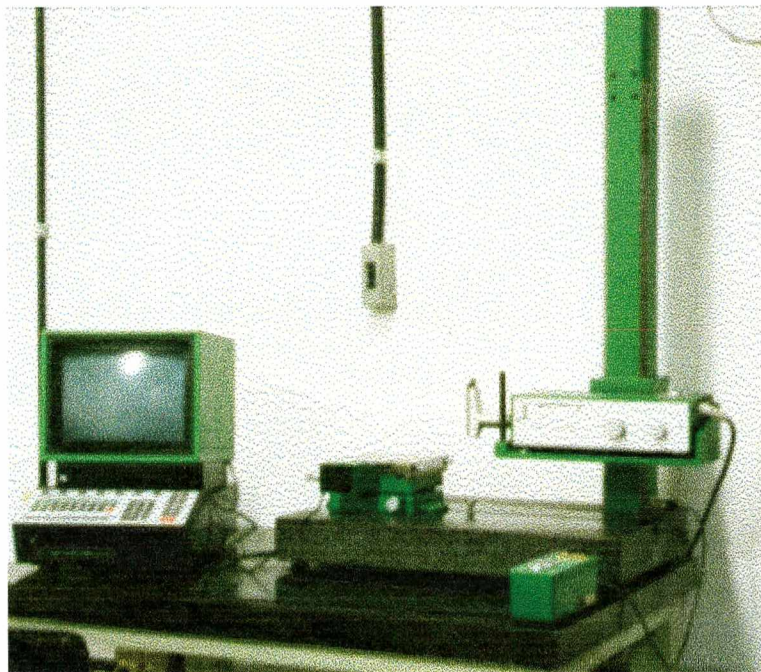


Figura 42 - Rugosímetro modelo Perthometer S8P - PRK, Feinprüf Perthen GmbH

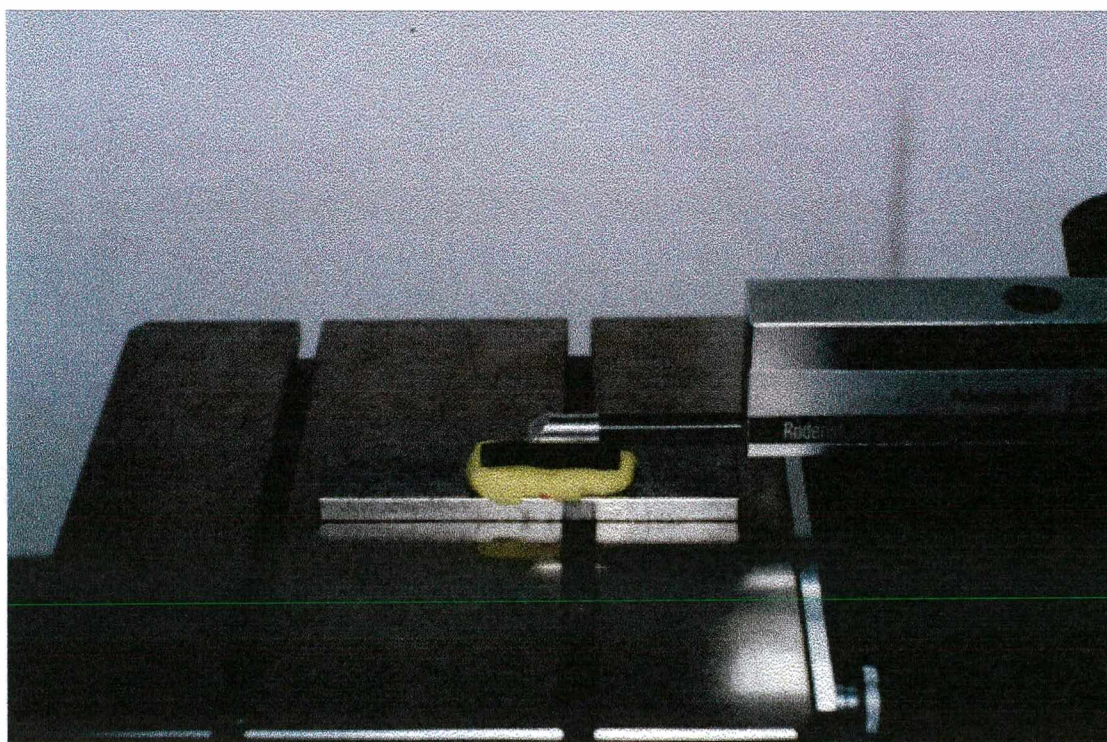


Figura 43 - Medição da rugosidade da resina com a sonda Focodyn, Feinprüf Perthen GmbH [2]

4.7.2 - EQUIPAMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA TOPOGRAFIA DO REBOLO

Para avaliar a topografia do rebolo antes e depois do dressamento por toque, além do mapeamento da superfície com o rugosímetro, foram analisadas amostras em um microscópio eletrônico de varredura XL 30 da firma Phillips, (Figura 44).

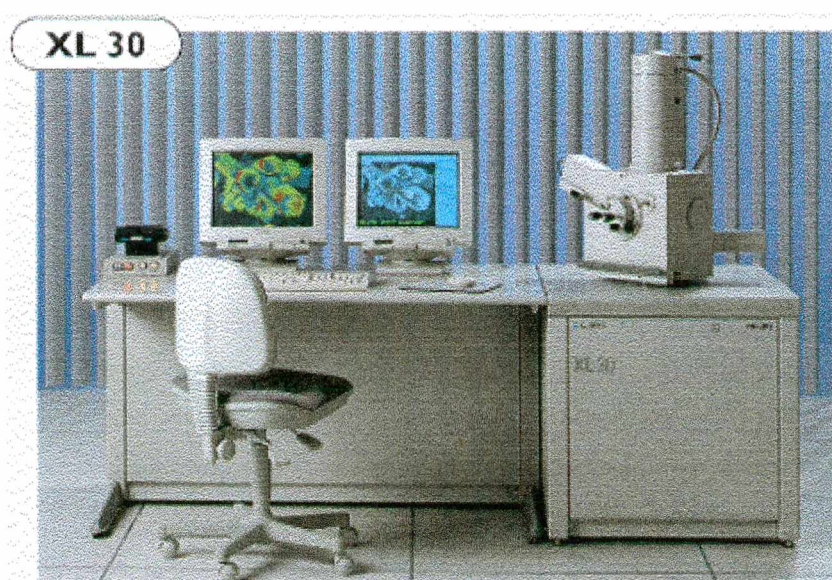


Figura 44 - Microscópio Eletrônico de Varredura XL 30 (MEV) [33]

Devido ao tamanho limitado da câmara deste microscópio, as amostras do rebolo analisadas foram obtidas por moldagem, técnica detalhada por Bertalan e Basto [2,10]. Definiu-se uma região do rebolo, da qual foram retiradas as amostras.

O processo de aplicação da resina é simples. Definida uma posição do rebolo, aplica-se primeiramente uma resina flexível Palesit 370 Harz, para obter um negativo da superfície do rebolo (Figura 45). Após a cura desta resina preparada com seu respectivo catalisador, Palesit Härter N, aplica-se a resina Biresin G 40 Harz sobre este negativo, que após a cura desta também

com seu respectivo catalisador, Biresin F1 Härter, representa de forma muito clara o positivo do rebolo (Figura 46) [2].

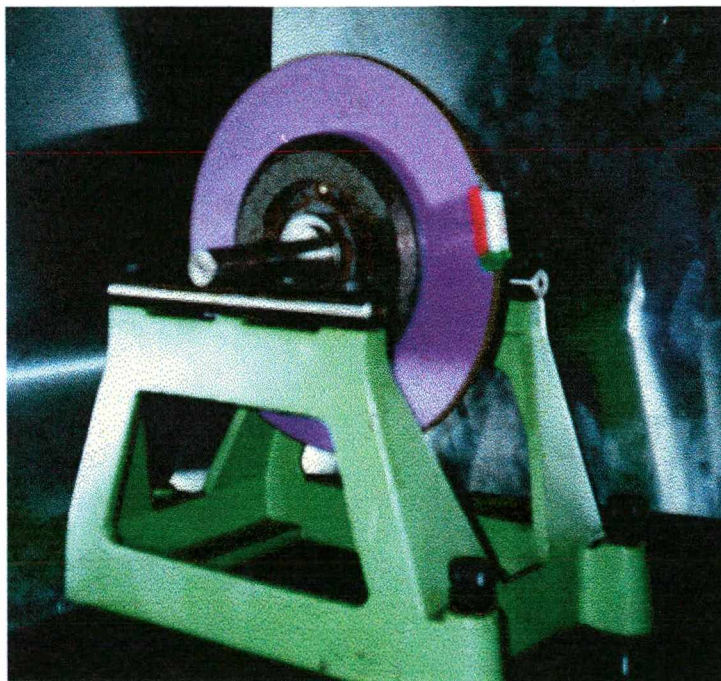


Figura 45 - Moldagem da resina flexível numa posição periférica do rebolo

Esta figura compara as imagens obtidas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da mesma região de um pequeno rebolo de CBN de 20 mm de diâmetro por 10 mm de largura, com granulometria de 151 μm com a sua cópia em resina rígida [2].

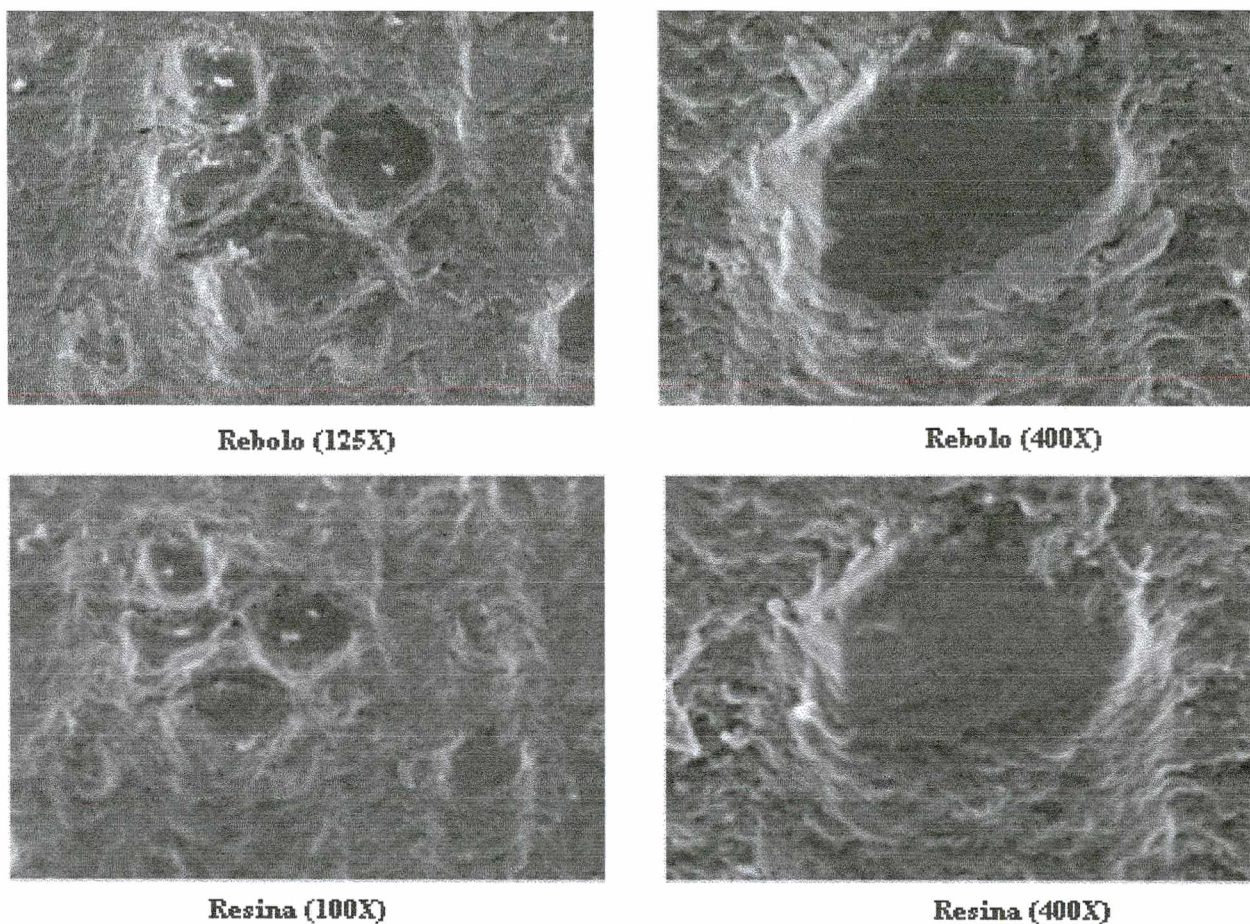


Figura 46 - Imagem MEV de um rebolo (acima) e de sua cópia (abaixo) [2]

Tanto na aplicação da resina flexível como da resina dura, a preparação deve ser feita de forma que bolhas residuais não prejudiquem a moldagem. Os melhores resultados foram obtidos evacuando-se o recipiente de preparação em médio vácuo em uma câmara de vácuo de fabricante Struers e marca Epovac Struers e também uma bomba de vácuo do fabricante Edwards, modelo E2M18 (2 estágios).

4.8 - EQUIPAMENTO PARA AFIAÇÃO DO REBOLO

Para a realização no Laboratório de Mecânica de Precisão de ensaios de dressamento convencionais, foi empregado o dispositivo de afiação com bloco de óxido de alumínio baseado no trabalho de Schleich [21] e desenvolvido no trabalho de Bertalan [2] (Figura 47).

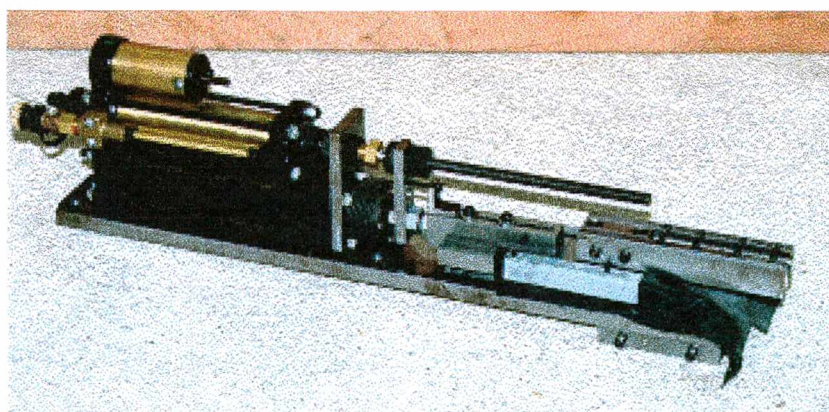


Figura 47 - Dispositivo de afiação do rebolo [2]

Esse dispositivo utiliza um sistema de avanço com força constante, porém com um freio hidráulico para obtenção de uma velocidade constante de afiação. O movimento de avanço é conduzido sobre uma guia prismática [2].

A força com que o bloco de afiação penetra no rebolo é função principalmente da regulagem de uma válvula controladora de pressão inserida entre o cilindro pneumático e a rede de ar comprimido. Porém, essa força também depende da regulagem do freio hidráulico. Este freio hidráulico, denominado Hydro-Check, pode ser visto na parte superior do dispositivo, imediatamente acima do cilindro pneumático. O Hydro-Check restringe, através da variação do tamanho de um orifício, a passagem de óleo pelo seu interior e limita, portanto, a velocidade de deslocamento da barra de afiação [2].

4.9 - PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS

Para assegurar a confiabilidade dos resultados, os parâmetros de entrada do sistema foram calibrados com o rigor requerido neste trabalho. A sistemática empregada é a mesma descrita em trabalhos anteriores [2] realizados no Laboratório de Mecânica de Precisão LMP. As calibrações mais relevantes são descritas a seguir.

4.9.1 - CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR DO REBOLO E DA PEÇA

a) Velocidade angular do rebolo

A retificação com rebolos de CBN dá melhores resultados com velocidade de retificação superior à empregada na retificação com rebolos convencionais. Para obter informações sobre a rotação efetiva do rebolo foi determinada a sua correlação com a frequência indicada no conversor de frequência Danfoss modelo VLT 2050 do sistema de acionamento do motor principal. A faixa de velocidades periférica do rebolo de interesse se situa entre 30 e 40 m/s.

Para determinar a velocidade angular do rebolo foi usado um aparelho de medição de rotação da marca Schenk, modelo Vibrolancer 41. Os valores para a calibração da velocidade angular do rebolo com a variação da frequência no conversor de frequência Danfoss são mostrados no Quadro 4.

Quadro 4 - Calibração da rotação do rebolo

**RETIFICADORA STUDER
REBOLO de 300 mm**

v_s [m/s]	freq. [Hz]	v_s [m/s]	freq. [Hz]	v_s [m/s]	freq. [Hz]	v_s [m/s]	freq. [Hz]
30	48,8	33	53,7	36	58,5	39	63,5
31	50,4	34	55,3	37	60,2	40	65,0
32	52,0	35	56,9	38	61,8		

A Figura 48 mostra o conversor de frequência Danfoss e o aparelho de medição da velocidade angular Schenck, utilizados para a calibração da velocidade angular do rebolo.



Figura 48 - Conversor de frequência Danfoss modelo VLT 2050 e aparelho de medição da velocidade angular Schenck, modelo VB 41, na calibração da velocidade angular do rebolo [2]

b) Velocidade angular da peça

Verificou-se que mudanças na pressão de contato do contra-ponto contra o eixo da peça e também do rolo dressador diamantado alteravam a rotação do eixo do cabeçote porta-peça. Tanto para a peça como também para o rolo dressador diamantado foram verificadas variações na rotação em relação à indicação no painel, Quadro 5. A calibração com o rolo dressador diamantado montado até 1600 rpm se faz necessária para atender a exigência da relação de velocidades periféricas do rolo dressador e do rebolo durante o dressamento.

Quadro 5 – Calibração da rotação do porta-peça e rolo dressador

Rotação Nominal Peça [rpm]	Rotação Real Peça [rpm]	Rotação Nominal Rolo [rpm]	Rotação Real Rolo [rpm]
80	81	80	84
300	325	800	950
500	570	1200	1441
700	823	1300	1545
		1340	1600
		1300*	1600*

*rolo dressador girando concordantemente com o rebolo

A diferença consideravelmente elevada dos valores reais em relação aos nominais, se deve ao fato que o servo-motor que acionava o arrastador porta-peça ou porta-rolo sofreu uma reparação na firma Bosch, para onde ele foi enviado para ser consertado. Devido ao fato da calibração do servo-motor ter sido feita então na própria fábrica, com o motor em separado sem a máquina-ferramenta, a diferença entre os valores nominais da máquina e os reais é facilmente explicada.

4.9.2 - CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO EM MERGULHO

a) Velocidade transversal (mergulho do rebolo)

A calibração da velocidade de avanço em mergulho do carro porta-rebolo foi realizada com o auxílio de um cronômetro e da medição de posicionamento com a régua óptica instalada. O procedimento foi de medir o deslocamento realizado em um certo tempo cronometrado. Para isso dever-se-ia esperar o período inicial em que existe uma aceleração natural da máquina até esta alcançar a velocidade constante. Para evitar dúvidas as medições foram realizadas várias vezes e chegou-se ao valor nominal através da média das medições.

O Quadro 6 mostra a nova calibração do avanço do porta-rebolo. Os valores nominais ajustados no potenciômetro estão relacionados com os valores reais no quadro.

Quadro 6 - Calibração do avanço porta-rebolo v_f [$\mu\text{m/s}$]

v_f nom.	v_f real	v_f nom.	v_f real
5	1,00	70	60,33
10	5,67	75	65,21
15	10,03	80	69,38
20	14,85	85	74,62
25	19,18	90	80,11
30	23,37	95	85,01
35	28,51	100	90,79
40	32,45	105	95,84
45	36,61	110	100,71
50	41,85	115	104,93
55	45,55	120	110,27
60	50,43	125	114,23
65	55,41	130	119,87

b) Velocidade longitudinal (deslocamento longitudinal da mesa)

Para calibração do deslocamento longitudinal da mesa foi usado um micrômetro digital para medição do deslocamento e um cronômetro. A Figura 49 mostra o sistema para a medição da velocidade de deslocamento da mesa.

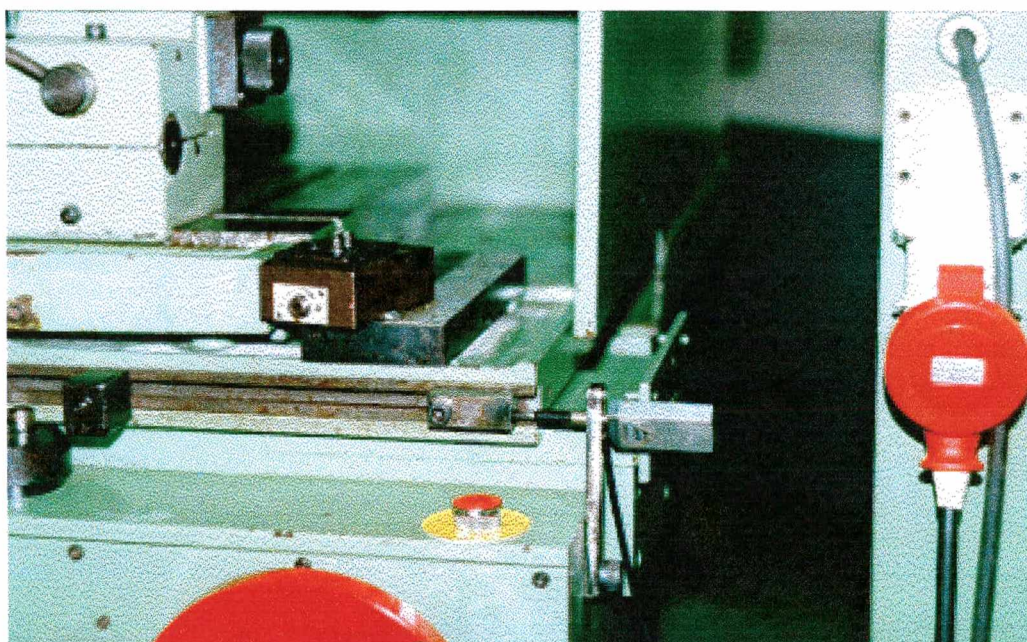


Figura 49 - Medição da velocidade de deslocamento da mesa [2]

No Quadro 7 são mostrados os valores da calibração.

Quadro 7 - Calibração da velocidade de deslocamento longitudinal da mesa [mm/s]

Da Direita para a Esquerda		Da Esquerda para a Direita	
v_f nom. [mm/s]	v_f real [mm/s]	v_f nom. [mm/s]	v_f real [mm/s]
2	0,80	2	1,00
4	1,60	4	1,56
6	2,60	6	2,57
8	4,00	8	4,18

Para a calibração do deslocamento da mesa, a diferença entre os valores reais dos nominais na máquina-ferramenta se devem ao fato de que esse deslocamento longitudinal da mesa dificilmente foi utilizado no período de estudo. Por isso uma variação podia ser esperada devido a depreciação normal da máquina-ferramenta. Para reparar esse fato, somente uma reparação total da máquina-ferramenta pode ser suficiente, o que não foi viável, nem considerada necessária, durante a execução do trabalho.

4.9.3 - AJUSTE DE PARALELISMO

O paralelismo entre a ponta e contra-ponta da máquina-ferramenta foi realizado de modo a permitir a verificação da ortogonalidade entre o movimento de avanço do rebolo e a superfície retificada da peça. Para esta tarefa foi usada uma peça retificada padrão, com erro de cilindricidade inferior a 1 μm e um relógio comparador de menor divisão de escala de 1 μm .

A Figura 50 mostra a montagem do mandril e relógio comparador. O mesmo foi repetido com o relógio posicionado verticalmente, podendo-se considerar que as peças entre pontas estarão paralelas em relação à linha de movimentação da mesa [2].

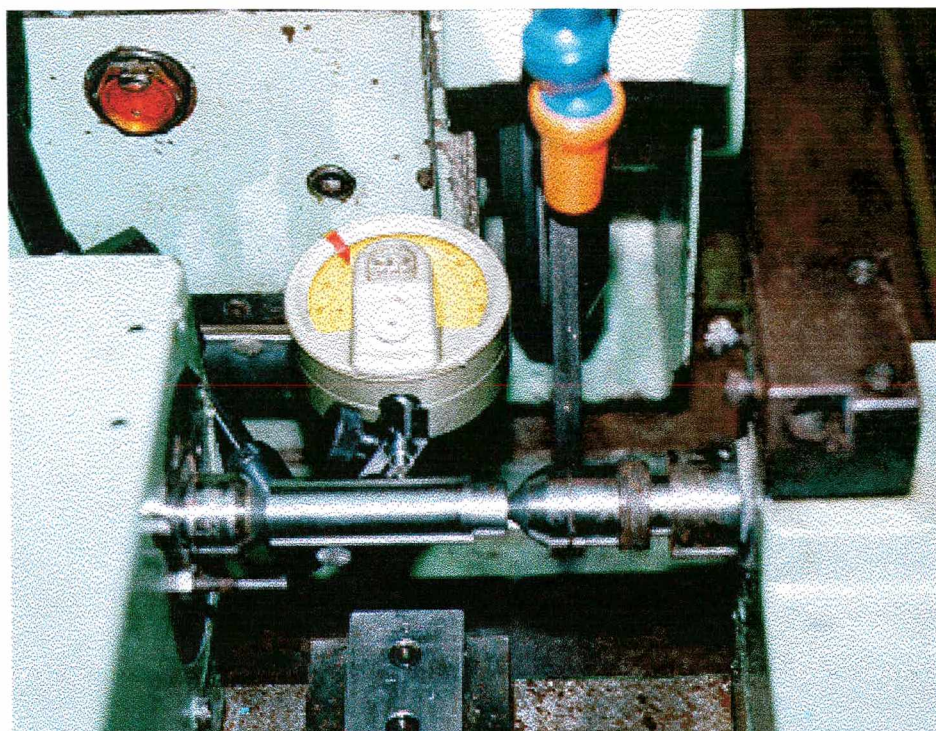


Figura 50 - Ajuste do paralelismo da mesa [2]

Tanto na posição horizontal como vertical do relógio comparador foram detectados erros inferiores a $2,5 \mu\text{m}$. Esse valor é admissível para a realização do trabalho.

4.9.4 - BALANCEAMENTO ESTÁTICO DO REBOLO

O balanceamento estático do reboło é feito em um dispositivo específico para esta finalidade. O reboło é montado sobre um mandril cilíndrico. Este é posicionado sobre duas barras cilíndricas paralelas entre si e horizontais (Figura 51).

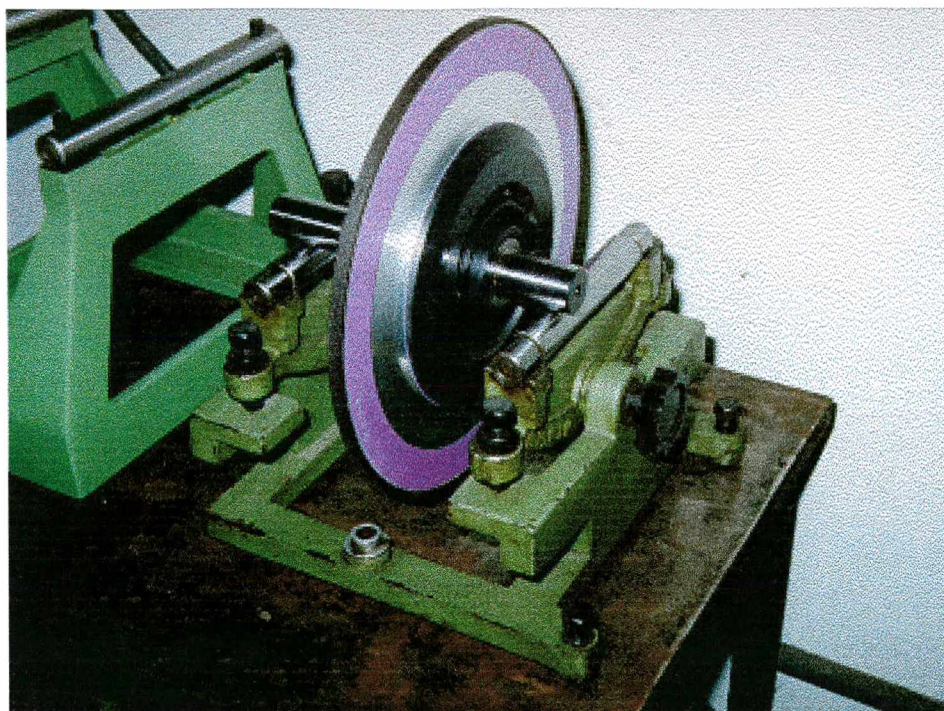


Figura 51 - Balanceamento estáticos dos rebolos [2]

O rebolo com o mandril é posicionado sobre os cilindros horizontais. Se houver desbalanceamento, o lado mais pesado vai tender à posição inferior. Pelo deslocamento de castanhas localizadas no flange do rebolo é possível corrigir o desbalanceamento estático.

Como o rebolo é constituído de um corpo sólido, sem porosidade, o desbalanceamento dinâmico é pequeno. Experimentos anteriores mostraram que, tanto para o rebolo com corpo metálico, como para o rebolo com corpo de resina reforçada, o balanceamento dinâmico para a faixa de velocidade de retificação de até 40 m/s é desnecessário [2].

4.9.5 - CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DO FLUIDO DE CORTE

A calibração da vazão de fluido de corte utilizado na retificação foi realizada com auxílio de recipientes de volume conhecido e cronômetro, conforme Bertalan e da Silva [2,9]. O Quadro 8 mostra os valores da vazão como função da pressão de estagnação dos manômetros instalados na tubulação do fluido.

Quadro 8 - Calibração da vazão do fluido de corte

Pressão de Estagnação	Vazão de Fluido
P_{est} [bar]	V_{fc} [l/min]
4,5	27,2
5,0	27,6
5,5	28,0

4.10 - DETERMINAÇÃO DOS VALORES DAS GRANDEZAS DE ENTRADA DO PROCESSO

Para escolha dos valores das grandezas do processo foi levado em conta principalmente o fato de se estar utilizando uma retificadora convencional. Isto implica na utilização de velocidades máximas de 40 m/s, portanto, inferiores às recomendadas aos rebolos de superabrasivos como o CBN. Para valores maiores que esses os mancais apresentavam um aquecimento acima do admissível, podendo causar uma falha do componente. Outro fator limitante é a potência instalada no acionamento principal. Embora as forças diminuam com o aumento da velocidade de retificação, a potência total aumenta. A limitação de potência instalada também não permitiu trabalhar com taxa de retificação maiores.

Para garantir que o desgaste fosse predominantemente abrasivo nos gumes dos grãos e a remoção de grãos se dar apenas de forma lenta pelo recuo do ligante (proporcional ao desgaste dos gumes dos grãos), todos os parâmetros de entrada devem ser ajustados de tal forma que se tenha uma espessura de cavaco não deformada pequena. Como no decorrer deste trabalho o diâmetro dos rebolos, o tamanho de grão e a concentração de grãos são constantes, a avaliação da espessura de cavaco não deformada pode ser expressa de forma satisfatória pela espessura de cavaco equivalente h_{eq} .

Baseado em trabalhos anteriores [5,6,7] optou-se por uma espessura de cavaco equivalente $h_{eq} = 0,02 \mu\text{m}$.

4.10.1 - GRANDEZAS DE ENTRADA PARA A RETIFICAÇÃO

A retificação em máquina convencional com rebolos de CBN foi estudada anteriormente no Laboratório de Mecânica de Precisão e se mostrou viável economicamente. Os parâmetros foram escolhidos de modo a se ter características desejadas de desgaste do rebolo, no caso predominantemente desgaste abrasivo dos gumes. Procurou-se evitar a presença de uma autoafiação no rebolo, que reduziria a margem de sucesso da aplicação da técnica de dressamento por toque.

A escolha dos parâmetros também foi executada verificando-se o resultado de trabalho, isto é, foi analisada a rugosidade da peça retificada observando-se os valores admissíveis, e mostrou-se satisfatória. Os valores dos parâmetros de entrada foram mantidos constantes para todos os ensaios realizados.

a) Velocidade periférica do rebolo (v_s)

A velocidade periférica do rebolo para o processo de retificação foi escolhida no seu valor máximo permitido pela máquina-ferramenta, isto é 40 m/s, embora a literatura referencie aplicações em velocidade até maiores que 200 m/s. Para garantir uma espessura de cavaco equivalente h_{eq} reduzida, a velocidade periférica da peça e de avanço do rebolo (com isso também a penetração de corte a_c) devem ser ajustadas à velocidade de corte, de forma que o desgaste do rebolo se torne predominantemente o desgaste do grão abrasivo e não do ligante, como desejado.

b) Velocidade de avanço do rebolo (v_f)

Na retificação cilíndrica a velocidade de avanço do rebolo estabelece a taxa de remoção de material do processo de retificação. A determinação dos valores da velocidade de

avanço é principalmente influenciada pelas exigências de produtividade industrial e pelas limitações da máquina-ferramenta. Para evitar uma solicitação excessiva dos grãos abrasivos, bem como para evitar um desgaste excessivo do ligante e assim reduzir a ancoragem dos grãos, limitou-se a velocidade de avanço em $12,70 \mu\text{m/s}$ para os corpos de prova do aço C15PbK e em $10,7 \mu\text{m/s}$ para o aço 100Cr6. Essa diferença dos valores se deu devido à da diferença de diâmetros externos dos dois corpos de prova e pelo fato de que a regulagem da velocidade de avanço tinha uma precisão muito melhor que a regulagem da rotação das peças.

c) Velocidade da peça (v_w)

Para a velocidade da peça, no processo de retificação, foi escolhido um valor bem reduzido. Isso ocorreu primeiramente porque a potência do motor que acionava a peça não permitia que velocidades muito grandes fossem ajustadas, pois nessas altas velocidades a potência exigida pelo processo se tornava superior à do motor, causando com isso falhas na rotação da peça e conseqüentemente defeitos na superfície da peça. Outro motivo foi por causa da escolha do parâmetro $h_{eq} = 0,02 \mu\text{m}$. Com esse valor escolhido, para que o desgaste predominante no rebolo fosse abrasivo, teve-se que determinar os valores da velocidade da peça e da velocidade de avanço do rebolo, já que a velocidade do rebolo teria que ser mantida a maior possível para se ter a viabilidade do processo em termos econômicos. Com isso foi escolhida a rotação da peça em 80 rpm, o que corresponde ao valor $0,084 \text{ m/s}$ para a peça com 20 mm de diâmetro, corpo de prova do aço C15PbK e ao valor $0,100 \text{ m/s}$ para a peça com 24 mm de diâmetro, corpo de prova do aço 100Cr6.

d) Profundidade de corte (a_e)

Para os corpos de prova do aço C15PbK a profundidade de corte na retificação foi limitada pela profundidade de cementação, em 1 mm. Para os corpos de prova do aço 100Cr6 a dureza se mantinha igual em toda seção transversal, de forma que a preocupação com a profundidade de corte tinha apenas uma importância secundária.

e) Tempo de faiscamento ou “spark-out” (t_a)

O tempo de faiscamento pode ser variado no comando da máquina-ferramenta desde 1 até 60 segundos. Para o processo de retificação, o tempo de faiscamento é empregado para reduzir a rugosidade das peças retificadas. A velocidade de avanço durante o faiscamento se limita ao retorno elástico do sistema máquina-ferramenta / peça / rebolo. A velocidade de avanço decresce geometricamente e tende a zero. A taxa de redução depende da rigidez do sistema. Quanto mais rígido mais rapidamente a velocidade de avanço residual tende a zero. A melhora da qualidade superficial após atingir-se o retorno elástico do sistema é insignificante. Como o objetivo deste trabalho não era obter uma alta qualidade superficial, limitou-se o tempo de faiscamento em 2 segundos para todos os ensaios.

f) Vazão de fluido de corte (V_{fcr})

Para a aplicação de uma quantidade grande de fluido de corte, no processo de retificação, a máquina-ferramenta deve ser encapsulada. O sistema de arraste da peça, que ficava na “área molhada”, apresentou problemas elétricos, devido à não-estanqueidade do motor. Para uma vazão de 27 l/min e uma pressão de estagnação de 4,5 bar obteve-se uma velocidade de saída do jato de fluido de corte de 44,3 m/s na tubeira de seção de 10,4 mm². Esta vazão foi mantida constante em todos os ensaios de retificação.

4.10.2 - GRANDEZAS DE ENTRADA PARA O DRESSAMENTO POR TOQUE

Os parâmetros para execução dos ensaios foram ajustados de modo que se pudesse chegar às conclusões sobre a influência da variação destes parâmetros no processo e assim chegar a um melhor domínio sobre o processo de dressamento por toque.

a) Velocidade periférica do rebolo (v_{sd})

Para o processo de dressamento com rolo diamantado a transferência da agressividade do rolo dressador para o rebolo se comporta como mostrado no gráfico da Figura 21. Para o caso de velocidades concordantes a agressividade do rebolo se torna maior quando tem-se uma aproximação da velocidade periférica do rolo dressador com a do rebolo, isto é, a relação de velocidades para o processo de dressamento $q = 1$. Em consequência da limitação da velocidade do eixo porta-peça/porta-rolo dressador, do diâmetro deste (100 mm) e para garantir uma agressividade ao rebolo inicialmente se escolheu uma velocidade periférica de dressamento do rebolo de 30 m/s.

b) Velocidade do rolo dressador (v_r)

O rolo dressador foi montado em substituição à peça, de forma que seu acionamento era idêntico, ou seja, entre pontas fixas, acionado pelo mesmo motor que promovia a rotação da peça. A rotação máxima do porta-peça é de 1600 rpm, o que, para um rolo dressador de 100 mm de diâmetro, correspondeu a uma velocidade periférica máxima $v_r = 8,38$ m/s, resultando em uma relação de velocidades $q = 0,28$ para a velocidade do rebolo $v_{sd} = 30$ m/s. Esse valor deve ser mantido fixo e no valor máximo devido ao fato de se ter problema com a relação de velocidades em valores muito pequenos.

c) Penetração de dressamento (a_{ed})

A penetração de dressamento foi fixada no valor de $6 \pm 1 \mu\text{m}$. Este parâmetro tem, de acordo com a bibliografia [18], grande influência no processo de dressamento por toque. Baseado nesta literatura os valores mínimos e máximos de interesse para rebolo de CBN são 2 e 10 μm respectivamente. Os ensaios foram então realizados com a penetração de dressamento intermediária de 6 μm , para se ter uma idéia inicial de como o processo de dressamento por toque se comportaria, pois não foi encontrada qualquer publicação do assunto dressamento por toque com rolos diamantados anterior a este trabalho.

Sobre o assunto dressamento por toque (“touch-dressing”) foram encontradas muito poucas publicações, tanto nacionais como internacionais. Em nenhuma delas foi empregado rolo dressador diamantado para a realização do dressamento. Por isso a dificuldade de se iniciar o processo com parâmetros já testados fez com que se escolhesse um valor intermediário para profundidade de dressamento e não ocorresse tentativas de variações desse valor.

d) Vazão de fluido de corte (V_{fed})

O fluido de corte foi empregado durante o dressamento de forma idêntica ao emprego na retificação, exceto na detecção do primeiro toque, para obter um sinal acústico com menos ruído de fundo.

4.11 - METODOLOGIA DE ENSAIOS

No início dos ensaios os rebolos se apresentavam com topografia “original de fábrica”, visto terem sido condicionados especificamente pelo fabricante para esta finalidade.

Esta condição inicial permitiu estabelecer um parâmetro de comparação para os ensaios de dressamento por toque a serem realizados.

A avaliação da topografia do rebolo foi efetuada em amostras moldadas em resina, tanto na medição de parâmetros de rugosidade como também na microscopia eletrônica de varredura.

A avaliação do resultado de trabalho foi efetuada pela medição da rugosidade em função do volume usinado específico, com rebolo dressado por toque e com o rebolo dressado convencionalmente. Ocorreu também uma avaliação topográfica do rebolo, comparando-se os estados das topografias após o processo de retificação de peças e após os processos de dressamento por toque, relacionando-se sempre o estado do rebolo com a qualidade das peças retificadas.

O dressamento por toque foi efetuado avançando-se o rebolo manualmente, controlando-se o avanço pela indicação da régua óptica até detectar-se o primeiro toque. Foram testadas três formas de dressamento por toque:

1. Rolo dressador girando concordante com o rebolo, dressamento por toque apenas em um mergulho sem faiscamento, sem fluido de corte.
2. Rolo dressador girando discordante com o rebolo, dressamento por toque apenas em um mergulho com faiscamento, com fluido de corte.
3. Rolo dressador girando discordante com o rebolo, dressamento por toque de passagem, com fluido de corte.

Para o dressamento de passagem, foram executadas quatro passagens de ida e volta do rolo sobre o rebolo. De acordo com a bibliografia [2], no processo de dressamento de passagem com rolo dressador, tem-se de forma ainda representativa no processo as passagens seguintes de dressamento do rolo dressador diamantado sobre o rebolo, devido ao fato que a relação de velocidades e também a concentração de grãos, tanto do rebolo como do rolo, tem influência representativa no dressamento. Ocorre que durante a primeira passada nem todos os grãos do rebolo são atingidos na profundidade de dressamento ajustada. Com a sobreposição das passagens posteriores, consegue-se uma uniformidade da profundidade de dressamento e com isso garante-se que essa profundidade foi mesmo executada em toda a topografia do rebolo.

Capítulo 5

DESENVOLVIMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

5.1 - ENSAIOS PRELIMINARES

Para se obter um domínio da aproximação do rebolo ao rolo dressador os experimentos foram iniciados com ensaios de determinação do primeiro toque na retificação de peças de aço. Com isso pode-se evitar danos, tanto do rebolo, como também do rolo dressador diamantado, para o caso de uma operação involuntária ou uma penetração excessiva para o dressamento. As penetrações de corte para a retificação podem ser uma ordem de grandeza maiores que no dressamento, de forma que os riscos eram desprezíveis.

Nos ensaios de determinação de primeiro toque foi empregado o rebolo de dureza J. Como peças foram empregados os corpos de prova dos aços C15PbK e 100Cr6.

A Figura 52 mostra o sinal do ruído de fundo captado pelo sensor de emissão acústica.

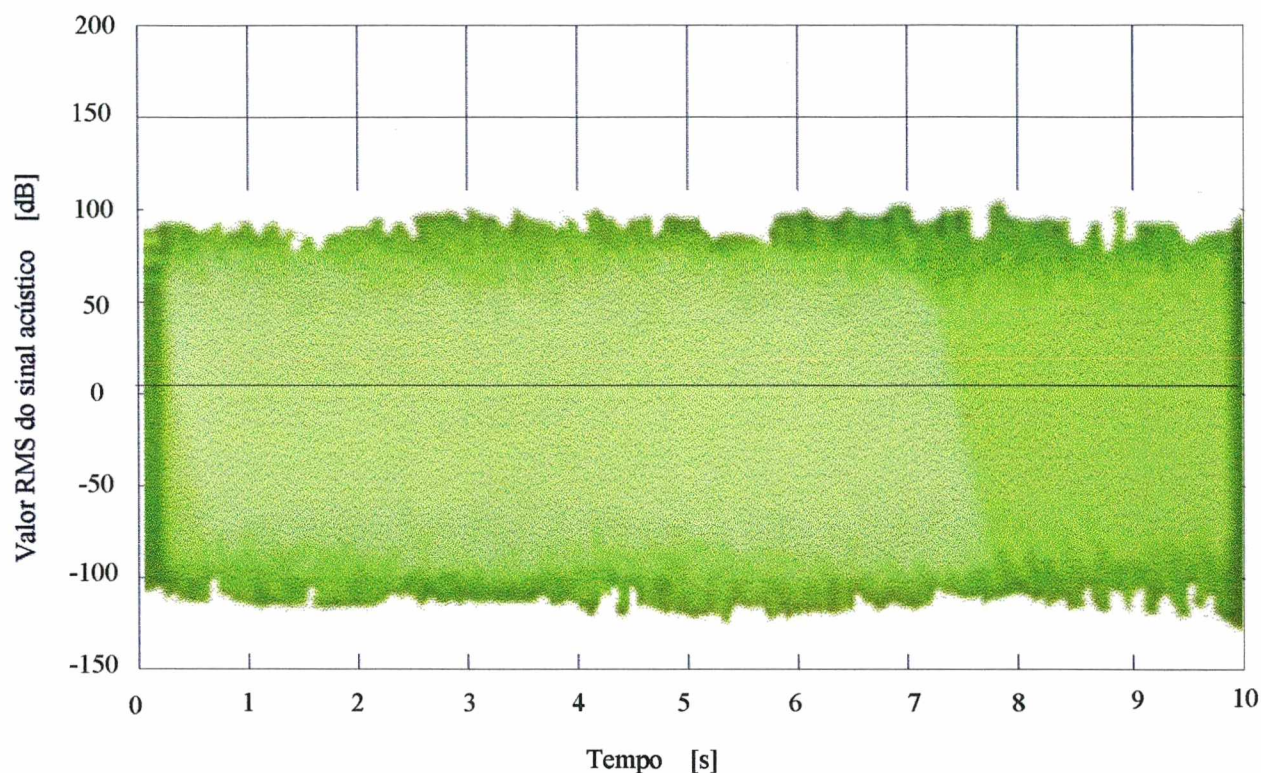


Figura 52 - Gráfico da emissão acústica do ruído de base do ambiente

Este ruído de fundo pode ter origem tanto na máquina-ferramenta e acessórios, como externamente à máquina-ferramenta.

Avançando o rebolo em passos de $1\ \mu\text{m}$, observava-se o sinal na tela do analisador de sinais. O gráfico da Figura 53 mostra o sinal do primeiro toque do rebolo sobre a peça. Este procedimento foi efetuado sem fluido de corte. Desta forma, além de não se ter a influência negativa do fluido de corte sobre o ruído de fundo, pode-se observar o processo de toque. Para a interferência entre 0 e $1\ \mu\text{m}$ não se pode visualizar qualquer início de faiscamento na região de trabalho, visto as penetrações de corte serem menores que a penetração mínima para formação de cavacos.

A forma do gráfico para o primeiro contato do rolo dressador com a peça representa exatamente a frequência de rotação da peça. Devido ao fato de que a interferência era de no

máximo 1 μm , e que a peça tinha um erro de circularidade bem superior a esse valor, uma pequena parte da peça apenas entrou em contato primeiro com o rebolo. Os intervalos do sinal do ruído representam exatamente a rotação da peça de 80 rpm.

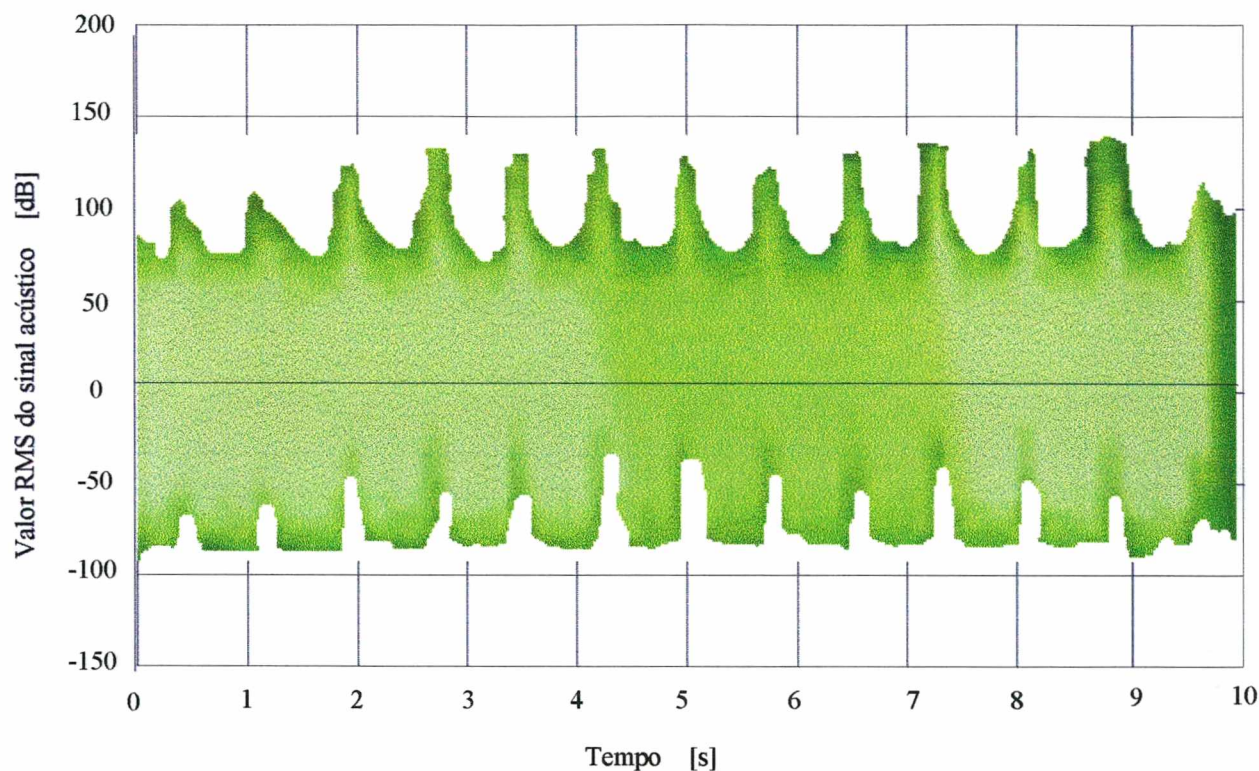


Figura 53 - Gráfico da emissão acústica durante um processo de primeiro contato entre rebolo de CBN e peça

A diferença entre o gráfico de ruído de fundo e do gráfico mostrando o primeiro toque é nítida e desta forma pode-se garantir que no dressamento de toque não se correria riscos maiores, um vez que a literatura recomenda penetrações de dressamento de até 10 μm .

O desgaste do rebolo foi efetuado em operações de retificação. Para simular uma aplicação industrial, foram realizados ensaios de retificação de mergulho com penetrações de corte de 1 mm para cada ensaio. Foram efetuados 52 ensaios em 100Cr6 (volume usado

específico $V_w' = 3757 \text{ mm}^3/\text{mm}$) e 50 ensaios em C15PbK (volume usinado específico $V_w' = 3141 \text{ mm}^3/\text{mm}$).

Ao final destes ensaios de retificação a topografia do rebolo foi copiada em resina para análise de rugosidade e microscopia eletrônica de varredura e para a comparação com os resultados obtidos nas impressões do rebolo condicionado pelo fabricante.

Todos os ensaios de retificação foram efetuados com as variáveis de processo, como velocidade de corte, rotação da peça, penetração de corte, velocidade de avanço e, conseqüentemente, taxa de retificação, constantes. As alterações no resultado de trabalho, verificadas principalmente através das rugosidades medidas nas peças, puderam assim ser relacionadas ao processo de dressamento e ao desgaste do rebolo.

Após os primeiros ensaios de retificação, com um volume usinado específico total de $V_w' = 6898 \text{ mm}^3/\text{mm}$, o rebolo apresentava uma topografia estabilizada e procedeu-se o primeiro ensaio de dressamento por toque. O sinal acústico do primeiro contato entre rolo dressador diamantado e rebolo está mostrado no gráfico da Figura 54. O avanço para cada captação do sinal no visor do analisador de sinais foi de $0,5 \mu\text{m}$, de forma que o sinal mostrado representa uma penetração menor que esse valor total de avanço por amostragem do sinal.

A sensibilidade do sistema de aquisição do sinal de emissão acústica se mostrou adequada para o dressamento de toque, pois como durante uma aquisição de sinal foi avançado apenas $0,5 \mu\text{m}$ e o sinal foi detectado com clareza, fica clara a capacidade de determinação de onde se deve iniciar a profundidade de dressamento, e ainda ter um valor exato dessa profundidade de dressamento.

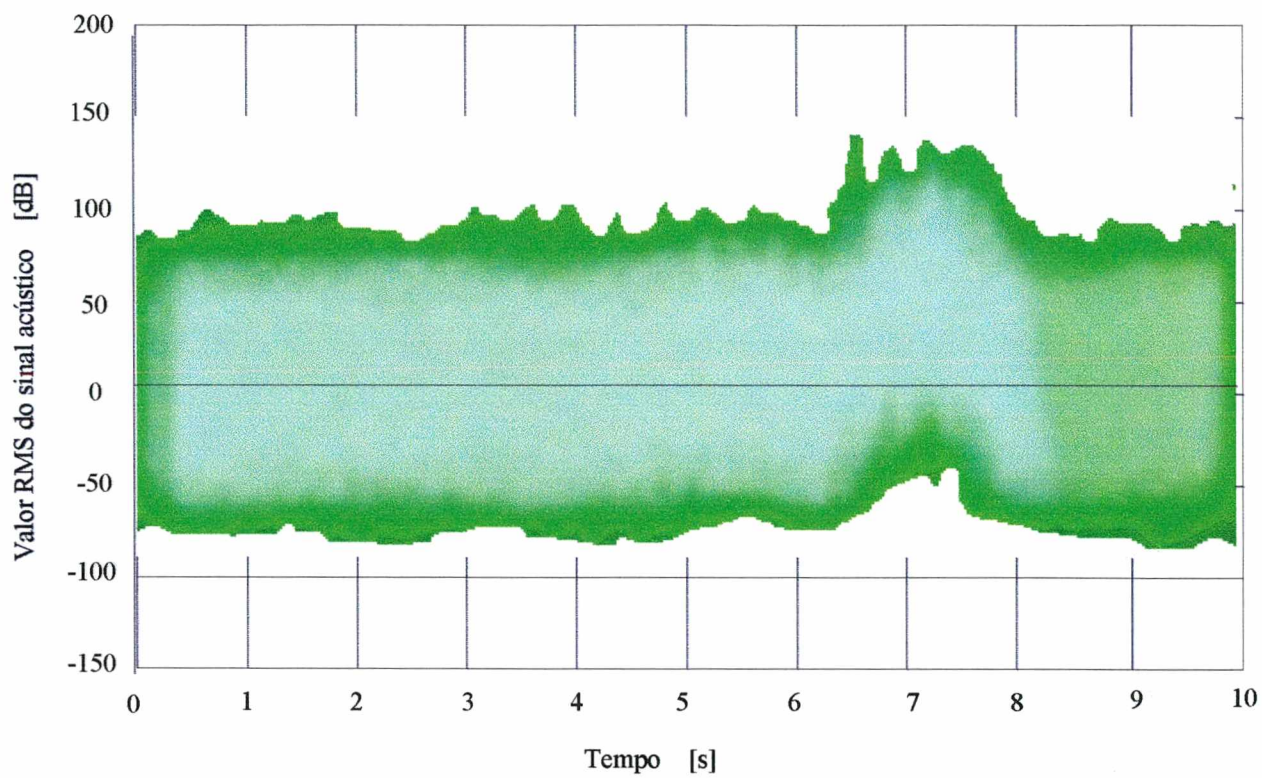


Figura 54 - Gráfico da emissão acústica durante um processo de primeiro contato entre rebolo de CBN e rolo dressador diamantado

Capítulo 6

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De forma semelhante ao procedimento efetuado com o rebolo de dureza “J” foram repetidos ensaios com o rebolo de dureza “N”.

6.1 - ENSAIOS COM O REBOLO DE CBN DE DUREZA “J”

Para que possa ser feita uma análise de como o processo de dressamento por toque afeta a topografia do rebolo e a qualidade da peça retificada, foi necessária a avaliação do estado inicial da topografia dos rebolos. Em cópias dos rebolos moldadas em resinas foi avaliada a topografia através do mapeamento da rugosidade, conforme mostrado na Figura 55 e no Quadro 9 para o rebolo de dureza “J” condicionado no fabricante.

Os parâmetros ajustados no rugosímetro para a realização das medições das rugosidades da topografia do rebolo foram o comprimento de medição $LT = 5,6$ mm, o comprimento lateral de deslocamento do focodyn $LM = 4,0$ mm e a amplitude máxima de medição admissível $VB = 250$ μm .

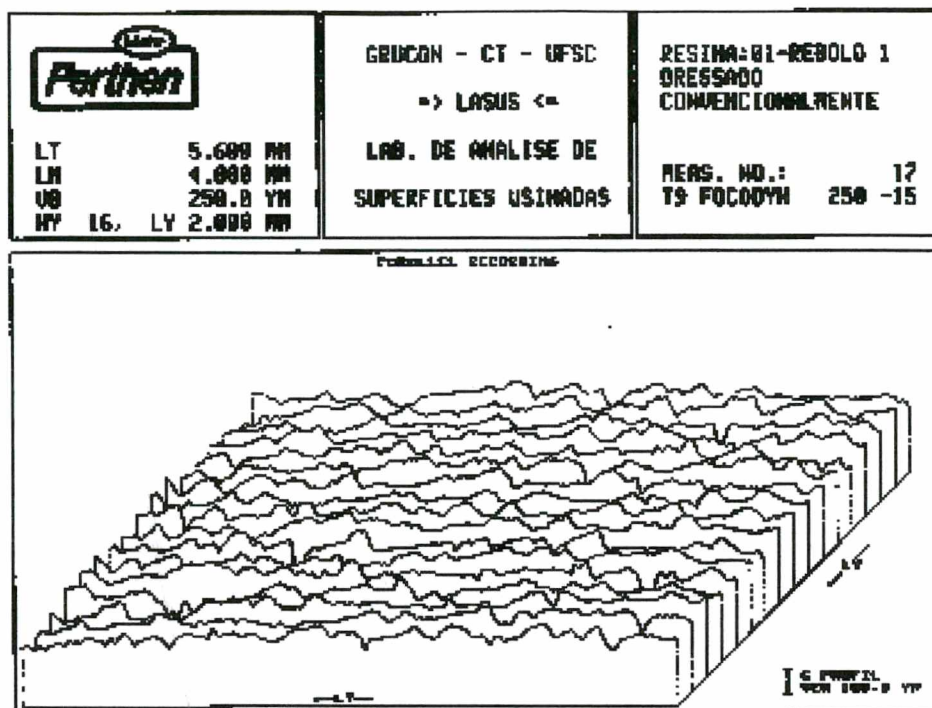


Figura 55 - Topografia do rebolo de dureza “J” condicionado convencionalmente

Quadro 9 - Parâmetros verticais de rugosidade do rebolo de dureza “J” dressado convencionalmente pelo fabricante

Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do molde	
Parâmetros utilizados	
LT	5,600 mm
LM	4,000 mm
VB	250 μ m
Apalpador	Focodyn
Valores Médios dos Parâmetros Medidos	
R_a	11 μ m
R_z	62 μ m
R_p	38 μ m
R_t	90 μ m

A análise dos parâmetros verticais permitiu concluir que, embora a rugosidade R_a apresente um valor baixo, de apenas 11 μ m, a média da rugosidade R_z e, principalmente, a profundidade de rugosidade R_t apresentam valores elevados, 62 μ m e 90 μ m, respectivamente. A

profundidade de alisamento R_p está relacionada com a protusão dos grãos verificada na área ensaiada. Considerando-se um tamanho de grão médio B126 (podendo-se ter grãos entre 100 μm e 200 μm) uma protusão de 62 μm é plenamente aceitável.

Foram executados, com o rebolo dressado pelo fabricante, 50 ensaios nas peças de C15PbK. O gráfico da Figura 56 mostra o comportamento dos parâmetros de rugosidade para o volume usinado específico V_w' . Apresenta-se a profundidade média de rugosidade R_z , a profundidade máxima isolada de rugosidade R_{max} , a profundidade de rugosidade R_{tw} e o desvio médio aritmético de rugosidade R_a da peça. O valor elevado inicial dos parâmetros verticais de rugosidade, exceto R_a , são devido ao estado agressivo inicial do rebolo de CBN. Após um volume usinado específico de 500 mm^3/mm houve uma estabilização dos valores da rugosidade.

A estabilização dos parâmetros verticais de rugosidade pode ser explicada pelo desgaste dos grãos mais protusos e a perda dos grãos danificados no dressamento convencional.

A manutenção dos parâmetros verticais da rugosidade até um volume usinado específico V_w' de 3000 mm^3/mm é explicada pela situação de regime, onde domina o desgaste abrasivo dos grãos mantendo-se uma situação estável da protusão dos grãos.

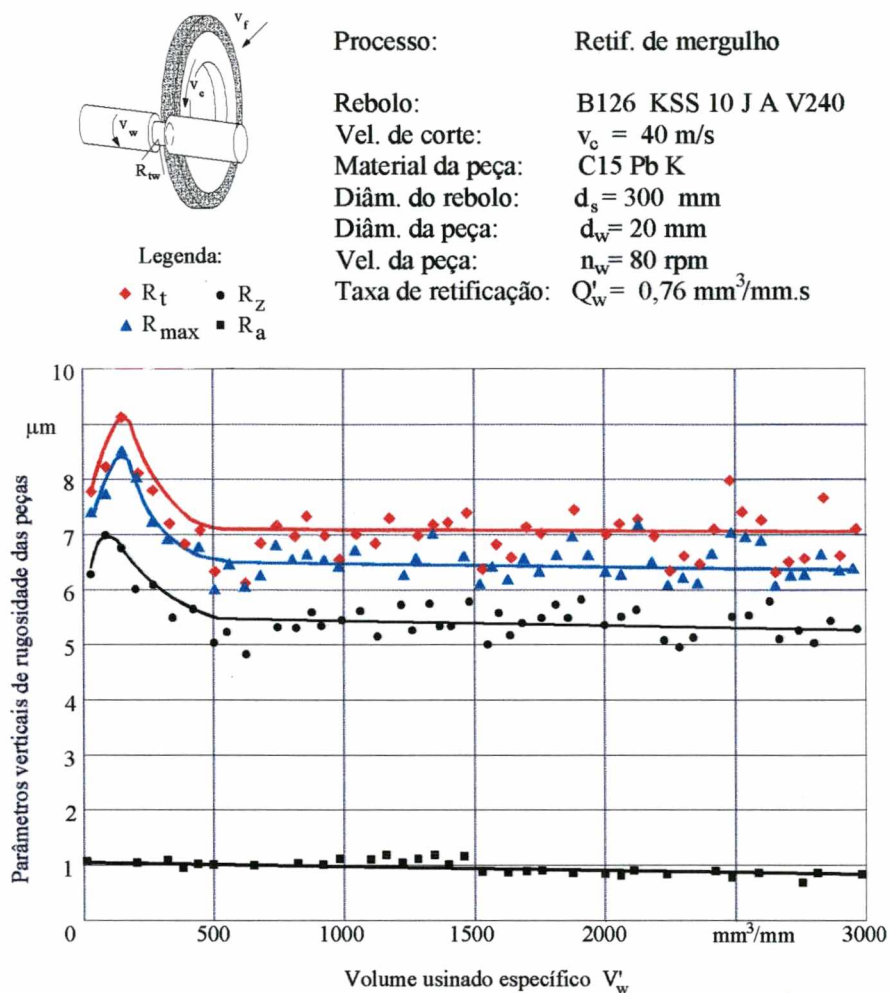


Figura 56 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de C15PbK pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado convencionalmente pelo fabricante

A mudança do material da peça para 100Cr6 mostra que para os mesmos parâmetros de entrada de retificação a estabilização dos parâmetros de rugosidade se dá para valores mais elevados, Figura 57, denotando uma mudança no mecanismo de desgaste. Após um volume usinado específico de aproximadamente 7000 mm³/mm optou-se por um condicionamento empregando inicialmente a metodologia de condicionamento descrita por Bertalan [2], ou seja perfilamento com rolo dressador diamantado e afiação com bloco de óxido de alumínio.

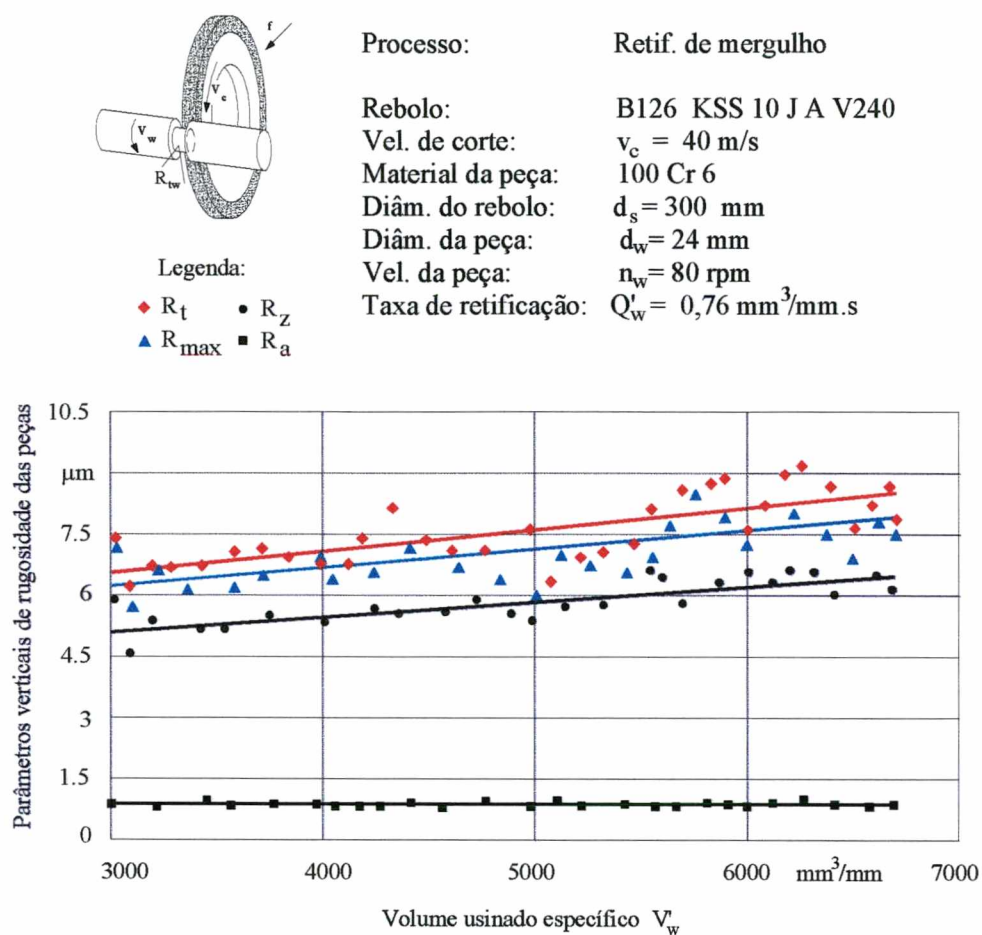


Figura 57 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado convencionalmente

O Quadro 10 mostra os valores dos parâmetros verticais de rugosidade para a topografia do rebolo após um volume usinado específico de retificação inicial de aproximadamente 7000 mm³/mm. O aumento do valor do parâmetro R_p e a redução das rugosidades R_z e R_t mostram que grãos mais protusos foram removidos da topografia do rebolo e que o espaço para o cavaco foi reduzido.

Quadro 10 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia da resina do rebolo de rudeza “J” após a retificação de um volume usinado específico de $7000 \text{ mm}^3/\text{mm}$

Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do molde	
Parâmetros utilizados	
LT	5,600 mm
LM	4,000 mm
VB	250 μm
Apalpador	Focodyn
Valores Médios dos Parâmetros Medidos	
R_a	11 μm
R_z	59 μm
R_p	43 μm
R_t	80 μm

Com este dressamento convencional realizado no LMP se objetivou comparar os resultados obtidos com o rebolo dressado convencionalmente pelo fabricante. O processo de perfilamento foi realizado com o rolo girando concordantemente ao rebolo. A penetração passiva de dressamento total foi de $50 \mu\text{m}$, garantindo que o ligante e os grãos ficassem na mesma altura. Após o avanço frontal do rebolo, o rolo dressador foi deslocado lateralmente sobre o rebolo de forma que fosse alcançado um total alisamento da superfície do rebolo. Depois do perfilamento, realizou-se a afiação do rebolo com blocos de óxido de alumínio. Utilizou-se no processo de afiação uma taxa de remoção específica do bloco de afiação $Q_{sb}' = 71,2 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, altura do bloco de afiação $h_{sb} = 13 \text{ mm}$ e uma velocidade de avanço do bloco de afiação $v_{f_{sb}} = 5,5 \text{ m/s}$.

Após a realização do dressamento convencional, foi confeccionado um molde em resina para determinação da topografia do rebolo nesta situação. O Quadro 11 mostra os valores obtidos no rugosímetro para esta situação do rebolo.

Quadro 11 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza

“J” dressado com rolo dressador e afiado automaticamente segundo Bertalan [2]

Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do molde	
Parâmetros utilizados	
LT	5,600 mm
LM	4,000 mm
VB	250 μm
Apalpador	Focodyn
Valores Médios dos Parâmetros Medidos	
R_a	5 μm
R_z	34 μm
R_p	22 μm
R_t	49 μm

Os valores da rugosidade da topografia do rebolo mostram que o dressamento controlado automaticamente no Laboratório de Mecânica de Precisão produziu uma protusão bem menor no rebolo.

Na seqüência foram retificados corpos de prova de 100Cr6 e verificada a rugosidade nas peças em função do volume usinado específico. Os valores ficaram bem abaixo dos valores alcançados com o rebolo dressado na fábrica mesmo sem alteração nos parâmetros de entrada do processo de retificação. A Figura 58 mostra o comportamento dos parâmetros verticais de rugosidade das peças retificadas em função do volume usinado específico.

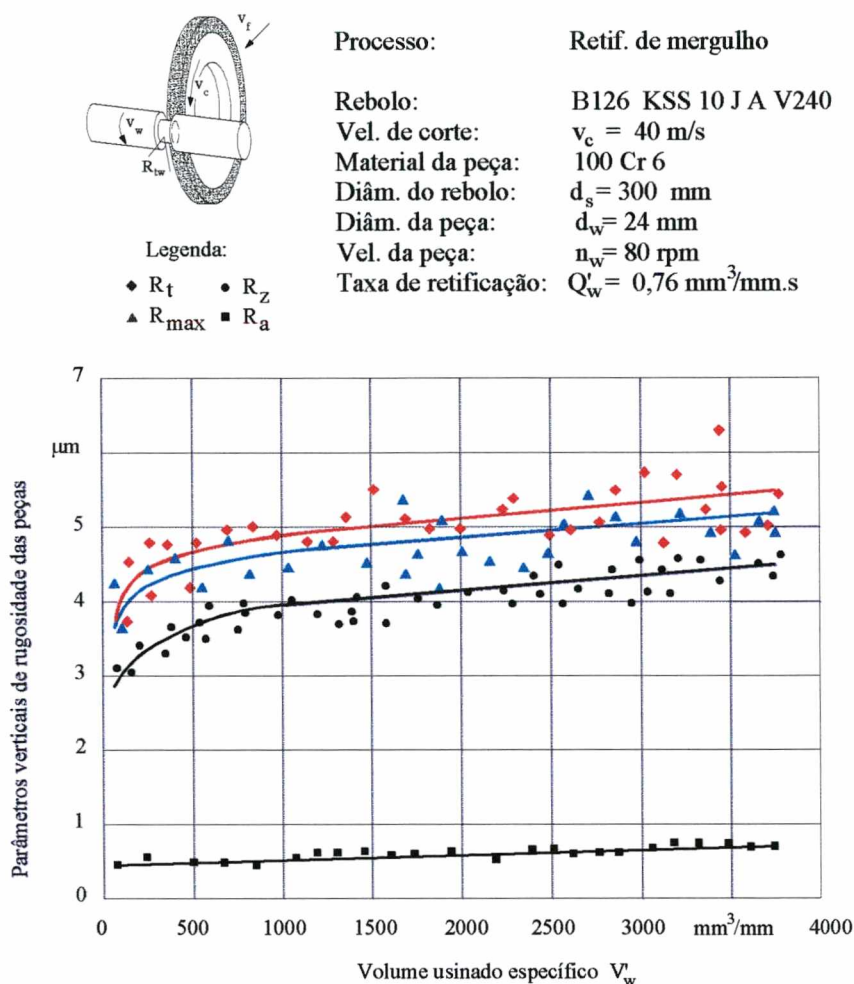


Figura 58 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado automaticamente segundo Bertalan [2]

Observa-se que os parâmetros verticais de rugosidade das peças apresentam uma tendência crescente. Disto se conclui que o rebolo não foi afiado de forma suficiente para a taxa de retificação em questão. Mesmo após um volume usinado específico de aproximadamente 4000 mm³/mm ainda não se atingiram valores estáveis. Estes estavam ainda inferiores aos valores estáveis atingidos com o rebolo afiado pelo fabricante. Pelas tendências das curvas estimou-se que atingir-se-ia a estabilização para um volume usinado específico muito maior, tornando necessário um tempo para a usinagem muito grande e inviável para um estudo de mestrado. Como o objetivo

do trabalho é a determinação da viabilidade do dressamento por toque, e não a retificação, os ensaios foram interrompidos para $V_w' \approx 4000 \text{ mm}^3/\text{mm}$. Para esta situação a topografia do rebolo foi avaliada por moldagem em resina. Os resultados desta avaliação são mostrados no Quadro 12 (lado esquerdo).

Após as duas seqüências de ensaios com o rebolo condicionado de forma convencional foi efetuado um dressamento de toque do rebolo. Para ilustrar, a Figura 59 mostra o sinal de emissão acústica obtido no processo de dressamento por toque, pois como este foi executado sem fluido de corte, pode-se captar o sinal do processo como um todo. Percebe-se que este não durou mais de 6 segundos, de acordo com o sinal de emissão acústica. A penetração de dressamento foi de 6 μm assegurada pela visualização da régua óptica.

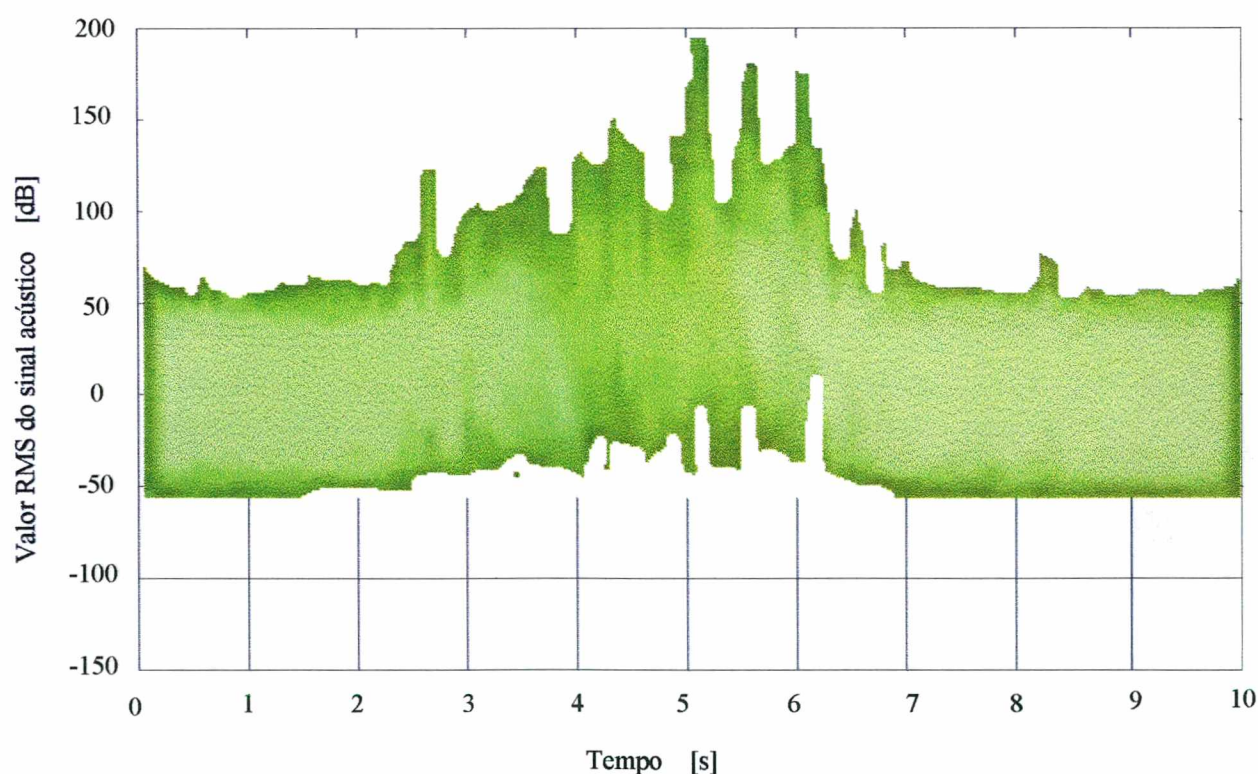


Figura 59 - Sinal acústico do 1º processo de dressamento por toque realizado no rebolo de dureza “J”

O Quadro 12 mostra os valores dos parâmetros verticais de rugosidade para o rebolo antes e após o primeiro processo de dressamento por toque.

Quadro 12 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza

“J” antes e após o primeiro processo de dressamento por toque

Valores dos parâmetros verticais de Rugosidade da topografia do molde			
Parâmetros utilizados			
LT		5,600 mm	
LM		4,000 mm	
VB		250 μm	
Apalpador		Focodyn	
Valores Médios dos Parâmetros Medidos			
Antes do primeiro dress. por toque / Após o primeiro dress. por toque			
R_a	6 μm	R_a	6 μm
R_z	38 μm	R_z	38 μm
R_p	25 μm	R_p	24 μm
R_t	56 μm	R_t	56 μm

O resultado das medições dos parâmetros verticais de rugosidade no Quadro 12 não mostrou uma diferença significativa antes e depois do dressamento por toque. O primeiro processo de dressamento por toque não conseguiu reduzir de modo considerável a agressividade do rebolo. Vários motivos contribuíram para esse mau resultado da primeira tentativa de se dressar o rebolo através do dressamento por toque. Um dos motivos foi que o rolo dressador apresentava um batimento muito acentuado, e como ainda não se tinha experiência na execução deste tipo de dressamento não se deu a devida importância a este fato antes da execução da primeira tentativa de dressamento do rebolo por toque. O segundo motivo foi em relação à ajustagem do processo. Como se tratava de uma máquina convencional, a utilização da rotação do rolo concordante com a rotação do rebolo trouxe problemas a mais para realização do dressamento. Como não havia uma forma segura de manter a rotação do rolo dressador acionado

pelo motor porta-peça da máquina, este era seguidamente acelerado pelo rebolo, ocasionando erros consideráveis do processo.

No início da retificação efetuada na seqüência verificou-se uma rugosidade inicial muito elevada nos corpos de prova que apresentaram uma tendência a estabilização, Figura 60. Este comportamento não era esperado, pois a remoção de aproximadamente 6 μm de material do topo dos grãos deveria ter levado a uma melhoria da rugosidade, embora a protusão tivesse sido diminuída. Verificou-se, então, que o batimento do rolo dressador diamantado era superior a 50 μm . Conseqüentemente o dressamento do rebolo não foi perfeito, pois a relação de rotações (concordante) permitiu que surgissem “ilhas” no rebolo onde os grãos de CBN não eram afetados pelo dressamento. Desta forma nestas “ilhas” os grãos eram mais protusos e, no início dos ensaios de retificação, os grãos destas “ilhas” se encarregavam da remoção do material da peça, com uma taxa de retificação real por gume maior que a programada. Após um volume usinado específico de 1000 mm^3/mm estas “ilhas” apresentaram um desgaste suficiente para que ocorresse a estabilização da rugosidade no patamar esperado, como mostrado na Figura 61.

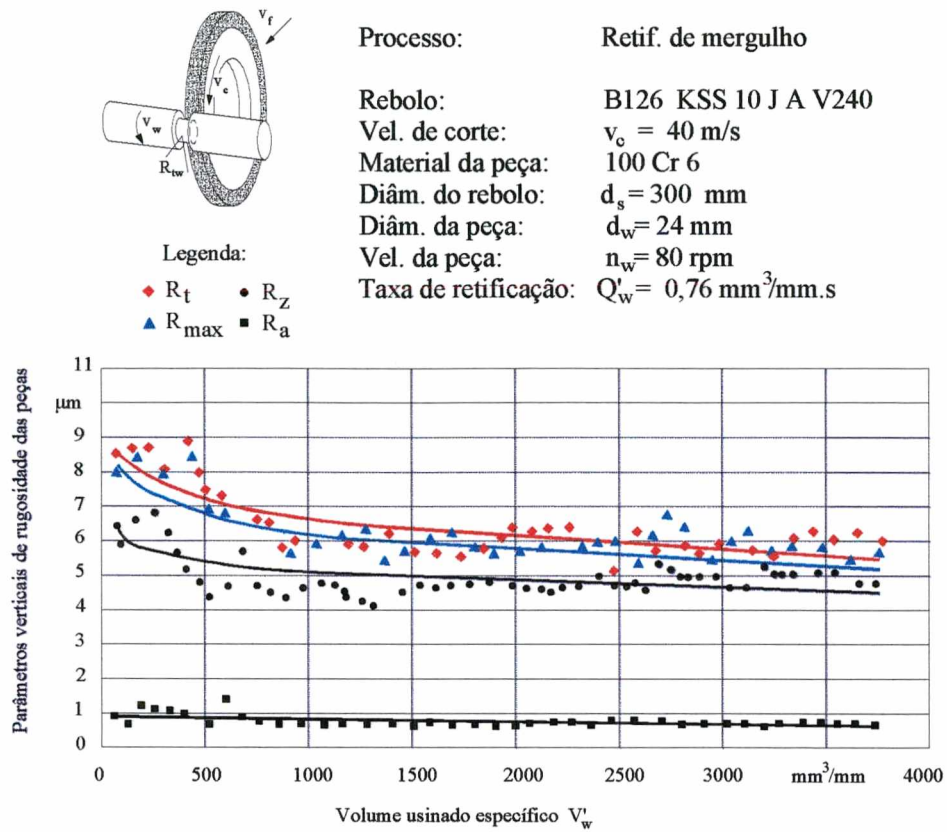


Figura 60 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado através do primeiro dressamento por toque

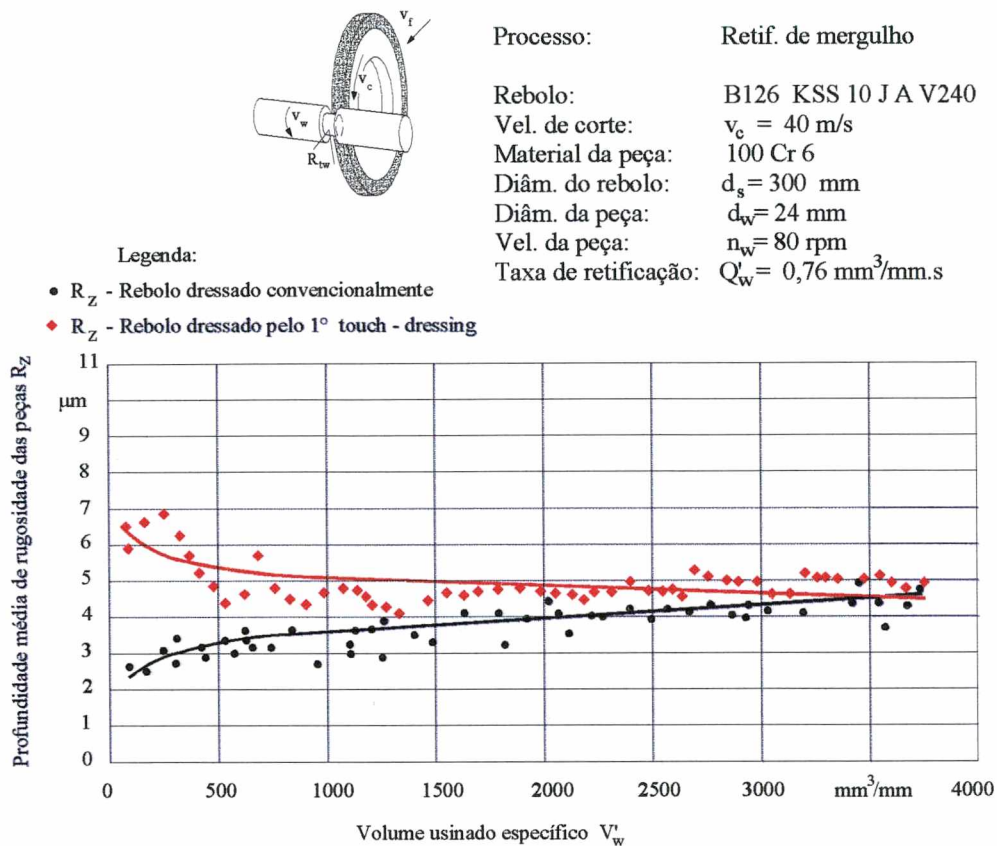


Figura 61 - Profundidade média de rugosidade R_z das peças para rebolo dressado automaticamente segundo Bertalan [2] e rebolo dressado pelo primeiro dressamento por toque

O resultado obtido na impressão em resina não pode ser considerado representativo, de modo que se passou então a usar a segunda metodologia de dressamento por toque: rolo dressador girando discordantemente com o rebolo, dressamento por toque apenas em um mergulho com faiscamento, com fluido de corte.

Para evitar a influência negativa do batimento do rolo dressador, estabeleceu-se inicialmente a posição do rolo dressador com maior excentricidade, e assim garantiu-se que a remoção máxima fosse limitada pela penetração de dressamento e não aleatoriamente influenciada pela excentricidade do rolo dressador.

O Quadro 13 mostra o comportamento dos parâmetros verticais de rugosidade do rebolo de CBN, dureza “J” antes e depois do 2º dressamento por toque. Observa-se uma redução dos parâmetros verticais de rugosidade. A profundidade de rugosidade R_t diminuiu 4 μm para uma penetração de dressamento de 6 μm . Como as medições de rugosidade não são efetuadas exatamente na mesma região antes e depois do dressamento por toque a redução de 4 μm pode ser considerada como esperada.

Quadro 13 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “J” antes e após o segundo dressamento por toque

Valores dos parâmetros verticais de Rugosidade da topografia do molde			
Parâmetros utilizados			
LT	5,600 mm		
LM	4,000 mm		
VB	250 μm		
Apalpador	Focodyn		
Valores Médios dos Parâmetros Medidos			
Antes do segundo dress. por toque / Após o segundo dress. por toque			
R_a	7 μm	R_a	7 μm
R_z	43 μm	R_z	40 μm
R_p	26 μm	R_p	25 μm
R_t	61 μm	R_t	57 μm

As imperfeições do rolo dressador se refletiram no rebolo, como mostrado na rugosidade da peça, Figura 62.

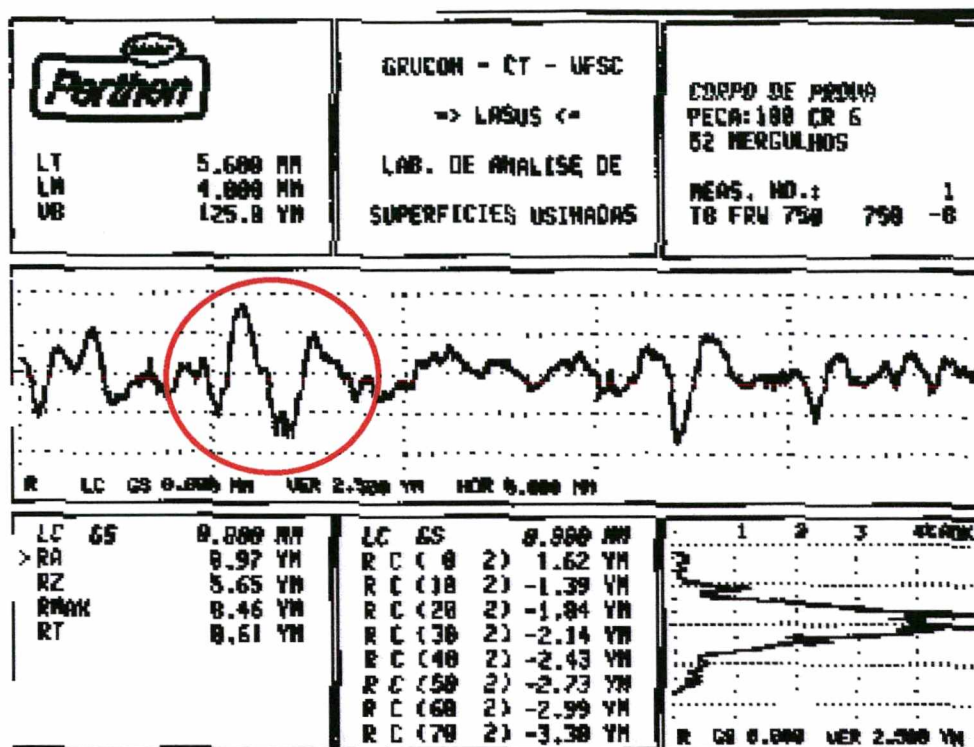


Figura 62 - Defeito produzido na peça pelo rebolo dressado através do dressamento por toque

Para não se perder a análise do processo de dressamento resolveu-se analisar a região não-afetada pelo defeito. Reduziu-se a distância de medição de 5,6 mm para 3,0 mm. Apesar de uma alteração no comprimento de medição trazer uma redução do valor da rugosidade da peça medida, pois o rugosímetro tem uma ajustagem automática da velocidade de medição conforme o comprimento total escolhido, o resultado é significativo. A Figura 63 mostra a região agora medida fora do defeito.

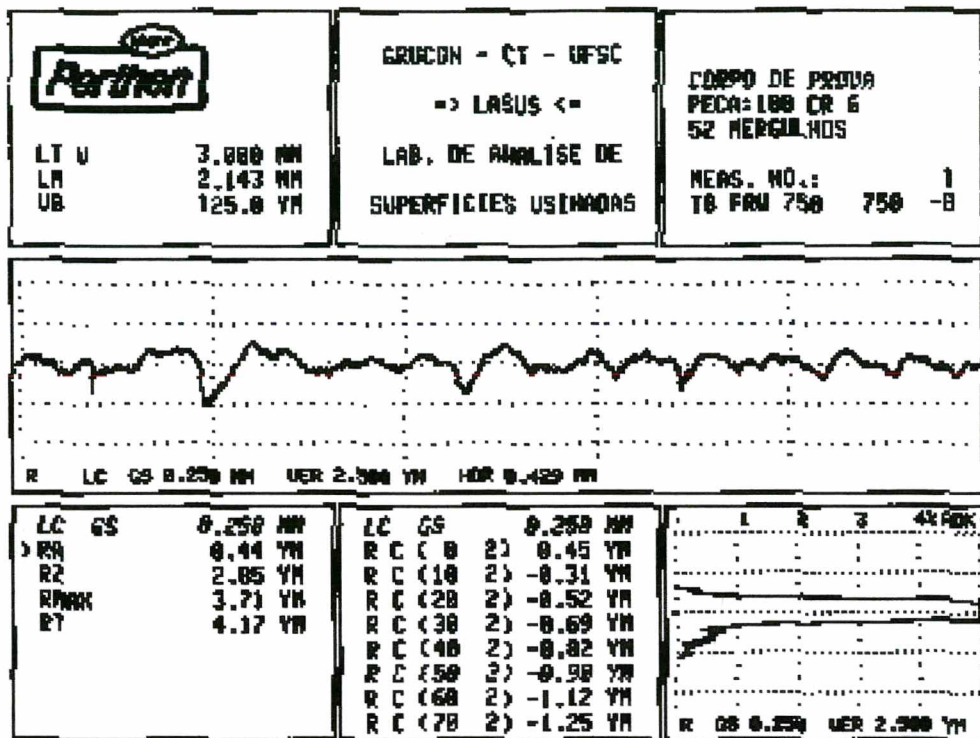


Figura 63 - Região de medição das peças retirada a região do defeito provocado no dressamento

Para se ter uma noção da redução devido ao menor comprimento de medição, mediu-se uma peça sem defeito com comprimento de medição de 5,6 mm e 3,0 mm. Os resultados das medições são mostrados no Quadro 14.

Quadro 14 - Medições de rugosidade com diferentes comprimentos de medições

Valores dos parâmetros verticais de Rugosidade da topografia do molde		
Parâmetros utilizados		
LT	5,600 e 3,000 mm	
VB	125 μm	
Apalpador	Apalpador mecânico	
Valores dos Parâmetros Medidos Para Diferentes Valores de LT		
LT = 5,600 mm	LT = 3,000 mm	Diferença [%]
$R_a = 0,6 \mu\text{m}$	$R_a = 0,5 \mu\text{m}$	$\Delta = 20,6$
$R_z = 4,4 \mu\text{m}$	$R_z = 3,7 \mu\text{m}$	$\Delta = 14,2$
$R_{\text{max}} = 5,3 \mu\text{m}$	$R_{\text{max}} = 4,1 \mu\text{m}$	$\Delta = 22,6$
$R_t = 5,3 \mu\text{m}$	$R_t = 4,7 \mu\text{m}$	$\Delta = 11,6$
$R_a = 0,6 \mu\text{m}$	$R_a = 0,5 \mu\text{m}$	$\Delta = 16,1$
$R_z = 4,1 \mu\text{m}$	$R_z = 3,3 \mu\text{m}$	$\Delta = 19,0$
$R_{\text{max}} = 4,7 \mu\text{m}$	$R_{\text{max}} = 3,5 \mu\text{m}$	$\Delta = 24,6$
$R_t = 4,7 \mu\text{m}$	$R_t = 3,9 \mu\text{m}$	$\Delta = 16,3$
$R_a = 0,6 \mu\text{m}$	$R_a = 0,5 \mu\text{m}$	$\Delta = 18,5$
$R_z = 4,2 \mu\text{m}$	$R_z = 3,5 \mu\text{m}$	$\Delta = 17,7$
$R_{\text{max}} = 5,0 \mu\text{m}$	$R_{\text{max}} = 4,4 \mu\text{m}$	$\Delta = 11,6$
$R_t = 5,4 \mu\text{m}$	$R_t = 4,4 \mu\text{m}$	$\Delta = 18,5$

De acordo com essas medições verificou-se uma redução em média de 17,60 % no valor das grandezas quando utilizado um menor comprimento de medição. Para a grandeza R_z a redução ficou em média menor ainda, em torno de 16,96 %.

O gráfico da Figura 64 mostra o comportamento da rugosidade das peças retificadas depois do segundo dressamento por toque no rebolo de dureza J. O gráfico se refere às medições realizadas fora da região defeituosa das peças. Além da redução da rugosidade, observou-se que os valores dos parâmetros verticais de rugosidade não mostraram alterações significativas a partir da primeira peça. Este resultado mostra que o processo de dressamento por toque pode perfeitamente ser empregado em máquinas convencionais, desde que empregado com cuidado e corretamente.

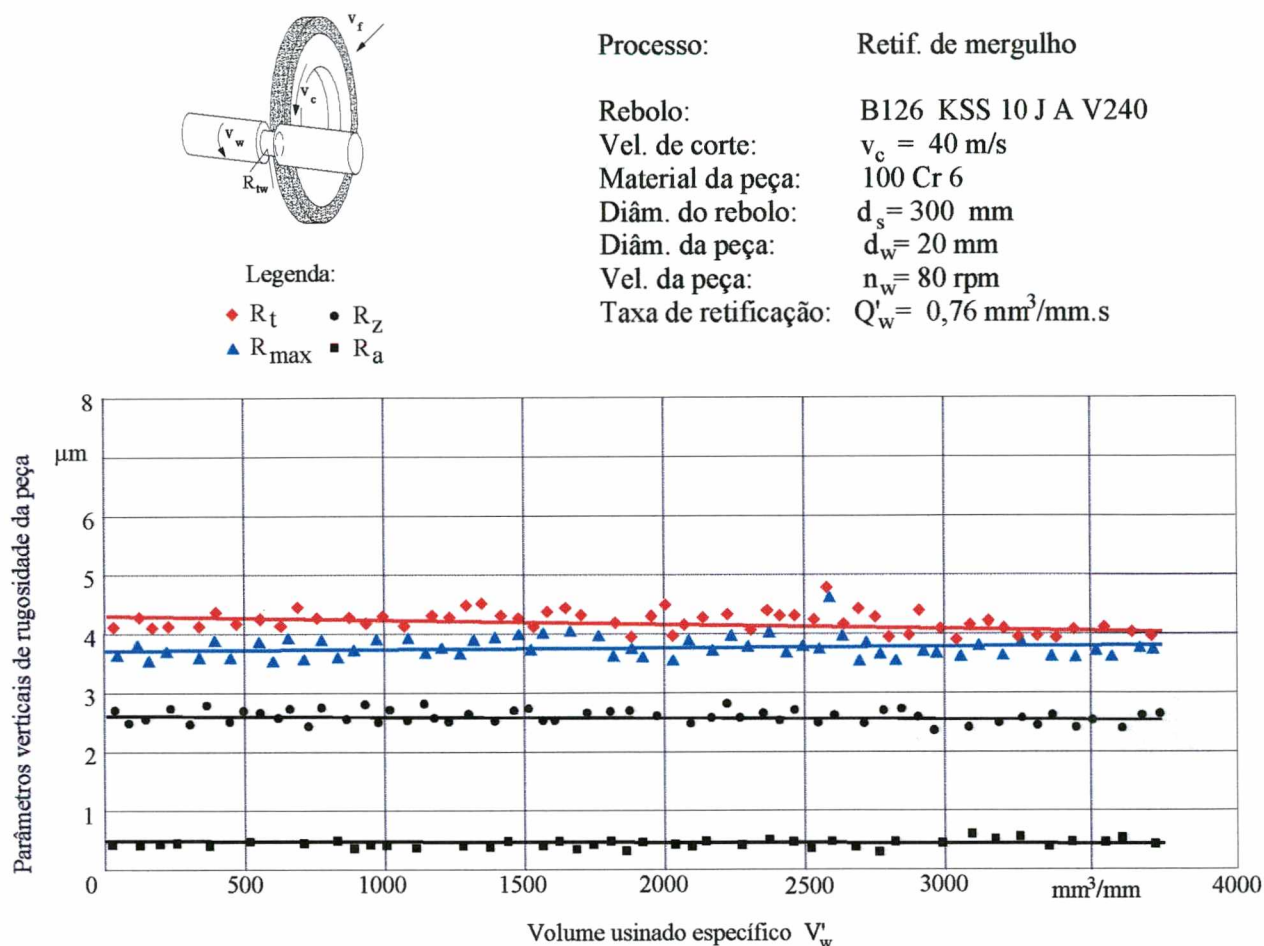


Figura 64 - Parâmetros verticais de rugosidades das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “J” dressado através do segundo dressamento por toque

Uma avaliação complementar da topografia do rebolo, Quadro 15, mostra que os parâmetros verticais de rugosidade apresentam um pequeno aumento, em média $2 \mu\text{m}$. Este aumento pode ser correlacionado com uma remoção maior do ligante do que um desgaste dos grãos abrasivos.

Quadro 15 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “J” dressado pelo segundo dressamento por toque no seu estado final após o processo de retificação

Valores dos parâmetros verticais de Rugosidade da topografia do molde	
Parâmetros utilizados	
LT	5,600 mm
LM	4,000 mm
VB	250 µm
Apalpador	Focodyn
Valores Médios dos Parâmetros Medidos	
R_a	7 µm
R_z	42 µm
R_p	25 µm
R_t	60 µm

Para verificar a repetibilidade dos resultados obtidos com o rebolo de dureza “J”, repetiu-se os ensaios com um rebolo de CBN de dureza “N”.

6.2 - ENSAIOS COM REBOLO DE CBN DE DUREZA “N”

A topografia do molde em resina inicial do segundo rebolo é mostrada na Figura 65. Os valores das rugosidades maiores comparativamente ao rebolo mais mole são explicados por um maior volume de barra de afiação aplicado no dressamento do rebolo mais duro pelo fabricante. Por causa dessa topografia mais agressiva, que pode ser verificada através dos valores dos parâmetros verticais de rugosidade do rebolo no Quadro 16, os valores dos parâmetros verticais de rugosidade dos corpos de prova resultaram mais altos que os valores para o rebolo mais mole.

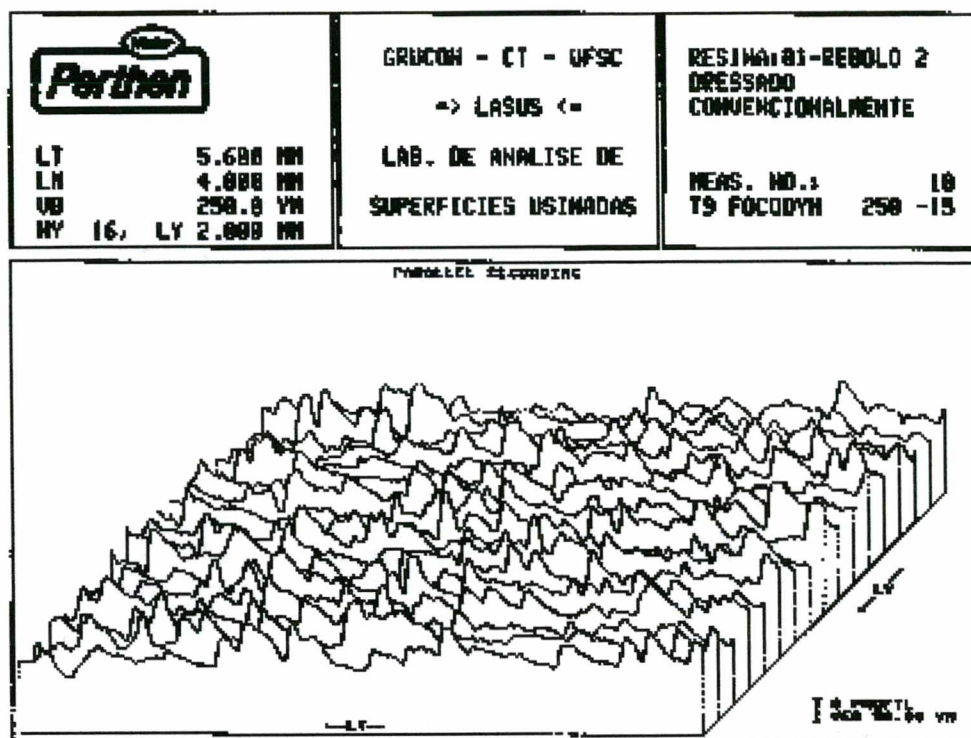


Figura 65 - Topografia obtida no rugosímetro do rebolo de dureza “N” dressado convencionalmente pelo fabricante

Quadro 16 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” dressado convencionalmente pelo fabricante

Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do molde	
Parâmetros utilizados	
LT	5,600 mm
LM	4,000 mm
VB	250 μ m
Apalpador	Focodyn
Valores Médios dos Parâmetros Medidos	
R_a	11 μ m
R_z	62 μ m
R_p	47 μ m
R_t	90 μ m

Com o rebolo dressado pelo fabricante foram então executados 100 ensaios nos corpos de prova de material 100Cr6. A Figura 66 mostra o comportamento dos parâmetros verticais de rugosidade para os corpos de prova retificados. Não ocorreu nenhuma alteração das variáveis de entrada para o processo de retificação.

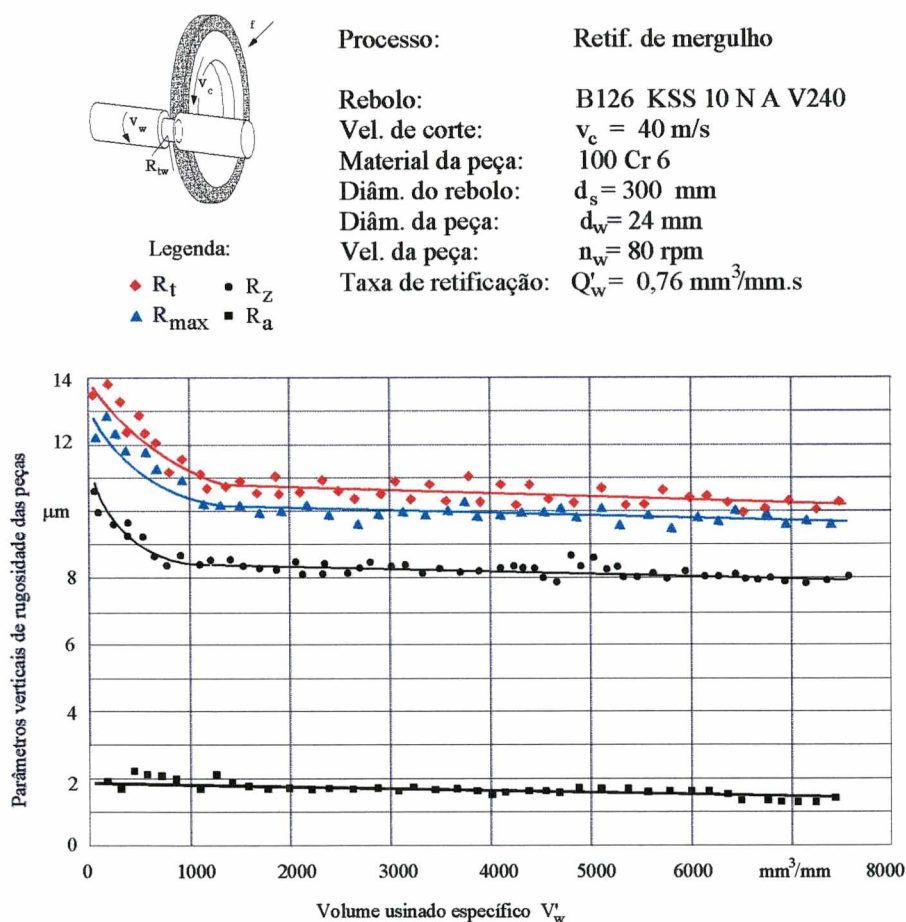


Figura 66 - Parâmetros verticais de rugosidade das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “N” dressado convencionalmente pelo fabricante

A estabilização dos parâmetros verticais de rugosidade para o rebolo de dureza “N” só aconteceu com um volume usinado específico $V'_w = 1000$ mm³/mm, o que correspondeu aproximadamente ao dobro do volume usinado específico para a estabilização dos valores das

peças retificadas com o rebolo de dureza “J”. Isso é devido ao menor desgaste do rebolo de dureza “N” por causa de seu ligante mais duro.

O primeiro processo de dressamento por toque executado no rebolo de dureza “N” seguiu a terceira metodologia de dressamento por toque: rolo dressador diamantado girando concordante com o rebolo, aplicação de fluido de corte no processo, dressamento de passagem com faiscamento em quatro passagens do rolo sobre o rebolo e penetração passiva de dressamento $a_{ed} = 6 \mu\text{m}$.

O primeiro contato foi realizado com sucesso e então o rolo dressador foi deslocado lateralmente até não estar mais em contato com a parte frontal do rebolo. Neste ponto foi avançado na quantidade da penetração passiva de dressamento e em seguida deslocado lateralmente sobre o rebolo. A velocidade de deslocamento foi ajustada de acordo com trabalho anterior [2], e realizaram-se oito passagens do rolo sobre o rebolo, quatro de ida e quatro de volta, com o movimento da mesa que deslocava o rolo dressador diamantado. Empregou-se fluido no processo e o rolo dressador girando discordantemente ao rebolo.

Confeccionaram-se resinas, uma antes e uma depois do dressamento por toque. Os valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do molde são mostrados no Quadro 17.

Como a medição na resina é feita em uma área ínfima da topografia do molde, 4,0 mm x 5,6 mm, os valores dos parâmetros verticais de rugosidade do molde apresentam uma variação devido à dificuldade da captação dos parâmetros nos mesmos locais no molde, como também a confecção do molde na mesma região no rebolo.

Quadro 17 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza

“N” antes e após o primeiro processo de dressamento por toque

Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do molde			
Parâmetros utilizados			
LT	5,600 mm		
LM	4,000 mm		
VB	250 μm		
Apalpador	Focodyn		
Valores Médios dos Parâmetros Medidos			
Antes do primeiro dress. por toque / Após o primeiro dress. por toque			
R_a	9 μm	R_a	11 μm
R_z	52 μm	R_z	58 μm
R_p	41 μm	R_p	41 μm
R_t	75 μm	R_t	77 μm

Os valores dos parâmetros verticais de rugosidade das peças alcançados na retificação com o rebolo dressado pelo primeiro dressamento por toque ficaram bem abaixo dos valores obtidos com o rebolo dressado convencionalmente pelo fabricante. Verificou-se também a maior uniformidade dos valores, não acontecendo uma alteração significativa dos valores dos parâmetros verticais de rugosidade das peças a partir do primeiro ensaio.

O gráfico da Figura 67 mostra os valores alcançados com a medição no rugosímetro dos parâmetros verticais de rugosidade das peças retificadas. Verifica-se uma pequena elevação dos valores dos parâmetros com o aumento do volume usinado específico.

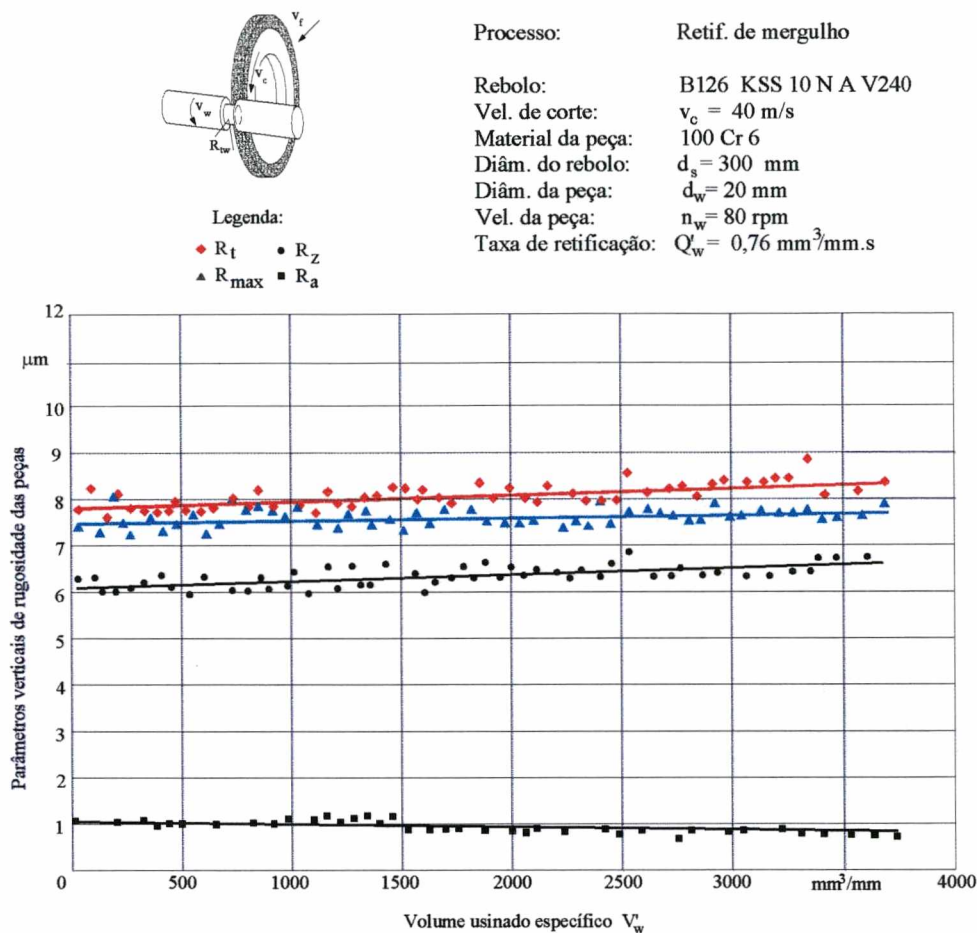


Figura 67 - Parâmetros verticais de rugosidade das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “N” após o primeiro dressamento por toque

Após a retificação de um volume usinado específico de aproximadamente 4000 mm³/mm, confeccionaram-se os moldes em resina para a caracterização da situação da topografia do rebolo. Os valores dos parâmetros verticais de rugosidade para este estado do rebolo pode ser visto no Quadro 18 (lado esquerdo). Realizou-se o segundo processo de dressamento por toque no rebolo de dureza “N”. A detecção do contato foi a mais clara dos processos de dressamento por toque, devido à experiência adquirida nos dressamentos anteriores.

O gráfico da Figura 68 mostra o momento da captação do primeiro contato entre o rebolo e o rolo dressador para o segundo processo de dressamento por toque do rebolo de dureza “N”.

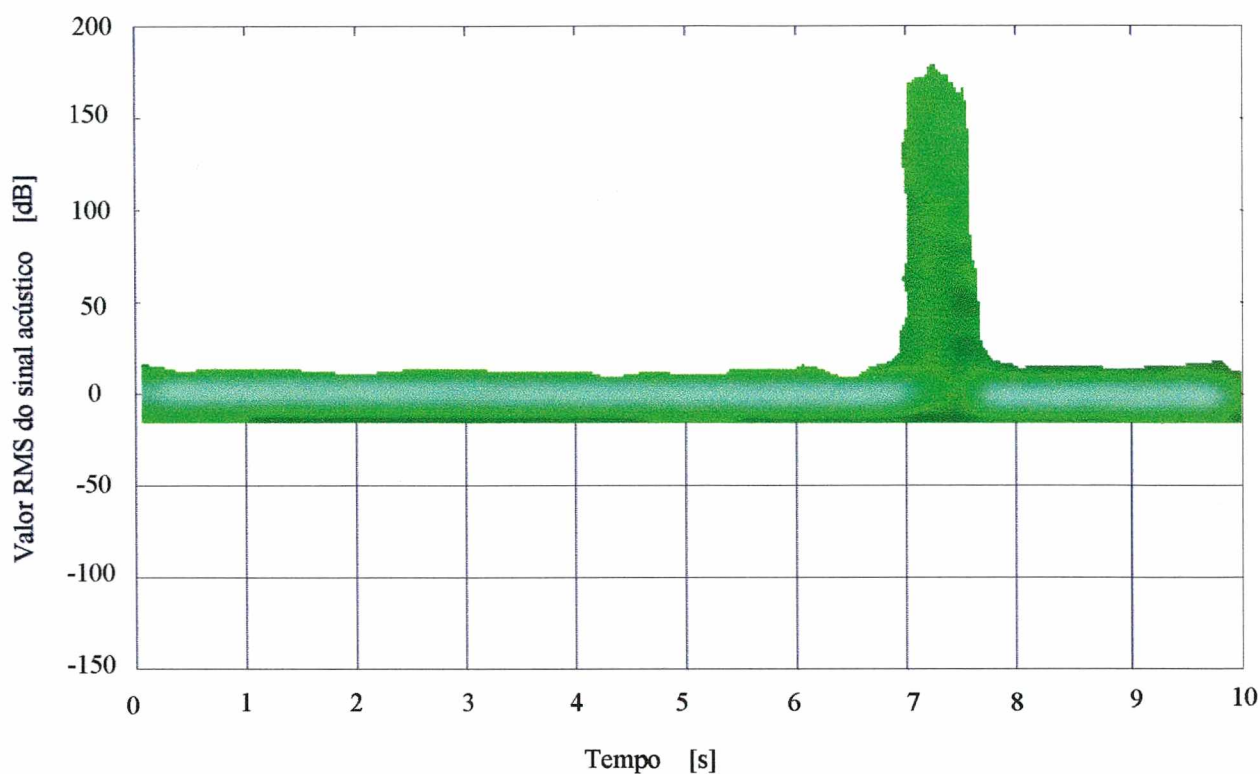


Figura 68 - Captação do primeiro contato entre rolo dressador e rebolo de dureza “N”
para o segundo dressamento por toque

Este contato teve a interferência do rolo dressador sobre o rebolo de no máximo $0,1 \mu\text{m}$, já que durante toda a captação este foi avançado em apenas $0,5 \mu\text{m}$. Por isso para se confirmar o toque entre rolo dressador e rebolo, resolveu-se captar o sinal seguinte de um avanço de mais $0,5 \mu\text{m}$ do rolo dressador sobre o rebolo, de modo a se ter uma maior experiência em relação ao comportamento do sinal do toque do rolo dressador com o rebolo. A Figura 69 mostra a captação desse sinal. Ficou claro que o gráfico anterior realmente se tratava do primeiro toque, pois pode-se notar que toques sucessivos e desde o começo da medição estavam presentes no gráfico da Figura 69.

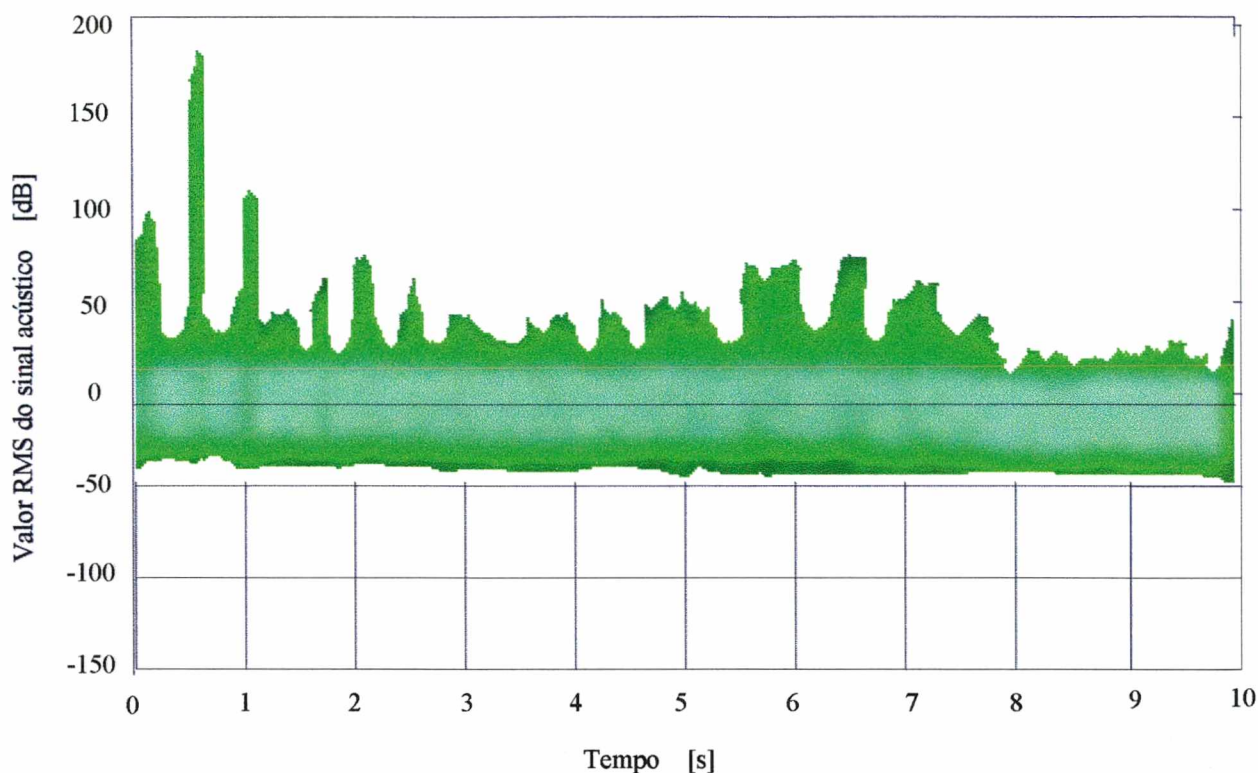


Figura 69 - Captação do sinal de emissão acústica de toques entre rolo dressador e rebolo após o primeiro contato

Deslocou-se o rolo lateralmente ao rebolo até este não estar mais frontalmente posicionado em relação ao rebolo, ajustou-se a profundidade até a desejada, isto é, avançou-se o rolo mais $5,4 \mu\text{m}$ e pode-se, então, iniciar normalmente o segundo processo de dressamento por toque. Esse processo de dressamento por toque foi executado exatamente como o processo anterior, isto é, com a terceira metodologia de dressamento por toque apresentada.

Os valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” antes e depois do segundo processo de dressamento por toque podem ser vistos no Quadro 18. Desta vez verificou-se que as leituras dos parâmetros dos moldes em resina apresentaram valores coerentes com o que era esperado. Aconteceu uma redução nos parâmetros verticais de

rugosidade do rebolo e com isso uma redução dos valores dos parâmetros das peças retificadas também era esperada.

Quadro 18 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” antes e após o segundo processo de dressamento por toque

Valores dos parâmetros verticais de Rugosidade da topografia do molde			
Parâmetros utilizados			
LT		5,600 mm	
LM		4,000 mm	
VB		250 μm	
Apalpador		Focodyn	
Valores Médios dos Parâmetros Medidos			
Antes do segundo dress. por toque / Após o segundo dress. por toque			
R_a	10 μm	R_a	9 μm
R_z	55 μm	R_z	51 μm
R_p	43 μm	R_p	40 μm
R_t	79 μm	R_t	70 μm

As resinas confeccionadas antes e depois do segundo dressamento por toque no rebolo de dureza “N” foram visualizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 70 mostra os grãos abrasivos do rebolo após a retificação de um volume específico de aproximadamente $4000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ e antes do segundo dressamento por toque. A Figura 71 mostra os grãos do rebolo de dureza “N” após o segundo dressamento por toque. Verificou-se ser muito complexa a análise através de fotos do MEV da topografia do rebolo, devido à grande dificuldade de se isolar um mesmo grão para análise. Tornou-se ainda mais complicada a análise no microscópio eletrônico de varredura devido ao fato de que as penetrações do processo de dressamento por toque foram de $6 \mu\text{m}$ e o tamanho de grão B126 pode variar de 100 a $200 \mu\text{m}$.

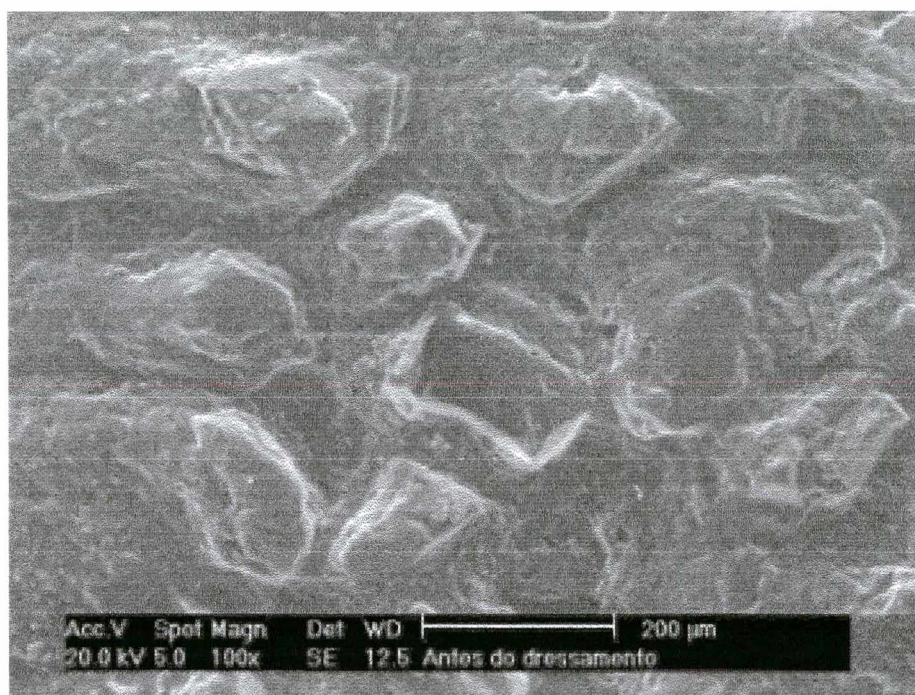


Figura 70 - Topografia do rebolo de CBN de dureza “N” após retificação de um volume usinado específico de $4000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ do material 100Cr6

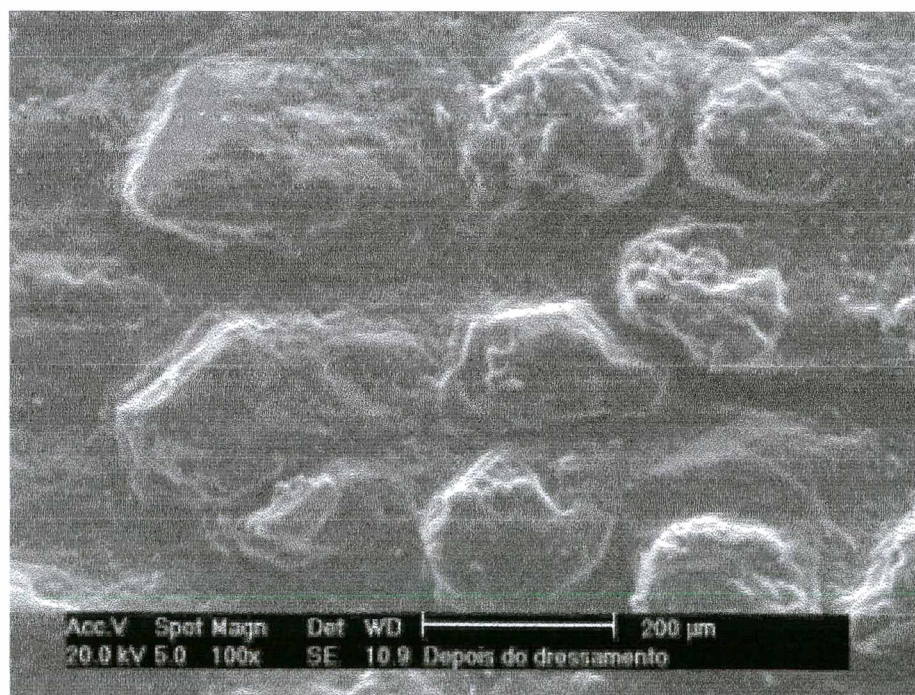


Figura 71 - Topografia do rebolo de CBN de dureza “N” após dressamento por toque com rolo dressador diamantado e penetração passiva de $6 \mu\text{m}$

Foram realizadas então as últimas retificações das peças para a caracterização do rebolo após o segundo dressamento por toque. O gráfico da Figura 72 mostra o comportamento dos parâmetros verticais de rugosidade das peças retificadas. Alcançou-se com essa situação do rebolo o melhor resultado de trabalho para o rebolo de dureza “N”. A estabilização dos valores dos parâmetros verticais de rugosidade das peças também foi verificada. Verificou-se também uma leve tendência ao aumento dos valores dos parâmetros verticais de rugosidade com o volume usinado específico.

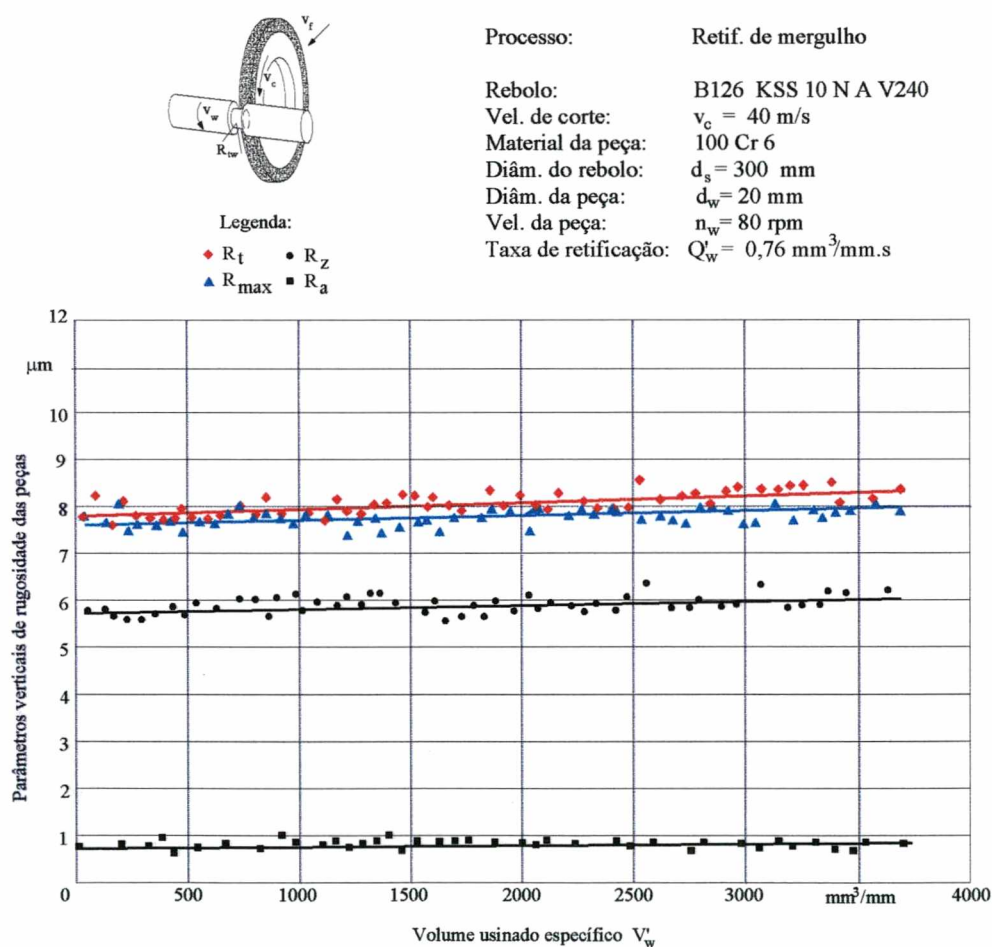


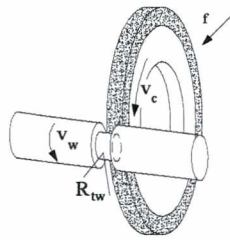
Figura 72 - Parâmetros verticais de rugosidade das peças de 100Cr6 pelo volume usinado específico para o rebolo de dureza “N” após segundo dressamento por toque

O Quadro 19 mostra os valores finais da topografia do rebolo após a retificação de um volume usinado específico de aproximadamente 4000 mm³/mm. Pode-se notar um aumento nos valores dos parâmetros verticais de rugosidade do rebolo, justificando a leve tendência de aumento dos parâmetros verticais de rugosidade das peças retificadas durante o processo de retificação.

Quadro 19 - Valores dos parâmetros verticais de rugosidade da topografia do rebolo de dureza “N” dressado pelo segundo dressamento por toque no seu estado final após o processo de retificação

Valores dos parâmetros verticais de Rugosidade da topografia do molde	
Parâmetros utilizados	
LT	5,600 mm
LM	4,000 mm
VB	250 µm
Apalpador	Focodyn
Valores Médios dos Parâmetros Medidos	
R_a	11 µm
R_z	60 µm
R_p	45 µm
R_t	86 µm

Para a verificação final de como o processo de dressamento por toque alcançou seu objetivo e melhorou a qualidade das peças retificadas, elaborou-se o gráfico comparativo da Figura 73 onde mostram-se os valores da profundidade média de rugosidade R_z das peças retificadas com o mesmo rebolo de CBN de dureza “N” dressado convencionalmente pelo fabricante e através do dressamento por toque. Os valores da profundidade média de rugosidade caem aproximadamente em 25 %, além de apresentarem uma estabilização muito maior desde o início do processo de retificação, sem a faixa transitória inicial presente quando o rebolo é dressado de forma convencional.



Legenda:

- R_z dressado convencionalmente
- ▲ R_z 1. dressamento por toque
- ◆ R_z 2. dressamento por toque

Processo:

Retif. de mergulho

Rebolo:

B126 KSS 10 N A V240

Vel. de corte:

$v_c = 40$ m/s

Material da peça:

100 Cr 6

Diâm. do rebolo:

$d_s = 300$ mm

Diâm. da peça:

$d_w = 24$ mm

Vel. da peça:

$n_w = 80$ rpm

Taxa de retificação: $Q_w^! = 0,76$ mm³/mm.s

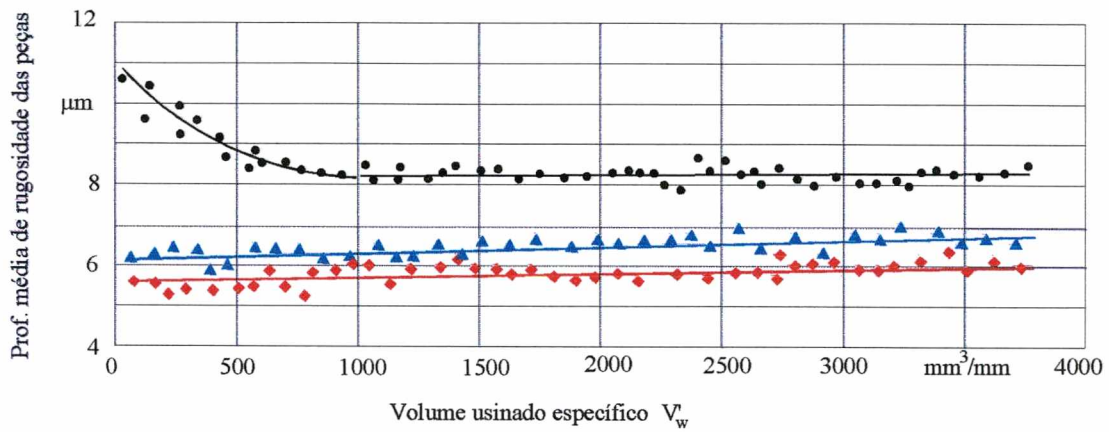


Figura 73 - Profundidade média de rugosidade R_z das peças para rebolo de CBN de dureza "N" dressado convencionalmente e dressado pelos dressamentos por toque

Capítulo 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Os resultados obtidos nos ensaios de dressamento por toque mostraram que esta técnica pode ser empregada em rebolo de CBN resinóides mesmo em máquinas convencionais, desde que se tenha a garantia do reconhecimento do primeiro toque entre rolo dressador diamantado e rebolo e se possa garantir penetrações passivas de dressamento $a_{ed} = 6^{\pm 1} \mu\text{m}$.

A comparação dos resultados do comportamento dos parâmetros verticais de rugosidade nas peças usinadas como função do volume usinado específico mostram um comportamento mais favorável para os rebolos dressados por toque, pois não ocorre o amortecimento do desgaste inicial típico para os rebolos condicionados convencionalmente.

O processo de dressamento por toque necessita que o desgaste seja mantido no rebolo de CBN estritamente abrasivo, isto está ligado a valores pequenos de h_{eq} . Valores baixos de h_{eq} estão relacionados com processos de acabamento na retificação. Conclui-se então que dressamento por toque deverá ser empregado para retificação de acabamento, já que processos de retificação de desbaste normalmente ocasionam no rebolo defeitos que dificilmente poderão ser eliminados através da pequena profundidade no dressamento por toque.

A avaliação da topografia do rebolo pela técnica da moldagem em resina mostrou-se satisfatória quando avaliada pela medição dos parâmetros verticais de rugosidade.

A avaliação da topografia do rebolo em microscópio eletrônico de varredura não se mostrou adequada. A remoção de apenas 6 μm do topo dos grãos com dimensão entre 100 e 200 μm quase não é perceptível.

A utilização de um rolo dressador diamantado para o dressamento por toque é viável. No entanto deve-se garantir um menor batimento possível da ferramenta de dressar, para que os resultados não sejam mascarados.

Os melhores resultados foram obtidos para o dressamento por toque discordante com movimentação lateral do rolo dressador diamantado sobre o rebolo.

O sistema de monitoramento GD 200 da Prometec com o sensor de emissão acústica AE 30 se mostrou capaz para a detecção do primeiro contato e assim poderá também ser empregado para a automação do processo de dressamento por toque em máquinas CNC.

Finalmente o último acessório utilizado na execução do dressamento por toque, a régua óptica, também se mostrou capaz de possibilitar a execução do processo em máquinas convencionais. A precisão de 0,2 μm é mais do que suficiente para o processo de dressamento por toque.

As vantagens econômicas desse processo são grandes. Ganhos tanto na qualidade das peças retificadas como na economia de rebolos são facilmente detectados. O ganho na qualidade das peças ficou na ordem dos 30 %, e a economia no desgaste do rebolo podem chegar a 80 %. Esses cálculos foram feitos em cima do rebolo de dureza "N", onde os parâmetros de profundidade de rugosidade R_z reduziram de 8 μm para 6 μm e no dressamento por toque foi consumido apenas 6 μm da camada abrasiva, enquanto que para um dressamento convencional essa profundidade ficaria em torno dos 30 μm .

Para novos trabalhos, especificamente na área de dressamento de rebolos de CBN, sugere-se uma maior variação dos parâmetros principais do processo, obtendo-se uma otimização do dressamento por toque.

A verificação da vida da ferramenta de CBN durante um trabalho de mestrado é inviável devido à grande quantidade de ensaios necessários para se ter dados confiáveis a respeito do comportamento da vida da ferramenta. Mas a transferência desta tecnologia para a indústria certamente permitirá obter os dados necessários para um amplo tratamento estatístico dos resultados.

Através de um estudo cooperativo como esse, poder-se-iam obter-se informações precisas do ganho econômico da aplicação do processo de dressamento por toque em rebolos de CBN.

Outra sugestão seria a realização de um trabalho onde a aplicação do dressamento por toque se realizaria em rebolos de CBN novos, isto é, dressados de fábrica. Tentar-se-ia reduzir a rugosidade das peças retificadas desde o início do processo, eliminando a faixa de oscilação dos resultados, mesmo para rebolos que não retificaram peças anteriormente.

Capítulo 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen**. 2. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 316 p., 1989.
- [2] BERTALAN, C. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas-Ferramenta Convencionais**. Dissertação, 209 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Abril de 1997.
- [3] KLYK, M. **Hochgeschwindigkeitsschleifen mit CBN: Voraussetzungen für die wirtschaftliche Anwendung einer neuen Technologie**. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan Verlag, 1993.
- [4] AULT, W. **Types of Grinding Wheels. Handbook of Modern Grinding Technology**. Cap. 3, p. 73-87, 1978.
- [5] DE OLIVEIRA, J.F.G. **Retificação com Nitreto de Boro Cúbico**. Apostila de Curso, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1988.
- [6] DE OLIVEIRA, J.F.G. **CBN Grinding Wheels and Their Truing and Dressing**. Apostila de Apresentação. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1990.
- [7] DE OLIVEIRA, J.F.G., PURQUÉRIO, B. de M., COELHO, R.T., BIANCHI, E.C. **Grinding Process Dominance by Means of the Dressing Operation**. Machine Tool Design Research 29, Manchester, p. 547-550, 1992.

- [8] DE OLIVEIRA, J.F.G. **Controle do estado de afiação de rebolos na retificação de precisão.** São Carlos, São Paulo, Brasil. Tese, 165 p. 1992.
- [9] DA SILVA, J. C. L. **Retificação Externa do Aço 100Cr6 com Rebolo 38 A 120 MVS.** Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Maio de 1998.
- [10] BASTO, F. F. **Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho do Aço 100Cr6 com Rebolos de CBN em Retificadoras Convencionais.** Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (a ser defendida).
- [11] TOMOYASU I., KAZUHIKO S., KUNIHICO U. **CBN - Kontur - statt Einstechschleifen.** Kariya, Japan. Werkstatt und Betrieb 128, p. 383-386, 1995.
- [12] TAWAKOLI T., MAFTOON H., TAVAKKOLI S. J. **Hochleistungsschleifen mit touchierten CBN - Schleifscheiben.** IDR, p. 108 - 113, 2/1991.
- [13] MEYER, H.R., KLOCKE, F. **High-Performance Grinding with CBN, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren.** 54th edition, p. 47-61, 1990.
- [14] LINDSAY, R.P., NAVARRO, N. **Principles of Grinding with Borazon CBN Wheels.** Parts 1 and 2. Machinery, Nrs. 4 and 5, 1973.
- [15] PECHERER, E., MALKIN, S. **Grinding of Steels with Cubic Boron Nitride (CBN).** Haifa, Israel. Annals of the CIRP, p. 211-216, Vol. 33/1/1994.
- [16] BHATTACHARYA, S.K. HON, K.K. **Grindability Study of CBN Wheel. Proceedings.** 24th International Machine Tool Design and Research Conference, September, p. 645-653, 1978.
- [17] KÖNIG, W., YEGENOGLU, K., STUCKENHOLZ, B. **Lower Grinding Costs and Better Workpiece Quality by High Performance Grinding with CBN Wheels.** WZL Laboratories Aachen, West Germany. The Journal of Gear Manufacturing, Illinois, January/February, 13 p. 1986.

- [18] STUCKENHOLZ, B. **Das Abrichten von CBN-Scheifscheiben mit kleinen Abrichtzustellungen.** Tese. Aachen, 135 p. 1988.
- [19] MAHAR, R.L., **Progress in CBN Production Grinding.** Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan, 1995.
- [20] FILHO, N.M., COELHO, R.T., DE OLIVEIRA, J.F.G. **Investigação a Respeito da Aplicação da Emissão Acústica (EA) no Monitoramento da Dressagem de Rebolos de Alumina (Al₂O₃).** Máquinas e Metais, p. 56-73. Maio, 1998.
- [21] SCHLEICH, H. **Schärfen von Bornitridschleifscheiben.** Tese. Aachen 147 p. 1982.
- [22] LINDSAY, R.P. **Principles of Grinding.** Handbook of Modern Grinding Technology. Chapter 2, p. 30-55, 1987.
- [23] SCHMITT, R. **Abrichten von Schleifscheiben mit Diamantbestückten Rollen.** Tese. TH Braunschweig, 1968.
- [24] SCHEIDEMANN, H. **Einfluss der durch Abrichten mit zylindrischen und profilierten Diamantrollen erzeugten Schleifscheibenschneidfläche auf den Schleifvorgang.** Tese. TU Braunschweig, 1973.
- [25] PAHLITZSCH, G., KARATZOGLOU, K. **Erfassung des Schneidenflächenzustandes einer Schleifscheibe beim Flachsleifen.** ZwF 67 9, S. 480 - 484, 1972.
- [26] KARATZOGLOU, K. **Auswirkungen der Scheneidflächenbeschaffenheit und der Einstellbedingungen auf das Schleifergebnis beim Flach-Einsteichschleifen.** Dissertation TU Braunschweig, 1973.
- [27] NN. Process monitor GD 200. **Manual do fabricante**, 11/1989.
- [28] NN. VRZ 380 A. **Manual de operação**, 1985.
- [29] NN. Körperschallsensor AE 30. **Manual do fabricante**, 11/1989.
- [30] NN. HP 3563 A. Hewlett Packard. **Manual do fabricante**, 1989.

- [31] NN. Firma Winter do Brasil. **Catálogos de rebolos de CBN e rolos dressadores diamantados.** Winter do Brasil - Ferramentas Diamantadas e de Bornitrid Ltda. 60 p. Jundiaí, SP, 1990.
- [32] NN. Perthometer S 8P- PRK. **Manual de operação nº 6 80 0911.**, Feinprüf Perthen GmbH, agosto 1998.
- [33] NN. Microscópio Eletrônico de Varredura – Phillips. Catálogo do fabricante – série XL. Holanda, 1996.