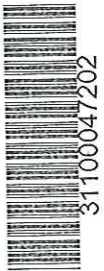


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO  
COM ALTA VELOCIDADE EM SEDE DE VÁLVULAS DE  
MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA USANDO REBOLO DE  
CBN VITRIFICADO.**

DEDALUS - Acervo - EESC



Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

**EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço: 28.1.01.104

Ass.: *Leandro Corradi*

Marcelo Biffi

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para concorrer ao Título de Mestre, pelo curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Área de concentração: Processos de Fabricação.

Orientador:  
João Fernando Gomes de Oliveira



São Carlos  
2003

Class.	TESE
Curr.	0892
Tomo	T055/04
Syno	1358960

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B591d Biffi, Marcelo  
Desenvolvimento do processo de retificação com alta  
velocidade em sede de válvulas de motores à combustão  
interna usando rebolo de CBN vitrificado / Marcelo Biffi.  
-- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Engenharia Mecânica.

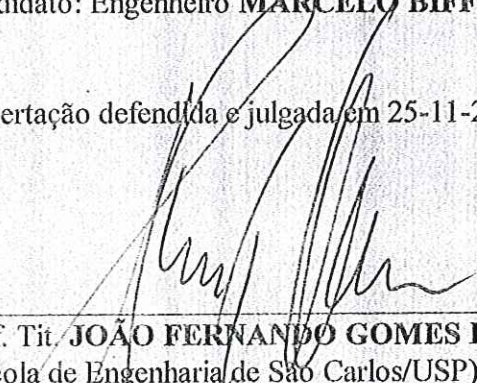
Orientador: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira.

1. Retificação. 2. CBN. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCELO BIFFI**

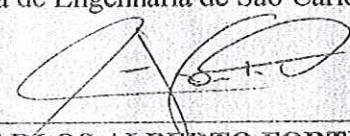
Dissertação defendida e julgada em 25-11-2003 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Tit. **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA** (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

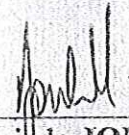
APROVADO

  
Prof. Assoc. **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

  
Dr. **CARLOS ALBERTO FORTULAN**  
(Cerauto Ltda)

APROVADO

  
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

  
Prof. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

À minha esposa Luciana, aos meus pais e minha irmã pelo incentivo, e aos amigos por terem compartilhado dessa grande experiência.

## AGRADECIMENTOS

Ao grande amigo Prof. João Fernando pelo apoio e orientação, não só nos momentos de estudo mas também no direcionamento da vida profissional.

Ao amigo Prof. Reginaldo pela co-orientação do trabalho e pelas viagens à TRW.

À todos os amigos do OPF, em especial aos amigos Douglas, Eraldo, João Jorge e Ronaldo pela ajuda na obtenção de material, na resolução dos problemas da máquina e também nos testes práticos.

Às empresas TRW, Zema, , Saint Gobain e Micro Química por terem cedido o material e as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida

## SUMÁRIO

RESUMO .....	I
ABSTRACT .....	II
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 ASPECTOS CONCEITUAIS SOBRE RETIFICAÇÃO EM ALTA VELOCIDADE .....	4
2.1.1 Geometria e cinemática da operação de retificação .....	5
2.1.2 Redução da temperatura da zona de contato .....	7
2.1.3 Outras características afetadas pelo aumento da velocidade $v_s$ .....	9
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS GRÃOS DE CBN .....	12
2.2.1 Principais características dos rebolos CBN de ligante vitrificado .....	16
2.3 CONDICIONAMENTO DE REBOLOS CBN DE LIGA VITRIFICADA .....	19
2.4 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO ATRAVÉS DA EMISSÃO ACÚSTICA (EA) .....	25
2.4.1 Emissão Acústica (EA) .....	27
2.4.2 Sistema de Monitoramento DEAR .....	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
3.1 MATERIAIS.....	34
3.2 MÉTODOS.....	39
3.2.1 Preparação da máquina para os experimentos .....	39
3.2.2 Ensaio para estabelecimento das condições ideais de dressagem.....	41
3.2.3 Ensaio para a determinação do desgaste do rebolo na retificação dos diferentes materiais .....	43

3.2.4 Ensaio para otimização dos ciclos de retificação.....	46
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
4.1 ENSAIOS DE DRESSAGEM.....	48
4.1.1 Determinação dos parâmetros de dressagem.....	48
4.1.2 Monitoramento on-line da topografia do reboło. ....	51
4.2 ENSAIOS DE DESGASTE DO REBOLO DE CBN.....	55
4.3 MONITORAMENTO DA TOPOGRAFIA DO REBOLO DURANTE A RETIFICAÇÃO.....	75
4.4 ENSAIOS DE OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE RETIFICAÇÃO.....	83
4.5 COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS LABORATORIAIS E OS DADOS REAIS COLHIDOS EM CHÃO-DE-FÁBRICA .....	88
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>92</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>100</b>
ANEXO I .....	100
ANEXO II .....	101
ANEXO III .....	102
Programa de dressagem utilizado nos experimentos. ....	102
Sub-programa de dressagem. ....	103
Programa para retificação de sede de válvulas.....	104
ANEXO IV .....	106
Corpos de prova do material 40 Cr Mo V4.7 retificado com velocidade de avanço de 2 mm/min.....	106
Corpos de prova do material 40 Cr Mo V4.7 retificado com velocidade de avanço de 8 mm/min.....	109

<i>Corpos de prova do material 40 Cr Mo V4.7 retificado com velocidade de avanço de 16 mm/min.....</i>	<i>112</i>
<i>Corpos de prova do material Pyromet 31 retificado com velocidade de avanço de 2 mm/min.....</i>	<i>114</i>
<i>Corpos de prova do material VMS-599 retificado com velocidade de avanço de 2 mm/min.....</i>	<i>117</i>



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FORÇA NORMAL DE RETIFICAÇÃO EM FUNÇÃO DO AUMENTO DA VELOCIDADE $V_s$ , ADAPTADO DE SHIH ET AL (1998). .....	7
FIGURA 2 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE PERIFÉRICA DO REBOLO NA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA PEÇA RETIFICADA (TAWAKOLI, 1990). .....	8
FIGURA 3 – COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA CONSUMIDA DO MOTOR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE (JACKSON, 2001). .....	11
FIGURA 4 – DUREZA DOS GRÃOS ABRASIVOS (MAHAR, 1992).....	13
FIGURA 5 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS MATERIAIS. ....	13
FIGURA 6 – RESISTÊNCIA À FRATURA DOS GRÃOS DE CBN, (HTTP://WWW.GE.COM/SUPERABRASIVES). ....	14
FIGURA 7 – REBOLO CBN DE LIGA VITRIFICADA, DETALHE DO UM SEGMENTO ABRASIVO (HITCHINER, 1999). ....	16
FIGURA 8 – DIFERENTES PROJETOS DE REBOLOS, (A) SUTO ET AL, 1990, (B) ANDREWS, 1979, (C) GRAAFF, 1997. ....	18
FIGURA 9 – TIPOS DE DRESSAGEM PARA REBOLOS CBN VITRIFICADO (TÖNSHOFF ET AL, 2001).....	21
FIGURA 10 – DETALHE DA SUPERFÍCIE DO REBOLO APÓS DRESSAGEM COM DISCO DRESSADOR (HITCHINER, 1999).....	23
FIGURA 11 – RELAÇÃO ENTRE QD, AD E $R_{M\acute{A}X}$ DE SCHIMITT APUD HITCHINER, 1999.....	24
FIGURA 12 – PROBLEMAS NA RETIFICAÇÃO (OLIVEIRA & DORNFELD 2001). ....	26

FIGURA 13 – PRINCIPAIS FONTES DE EA NA RETIFICAÇÃO (KÖNIG & MEYEN, 1990). .....	28
FIGURA 14 – TELA DO SOFTWARE DEAR (GOMES, 2001). .....	31
FIGURA 15 – CONSTRUÇÃO DA IMAGEM DA SUPERFÍCIE ATIVA DO REBOLO NA DRESSAGEM. ....	32
FIGURA 16 – RETIFICADORA ZEMA G800 DO LABORATÓRIO DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO (OPF - EESC). ....	35
FIGURA 17 – [A] DIMENSÕES PRINCIPAIS DOS CORPOS DE PROVA, [B] EXEMPLO DO CORPO DE PROVA TIPO I ANTES E DEPOIS DO ENSAIO. ....	36
FIGURA 18 – [A] UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE SINAL DE EA SENSIS; [B] SENSOR DE EA DIFERENCIAL DE CONTATO; [C] SENSOR DE EA POR JATO DE ÓLEO.....	37
FIGURA 19 – ESQUEMA DO SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE DADOS UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS. ....	38
FIGURA 20 – TRANSDUTOR LINEAR (LVDT). ....	38
FIGURA 21 – POSICIONAMENTO DOS RELÓGIOS COMPARADORES PARA CENTRAGEM DO DISCO DRESSADOR.....	39
FIGURA 22 – DETALHE DO SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA DE JATO DE ÓLEO REFRIGERANTE. ....	40
FIGURA 23 – CORPO DE PROVA PARA IMPRESSÃO DO PERFIL DO REBOLO APÓS ENSAIO DE DESGASTE. ....	45
FIGURA 24 – CURVA PARA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DRESSAGEM. ....	48
FIGURA 25 – INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DRESSAGEM NA RUGOSIDADE DA PEÇA.....	49

FIGURA 26 – ESQUEMA DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE DRESSAGEM NA SUPERFÍCIE DO REBOLO. ....	51
FIGURA 27 – MAPA TOPOGRÁFICO DO REBOLO, VD – 100MM/MIN, QD – 0,323 (DETALHE DO MACROEFEITO DA DRESSAGEM). ....	52
FIGURA 28 – PRIMEIRO E ÚLTIMO MAPA DA DRESSAGEM PRELIMINAR. ....	54
FIGURA 29 – COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E DA CIRCULARIDADE PARA O MATERIAL 40CrMoV4.7 EM FUNÇÃO DO VOLUME DE MATERIAL RETIFICADO $V_w$ . ....	55
FIGURA 30 - COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E DA CIRCULARIDADE PARA O MATERIAL PYROMET 31 EM FUNÇÃO DO VOLUME DE MATERIAL RETIFICADO $V_w$ . .....	56
FIGURA 31 – COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E DA CIRCULARIDADE PARA O MATERIAL TRW VMS-599 EM FUNÇÃO DO VOLUME DE MATERIAL RETIFICADO $V_w$ .....	56
FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E DA CIRCULARIDADE PARA O MATERIAL 40CrMoV4.7 EM FUNÇÃO DO VOLUME DE MATERIAL RETIFICADO ( $V_w$ ) E VF DE 8MM/MIN. ....	57
FIGURA 33 - - COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E DA CIRCULARIDADE PARA O MATERIAL 40CrMoV4.7 EM FUNÇÃO DO VOLUME DE MATERIAL RETIFICADO ( $V_w$ ) E VF DE 16MM/MIN. ....	58
FIGURA 34 - COMPARAÇÃO DA RUGOSIDADE DO CORPO DE PROVA EM DIFERENTES MATERIAIS APÓS A RETIFICAÇÃO COM REBOLO CBN VITRIFICADO. ....	59
FIGURA 35 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE CIRCULARIDADE OBTIDO DA RETIFICAÇÃO COM REBOLO CBN VITRIFICADO. ....	61

FIGURA 36 – ANÁLISE HARMÔNICA DE UM CORPO DE PROVA DE 40Cr Mo V4.7...	61
FIGURA 37 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO CORPO DE PROVA. ....	64
FIGURA 38 – SITUAÇÃO DO REBOLO APÓS ACIDENTE DE RETIFICAÇÃO COM $V_F$ DE 16MM/MIN.....	66
FIGURA 39 – ESQUEMA DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL DE VIBRAÇÃO DO CORPO DE PROVA.....	67
FIGURA 40 – ANÁLISE ESPECTRAL DO CORPO DE PROVA QUE VIBROU NA RETIFICAÇÃO COM $V_F$ DE 16MM/MIN. ....	68
FIGURA 41 – MAPAS TOPOGRÁFICOS DA DRESSAGEM APÓS O <i>CHATTER</i> NA RETIFICAÇÃO.....	69
FIGURA 42 – GRÁFICO 3D DA SUPERFÍCIE DO REBOLO.....	70
FIGURA 43 – FOTO DA PEÇA QUE VIBROU DURANTE A RETIFICAÇÃO COM $V_F$ DE 16MM/MIN.....	71
FIGURA 44 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DE $G$ MÉDIO EM DIFERENTES SITUAÇÕES DE RETIFICAÇÃO.....	72
FIGURA 45 – RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL E O DESGASTE DO REBOLO .....	73
FIGURA 46 – MAPAS TOPOGRÁFICOS DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE 40CrMoV4.7 COM VELOCIDADE DE AVANÇO DE 2MM/MIN. ....	75
FIGURA 47 - MAPAS TOPOGRÁFICOS DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE 40CrMoV4.7 COM VELOCIDADE DE AVANÇO DE 8MM/MIN. ....	76
FIGURA 48 - MAPAS TOPOGRÁFICOS DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE 40CrMoV4.7 COM VELOCIDADE DE AVANÇO DE 16MM/MIN. ....	76

FIGURA 49 - MAPAS TOPOGRÁFICOS DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE PYROMET 31 COM VELOCIDADE DE AVANÇO DE 2MM/MIN. ....	77
FIGURA 50A - MAPAS TOPOGRÁFICOS DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE VMS-599 COM VELOCIDADE DE AVANÇO DE 2MM/MIN. ....	77
FIGURA 51 – IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES GRÁFICOS DOS MAPAS TOPOGRÁFICOS DE RETIFICAÇÃO PARA O MATERIAL 40CrMoV4.7.....	79
FIGURA 52 – DETALHE DO DEFEITO OBSERVADO COM O SOFTWARE DE MONITORAMENTO. ....	82
FIGURA 53 – CICLO PADRÃO DE RETIFICAÇÃO. ....	83
FIGURA 54 – ESTRATÉGIA DE RETIFICAÇÃO DE Mergulho com balanço sem remoção de material. ....	84
FIGURA 55 – RESULTADO COMPARATIVO ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE RETIFICAÇÃO CONVENCIONAL E COM BALANÇO PARA O MATERIAL 40CrMoV4.7. ....	85
FIGURA 56 – COMPARATIVO ENTRE A RETIFICAÇÃO CONVENCIONAL E A RETIFICAÇÃO COM REBOLO DE CBN DE SEDE VÁLVULAS DE COMBUSTÃO INTERNA. ....	89
FIGURA 57 – COMPARATIVO ENTRE O CUSTO DE FERRAMENTAL POR PEÇA RETIFICADA NA RETIFICAÇÃO CONVENCIONAL E NA RETIFICAÇÃO COM REBOLO CBN VITRIFICADO. ....	90
FIGURA 58 – COMPARATIVO ENTRE O NÚMERO DE PEÇAS RETIFICADAS POR HORA TRABALHADA, CONSIDERANDO MESMO TEMPO DE ALIMENTAÇÃO DAS MÁQUINAS. ....	90

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MATERIAIS UTILIZADOS NO TRABALHO	35
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS E MATERIAIS RETIFICADOS (DIMENSÕES EM MM).	36
TABELA 3 – MATRIZ DO ENSAIO DE DRESSAGEM.	42
TABELA 4 – MATRIZ EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE DESGASTE.	43
TABELA 5 – MATRIZ EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE OTIMIZAÇÃO DE CICLO DE RETIFICAÇÃO.	47
TABELA 6 – ESTUDOS DOS TEMPOS DE CORTE TEÓRICOS (NÃO LEVA EM CONTA SPARKOUT).	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de alumínio.

Anova – *Analysis of Variances*

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CBN – Nitreto Cúbico de Boro.

DEAR – Distribuição da Energia Acústica na Retificação.

EA – Emissão Acústica.

Fe – Ferro.

I/O – Entrada/Saída (*Input / Output*).

Ni – Níquel.

SI – Sistema Internacional de Unidades.

Upr – Unidades por revolução ("*Units per revolution*").

VI – Instrumento virtual ("*Virtual Instrument*")

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$  – Profundidade de corte [mm].

$a_d$  – Profundidade de dressagem [mm].

$d_e$  – Diâmetro equivalente  $d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}}$  [mm].

$d_s$  – Diâmetro do rebolo [mm].

$d_w$  – Diâmetro da peça [mm].

$E$  – Módulo de elasticidade do material [N/m<sup>2</sup>].

$f_e$  – Freqüência de excitação [Hz].

$f_r$  - Freqüência de rotação do rebolo [Hz]  $f_r = \frac{rpm.rebolo}{60}$ .

$F_n$  – Força normal de retificação [N].

$F'_n$  – Força normal específica de retificação [N].

$F_t$  – Força tangencial de retificação [N].

$g$  – Aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>].

$G$  – Relação entre o volume de material retificado e o volume de rebolo desgastado.

$h_m$  – Espessura do cavaco indeformado [mm].

$L$  – Espaçamento entre dois grãos consecutivos [mm].

$n_{ond}$  - Número de ondulações presentes na superfície do rebolo.

$N_r$  - Rotação do dressador [rpm].

$N_w$  - Rotação da peça [rpm].



$P_c$  – Potência de corte [W].

$P_{disp}$  – Potência disponível na máquina [W].

$P_l$  – Potência perdida [W].

$P_{KSS}$  – Potência perdida devido contato do fluido de corte com a superfície do rebolo [W].

$P_L$  – Potência necessária para rotacionar o rebolo [W].

$P_{SSP}$  – Potência perdida devido ao lavador de rebolo [W].

$P_{Total}$  – Potência total consumida [W].

$q_d$  – Relação de velocidades entre o rebolo e o dressador.

$Q_w$  – Taxa de remoção de material [mm<sup>3</sup>/s].

$Q'_w$  – Taxa de remoção específica de material [mm<sup>3</sup>/mm.s].

$r$  – Raio do rebolo [mm].

$s_d$  – Passo de dressagem [mm].

$t_a$  - Tempo de alisamento ou *spark-out* [s].

$U_d$  – Grau de recobrimento de dressagem  $U_d = \frac{a_d}{S_d}$ .

$v_d$  – Velocidade de dressagem [mm/min].

$v_f$  – Velocidade de avanço [mm/min].

$v_r$  – Velocidade do rolo ou disco dressador [m/s].

$v_s$  – Velocidade do rebolo [m/s].

$v_w$  – Velocidade da peça [m/s].

$V_w$  – Volume de material removido da peça [mm<sup>3</sup>].

$V'_w$  – Volume específico de material removido da peça [mm<sup>3</sup>/mm].

$\mu$  - Expansão radial do corpo metálico do rebolo CBN [m].

$\gamma$  - Densidade do material do corpo do rebolo [ $\text{kg/m}^3$ ].

$\omega$  - Velocidade angular do rebolo [rad/s].

$\nu$  - Número de Poisson.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver o processo de retificação a alta velocidade de superligas utilizando rebolos de CBN vitrificados. Para tanto, foram estudadas diversas condições de dressagem, ou seja, as influências dos parâmetros de dressagem no desempenho do rebolo CBN de liga vitrificada. A partir da escolha desses parâmetros, foi também determinado o desgaste do rebolo em diversas condições de velocidade de avanço, e a qualidade superficial das peças retificadas. Foi utilizado um sistema de mapeamento topográfico do rebolo, baseado na emissão acústica emanada da interação entre rebolo-peça, para o monitoramento do processo. Como resultado foi determinada a influência da velocidade de dressagem e da relação de velocidades na rugosidade da peça retificada. Ficou determinado também, o desgaste do rebolo de CBN em função do volume de material retificado para os diferentes materiais das superligas testadas. Através do sistema de mapeamento topográfico, determinou-se os padrões gráficos do comportamento do rebolo de CBN vitrificado. Sendo assim, verificou-se que o sucesso da aplicação de rebolos CBN vitrificados na retificação de superligas depende da qualidade superficial do rebolo após a dressagem e da escolha certa dos parâmetros de retificação, os quais dependem da constituição das ligas testadas.

## ABSTRACT

The aim of this work is to develop a high speed grinding process for super alloys using vitrified CBN wheels. For that, dressing conditions were studied in order to determine its influence on the CBN wheel performance. From the chosen parameters, the wheel wear and the ground surface quality were measured for different infeed speeds. A topographical mapping system based on acoustic emission was used to monitor the grinding process. As a result, the best dressing speed and speed ratio which generated the smallest surface roughness values could be found. The CBN wheel wear was measured and its ratio to the ground volume was evaluated. Through the mapping system, some visual patterns were obtained defining the grinding wheel behavior when dressing and grinding. Thus, the success vitrified CBN wheel application for super alloys depends basically on the wheel topography after dressing and the grinding parameters, which are close related to the work material composition.

## 1. INTRODUÇÃO

O estágio atual da globalização mundial entre as indústrias automotivas, provocou uma profunda mudança na administração dos negócios das empresas. Para sobreviverem em meio de uma concorrência tão acirrada, as empresas de manufatura tiveram que contornar suas dificuldades produzindo mais, com maior qualidade e com menor preço (Hahn, 1986). Sendo assim, foram obrigadas a melhorarem seus índices de produtividade, os quais até o final da década de 80 vinham caindo. Então, para que os índices de produtividade voltassem a crescer as empresas introduziram novas tecnologias tanto em maquinário, quanto em automação e principalmente nos processos de manufatura (Ferris & Klarquist, 1989).

O desenvolvimento da automação industrial e a aparição das teorias de produção seriada celular, potencializaram o aumento de produção garantindo uma maior qualidade das peças usinadas. Todavia, apesar dos avanços tecnológicos no campo das máquinas ferramenta e da automação industrial, pouco desenvolvimento tecnológico relacionado ao fenômeno de corte pôde ser observado nos processos de fabricação, no sentido de reduzir o custo operacional das empresas. Com o processo de retificação não foi diferente. Apesar de ser o processo de usinagem mais utilizado para a obtenção de peças de precisão, é também o processo de usinagem menos

dominado, ficando seu desempenho muito dependente da habilidade do operador (Oliveira, 1988).

Apesar do custo de fabricação dos componentes de motores, em especial as válvulas para motores de combustão interna, ser composto primordialmente pelo custo da matéria-prima, aproximadamente 50% do custo total de fabricação, 35% do custo total é dedicado ao custo de manufatura dos componentes, formando assim um grande potencial para a redução de custos e aumento dos índices de produtividade das empresas.

Contudo, a fabricação deste tipo de peça ainda é um problema para as empresas especializadas. Devido as máquinas estarem dispostas em linha na grande maioria das empresas, o fluxo de produção ainda é prejudicado devido ao baixo grau de compreensão do processo de retificação, principalmente em algumas operações de retificação cilíndrica externa convencional.

Com base nesse problema da indústria automobilística, os objetivos do presente trabalho são:

- Desenvolver o processo de retificação em alta velocidade com rebolo de CBN vitrificado;
- Verificar o comportamento da ferramenta na retificação de superligas, observando o desgaste volumétrico do rebolo e a qualidade superficial da peça retificada;
- Aplicar a tecnologia mencionada acima na retificação de válvulas para motores de combustão interna e comparar os resultados de produtividade com os resultados reais colhidos em chão-de-fábrica;

Sendo assim, se espera desenvolver um processo de retificação alternativo, o qual possa melhorar os índices de produtividade das empresas ajudando-as a manterem-se competitivas no mercado atual.

Este trabalho está dividido em 4 capítulos sendo eles:

- Revisão bibliográfica;

Este capítulo traz uma revisão da literatura mais relevante do assunto proposto, enfatizando os conceitos teóricos relacionados à retificação em alta velocidade, bem como as principais características da aplicação dos rebolos de CBN (Nitreto Cúbico de Boro).

- Materiais e Métodos;

Esse segundo capítulo apresenta detalhadamente a descrição do maquinário e dos equipamentos utilizados nos experimentos, bem como mostra os procedimentos experimentais para cada teste prático realizado, a fim de prover subsídios para a reprodução futura do trabalho aqui apresentado.

- Resultados e Discussões;

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos testes práticos, sendo esses comentados e relacionados com algumas referências bibliográficas importantes.

- Conclusão;

Este capítulo relaciona as conclusões mais relevantes resultantes da pesquisa realizada nesse trabalho.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Aspectos conceituais sobre retificação em alta velocidade**

Retificação é o processo de usinagem por abrasão o qual remove material da peça através da ação de grãos abrasivos espalhados aleatoriamente pela superfície do rebolo. Ao contrário dos demais processos de usinagem com remoção de material, como por exemplo, os processos de torneamento e fresamento, no processo de retificação a ferramenta, chamada de rebolo, apresenta geometria indefinida, ou seja, os grãos abrasivos que constituem o rebolo não apresentam o mesmo posicionamento e a mesma orientação (Malkin, 1989).

De acordo com Werber & Tawakoli (1989), para se realizar uma operação de retificação com alta velocidade de corte a máquina deve apresentar alguns requisitos básicos:

- Eixo com alta potência;
- Mancais e suportes rígidos;
- Comando CNC;
- Mesas e guias com alta rigidez;



- Sistema de refrigeração otimizado;
- Sistema de balanceamento de rebolo integrado;
- Sistema de dressagem com alta rigidez;

A seguir serão apresentados os principais fatores que são influenciados pelo aumento da velocidade periférica do rebolo na retificação cilíndrica externa.

### 2.1.1 Geometria e cinemática da operação de retificação

A velocidade periférica do rebolo ( $v_s$ ) é a principal variável a ser considerada na retificação com rebolos de CBN (Lindsay, 1975). O aumento da velocidade ( $v_s$ ) proporciona a variação de diversos parâmetros teóricos de retificação. Entre esses fatores, os parâmetros mais importantes são os parâmetros relacionados com a geometria do cavaco indeformado, principalmente a espessura do cavaco indeformado ( $h_m$ ) (Malkin, 1989; Hwang et al, 2000).

#### (a) *Espessura do cavaco indeformado ( $h_m$ ):*

Também chamada de profundidade de corte de cada grão abrasivo, expressa a máxima profundidade de corte alcançada por um único grão abrasivo dentro da zona de contato do rebolo e da peça. A espessura do cavaco indeformado ( $h_m$ ) pode ser expressa por (Malkin, 1989):

$$h_m = 2L \left( \frac{v_w}{v_s} \right) \left( \frac{a}{d_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1),$$

onde:

L – Espaçamento entre dois grãos abrasivos ativos consecutivos;

$v_w$  – Velocidade periférica da peça;

a – Profundidade de corte;

$d_e$  – Diâmetro equivalente, que na retificação cilíndrica externa é expresso por:

$$d_e = \frac{d_s}{1 + d_s/d_w} \quad (2),$$

sendo,  $d_s$  o diâmetro externo do rebolo e  $d_w$  o diâmetro externo da peça.

Da eq. (1), conclui-se que com o aumento da velocidade  $v_s$ , ocorre uma redução da espessura do cavaco indeformado, ou seja, ocorre uma redução da profundidade de corte por grão abrasivo (Tönshoff & Falkenberg, 1996). Com isso, é possível aumentar a velocidade de avanço ( $v_f$ ), a fim de manter constante a espessura do cavaco indeformado. Segundo Yui & Lee (1996), a principal consequência desse fenômeno é a redução das forças normal e tangencial de retificação. A Figura 1, mostra o resultado desse fenômeno sob a força normal específica de retificação apresentada por Shih et al (1998).

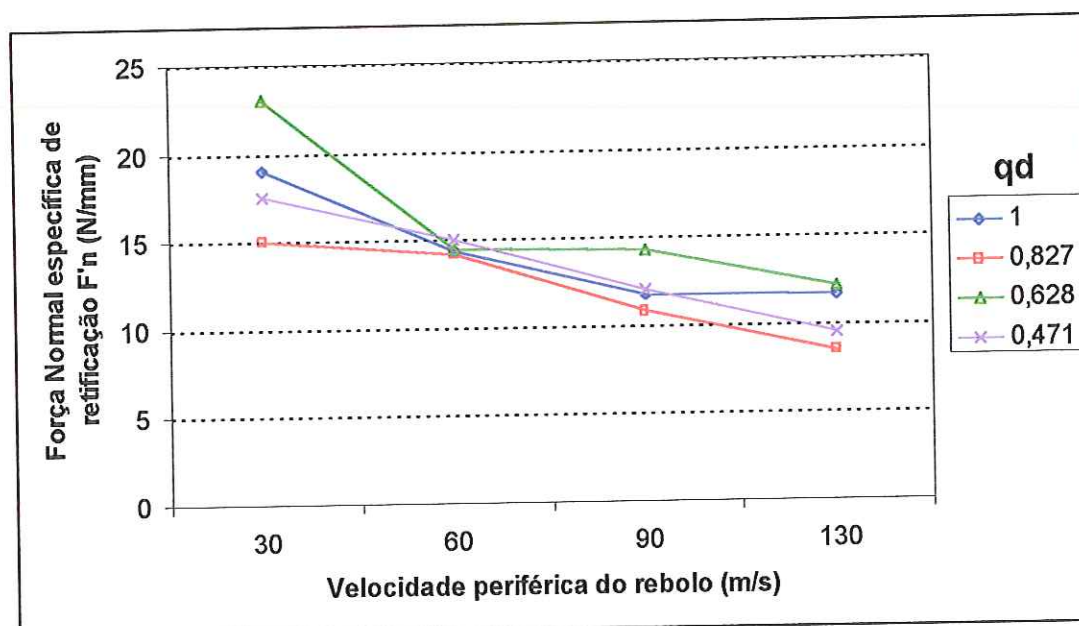


Figura 1 – Força normal de retificação em função do aumento da velocidade  $v_s$ , adaptado de Shih et al (1998).

Além da redução das forças normal ( $F_n$ ) e tangencial de retificação ( $F_t$ ), o aumento da velocidade de avanço ( $v_f$ ) possibilita a redução do tempo de retificação para o mesmo volume de material, aumentando assim a taxa de remoção de material ( $Q_w$ ), ampliando o potencial de redução de custo do processo de retificação.

### 2.1.2 Redução da temperatura da zona de contato

No estudo realizado por Tawakoli (1990), além da redução das forças envolvidas no processo, o aumento da velocidade  $v_s$ , proporciona redução da propagação de calor da zona de retificação para a peça. Aliada as

excelentes propriedades térmicas dos grãos abrasivos de CBN (Nitreto Cúbico de Boro), problemas de queima superficial e tensões residuais são minimizados. A Figura 2, compara o comportamento da temperatura superficial da peça em relação ao aumento da velocidade periférica do rebolo para a retificação convencional com rebolos de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e rebolos de CBN.

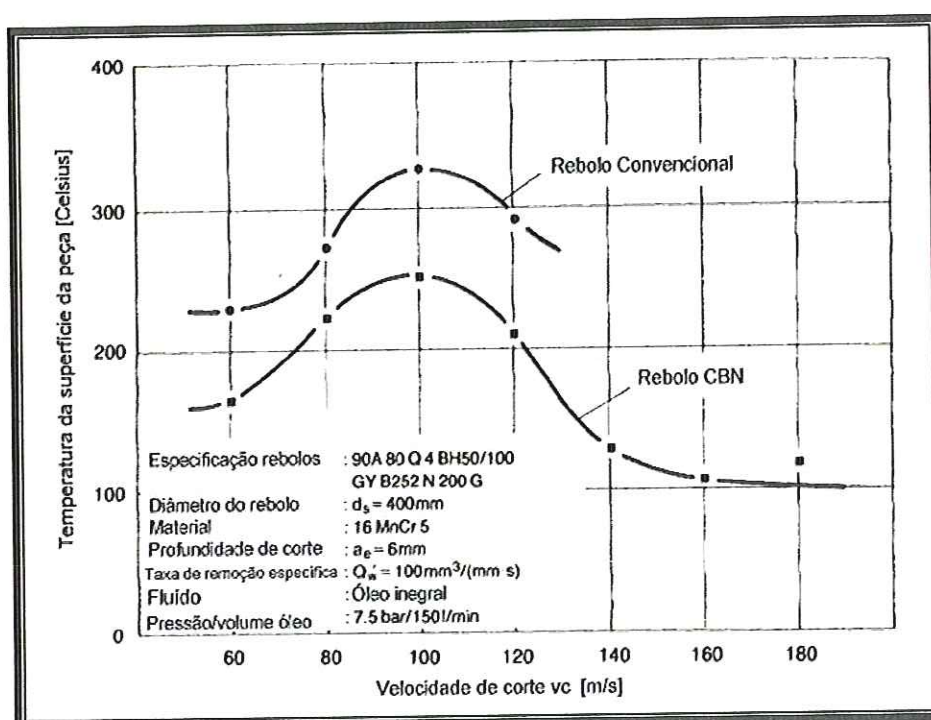


Figura 2 - Influência da velocidade periférica do rebolo na temperatura superficial da peça retificada (Tawakoli, 1990).

Observa-se na Figura 2, que tanto para rebolos convencionais como para os rebolos de CBN, a temperatura da superfície da peça aumenta até a limite de 100m/s (temperatura de equilíbrio para formação de cavaco), e depois decresce substancialmente até se estabilizar em aproximadamente 150m/s. De acordo com Hitchiner (1999), esse fenômeno é explicado pois

em alta velocidade o tempo de contato dos grão abrasivos é tão pequeno que o fenômeno térmico torna-se adiabático, e com isso, o calor gerado na camada de contato não tem tempo suficiente para se propagar para o interior da peça antes de ser removido pelo grão abrasivo subsequente.

### 2.1.3 Outras características afetadas pelo aumento da velocidade

$V_s$

Além dos parâmetros descritos acima, o aumento da velocidade periférica do rebole influencia na qualidade da peça retificada, principalmente na rugosidade e nas tensões residuais. Diversos autores (Werber & Tawakoli, 1988; Hwang et al, 2000; Lindsay, 1975; Suto et al, 1990) afirmam que com o aumento da velocidade  $v_s$  existe redução dos valores de rugosidade.

Historicamente tem sido muito difícil se conseguir valores baixos de rugosidade na retificação com CBN vitrificado. Contudo, com o aperfeiçoamento dos comandos CNC, dos mancais e a utilização de discos diamantados na dressagem essa situação passou a ser modificada.

Outra grandeza também influenciada pelo aumento da velocidade é a potência consumida. De acordo com Jackson et al (2001), a potência total consumida é composta pela potência de corte ( $P_C$ ) e pela perda de potência ( $P$ ):

$$P_{Total} = P_C + P_I \quad (3)$$

Por definição, a potência de corte  $P_C$  é expressa pelo produto da força tangencial de retificação ( $F_t$ ) e a velocidade periférica do rebolo ( $v_s$ ), conforme equação 4.

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

A perda de potência ( $P_I$ ) por sua vez, é composta pela potência necessária para rotacionar o rebolo em vazio ( $P_L$ ), pela potência perdida devido ao contato do fluido de corte sobre a superfície do rebolo ( $P_{KSS}$ ), e pela potência perdida devido ao sistema de jato de limpeza da superfície do rebolo ( $P_{SSP}$ ).

$$P_I = P_L + P_{KSS} + P_{SSP} \quad (5)$$

Todavia o aumento da velocidade ( $v_s$ ) apresenta maior influência na potência perdida ( $P_I$ ) do que na potência de corte ( $P_C$ ) para valores de  $v_s$  acima de 220m/s. A Figura 3 mostra que o aumento de  $v_s$ , resulta em um maior aumento na potência perdida para a rotação do rebolo, refrigeração e limpeza do rebolo, do que aumento efetivo da potência de corte  $P_C$ .

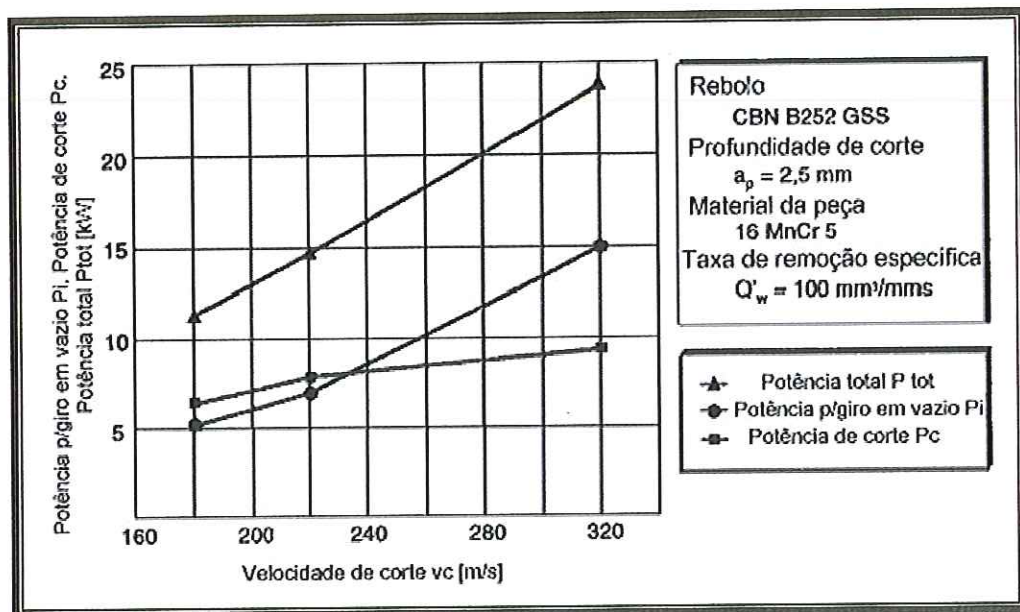


Figura 3 – Comportamento da potência consumida do motor em função da velocidade de corte (Jackson, 2001).

## 2.2 Características dos grãos de CBN

O nitreto cúbico de boro, ou simplesmente CBN, mostra-se atualmente como o grão abrasivo de maior potencial para melhora da qualidade da peça retificada e para a redução do custo operacional de retificação (Johnson & Ratterman, 1988). Introduzido no mercado mundial no final da década de 60 pela General Electric, o CBN, chamado na época de BORAZON, permaneceu vários anos em desenvolvimento até alcançar o nível tecnológico observado atualmente (Carius, 1999).

De acordo com Salmon (1992), o grão de CBN de cor preta e opaca conhecido hoje, é formado através de um processo de sinterização realizado sob alta temperatura e pressão (1650°C e 68.000bar). Nessa condição extrema e na presença de um catalisador, elétrons dos átomos de nitrogênio migram para os átomos de boro, formando assim uma estrutura cristalina semelhante à estrutura do diamante. Dessa forma, excelentes propriedades físicas e químicas são obtidas, destacando-se sua alta dureza e sua alta condutividade térmica. A Figura 4 e a Figura 5 mostram respectivamente a comparação destas duas propriedades entre os grãos de CBN e os demais grãos abrasivos convencionais.



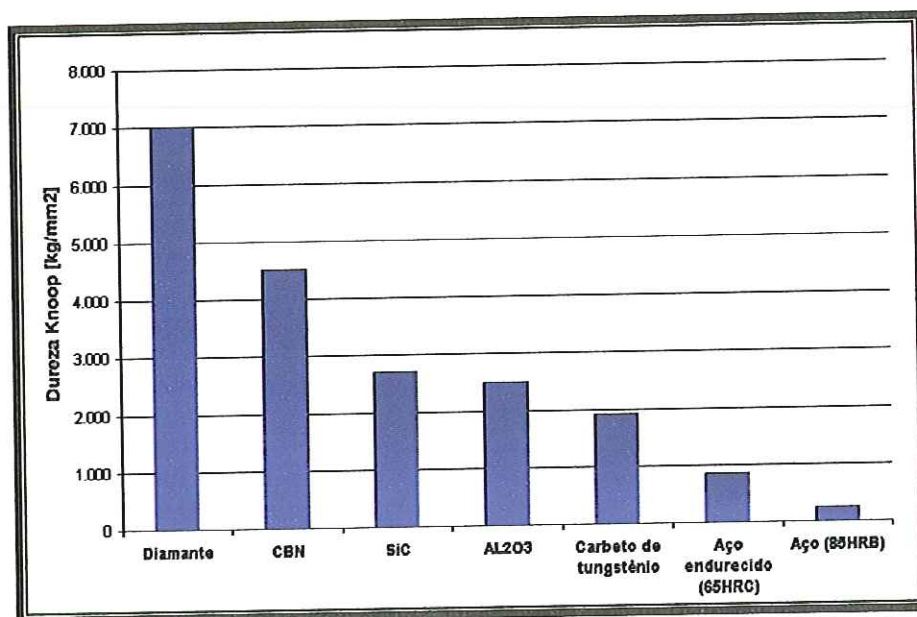


Figura 4 – Dureza dos grãos abrasivos (Mahar, 1992).

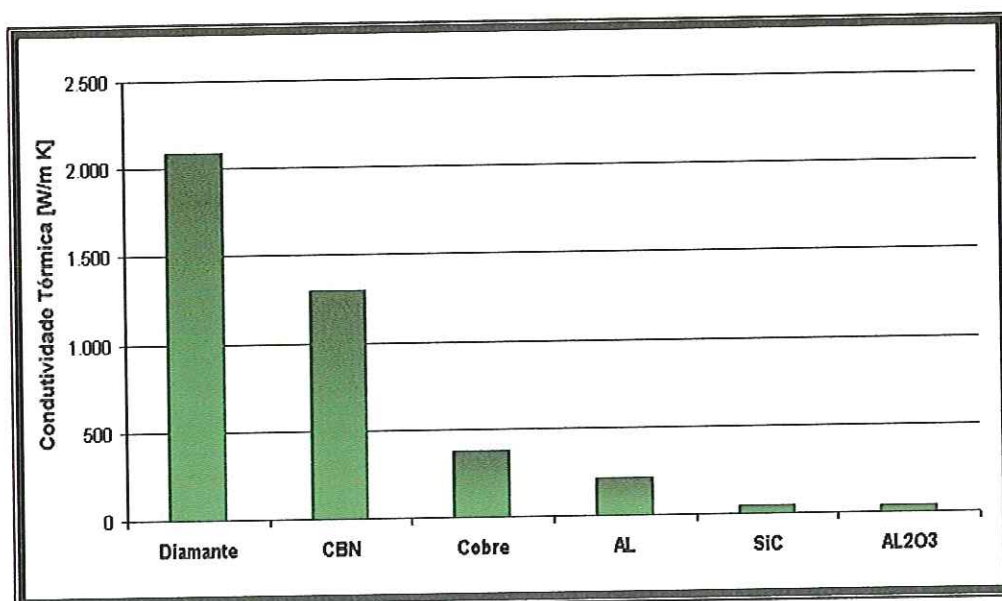


Figura 5 – Condutividade térmica dos materiais.

Todavia, outras características determinadas pelo tipo de grão, sua forma, seu tamanho e seu revestimento também são observadas. O estudo realizado pela General Electric, revelou que as propriedades mencionadas acima tem grande influência na resistência à fratura do grão abrasivo. Observou-se que quanto menor o tamanho do grão abrasivo e mais irregular

é sua forma, maior é sua resistência à fratura. A Figura 6 traz o resultado do estudo realizado pela General Electric.

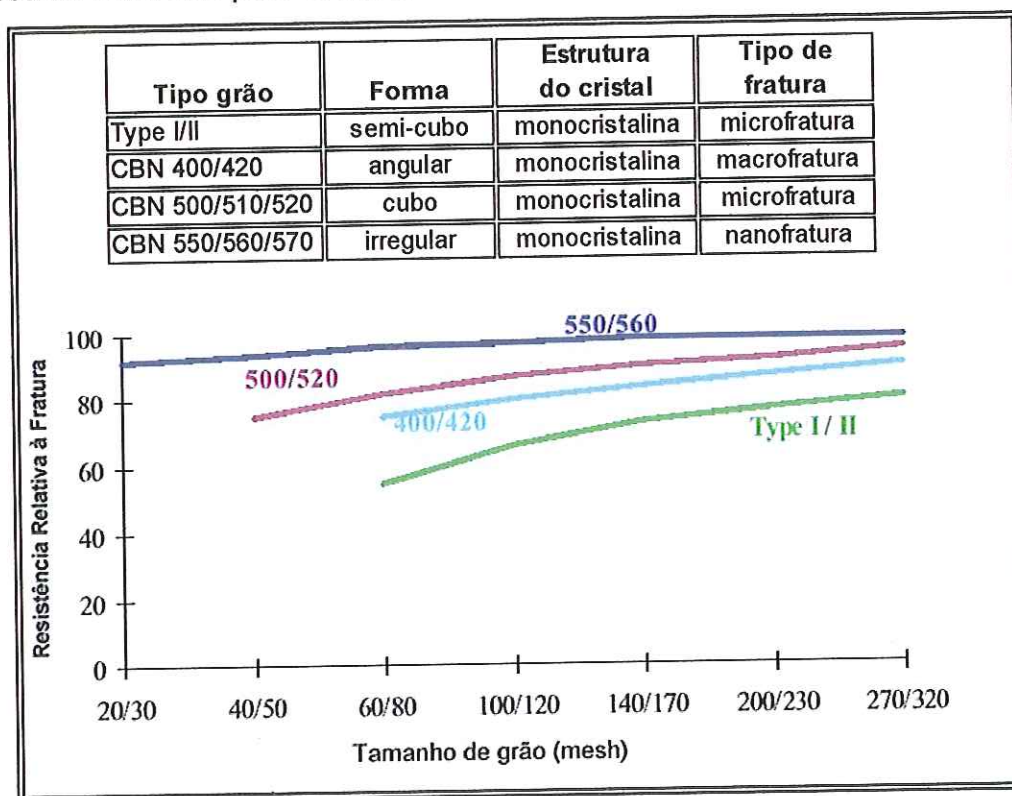


Figura 6 – Resistência à fratura dos grãos de CBN,

(<http://www.ge.com/superabrasives>).

Resistência relativa à fratura citada na figura 6 pode ser caracterizada como a capacidade de um grão abrasivo absorver energia durante a retificação sem que ocorra perda volumétrica. É uma escala qualitativa definida pela própria General Electric que compara a facilidade ou dificuldade com que o grão se quebra. Quanto maior é o valor da resistência relativa à fratura mais dificilmente o grão se quebra.

Outras propriedades como baixo coeficiente de atrito, alta resistência à abrasão, etc., também são observadas nos grãos abrasivos de CBN e são

constantemente citadas nas obras de diversos autores (Bailey & Juchen, 1998; Redington & Sullivan, 1998).

De acordo com Carius (1999), na presença de ferro o CBN torna-se inerte, ou seja, não reage quimicamente com os átomos de ferro que constituem o material retificado. Essa propriedade mostra-se como a principal vantagem do CBN em relação ao diamante, que quando em contato com o ferro e em altas temperaturas se fragiliza, devido à formação de carbetos, reduzindo sua resistência à fratura e ao desgaste. Sendo assim, o CBN mostra-se como uma importante ferramenta para a retificação de aços, materiais ferrosos endurecidos, ferro fundido e superligas de níquel e cobalto (Bianchi et al, 1999).

Existem quatro tipos possíveis de sistema de liga para os rebolos CBN e sua escolha depende diretamente do tipo de aplicação desejada. Porém, na prática, atualmente as mais utilizadas na indústria são; ligas galvânicas (também conhecidas como ligas eletrodepositadas), ligas metálicas e ligas de resina (Mahr, 1992). Poucas aplicações industriais de rebolos CBN de liga vitrificada são observadas, sendo as aplicações mais relatadas em retificação de eixos comando de válvula, virabrequins e na indústria aeroespacial (Barnard, 1990; Tönshoff & Falkenberg, 1996; Hitchiner, 1999).

Haja vista a natureza deste trabalho, a seguir serão revistas somente as principais características dos rebolos CBN de ligante vitificado.

## 2.2.1 Principais características dos rebolos CBN de ligante vitrificado

Basicamente os rebolos CBN de liga vitrificada são constituídos por um corpo metálico e diversos segmentos abrasivos colados através de uma cola com alta resistência à fratura e alta resistência à ação dos agentes químicos presente nos fluídos de corte. A Figura 7 apresenta a constituição básica de um reboło CBN de liga vitrificada.

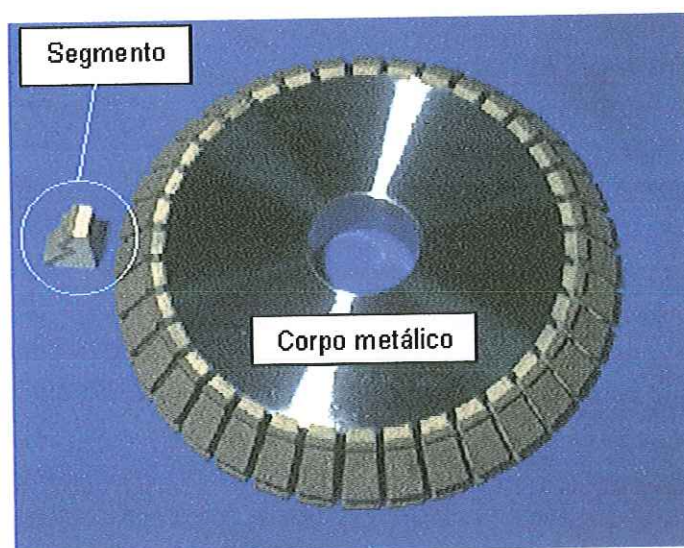


Figura 7 – Reboło CBN de liga vitrificada, detalhe do um segmento abrasivo (Hitchiner, 1999).

Quando aplicados em alta rotação, o corpo metálico desse tipo de reboło comporta-se de forma elástica, se expandindo radialmente. Essa expansão radial provoca deformações radiais da ordem de centésimos de milímetro. De acordo com Yui & Lee (1996), a expansão do corpo metálico

do rebolo pode ser calculada de acordo com a teoria da elasticidade utilizando um modelo de disco metálico simples conforme a equação 6.

$$u = \frac{\gamma \cdot \omega^2}{4 \cdot E \cdot g} (1 - \nu) \cdot r^3 \quad (6)$$

Onde:

$u$  – Expansão radial do corpo metálico do rebolo;

$\gamma$  - Densidade do material do corpo do rebolo;

$\omega$  - Velocidade angular;

$r$  – Raio do rebolo;

$\nu$  - Número de Poisson;

$E$  – Módulo de Young (ou Módulo de Elasticidade);

$g$  – Aceleração da gravidade;

A forma dos rebolos CBN vitrificados geralmente é função do perfil da peça a ser retificada e do modo o qual o rebolo será fixado na máquina. Contudo, algumas pesquisas foram realizadas a fim de adequar o projeto do rebolo a fim de melhorar a refrigeração da peça retificada (Suto et al, 1990; Andrews, 1979; Graaff, 1997), como mostrado na Figura 8. Um fenômeno interessante e que pode até inviabilizar a implantação desses projetos de rebolo com refrigeração incorporada, são os altos níveis de ruído gerado devido aos sulcos e furos presentes na superfície do rebolo (Hitchiner, 1999).

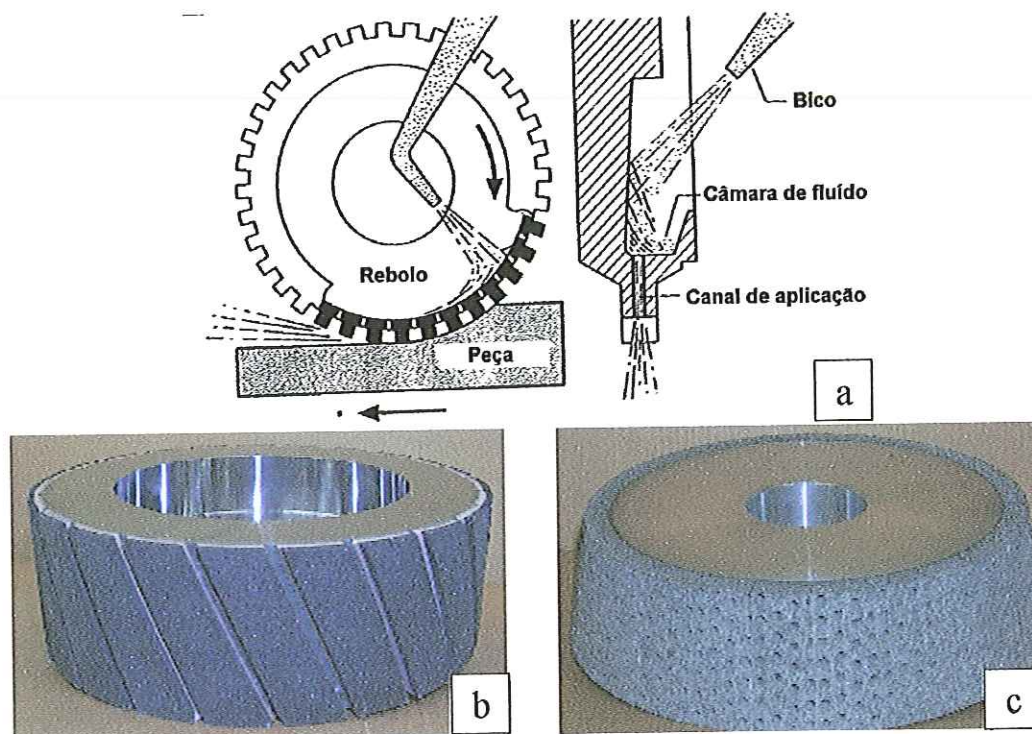


Figura 8 – Diferentes projetos de rebolos, (a) Suto et al, 1990, (b) Andrews, 1979, (c) Graaff, 1997.

A característica mais importante apresentada pelos rebolos CBN de liga vitrificada, é que esses podem ser dressados e terem sua característica topográfica alterada. Devido a grande importância do processo de dressagem (ou condicionamento) para o desempenho desses rebolos, esse assunto será abordado separadamente a seguir.

## 2.3 Condicionamento de rebolos CBN de liga vitrificada

O condicionamento de rebolos de CBN vem sendo objeto de estudo de diversos pesquisadores há vários anos (Takagi et al, 1990; Takagi & Liu, 1996; Inasaki, 1996), e ao longo desses anos diversas formas de adequar as características topográficas do rebolo às especificações do produto retificado foram criadas.

Entende-se por condicionamento de rebolos, o conjunto de operações as quais adequam as características topográficas da ferramenta aos requisitos de qualidade do processo de retificação. Basicamente, a operação de condicionamento para rebolos CBN de liga vitrificada pode ser composta por três etapas: geração de forma, afiação e limpeza (Klock & König, 1995). A geração de forma, mais conhecida como *truing*, tem como objetivo gerar o perfil desejado no rebolo e eliminar os eventuais erros geométricos que possam acarretar em problemas à qualidade da peça. A operação de afiação, por sua vez, tem por objetivo aumentar a capacidade de corte do rebolo. Essas duas operações no caso de rebolos de liga vitrificada acontecem de uma só vez, recebendo simplesmente o nome de dressagem. A operação de limpeza é executada a fim de remover o material da peça que fica alojado nos espaços vazios entre os grãos abrasivos de CBN. Esses espaços vazios são chamados de poros do rebolo.

A operação de *truing* para rebolos CBN de liga vitrificada pode ser feita de diversas formas. Até o final da década de 80, rebolos de óxido de

alumínio montados em eixos com torque controlado eram o principal método utilizado para a geração de perfis em rebolos CBN de liga resinóide, bem como nos de liga vitrificada. Diversos autores apresentam relatos sobre a utilização deste tipo de sistema (Ault, 1986; Malkin, 1989). Contudo, devido a grande diferença de dureza entre o rebolo dressador e o rebolo de CBN, o desgaste dos rebolos para o *truing* mostrava-se muito grande, além do impacto negativo referente ao alto custo do seu sistema de acionamento com controle de torque.

Atualmente, nas retificadoras mais modernas a operação de geração de forma de rebolos CBN de liga vitrificada é feita através rolos ou discos de diamante com liga eletrolítica. Nos dressadores tipo rolo, os diamantes são distribuídos aleatoriamente ao longo da superfície do mesmo a fim de evitar o aparecimento de qualquer tipo de padrão devido ao posicionamento dos grãos de diamante. Já nos discos dressadores mais modernos, os grãos de diamante também são distribuídos aleatoriamente, porém nesse, em uma faixa na lateral do seu corpo metálico. De acordo com Tönshoff et al (2001), atualmente a dressagem de rebolos CBN de ligante vitrificado pode ser feita de diversas formas, sendo elas: com ou sem o uso de dressadores diamantados, sendo estes rotativos ou não, ou mesmo apresentando diferença de velocidade entre o rebolo e o dressador. A Figura 9, apresenta os métodos descritos por Tönshoff.



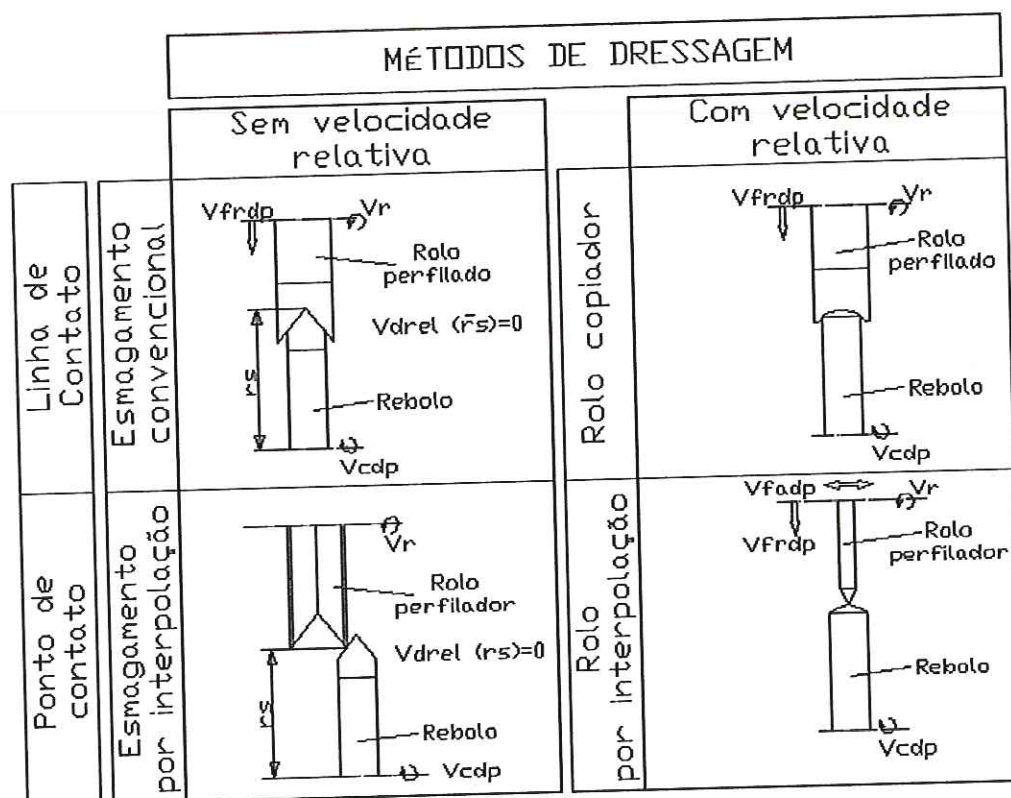


Figura 9 – Tipos de dressagem para rebolos CBN vitrificado (Tönshoff et al, 2001).

Após a operação de geração de forma do rebolo, observa-se o fechamento da sua estrutura. Sendo assim, para se alcançar as condições ideais de corte é necessário que os grãos abrasivos estejam expostos e afiados. Para que isso aconteça, a operação de afiação deve ser realizada. Contudo esse processo não apresentou grandes progressos nos últimos anos, e ainda hoje é feito com o auxílio de bastões abrasivos geralmente constituídos de grãos de carbureto de silício ou de óxido de alumínio. Nessa operação, esses bastões abrasivos são colocados em contato com a superfície do rebolo manualmente ou através de sistemas mecânicos. Com isso, ocorre o arrancamento de parte do ligante que faz o ancoramento dos

grãos de CBN mais externos, fazendo que estes fiquem mais expostos proporcionando um melhor corte.

De acordo com Brinksmeier & Çinar (1995), os parâmetros cinemáticos do processo de condicionamento do rebolo, daqui para frente chamado simplesmente de dressagem, são os responsáveis pelo bom desempenho dos rebolos de CBN na retificação. Segundo os autores, os parâmetros mais importantes são: o grau de recobrimento ( $U_d$ ), a relação de velocidades entre o dressador e o rebolo ( $q_d$ ) e a profundidade de dressagem ( $a_d$ ).

O grau de recobrimento ( $U_d$ ), expressa a relação entre a largura atuante do dressador e o avanço do dressador por volta ( $s_d$ ) (Oliveira, 1988), ou seja, relaciona a geometria dos grãos de diamante do dressador com os parâmetros cinemáticos da operação. A equação 7 define essa relação.

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} = \frac{b_d \cdot n_s}{v_d} \quad (7)$$

Em outras palavras, o grau de recobrimento representa a magnitude da rosca gerada no rebolo em dressagens onde se utilizam dressadores estáticos, ou seja, gera o macro-efeito no rebolo. Contudo, para dressadores do tipo disco rotativo, a rosca gerada não se forma perfeitamente, devido ao curto espaço de tempo que cada grão de diamante do dressador permanece em contato com o rebolo. Nesse caso, a superfície do rebolo fica repleta de sulcos que aumentam o macro-efeito, e que se mostra em sua pior forma em

dressagens efetuadas por discos onde os diamantes estão uniformemente espaçados. A Figura 10, mostra a superfície do rebolo idealizada por Hitchiner após a dressagem com disco rotativo.

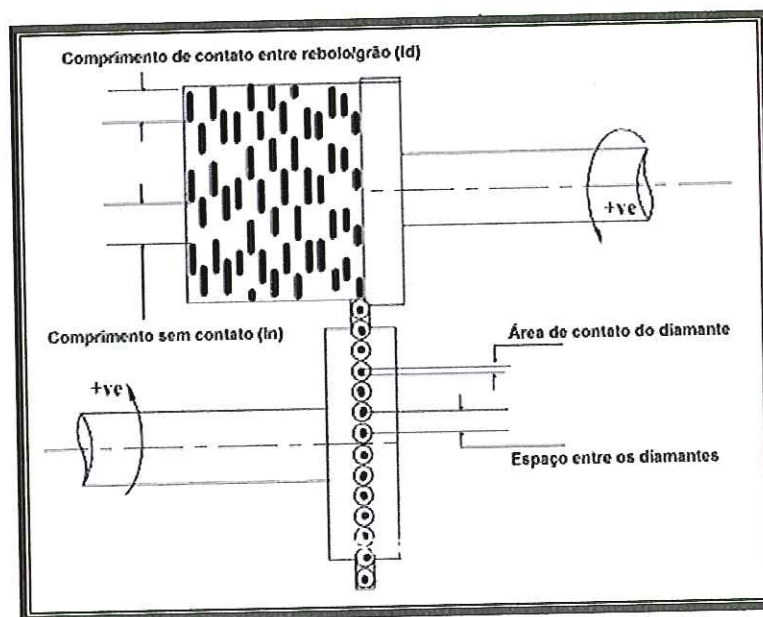


Figura 10 – Detalhe da superfície do rebolo após dressagem com disco dressador  
(Hitchiner, 1999)

Os outros dois principais parâmetros que influenciam a topografia do rebolo são; a relação de velocidades ( $q_d$ ) (equação 8), e a profundidade de dressagem por volta do rebolo ( $a_d$ ). Geralmente, esses dois parâmetros são utilizados para relacionar a qualidade superficial da peça retificada e as condições de dressagem para rolos diamantado, porém, o mesmo conceito pode ser aplicado para dressagens com discos dressadores.

$$q_d = \frac{v_r}{v_s} \quad (8)$$

Onde:  $v_r$  – velocidade periférica do rolo ou disco  
 $v_s$  – velocidade periférica do rebolo

A Figura 11, mostra a curva desenvolvida por Schmitt em 1968. Essa curva relaciona a relação de velocidades, a profundidade de dressagem por volta do rebolo e a rugosidade da superfície do rebolo após a dressagem. Esse estudo serviu como base para diversos trabalhos de diferentes autores (Lindsay, 1986; Hitchiner, 1999).

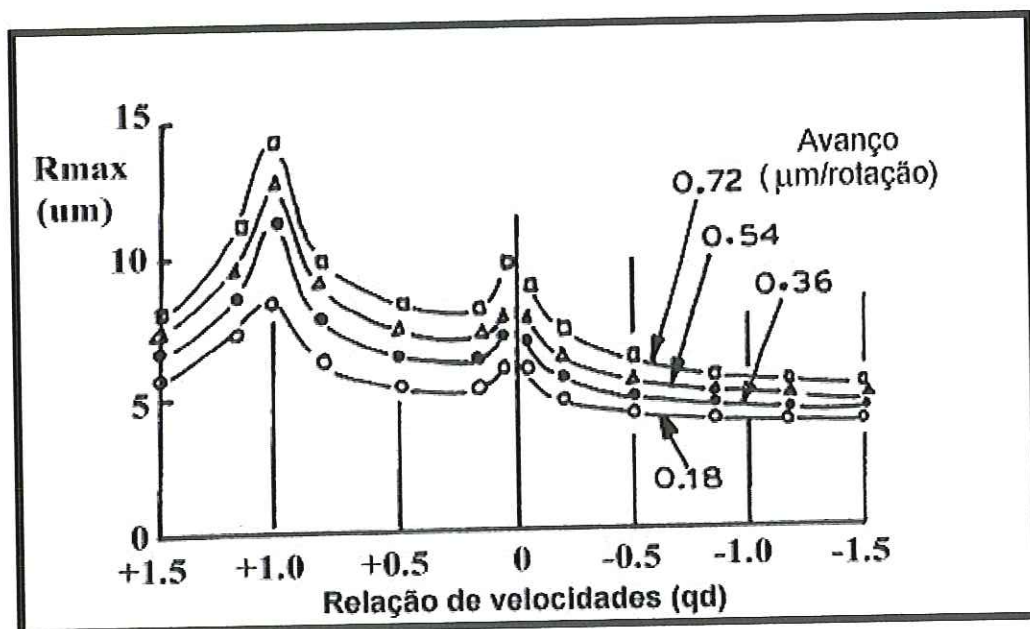


Figura 11 – Relação entre  $q_d$ ,  $a_d$  e  $R_{máx}$  de Schmitt apud Hitchiner, 1999.

## **2.4 Monitoramento do processo de retificação através da emissão acústica (EA)**

A crescente preocupação por parte das empresas pela garantia da qualidade das peças usinadas, vem incentivando o aumento do número de sistemas de monitoramento destinados aos processos de usinagem, principalmente para o processo de retificação (GOMES, 2001).

Conforme HÖNIG & KLUMPEN (1993), os sistemas de monitoramento em processo devem identificar os erros presentes na peça, que por sua vez são gerados a partir de problemas provenientes do processo de retificação. Sendo assim, esses sistemas podem aumentar a produtividade das empresas, pois as máquinas trabalham com mínima assistência e de forma automática sem que necessite muita interferência do ser humano (TÖNSHOFF et al, 1998).

Geralmente, na retificação, os sistemas de monitoramento em processo utilizam grandezas físicas, tais como a emissão acústica (EA), forças, potência, posição e etc., que podem ser captadas do processo de corte e da operação de dressagem do rebolo.

Na Figura 12, Oliveira & Dornfeld (2001), mostram o estágio atual de alguns dos problemas mais comuns para os diversos tipos de operações de retificação.

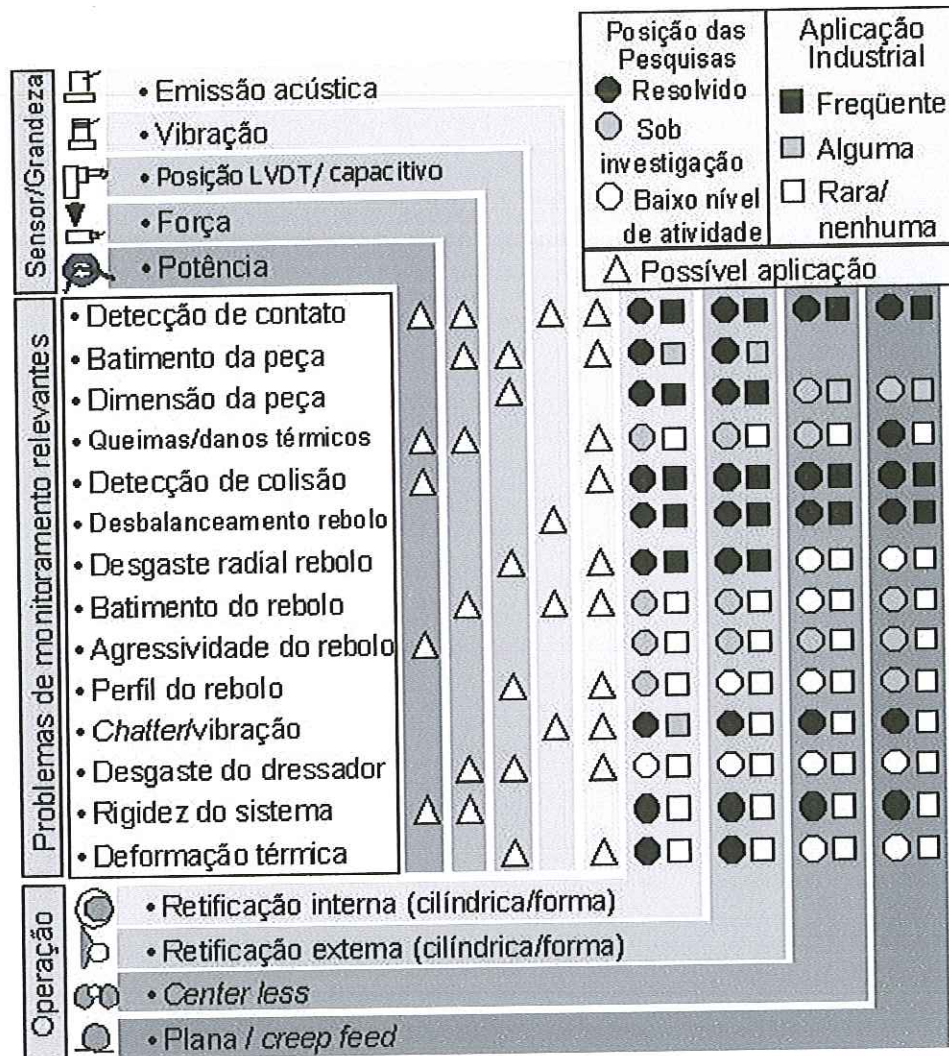


Figura 12 – Problemas na retificação (Oliveira & Dornfeld 2001).

Na maioria dos casos apresentados na Figura 12, os problemas podem ser solucionados através da aquisição dos sinais de EA do processo, através de *hardwares* especiais e computadores de última geração. Sendo assim, devido a importância da emissão acústica para alguns dos atuais sistemas de monitoramento do processo de retificação, a seguir será feita uma breve revisão sobre EA e sobre o sistema de monitoramento DEAR (Distribuição da Energia Acústica na Retificação) desenvolvido por Gomes (2001).

### 2.4.1 Emissão Acústica (EA)

Emissões acústicas são ondas acústicas geradas dentro do material a partir de excitações externas em alta pressão. As frequências da EA (50 kHz a 1000 kHz) estão muito acima dos ruídos convencionais de usinagem (ruído de rolamento, atrito de metais, etc.) não relacionados ao corte de material, sendo assim, é possível utilizá-la para descrever o fenômeno de corte de material na retificação (DORNFELD, 1992).

No processo de retificação as principais fontes geradoras de EA são as fraturas dos grãos e do ligante, trincas nos grãos e atrito entre a peça e o grão abrasivo (Figura 13). O processo de corte na retificação acontece em três etapas distintas: a primeira fase é caracterizada por uma extrema pressão de contato entre o rebolo e a peça gerando o aparecimento de deformações elásticas de ambas as partes (esse fenômeno também é conhecido como *escorregamento* ou *rubbing*); a segunda fase é caracterizada pela deformação plástica do material, ou seja, riscamento do material da peça (*plowing*) ocasionando deslocamento lateral do material; a terceira fase é propriamente a formação do cavaco e seu arranque da peça. Todos os fenômenos descritos acima estão relacionados à formação do cavaco e ao desgaste do rebolo, sendo que sua intensidade é diretamente proporcional ao sinal de EA mensurável (GOMES, 2001).

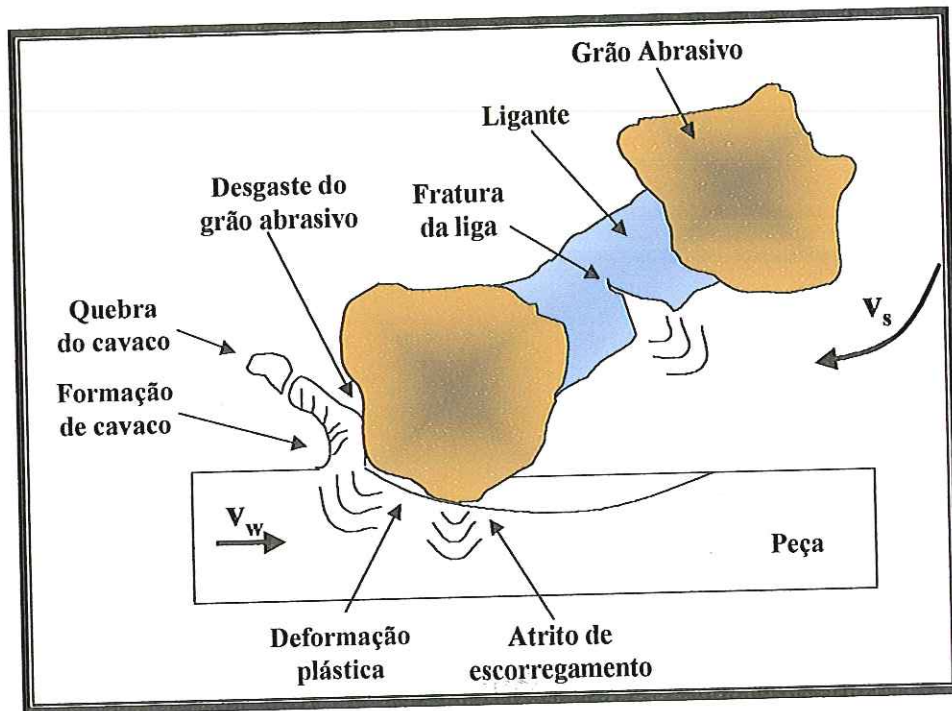


Figura 13 – Principais fontes de EA na retificação (KÖNIG & MEYEN, 1990).

Segundo DORNFELD & CAI (1984), a EA é muito eficiente para a detecção de contato entre o rebolo e a peça, uma vez que esses sinais apresentam sensibilidade superior àqueles obtidos através de medições de força do processo. Devido sua grande sensibilidade, o monitoramento da retificação feito por emissão acústica deve possuir alguns cuidados quanto ao nível do sinal de EA em relação ao avanço do rebolo. Nesse processo devido ao grande número de variáveis (rebolo, peça, fluido de corte, máquina, velocidade de avanço, sobremetal, etc.) pequenas variações dessas variáveis podem provocar sensíveis mudanças nos níveis do sinal de emissão acústica, portanto, o ajuste da sensibilidade do sinal é de fundamental importância para que os valores apresentados mostrem com precisão os dados do processo de retificação.



Atualmente a EA é utilizada principalmente para detecção de contato entre o rebolo e a peça, para controle do tempo de alisamento (ou *spark-out*), para controle da qualidade da dressagem, controle do desgaste do rebolo e controle da condição topográfica do rebolo.

#### 2.4.2 Sistema de Monitoramento DEAR

O sistema de Distribuição de Energia Acústica na Retificação (DEAR), desenvolvido por Gomes (2001), utiliza os sinais de emissão acústica emanados do processo de retificação ou da operação de dressagem para compor uma imagem da superfície ativa do rebolo. Esse sistema é composto por:

- Microfone de contato:

Esse sensor capta as ondas acústicas que se propagam do ponto de contato entre a peça e o rebolo até a estrutura da máquina. Através da diferença de potencial de uma placa cerâmica piezo-elétrica situada dentro do sensor, são gerados pulsos de tensão proporcionais às ondas acústicas que agem sobre a estrutura do sensor.

- Sensor de proximidade:

Esse sensor capta os sinais de rotação do eixo do rebolo, liberando pulsos de tensão a cada volta do rebolo. Neste trabalho esse sensor será

chamado de *trigger*. No sistema DEAR o trigger indica o início de cada volta do rebole durante o tempo de retificação.

- Unidade de tratamento de sinais de EA:

Esse hardware processa os sinais brutos de tensão (proporcionais à EA do processo) liberados pelo microfone de contato. No processamento o sinal bruto captado é amplificado, retificado, integrado e filtrado, sendo liberado na saída um sinal de tensão proporcional correspondente à EA-RMS (*root mean square*).

- Placa de aquisição de dados:

Esse hardware de aquisição de dados tem como função simplesmente receber, armazenar e enviar para um computador os dados analógicos vindos do sensor de proximidade e da unidade de tratamento de sinal de EA.

- Software de tratamento de sinais:

Este software utiliza os dados disponíveis na placa de aquisição de dados, para montar uma matriz vetorial que relaciona os dados de EA, posição angular do rebole e tempo. Com isso, o software gera uma imagem tridimensional que representa a superfície ativa do rebole. A Figura 14, mostra a tela do software desenvolvido por Gomes (2001).

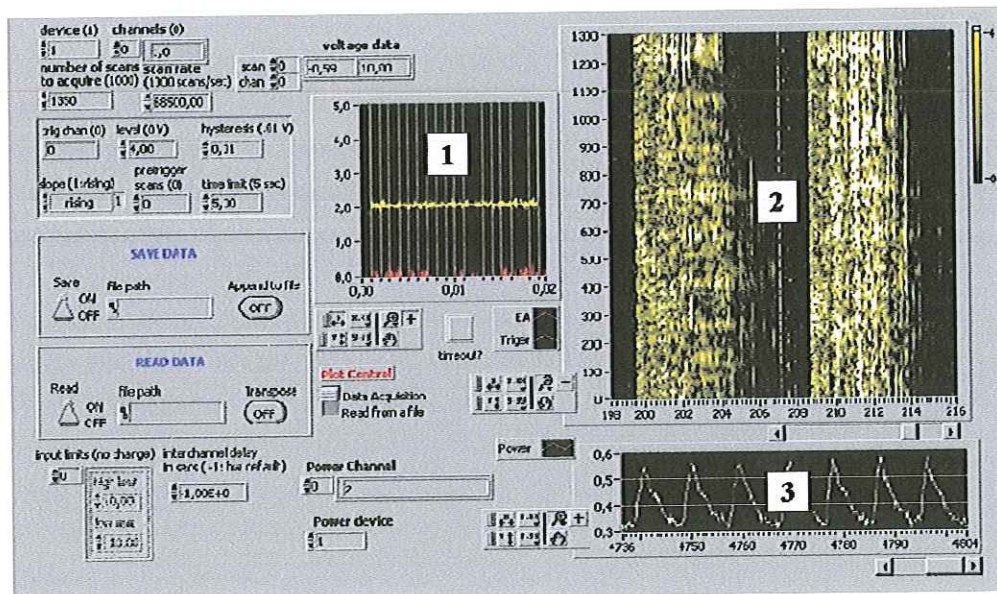


Figura 14 – Tela do software DEAR (Gomes, 2001).

Na Figura 14, pode-se observar três gráficos distintos 1, 2 e 3. O gráfico 1 mostra os sinais de trigger (em amarelo) e de EA. (em vermelho). Esse gráfico é utilizado como base para determinação dos parâmetros do hardware de aquisição de dados. Os parâmetros de hardware são alterados de acordo com a velocidade periférica do rebolo, de forma que os sinais de EA sejam sempre relacionados com uma volta completa do rebolo. Nesse gráfico o sinal de EA só irá aparecer quando houver algum contato entre o rebolo e a peça, ou entre o rebolo e o dressador.

O gráfico 2 da Figura 14 representa a imagem tridimensional da superfície ativa do rebolo. Esse gráfico apresenta significados diferentes de acordo com a natureza do monitoramento, dressagem ou retificação. Quando utilizado na retificação, a abscissa representa o tempo de retificação e a ordenada representa o perímetro do rebolo. A intensidade do gráfico representa a média da energia acústica liberada pelos grãos abrasivos que

estão em contato com a peça. Na dressagem, o gráfico 2 representa o mapa topográfico do rebolo, ou seja, a ordenada como no gráfico da retificação mostra o perímetro do rebolo e a abscissa mostra a largura do rebolo. Nesse gráfico a intensidade é dada pelo contato entre cada grão abrasivo do rebolo e do dressador. A Figura 15 explica esquematicamente como a imagem é formada à partir da interação entre o rebolo e o dressador.

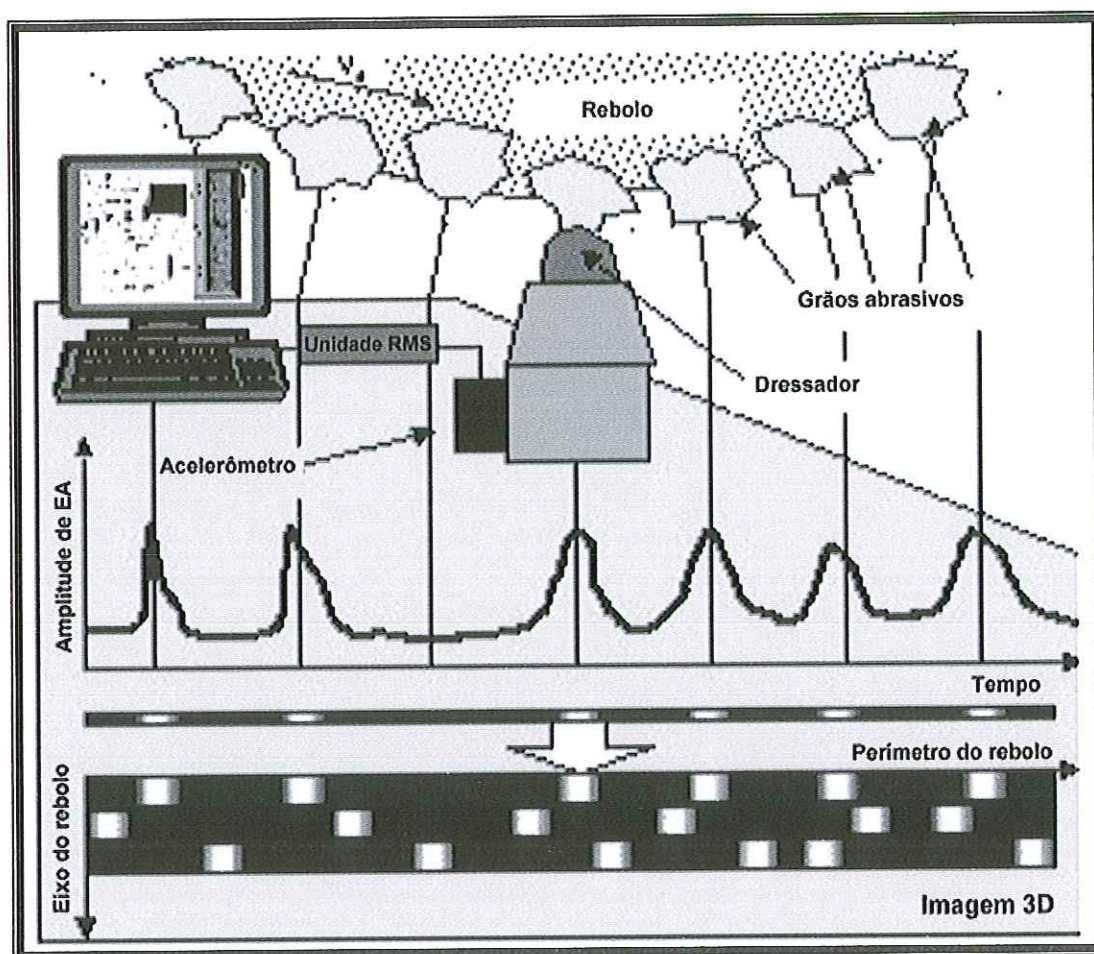


Figura 15 – Construção da imagem da superfície ativa do rebolo na dressagem.

Durante uma volta completa do rebolo, o contato de cada grão abrasivo do rebolo com o diamante do dressador, gera um pico de emissão acústica. Com isso, a cada sinal do trigger o software monta uma matriz que

relaciona a posição de cada grão abrasivo ao longo do perímetro com a amplitude do sinal de EA correspondente. Para transformar o valor do sinal de EA em imagem o software associa esse valor a uma cor. Ao longo do tempo, ou seja, com o movimento do dressador ao longo da largura do rebolo, a cada sinal do trigger são montadas novas matrizes que são dispostas instantaneamente lado a lado representando a largura do rebolo.

O significado prático dessa imagem é; quanto mais claro está a região do mapa, maior é a interação do diamante do dressador com o rebolo, ou seja, nessa região existe maior contato entre o rebolo e o diamante ou no mapa de retificação mais solicitada está a região e vice-versa.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

A realização deste trabalho contou com a colaboração de diversas empresas ligadas a retificação, entre elas; TRW Automotive Ltda, Saint-Gobain Abrasives – Winter, Zema Zelics, GE Fanuc, Sensis entre outras, que doaram respectivamente: peças para corpos de prova, rebolo e sistema de dressagem (motor e disco diamantado), reforma da máquina e CNC de arquitetura aberta e os servo motores da máquina.

Os ensaios foram executados na retificadora cilíndrica Zema G800HS do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (OPF) da Universidade de São Paulo – EESC (Figura 16). Essa máquina sofreu uma reforma durante o período de mestrado onde foram estabelecidas diversas condições especiais;  $v_s$  máxima de 120m/s, sistema de dressagem a alta velocidade e com disco diamantado, CNC de arquitetura aberta, medidor de vazão de fluido de corte, sistema de monitoramento de EA, etc. A Tabela 1 resume as especificações dos materiais utilizados para a realização deste trabalho. O desenho do rebolo e do dressador são mostrados nos Anexos I e II respectivamente.



Figura 16 – Retificadora Zema G800 do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (OPF - EESC).

Tabela 1 – Materiais utilizados no trabalho

DESCRIÇÃO	DADOS TÉCNICOS
Retificadora cilíndrica	Modelo – ZEMA G800HS $V_s$ máximo – 120m/s $P_{disp.}$ – 20cv Comando CNC – GE Fanuc 18iT $N_r$ máximo – 5760 rpm
Rebolo	B 181 124 V (408 x 136 x 15mm; camada útil de CBN – 8mm) – Saint Gobain
Dressador	Disco diamantado eletrolítico (130 x 25,4 x 1mm) - Saint Gobain

Nos experimentos conduzidos neste trabalho foram utilizados três tipos de válvulas de combustão interna de diferentes dimensões e compostas por diferentes materiais. As dimensões dos corpos de prova estão exemplificadas na Figura 17. A Tabela 2 resume as características e os materiais constituintes dos corpos de prova.

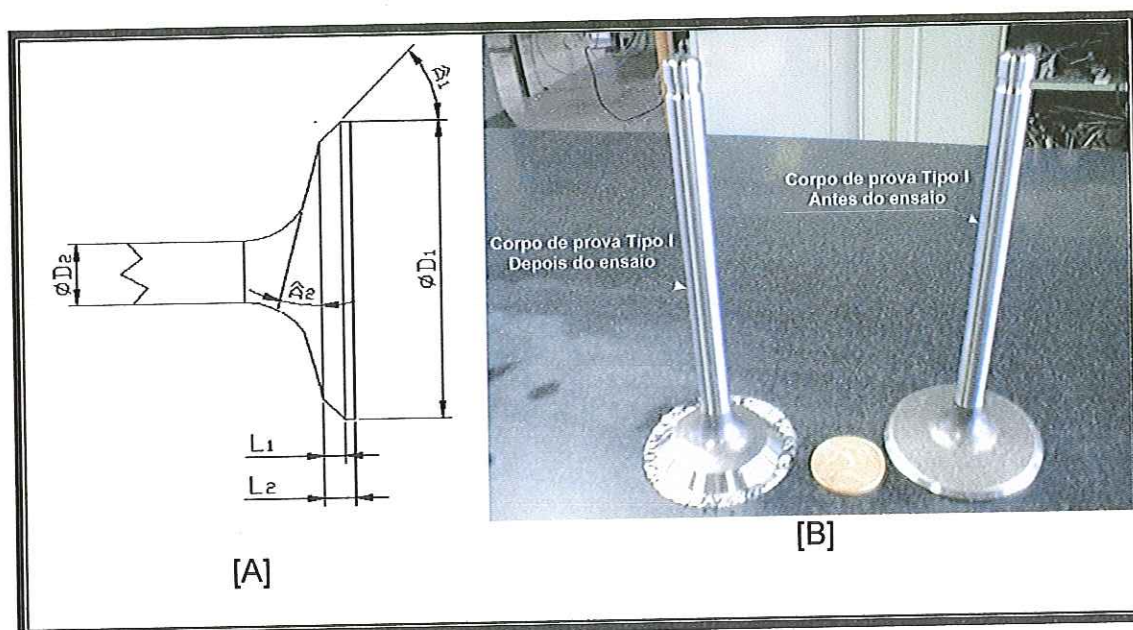


Figura 17 – [A] Dimensões principais dos Corpos de prova, [B] Exemplo do corpo de prova Tipo I antes e depois do ensaio.

Tabela 2 – Características e materiais retificados (Dimensões em mm).

	$D_1$	$D_2$	$\hat{A}_1$	$\hat{A}_2$	$L_1$	$L_2$	Material retificado
<b>TIPO 1</b>	55,63	9,44	45°15'	10°	1,48	3,00	40 Cr Mo V 4.7
<b>TIPO 2</b>	39,95	9,42	60°15'	R16.8	2,33	4,78	Pyromet 31
<b>TIPO 3</b>	45,82	7,82	45°	15°	3,25	4,85	TRW VMS-599

Ao longo de todos os experimentos foram retificados 150 corpos de prova em diferentes ensaios os quais serão detalhados mais adiante.



A captação dos dados foi realizada no próprio computador da máquina (PENTIUM III 850MHz), através do *hardware* de aquisição de dados modelo PCI-MIO-16XE-10 e do conector de I/O modelo BNC-2110 da National Instruments. O software de programação utilizado para desenvolver o sistema de mapeamento de reolos descrito na seção 1.42 foi o LabView 6.0i da National Instruments. Os sensores de EA e a unidade de tratamento de sinais de EA modelo DM-42 (Figura 19), utilizados neste trabalho foram doados pela empresa Sensis. Para a captação do sinal de *Trigger* foi utilizado um sensor de presença indutivo com saída analógica de 10V.

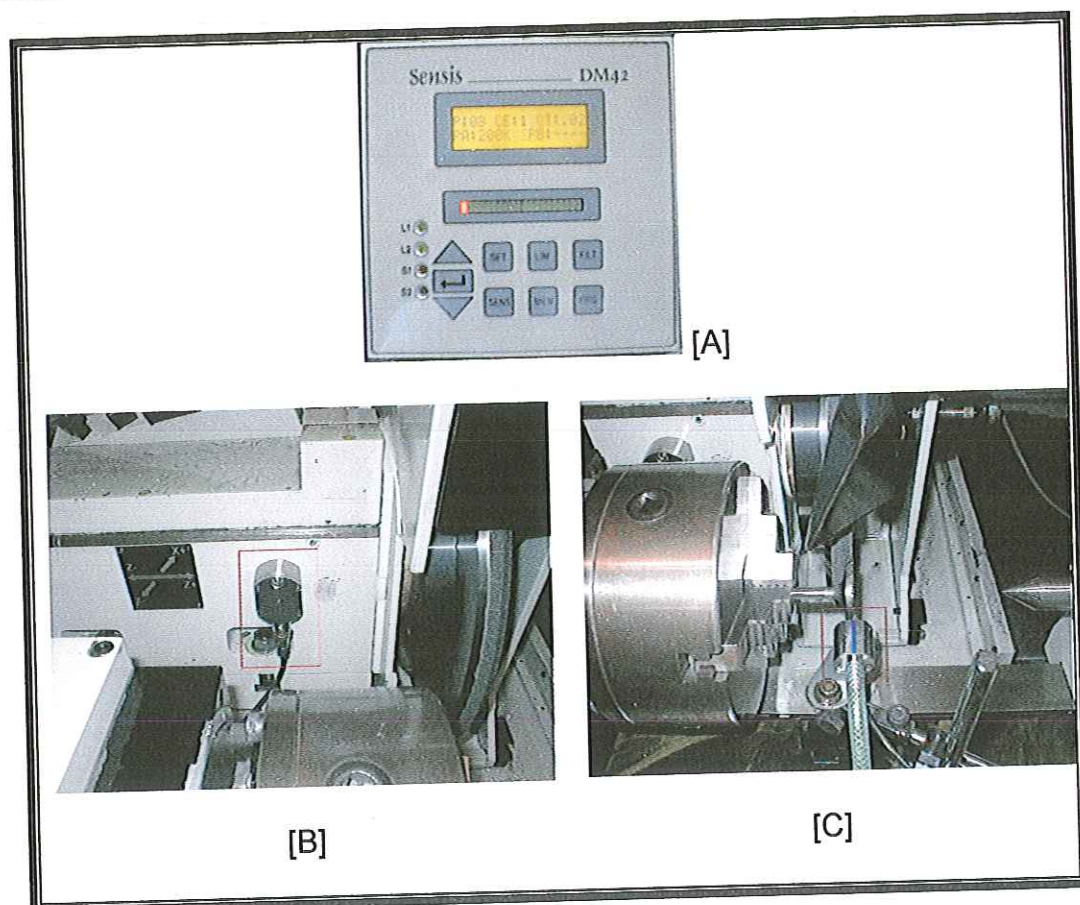


Figura 18 – [A] Unidade de processamento de sinal de EA SENSIS; [B] Sensor de EA diferencial de contato; [C] Sensor de EA por jato de óleo.

A vazão de óleo refrigerante foi monitorada através do medidor de vazão DMY-2030 da Contec. A Figura 19, mostra o esquema de captação e processamento de sinais utilizados nesse experimento.

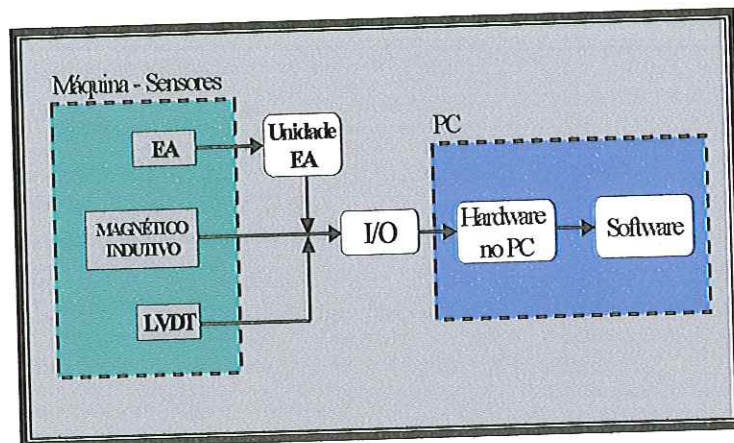


Figura 19 – Esquema do sistema de captação de dados utilizado nos experimentos.

No ensaio de otimização do ciclo de retificação foi utilizado um transdutor linear (LVDT) com saída analógica proporcional de 0 a 10V (Figura 20).

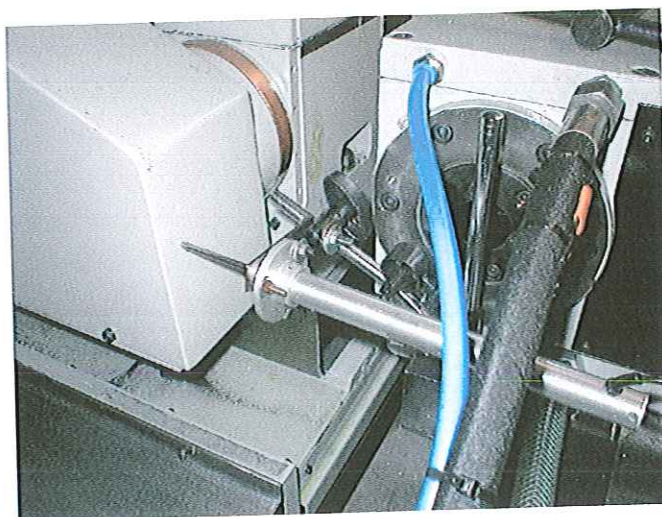


Figura 20 – Transdutor linear (LVDT).

A seguir serão descritos os métodos aplicados a cada experimento realizado neste trabalho.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Preparação da máquina para os experimentos

Antes da colocação do rebolo na máquina foi realizado o balanceamento estático do mesmo a fim de evitar possíveis vibrações indesejadas. O disco dressador também foi montado observando-se os níveis de batimento radial e axial recomendados. Nesse experimento o disco foi montado com batimento radial de  $5\mu\text{m}$  e o axial de  $3\mu\text{m}$ , conforme o esquema da Figura 21. Níveis de batimento radial e axial muito altos (acima de  $10\mu\text{m}$ ) influenciam na topografia do rebolo, bem como reduzem proporcionalmente a vida útil do disco dressador, uma vez que em trabalho, somente uma região deste irá tocar a superfície do rebolo.

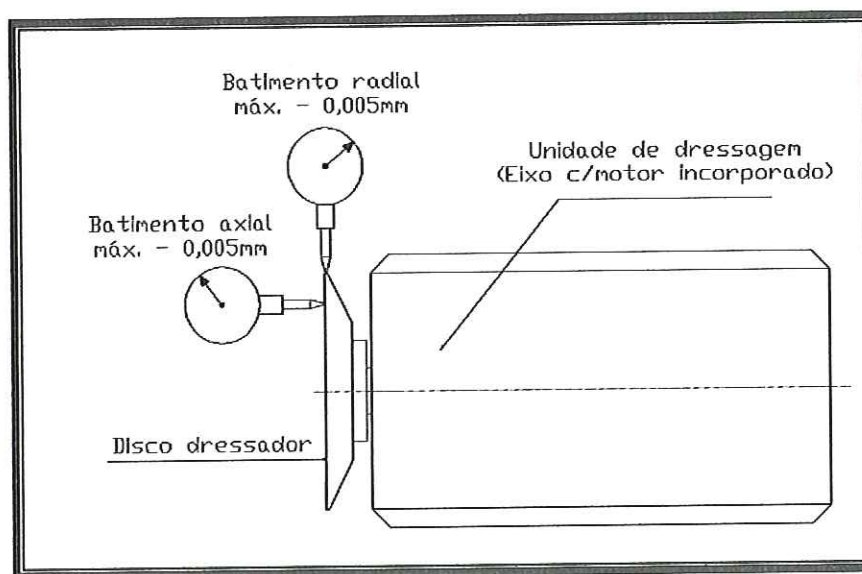


Figura 21 – Posicionamento dos relógios comparadores para centragem do disco dressador.

Após a montagem do rebolo no eixo da máquina, este foi dressado consecutivamente com profundidade de  $2\mu\text{m}$  (raio) até toda sua superfície estar tocando homogeneamente no dressador. A dressagem preliminar foi monitorada através do sistema DEAR utilizando um sensor de emissão acústica diferencial e a retificação dos corpos de prova através do sensor de EA por jato de óleo refrigerante, montado conforme mostrado na Figura 22.

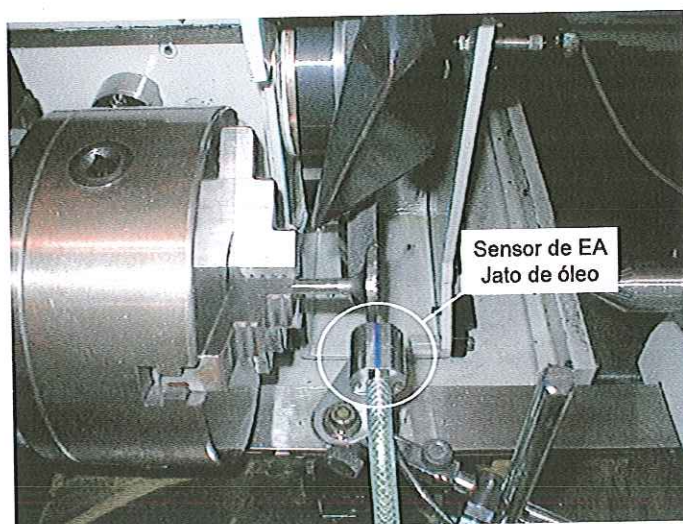


Figura 22 – Detalhe do sensor de emissão acústica de jato de óleo refrigerante.

### 3.2.2 Ensaio para estabelecimento das condições ideais de dressagem.

Esse experimento foi realizado com a finalidade de levantar curvas úteis para a otimização dos parâmetros de dressagem. Sendo assim, foram relacionadas as principais grandezas envolvidas na dressagem; a relação de velocidades ( $q_d$ ), a profundidade de dressagem ( $a_d$ ) (que foi mantida constante, tendo em vista que as necessidades de correção no perfil foram mínimas), e a velocidade de dressagem ( $v_d$ ). Como resultado, mediu-se a rugosidade superficial do corpo de prova, referente ao relacionamento dos parâmetros acima mencionados. Ao todo foram realizados dezoito ensaios de acordo com a matriz experimental da Tabela 3. Nesse trabalho adotou-se o sentido concordante de dressagem, ou seja, o vetor velocidade do disco dressador e do rebolo somam-se no ponto de contato.

Para cada par de valores de  $q_d$  e  $v_d$  foram realizados três passes de dressagem consecutivos com profundidade de 0,002mm no diâmetro. Os testes foram realizados partindo de  $v_d$ : 200, 100, 300 mm/min para cada  $q_d$ , no intuito de eliminar quaisquer influências dos testes anteriores.

Tabela 3 – Matriz do ensaio de dressagem.

Nr. Ensaio	$v_s$ [m/s]	$v_r$ [m/s]	$q_d$	$v_d$ [mm/min]
1	40	32,33	0,808	100
2	40	32,33	0,808	200
3	40	32,33	0,808	300
4	40	24,20	0,605	100
5	40	24,20	0,605	200
6	40	24,20	0,605	300
7	40	19,35	0,484	100
8	40	19,35	0,484	200
9	40	19,35	0,484	300
10	80	32,30	0,404	100
11	80	32,30	0,404	200
12	80	32,30	0,404	300
13	80	24,18	0,302	100
14	80	24,18	0,302	200
15	80	24,18	0,302	300
16	80	9,67	0,121	100
17	80	9,67	0,121	200
18	80	9,67	0,121	300

Após cada dressagem foram retificadas três peças consecutivas do corpo de prova TIPO 3 com os seguintes parâmetros de retificação:

- Profundidade de corte:  $a = 0,5\text{mm}$ ;
- Velocidade de avanço:  $v_f = 2\text{mm/min}$ ;
- Rotação da peça:  $N_w = 150\text{ rpm}$
- Tempo de alisamento:  $t_a = 5\text{s}$ .
- Corpo de prova: Tipo 3

Os programas CNC utilizados para realizar tanto a dressagem do rebolo como para efetuar a retificação estão descritos no ANEXO III.

### 3.2.3 Ensaio para a determinação do desgaste do rebolo na retificação dos diferentes materiais.

Foram realizados cinco ensaios de desgaste para o rebolo de CBN de liga vitrificada, onde se variou o material do corpo de prova e a velocidade de avanço na retificação. Nos três primeiros ensaios foram mantidas constantes as condições de retificação variando-se somente o material do corpo de prova. Nos dois outros ensaios adotou-se um tipo de material e variou-se a velocidade de avanço ( $v_f$ ). A Tabela 4 resume as condições em que os ensaios acima foram realizados.

Tabela 4 – Matriz experimental dos ensaios de desgaste.

Ensaio Nr.	Corpo de prova	Nr. de corpos de prova	$V_s$ [m/s]	$V_w$ [m/s]	$V_f$ [mm/min]	$t_a$ [s]
1	Tipo 3	60	100	0,35	2	5
2	Tipo 1	23	100	0,35	2	5
3	Tipo 2	21	100	0,35	2	5
4	Tipo 1	23	100	0,35	8	5
5	Tipo 1	23	100	0,35	16	5

Precedendo o início dos ensaios, a fim de eliminar quaisquer irregularidades presentes na superfície do rebolo, o mesmo foi dressado consecutivamente cinco vezes com profundidade de 0,002mm. Os corpos de

prova foram posicionados sempre na mesma posição na placa de fixação por intermédio de uma referência.

A fim de simular a retificação de um maior volume de peças retificadas, foram utilizadas profundidades de corte altas conforme descrito a seguir:

- Corpo de prova TIPO 1 →  $a = 7,5\text{mm}$ .
- Corpo de prova TIPO 2 →  $a = 2,5\text{mm}$ .
- Corpo de prova TIPO 3 →  $a = 3\text{mm}$ .

Após a retificação de todas as peças, os corpos de prova de desgaste, mostrados na Figura 23, foram retificados com profundidade de corte de  $0,25\text{mm}$ , a fim de imprimir a superfície do rebolo desgastada.



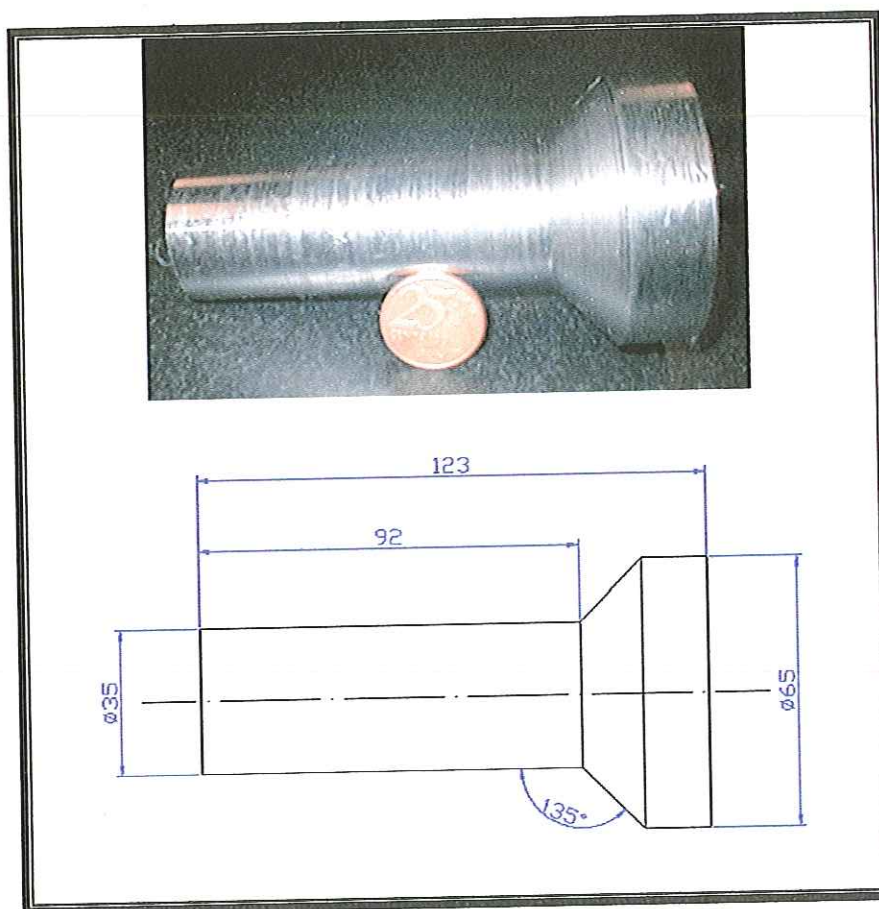


Figura 23 – Corpo de prova para impressão do perfil do rebolo após ensaio de desgaste.

A evolução do desgaste do rebolo foi avaliada através da comparação dos mapas topográficos do rebolo ao longo da retificação dos corpos de prova, e através do valor de desgaste encontrado no corpo de prova de desgaste.

### 3.2.4 Ensaio para otimização dos ciclos de retificação

Os ensaios de otimização dos ciclos de retificação foram realizados para determinar o melhor valor de velocidade de avanço de retificação, levando em consideração os parâmetros reais de profundidade de corte para o corpos de prova do TIPO 1. Nesse ensaio foram comparados os resultados experimentais realizados no laboratório do OPF com os resultados reais colhidos na empresa fabricante de válvula para motores de combustão interna, sendo que os parâmetros avaliados foram: a rugosidade e a circularidade da peça após a retificação e o tempo de retificação.

Foram avaliadas duas estratégias de retificação; a primeira onde o corpo de prova foi retificado em mergulho e com a saída do rebolo convencional ( $90^\circ$ ), e a segunda onde o corpo de prova também foi retificado em mergulho, porém a saída do rebolo foi realizada em  $45^\circ$ , ou seja, alisando a região retificada sem a remoção de material. Essa segunda estratégia será chamada daqui para frente neste trabalho de retificação com balanço. A Tabela 5 mostra a matriz experimental utilizada nesses ensaios.

Tabela 5 – Matriz experimental dos ensaios de otimização de ciclo de retificação.

Ensaio Nr.	Balanço?	Vs [m/s]	Vw [m/s]	Vf [mm/min]	Tempo alisamento (s)
1	Não	100	0,35	2	5
2	Não	100	0,35	4	5
3	Não	100	0,35	8	5
4	Não	100	0,35	16	5
5	Não	100	0,35	32	5
6	Não	100	0,35	64	5
7	Não	100	0,35	128	5
8	Não	100	0,35	256	5
9	Sim	100	0,35	2	5
10	Sim	100	0,35	4	5
11	Sim	100	0,35	8	5
12	Sim	100	0,35	16	5
13	Sim	100	0,35	32	5
14	Sim	100	0,35	64	5
15	Sim	100	0,35	128	5
16	Sim	100	0,35	256	5

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIOS DE DRESSAGEM

#### 4.1.1 Determinação dos parâmetros de dressagem

Os resultados obtidos da medição da rugosidade média dos corpos de prova em relação à velocidade de dressagem ( $v_d$ ) e à relação de velocidades ( $q_d$ ) é mostrado na Figura 24.

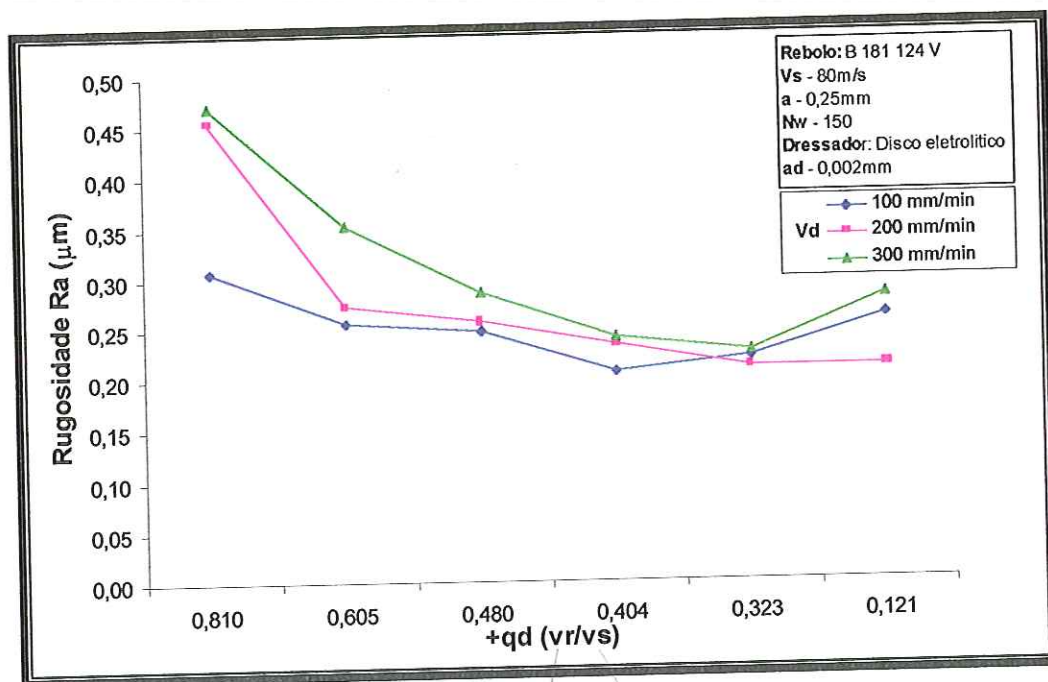


Figura 24 – Curva para otimização dos parâmetros de dressagem.

Observa-se a partir da figura acima que a qualidade superficial da peça é intensamente afetada pela combinação das velocidades do rebolo e do dressador,  $v_s$  e  $v_w$  respectivamente, e pela velocidade de dressagem  $v_d$ . É visto que quanto menor é a relação  $q_d$ , ou seja, maior é a velocidade do

rebolo em relação à velocidade do disco dressador, menor é a agressividade da superfície do rebolo. Devido a esse motivo observa-se uma melhoria no acabamento superficial da peça.

A Figura 25 compara a influência dos dois principais parâmetros de dressagem ( $q_d$  e  $v_f$ ). Nessa figura são apresentados como resultados as médias dos valores utilizados na figura 24 a fim de conhecer o impacto dos parâmetros sobre a rugosidade da peça.

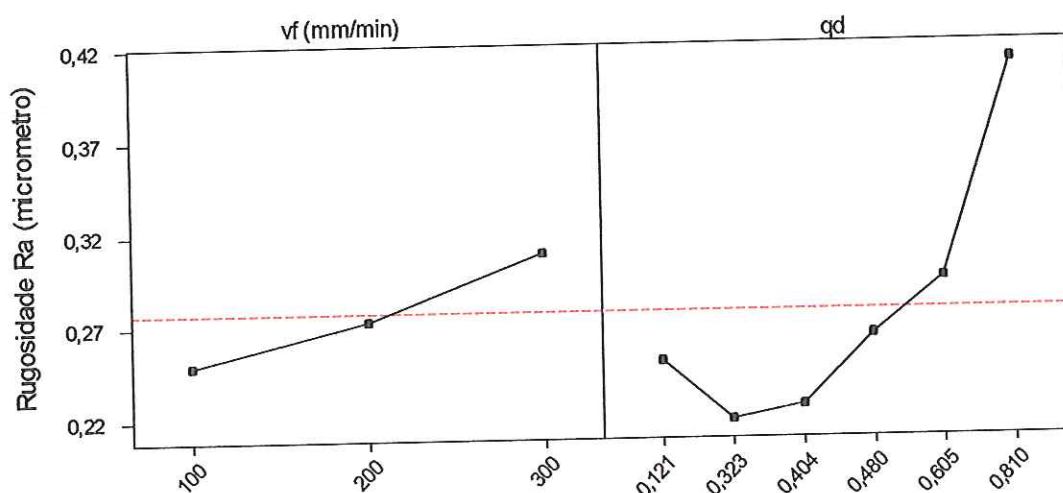


Figura 25 – Influência dos parâmetros de dressagem na rugosidade da peça.

A partir dos valores médios mostrados na figura acima é possível concluir que a relação entre as velocidades do disco dressador e do rebolo tem maior influência sobre a rugosidade da peça que a velocidade de avanço no caso estudado. Essa conclusão também se confirma com o estudo de Anova (*Analysis of Variances*) dos resultados adquiridos. Nesse estudo, o P-valor para a relação  $q_d$  foi de 0,003 e para  $v_f$  de 0,429, afirmando que estatisticamente a variação dos valores de  $q_d$  é significativa em relação ao resultado da rugosidade da peça, o que não se verifica para  $v_f$ .

Voltando a observar a Figura 24, nota-se que os valores de rugosidade caem até o valor de  $q_d$  igual a 0,323. Abaixo disso, a rugosidade da peça volta a atingir níveis de acabamento mais pobres. Isso ocorre, pois após a dressagem o volume de poros presentes na superfície do rebolo é bem pequeno e insuficiente para alojar os cavacos removidos na retificação. Com isso, ocorre um aumento da temperatura na zona de retificação, devido ao "entupimento" prematuro desses poros, fazendo com que cada vez mais os cavacos se fundam à superfície do rebolo, aumentando o atrito com a superfície da peça.

Outro fator determinante na agressividade do rebolo, ou melhor, na rugosidade da peça retificada é a velocidade de dressagem. Observa-se que quanto maior é a velocidade de dressagem maior é a rugosidade encontrada na peça.

É interessante notar que a curva mostrada na Figura 24, segue o mesmo padrão das curvas apresentadas por Schmidt apud Hitchiner (1999), no estudo da dressagem em mergulho com rolos diamantados. Analogamente ao estudo de Schmidt, a partir dessa curva, é possível prever a rugosidade superficial de superligas retificadas com rebolos de CBN vitrificado, reduzindo assim, o tempo da curva de aprendizado na retificação de materiais DTG.

#### 4.1.2 Monitoramento *on-line* da topografia do rebolo.

A perda de agressividade do rebolo observada com a redução da relação  $q_d$  e da velocidade  $v_d$ , mostrada na Figura 24, deve-se à sobreposição dos efeitos gerados na superfície do rebolo pelos diversos grãos de diamante do dressador. A esse fenômeno dá-se o nome de macroefeito de dressagem.

A redução do valor desses parâmetros de dressagem faz com que ocorra o fechamento da estrutura do rebolo CBN, semelhantemente ao que acontece na dressagem convencional de passagem utilizando dressadores estáticos. Esse fenômeno piora a capacidade de corte e conseqüentemente a capacidade de remoção de material da peça pelo rebolo. A Figura 26, esquematiza o fenômeno de dressagem para rebolos CBN vitrificado.

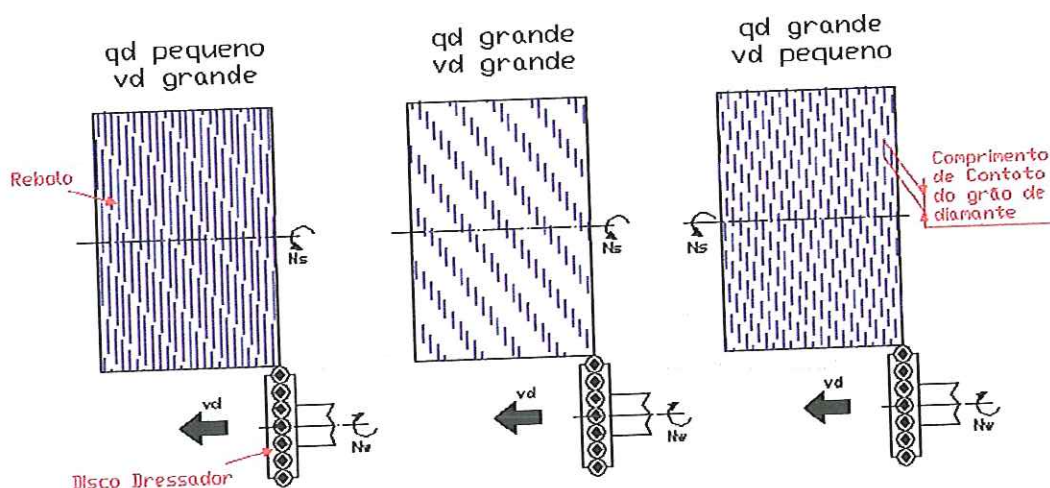


Figura 26 – Esquema do efeito dos parâmetros de dressagem na superfície do rebolo.

Através do mapa topográfico do rebolo realizado na operação de dressagem foi possível observar o efeito exemplificado na Figura 26. A Figura 27, apresenta esse mapa topográfico que representa a interação entre o disco dressador e a superfície do rebolo em quatro passes consecutivos de dressagem realizados com profundidade de dressagem igual a 0,001mm no raio do rebolo.

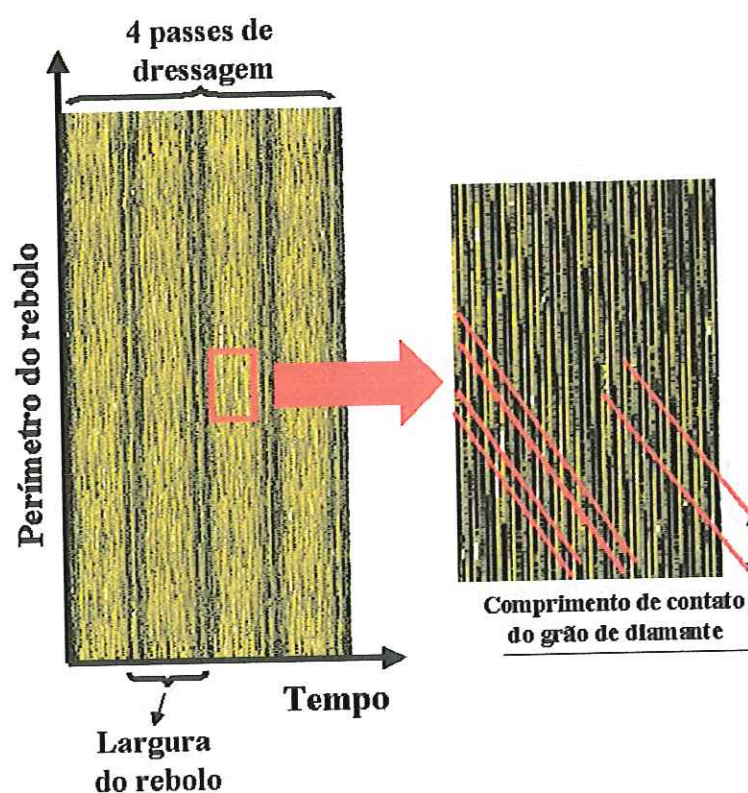


Figura 27 – Mapa topográfico do rebolo,  $vd = 100\text{mm/min}$ ,  $qd = 0,323$  (detalhe do macroefeito da dressagem).

Devido à distribuição aleatória dos grãos de diamante sobre a superfície do dressador eletrodepositado, ocorre a sobreposição do efeito do



contato dos diversos grãos do dressador com a superfície do rebolo gerando o padrão visual "picotado" observado na Figura 27.

Porém, o fechamento da estrutura do rebolo, reduzindo a velocidade de dressagem  $v_d$ , permite alcançar menores valores de rugosidade na retificação de superligas à base de níquel, cromo e cobalto.

Outro fator importante e que ressalta a necessidade do monitoramento *on-line* da topografia do rebolo durante a operação de dressagem é o alto custo do rebolo de CBN vitrificado. Sendo assim, a partir do monitoramento busca-se otimizar a profundidade de dressagem e a quantidade de passes necessários para se estabelecer as condições topográficas ideais para o corte de material. Visando esse ideal, a Figura 28 mostra as imagens do primeiro e do último passe da dressagem realizados antes dos experimentos para determinação da curva de  $q_d \times v_d$  para o rebolo de CBN vitrificado. Nessa figura, é possível observar que o defeito superficial (listra vertical no canto direito) apresentado no primeiro passe, foi completamente eliminado no 60° passe de dressagem, e a superfície do rebolo tornou-se completamente homogênea.

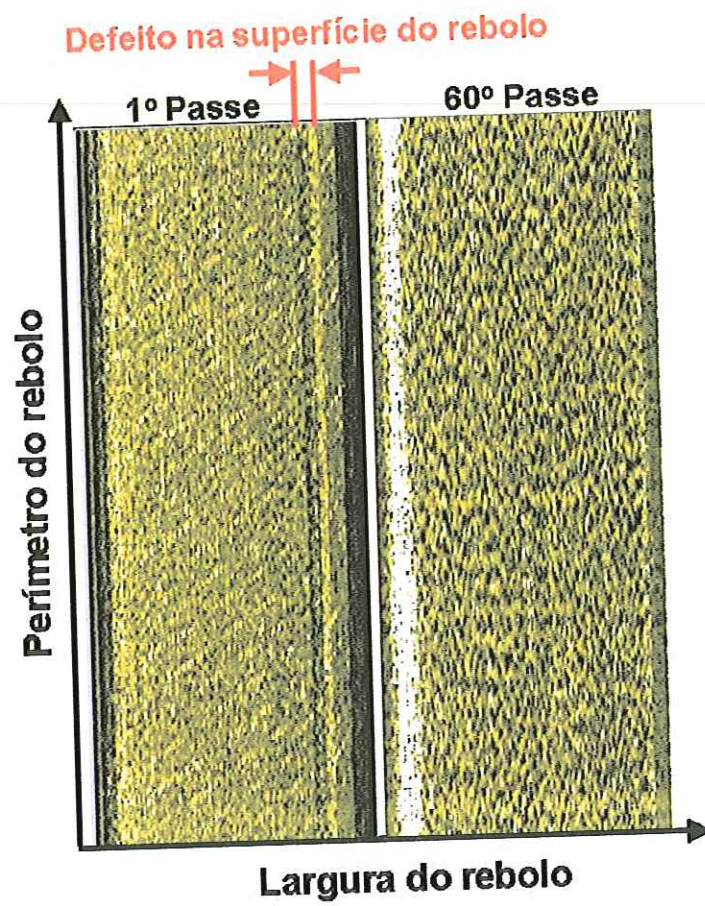


Figura 28 – Primeiro e último mapa da dressagem preliminar.

## 4.2 ENSAIOS DE DESGASTE DO REBOLO DE CBN.

Os ensaios de desgaste do rebolo CBN vitrificados na retificação de diferentes tipos de superligas foram conduzidos a fim de determinar seu comportamento ao longo de sua utilização. Com isso, mediu-se a rugosidade e a circularidade do corpo de prova e o desgaste efetivo da superfície do rebolo. As figuras 29, 30 e 31, mostram respectivamente os resultados do comportamento do rebolo ao longo da retificação dos materiais 40CrMoV4.7, Pyromet 31 e VMS-599, utilizando  $v_f$  de 2mm/min,  $v_s$  de 100m/s,  $v_w$  de 0,35m/s e tempo de alisamento de 5s.

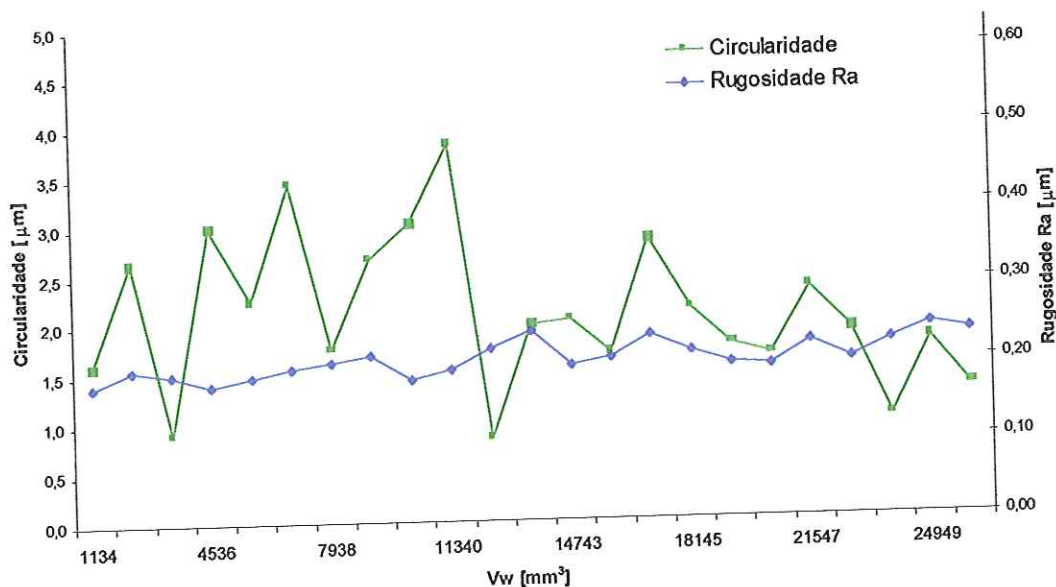


Figura 29 – Comportamento da rugosidade e da circularidade para o material 40CrMoV4.7 em função do volume de material retificado  $V_w$ .

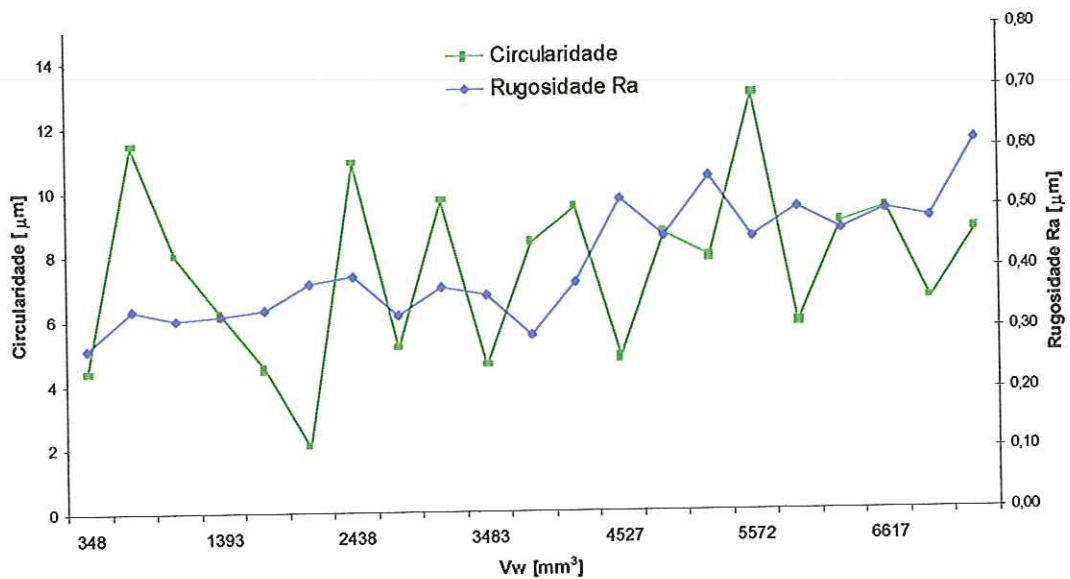


Figura 30 - Comportamento da rugosidade e da circularidade para o material Pyromet 31 em função do volume de material retificado  $V_w$ .

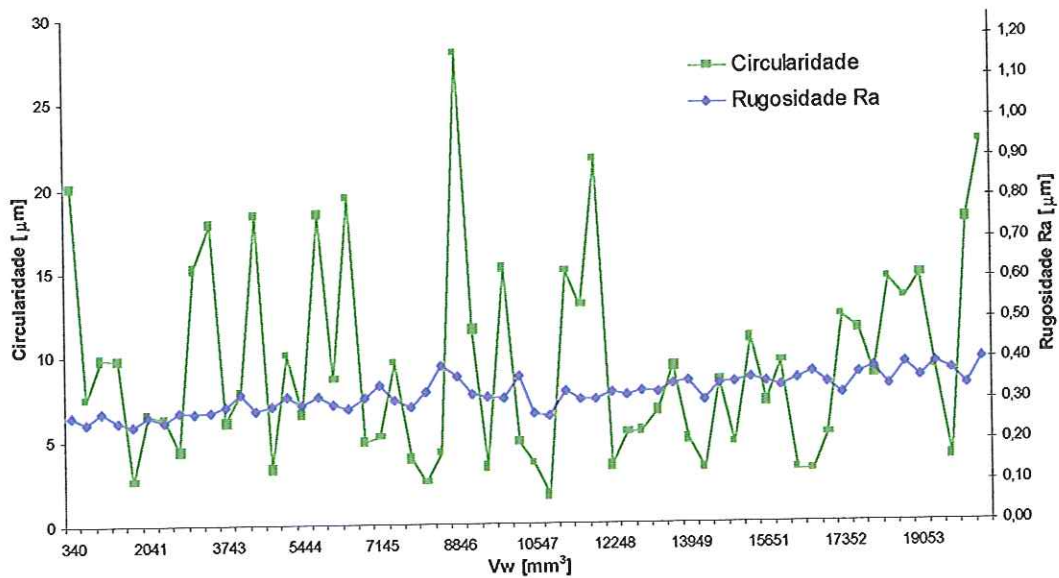


Figura 31 – Comportamento da rugosidade e da circularidade para o material TRW VMS-599 em função do volume de material retificado  $V_w$ .

As figuras acima apontam um aumento da rugosidade superficial da peça retificada em relação ao aumento do volume de material retificado. Isso

se explica devido ao fato do rebolo ir perdendo sua agressividade com o aumento do volume de material retificado, ou seja, ocorre o empastamento ou "entupimento" do rebolo com aumento o volume de material retificado. Com isso, aumenta o atrito entre as superfícies do rebolo e da peça devido ao acréscimo no contato entre metal-metal.

As figuras 32 e 33 mostradas abaixo, detalham o efeito das velocidades de avanço do rebolo, 8mm/min e 16mm/min respectivamente, durante a retificação do material 40CrMoV4.7.

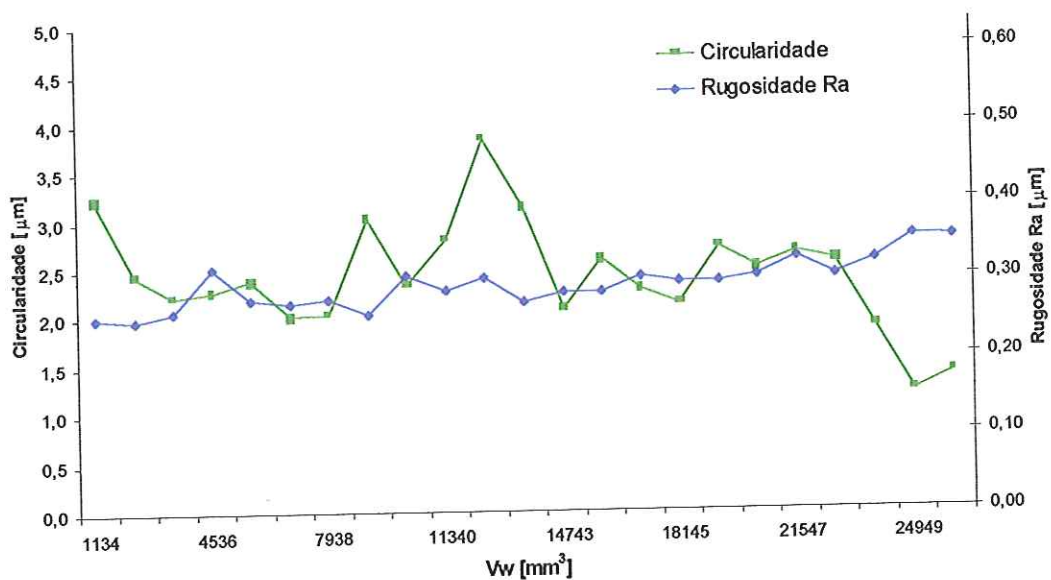


Figura 32 - Comportamento da rugosidade e da circularidade para o material 40CrMoV4.7 em função do volume de material retificado ( $V_w$ ) e  $v_f$  de 8mm/min.

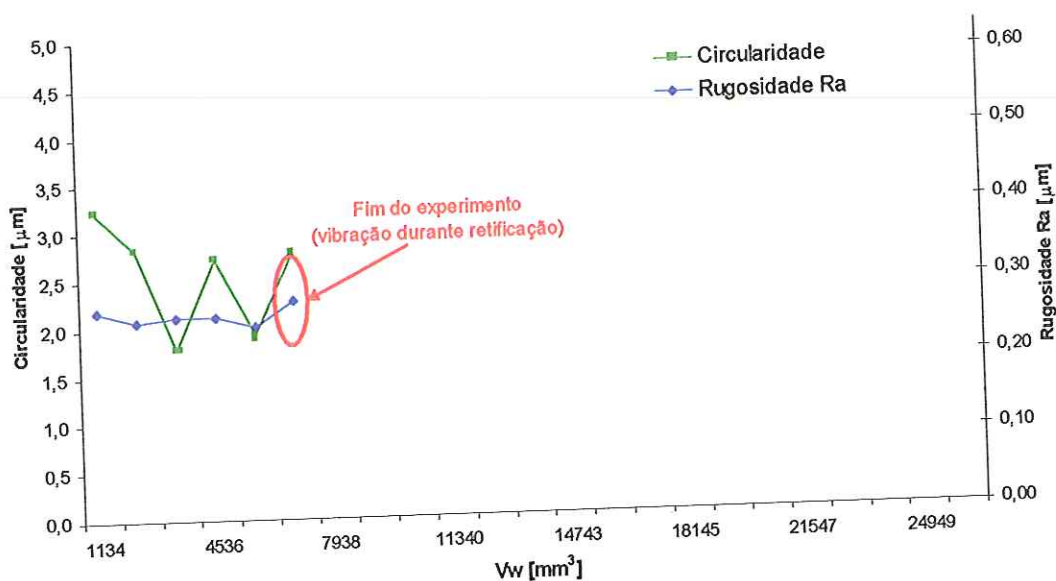


Figura 33 - - Comportamento da rugosidade e da circularidade para o material 40CrMoV4.7 em função do volume de material retificado ( $V_w$ ) e  $v_f$  de 16mm/min.

Comparando os valores dos gráficos (Figura 29, Figura 32 e Figura 33), pode-se notar que, quanto maior é o volume de material retificado, maior é a rugosidade superficial da peça nos três casos. Isso explica-se, pois com o aumento da velocidade de avanço ( $v_f$ ), a temperatura na zona de contato entre o rebolo e a peça aumenta, ocasionando assim, um maior desgaste e um maior empastamento na superfície do rebolo.

Pode-se observar na Figura 33 a interrupção do ensaio na retificação do sexto corpo de prova. O término do experimento foi declarado devido o surgimento de uma vibração indesejada durante a retificação, a qual ocasionou em um defeito superficial no rebolo, impedindo o prosseguimento do experimento sem que antes o rebolo fosse dressado.

Para efeito de comparação entre os materiais, a Figura 34 apresenta um gráfico onde são comparadas as tendências das curvas de rugosidade

mostradas nas figuras 29, 30 e 31. Essas tendências correspondem às regressões lineares dos valores experimentais obtidos.

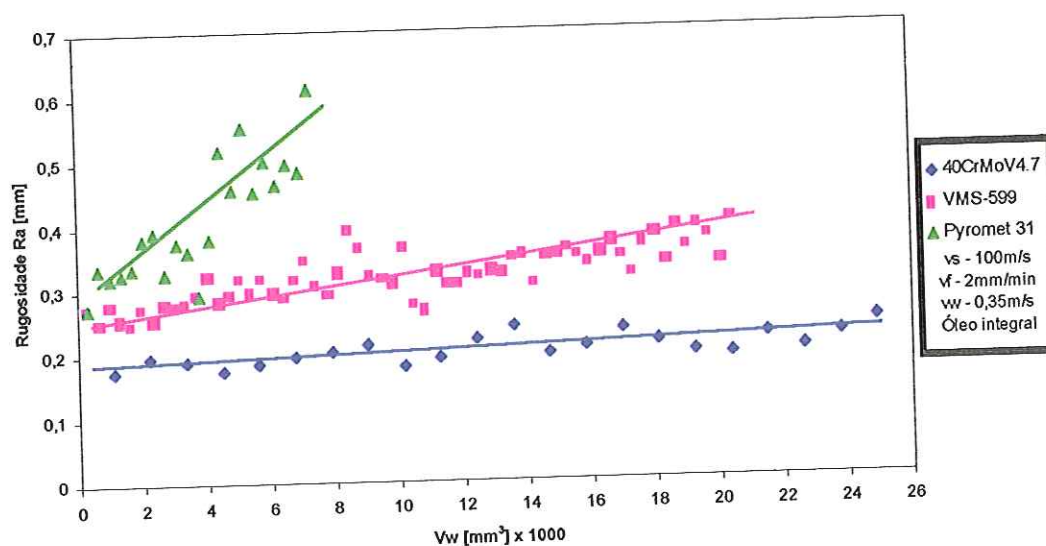


Figura 34 - Comparação da rugosidade do corpo de prova em diferentes materiais após a retificação com rebolo CBN vitrificado.

Do gráfico acima, pode-se concluir que a composição do material do corpo de prova tem grande influência no desgaste e empastamento da superfície do rebolo, bem como na qualidade superficial da peça. Fica evidente que, quanto mais Ni na composição do material, caso do Pyromet 31 58%Ni, mais maleáveis são os cavacos, e com isso, haverá o empastamento do rebolo prematuramente. Ao contrário, quanto mais Fe na composição do material, mais fácil os cavacos são removidos facilitando seu escoamento através da ação do fluido de corte. Contudo, o tratamento térmico do material também pode influenciar no desgaste do rebolo, e deve ser levado em consideração em uma análise mais profunda.

Os resultados de circularidade apresentados nas figuras 29 à 33, não são conclusivos em relação ao comportamento do rebolo CBN, uma vez que os resultados mostram-se muito aleatórios e dispersos. Porém, observou-se que nas Figuras 30 e 31, onde os corpos de prova são bi-metálicos (material da cabeça da válvula é diferente do material da haste), os resultados de circularidade se mostraram acima do especificado para a operação ( $10\mu\text{m}$ ). Nessas peças os dois materiais são soldados por uma operação de solda por fricção que por sua vez permite um erro de concentricidade de  $10\mu\text{m}$ , que é o valor de tolerância para a operação de retificação.

Contudo, para tentar achar uma explicação para o fenômeno ocorrido na retificação dos três materiais, foram comparados os gráficos de circularidade gerados pelo aparelho TAILY-ROUND Tailor-Robson modelo TR252. O Anexo IV apresenta os gráficos de circularidade obtidos nos experimentos, estando estes agrupados de acordo com o tipo de material e velocidade de avanço utilizada na retificação.

Da análise das figuras do Anexo IV, pode-se observar a existência de um padrão visual nos gráficos de circularidade para a maioria dos corpos de provas, independentemente do tipo de material retificado e da velocidade de avanço utilizada. Em todos os casos, se vê três formas principais que influenciam na qualidade das peças retificadas: ovalização, erro geométrico devido à má fixação e desbalanceamento do rebolo. A Figura 35, mostra um exemplo de gráfico de circularidade obtido nos experimentos e que mostra os três efeitos.



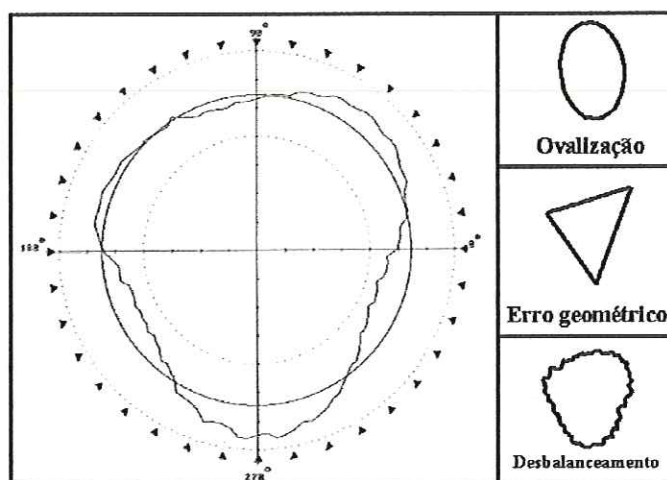


Figura 35 – Exemplo de gráfico de circularidade obtido da retificação com rebolo CBN vitrificado.

Para comprovar a existência desses três fatores mencionados acima; ovalização, erro geométrico e desbalanceamento do rebolo foi realizada a análise harmônica da circularidade do corpo de prova. A Figura 36, mostra o resultado.

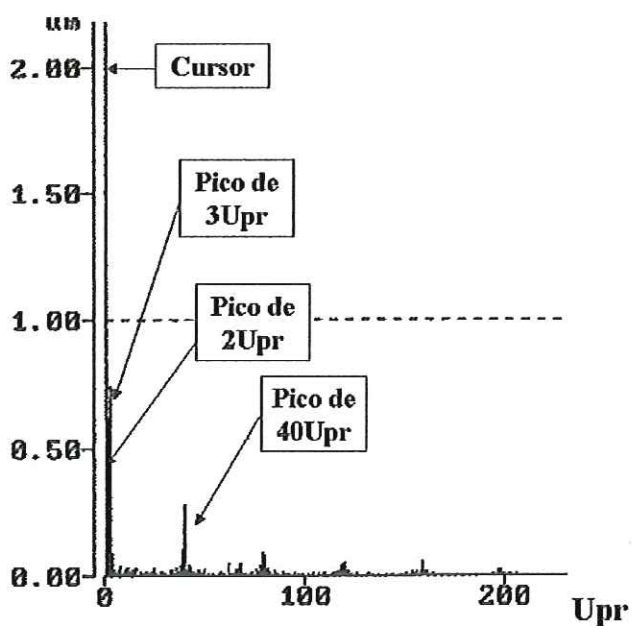


Figura 36 – Análise harmônica de um corpo de prova de 40Cr Mo V4.7.

A partir da Figura 36 é possível observar 7 picos na análise harmônica, sendo eles: 2, 3, 40, 80, 120, 160 e 200 Upr (*Units per revolution*). Todos os picos mencionados anteriormente estão associados aos três erros observados no gráfico de circularidade da peça.

A circularidade de  $0,6\mu\text{m}$  em 2Upr, se deve ao possível sobre-aquecimento da zona de retificação devido ao grande volume de material removido por corpo de prova, apesar da excelente condutividade térmica dos grãos de CBN do rebolo. Apesar do alto volume de fluido aplicado na retificação, 130L/min, isso ocorre devido à má penetração do fluido na zona de contato, reduzindo assim a eficiência da troca de calor entre a peça e o fluido de corte.

O erro geométrico da superfície da peça (forma triangular - 3Upr), se dá devido à má fixação da peça, sendo que essa forma depende muito do tipo de fixação. No caso a forma triangular, combina com a fixação em três pontos realizada pela placa de três castanhas da máquina. Neste sistema, a rigidez da fixação não é constante ao longo de uma volta da peça.

O desbalanceamento do rebolo é caracterizado pelos 40 lóbulos (40Upr) existentes ao longo do perímetro das figuras. Os demais picos, 80, 120, 160 e 200 Upr são harmônicas da própria rotação do rebolo, que ao longo da retificação se auto excita, gerando a forma senoidal observada na Figura 35.

Da Figura 36, conclui-se que o pico mais influente no valor nominal de circularidade medido é o valor referente ao erro geométrico causado pelo má assentamento da haste do corpo de prova sobre as castanhas da placa. Em

segundo observa-se a influência da má refrigeração na retificação e em terceiro a influência do desbalanceamento do rebolo na qualidade da peça retificada.

É possível associar o desbalanceamento do rebolo à quantidade de lóbulos presentes no gráfico de circularidade da peça retificada. Caso o valor da divisão entre a rotação do rebolo pela rotação da peça (Eq. 10), coincidir com o número de lóbulos presentes na superfície da peça, isso indica que existe um desbalanceamento dinâmico presente no rebolo durante a retificação.

$$U_{pr} = \frac{N_s}{N_w} = \frac{v_s}{d_s \cdot \pi} \quad (10)$$

No caso da Figura 36, é possível comprovar esse fenômeno através dos seguintes dados do processo:

- $v_s - 100\text{m/s}$
- $d_s - 400\text{mm}$
- $N_w - 120\text{rpm}$

Através da equação 10 e utilizando os valores no Sistema Internacional (SI) tem-se:

$$U_{pr} = \frac{100 \cdot 60000}{400 \cdot \pi \cdot 120} = 39,8 \approx 40$$

Com isso é possível comprovar a influência do desbalanceamento do rebolo na qualidade da peça retificada. A correção deste problema poderia ser executada de duas formas; através do balanceamento em processo do rebolo, realizado sem a interrupção do ciclo de trabalho, ou através do balanceamento estático do rebolo CBN, porém para isso é necessário retirar o rebolo da máquina.

Foi analisada também a influência da velocidade de avanço ( $v_f$ ) em relação à rugosidade dos corpos de prova. Esse ensaio foi realizado com o material 40CrMoV4.7, nas seguintes condições:  $v_s$  de 100m/s,  $v_w$  de 0,35m/s, tempo de alisamento de 5s. O resultado da comparação do efeito de três valores de  $v_f$  é mostrado na Figura 37.

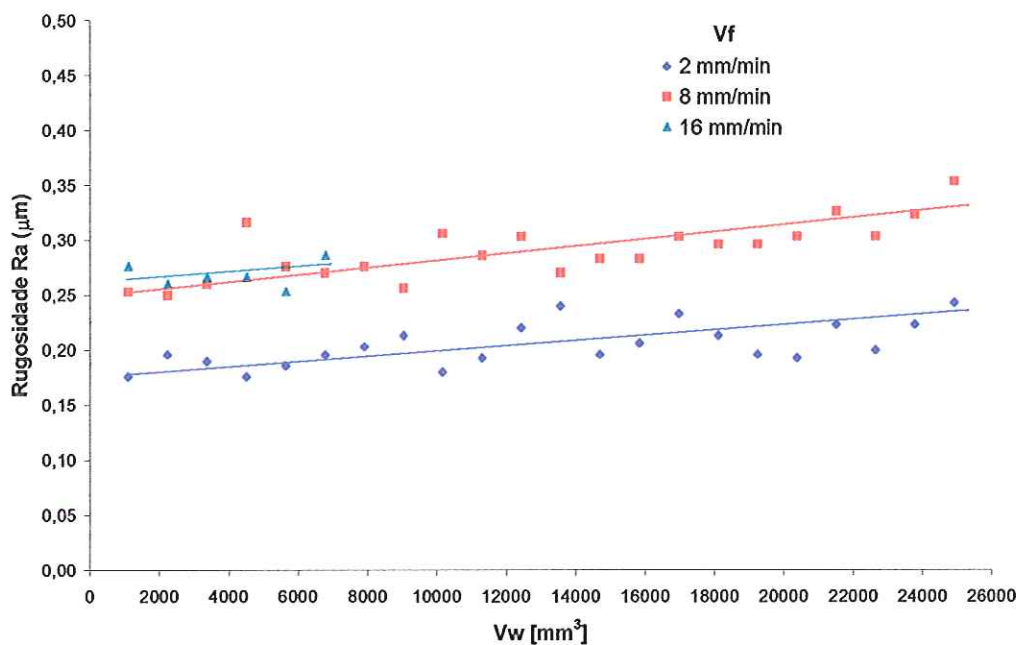


Figura 37 – Influência da velocidade de avanço no acabamento superficial do corpo de prova.

Observa-se claramente que o aumento da velocidade de avanço tem impacto negativo sobre o acabamento superficial, pois quanto maior é a velocidade de avanço ( $v_f$ ), maior são os valores da rugosidade da peça em relação ao volume de material retificado. Porém, é visto que para as velocidades de avanço escolhidas o aumento do valor da rugosidade não é proporcional ao aumento de  $v_f$ , uma vez que ocorreu um acréscimo de aproximadamente 50% nos valores de rugosidade para um aumento de 400% de  $v_f$ . Outro fato interessante observado na Figura 37 é que as inclinações das curvas de rugosidade para as velocidades de 2 e 8 mm/min são muito parecidas, indicando que o aumento da velocidade de avanço tem pouca influência sobre a taxa de desgaste do rebolo, porém é muito influente no acabamento superficial da peça retificada. Para  $v_f$  de 16mm/min, não foi observado esse fenômeno, pois devido à alta taxa de remoção de material ( $Q_w$ ), ocorreu uma constante renovação de grãos abrasivos até  $V_w$  de 6804mm<sup>3</sup>. Nessa situação, a alta frequência do corte imposta pelos grãos abrasivos do rebolo excitaram o corpo de prova em sua frequência natural, de maneira que ocorreu um aumento da amplitude de vibração, resultando no severo desprendimento dos grãos de CBN ao longo do perímetro do rebolo. Sendo assim, não foi possível prosseguir o ensaio, pois o rebolo não apresentava condições topográficas ideais para que a retificação se desse de forma segura. A Figura 38 mostra a foto da superfície do rebolo CBN vitrificado após o desprendimento dos grãos abrasivos de CBN durante a retificação com  $v_f$  de 16mm/min.



Figura 38 – Situação do rebolo após acidente de retificação com  $v_f$  de 16mm/min.

A fim de identificar se a peça foi excitada em sua frequência natural durante a retificação, foi realizada uma análise harmônica para determinar a frequência natural da peça quando fixada analogamente à placa de três castanhas. Para tanto, prendeu-se um corpo de prova em uma morsa, e na sequência excitou-a com a aplicação de uma força externa na região da cabeça da válvula. A Figura 39, mostra o esquema do procedimento utilizado. Foram utilizados os seguintes equipamentos: Sensor de EA - Sensis, Unidade de EA modelo DM-42 - Sensis, placa de aquisição marca National Instruments e software para análise espectral programado em Labview.

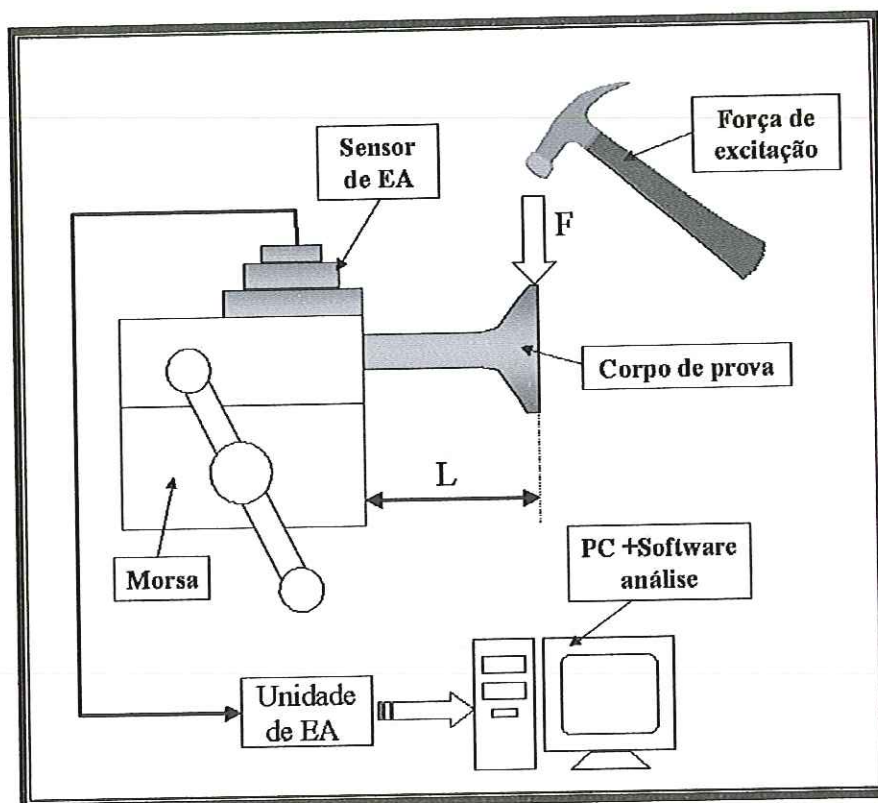


Figura 39 – Esquema do ensaio para determinação da frequência natural de vibração do corpo de prova.

O gráfico abaixo (Figura 40), apresenta o resultado da análise harmônica descrita acima. Dessa figura observa-se que quando a extremidade do corpo de prova é fixada à 55mm da placa, analogamente ao que ocorreu na prática, ocorre um pico de vibração na frequência de 720Hz aproximadamente.

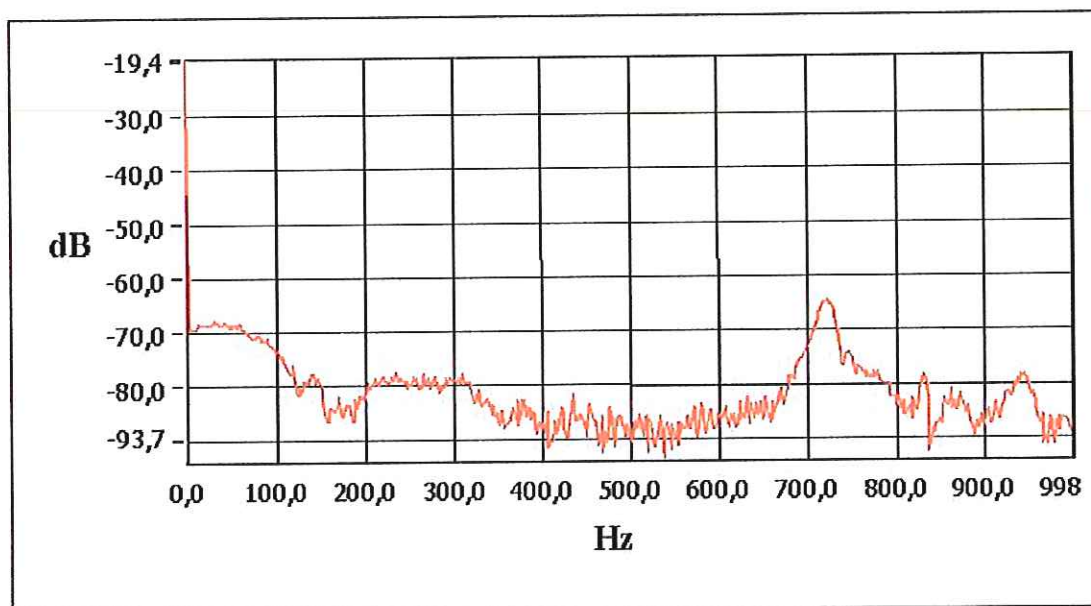


Figura 40 – Análise espectral do corpo de prova que vibrou na retificação com  $v_f$  de 16mm/min.

Na figura 40, a abscissa do gráfico representa a frequência com que o fenômeno de vibração ocorre na peça. O eixo da ordenada representa a amplitude da vibração em  $V_{rms}$  em relação à frequência correspondente.

Conclui-se que a partir da alta frequência de corte dos grãos abrasivos, aliada à grande velocidade de avanço empregada durante a retificação, ocorreu a excitação da peça em sua frequência natural através da superfície ondulada do rebolo. Ao longo do ciclo de retificação, houve o aumento dessa frequência de excitação até o ponto onde a mesma entrou em fase com a frequência natural da peça. Esse fenômeno é conhecido como *grinding chatter* ou trepidação (Tlustý, 1970). Com isso, multiplicando-se a frequência de rotação do rebolo e o número de ondulações da superfície do rebolo é possível verificar se no sistema ocorreu excitação da peça em sua frequência natural.



Para determinar o número de ondulações presentes na superfície do rebolo foi realizado o mapeamento acústico da operação de dressagem. A Figura 41 mostra os mapas de dressagem do rebolo na condição mostrada na Figura 38.

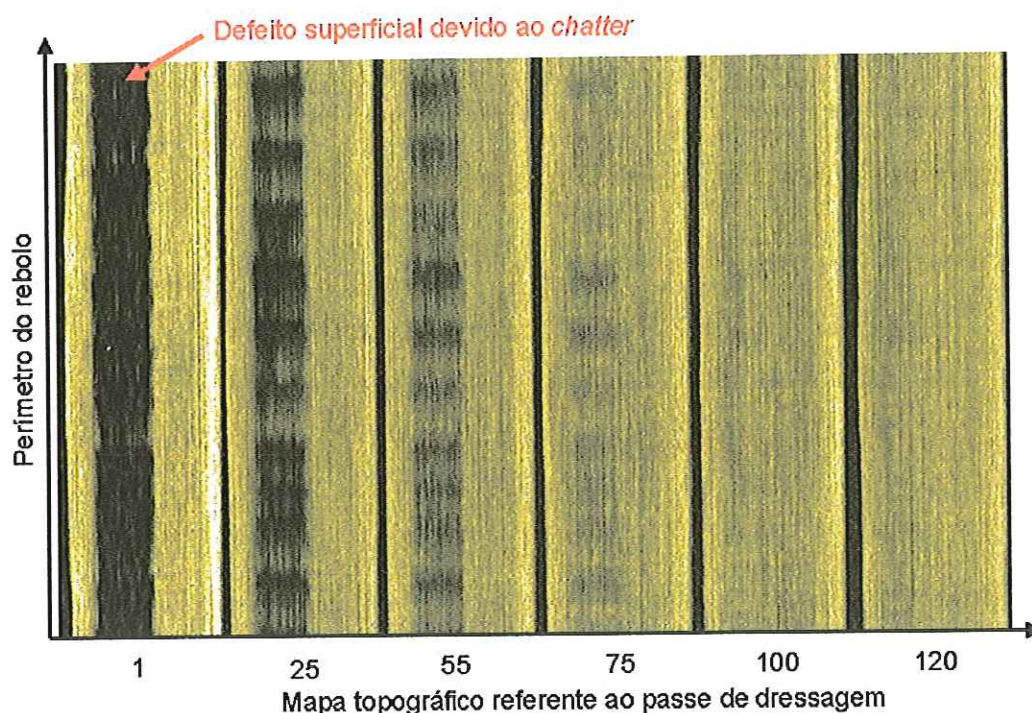


Figura 41 – Mapas topográficos da dressagem após o *chatter* na retificação.

Da figura acima, no mapa número 55, pode-se observar com maior nitidez 11 faixas horizontais escuras no mapa, indicando o número de ondulações na superfície do rebolo. Com o objetivo de evidenciar ainda mais a magnitude das ondulações, foram sobrepostos todos os 120 mapas de dressagem e dispostos em um gráfico 3D. Esse gráfico é mostrado Figura 42.

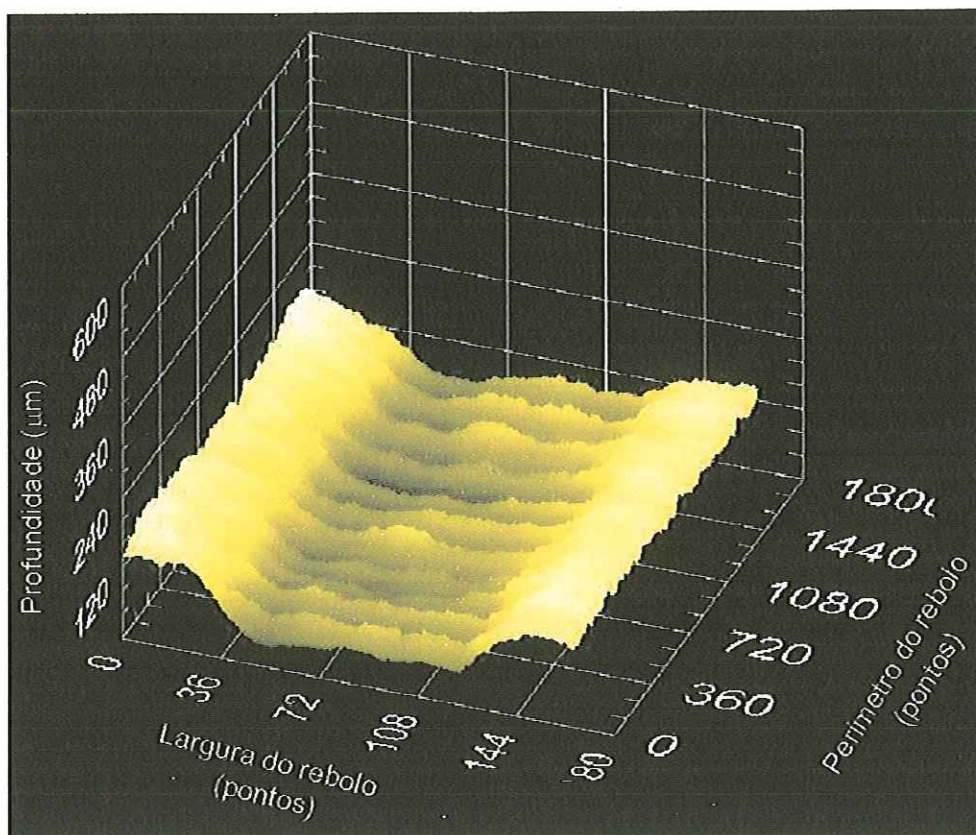


Figura 42 – Gráfico 3D da superfície do rebolo.

Levando em consideração que a rotação do rebolo na retificação era de 3915rpm (aproximadamente 82m/s), o diâmetro do rebolo 400mm e que haviam 11 ondulações na superfície do rebolo, pôde-se estabelecer a frequência da excitação que o rebolo exerceu sobre a peça:

$$f_e = n_{ond} \cdot f_r \quad (11),$$

onde:

$f_e$  – frequência de excitação [Hz]

$f_r$  - frequência de rotação do rebolo [Hz]  $f_r = \frac{rpm.rebolo}{60}$

$n_{\text{ond}}$  - número de ondulações presentes na superfície do rebolo

Sendo assim, pode-se calcular  $f_e$ :

$$f_e = 11 \cdot \frac{3915}{60} \approx 720 \text{ Hz}$$

Com isso, o resultado do cálculo da frequência de excitação do sistema bate com o valor da frequência natural da peça. Como consequência desse fenômeno, pode-se observar na Figura 43 o visual vibrado na superfície da peça proveniente do *chatter* durante a retificação.



Figura 43 – Foto da peça que vibrou durante a retificação com  $v_f$  de 16mm/min.

A partir dos ensaios de desgaste do rebolo CBN vitrificado foram calculadas as relações entre o volume de material retificado e o volume de

rebolo desgastado (Equação 12). Esses resultados são apresentados na Figura 44.

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (12)$$

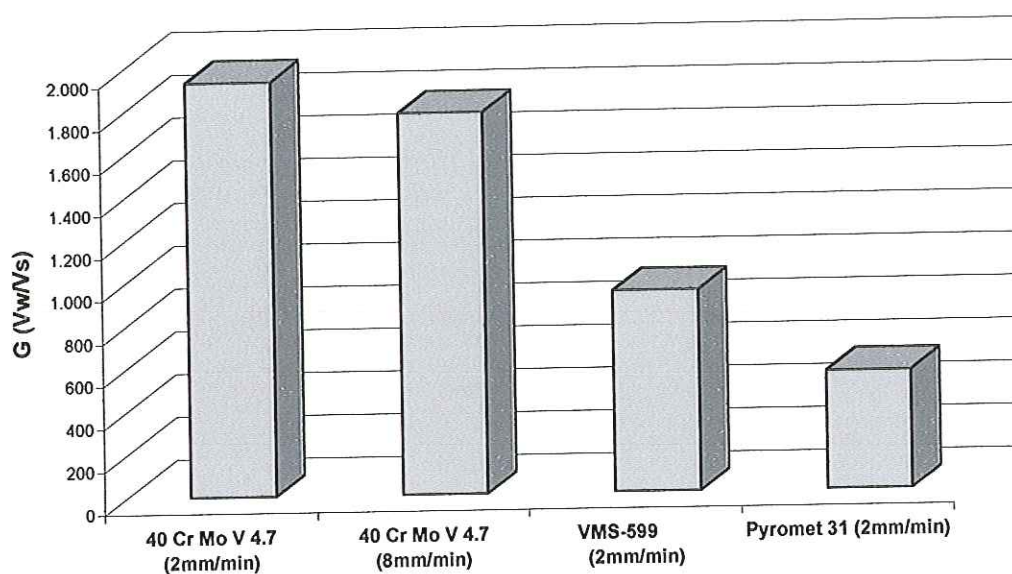


Figura 44 – Comparação dos valores de G médio em diferentes situações de retificação.

Da Figura 44 é possível observar que, tanto o material retificado quanto o valor da velocidade de avanço utilizada no ciclo de retificação apresentam importante papel na vida útil do rebolo. Analisando o resultado do parâmetro G em relação à retificação do material 40CrMoV4.7 com as velocidades de avanço de 2mm/min e 8mm/min, observa-se que quanto maior é a velocidade de avanço maior é o desgaste do rebolo, aproximadamente 8% no valor do G, passando de  $v_f$  de 2mm/min para

8mm/min. Analisando também o comportamento do rebolo na retificação dos três tipos de materiais com a mesma velocidade de avanço (2mm/min), pôde-se observar que, com o aumento da porcentagem de níquel na composição do material maior foi o desgaste do rebolo. Os materiais 40CrMoV4.7, VMS-599 e Pyromet 31 apresentam %Ni em peso respectivamente, 0%, 12% e 58%. Sendo assim, com base na composição química do material, criou-se uma relação entre a porcentagem de níquel na composição do material e a relação G. A Figura 45 mostra essa relação.

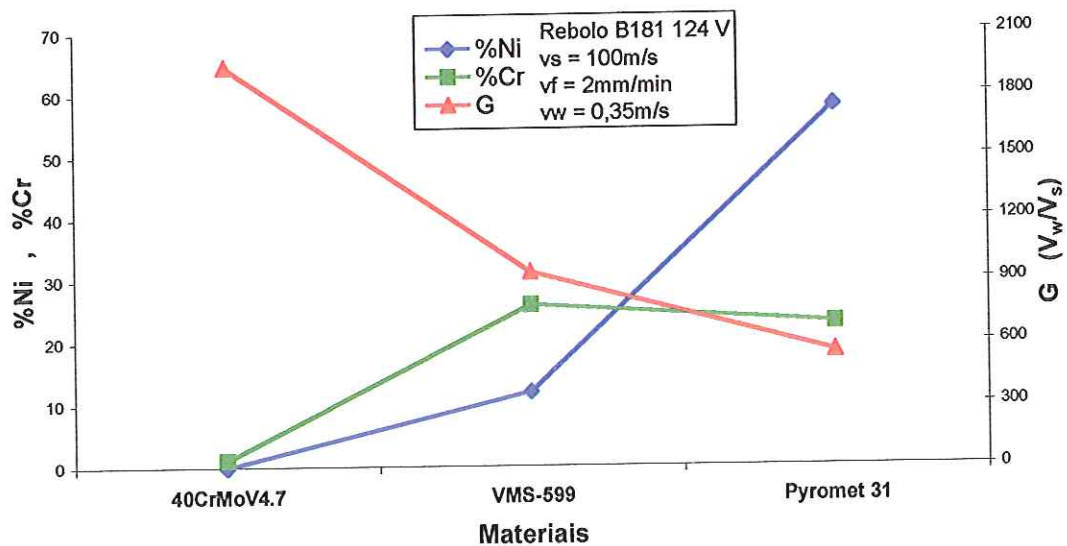


Figura 45 – Relação entre a composição química do material e o desgaste do rebolo .

Uma das explicações possíveis para o maior desgaste do rebolo de CBN em relação à porcentagem de níquel na composição química do material é que em altas temperaturas o Nitrogênio e o Boro do CBN se combinam quimicamente com o níquel do material degradando as

propriedades do grão abrasivo, e fazendo com que a camada mais ativa do grão sofra uma taxa de desgaste mais acentuada. Sendo o tratamento térmico do material também influente sobre a taxa de desgaste do rebolo, recomenda-se em trabalhos futuros a associação da composição química do material com o tratamento térmico e dureza do material, a fim de se estabelecer a real influência de cada fator sobre a taxa de desgaste dos rebolos de CBN vitrificado.

### 4.3 MONITORAMENTO DA TOPOGRAFIA DO REBOLO DURANTE A RETIFICAÇÃO.

Através do software mostrado no item 1.4.2, foram levantados diversos mapas topográficos do rebolo seqüencialmente ao longo da retificação dos corpos de prova, a fim de identificar os padrões gráficos predominantes na retificação com rebolo de CBN vitrificado. As figuras mostradas à seguir, são figuras formadas à partir da composição de diversos mapas topográficos adquiridos seqüencialmente na retificação dos três tipos de materiais pesquisados neste trabalho.

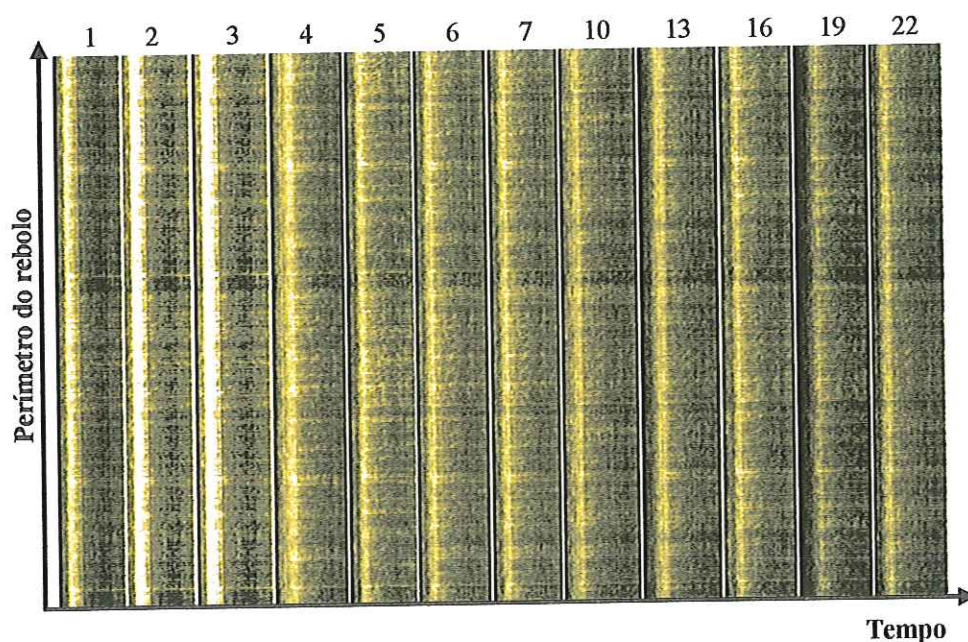


Figura 46 – Mapas topográficos do rebolo na retificação de 40CrMoV4.7 com velocidade de avanço de 2mm/min.

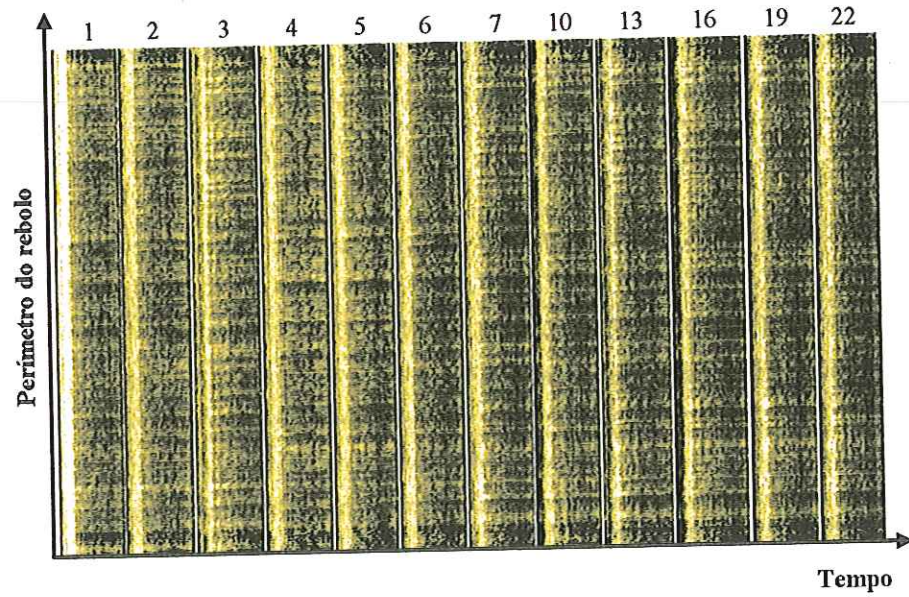


Figura 47 - Mapas topográficos do rebolo na retificação de 40CrMoV4.7 com velocidade de avanço de 8mm/min.

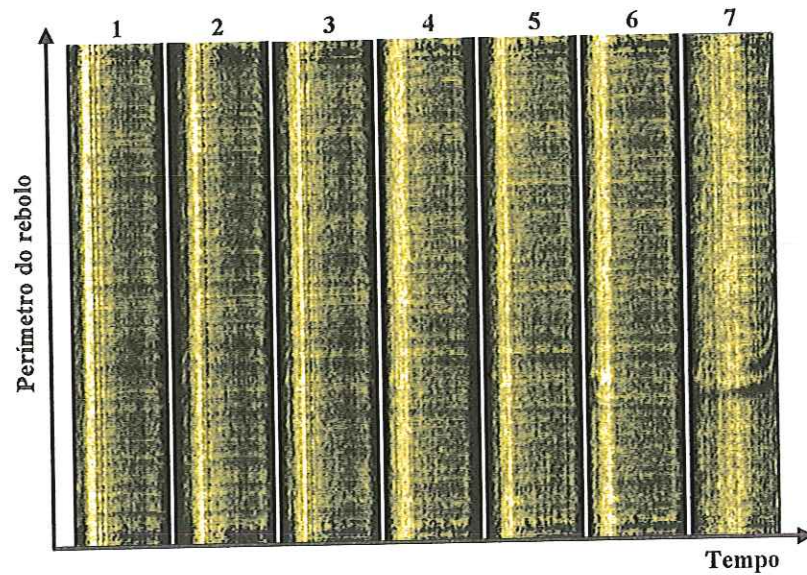


Figura 48 - Mapas topográficos do rebolo na retificação de 40CrMoV4.7 com velocidade de avanço de 16mm/min.



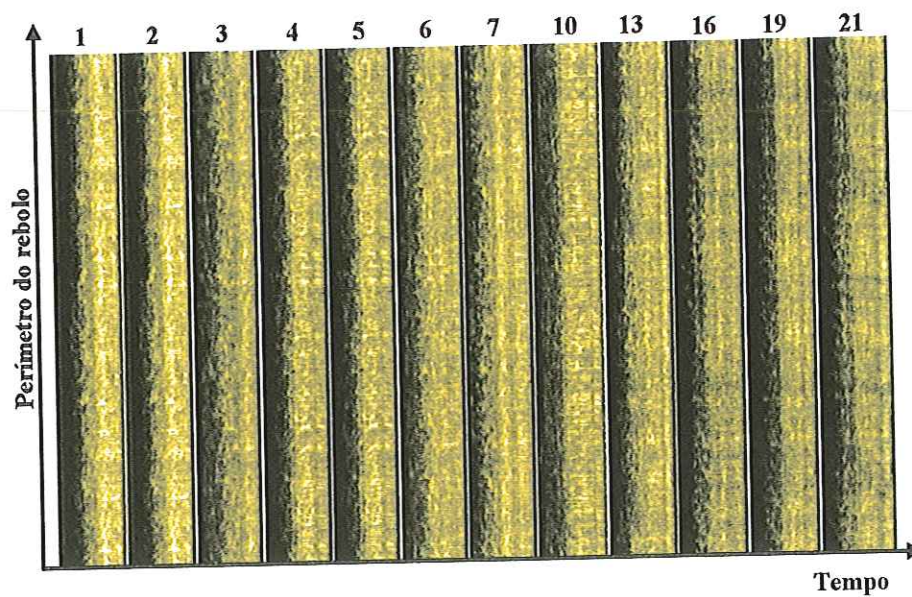


Figura 49 - Mapas topográficos do rebolo na retificação de Pyromet 31 com velocidade de avanço de 2mm/min.

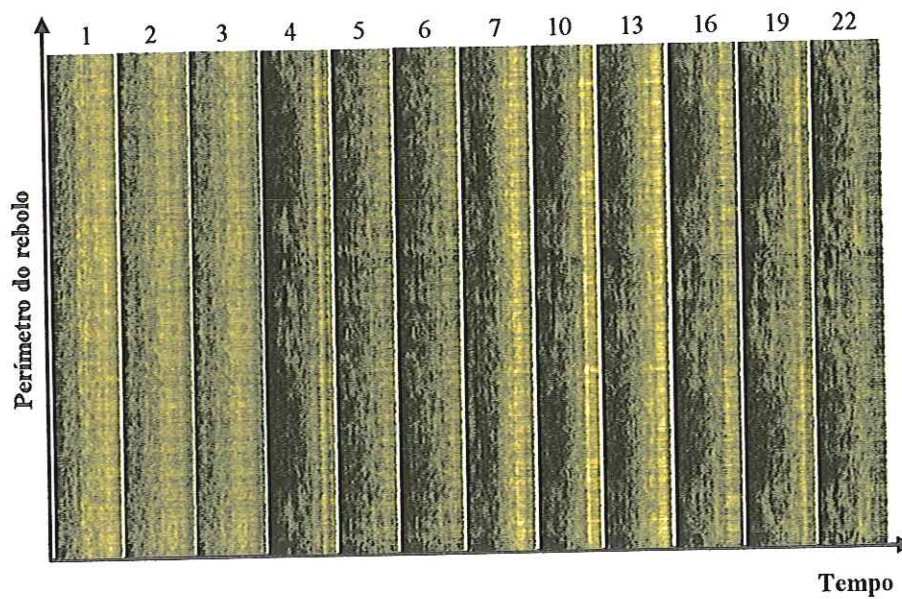


Figura 50A - Mapas topográficos do rebolo na retificação de VMS-599 com velocidade de avanço de 2mm/min.

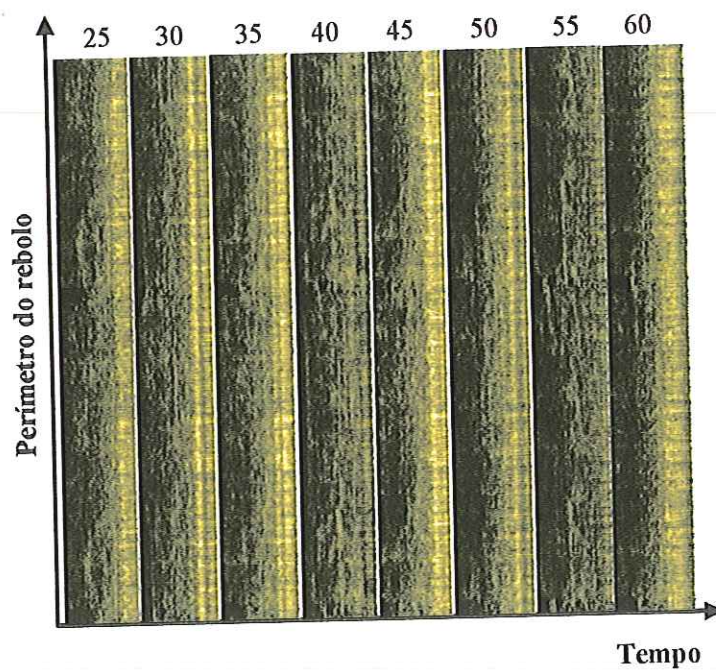


Figura 50B – Continuação dos mapas topográficos do rebolo na retificação de VMS-599 com velocidade de avanço de 2mm/min.

Comparando as Figuras 46 a 48, foi possível determinar os padrões predominantes nas imagens topográficas de retificação para o material 40CrMoV4.7, independentemente da velocidade de avanço do rebolo. A ilustração da Figura 51 mostra os três principais padrões observados.

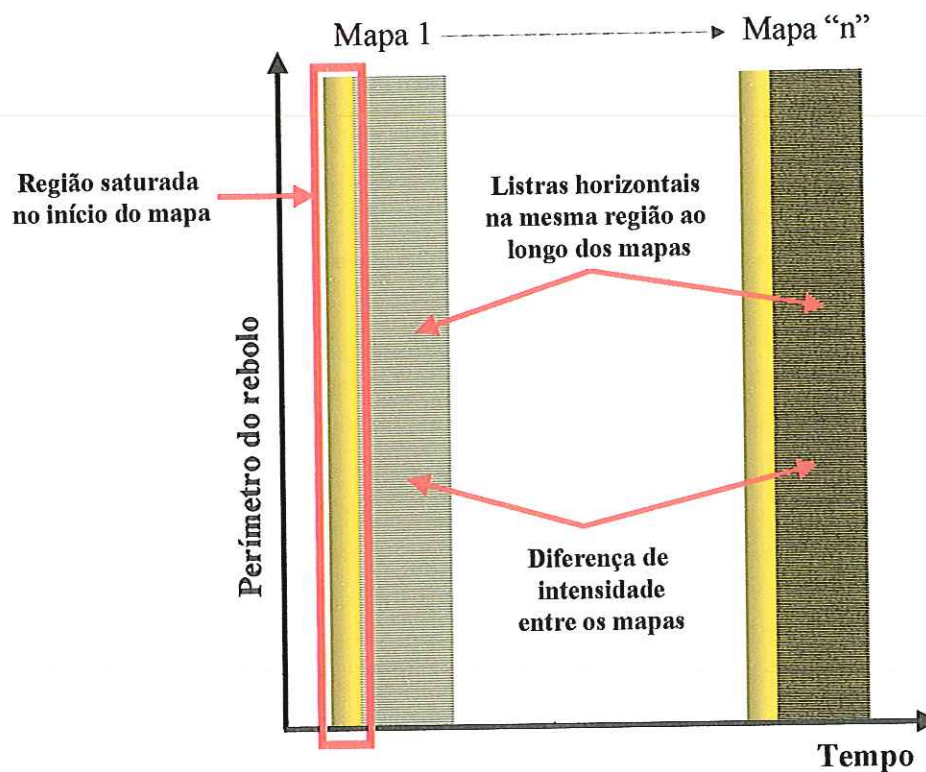


Figura 51 – Identificação dos padrões gráficos dos mapas topográficos de retificação para o material 40CrMoV4.7.

Independente da velocidade de avanço utilizada pelo rebolo na retificação do material 40CrMoV4.7, pôde-se observar três padrões visuais predominantes:

- a) *Região saturada no início do mapa*: gerada devido à variação de sobremetal do corpo de prova. Sendo assim, o maior volume de material aumenta a interação mecânica entre os grãos abrasivos do rebolo e a superfície da peça, proporcionando conseqüentemente aumento da amplitude do som gerado a partir do contato entre as superfícies. Outro fator que influencia a região inicial do mapa é a pequena área de contato do rebolo com a peça, que permite a vibração da mesma proporcionando o aumento da vibração do sistema peça-rebolo.

- b) *Listras horizontais posicionadas na mesma posição em mapas consecutivos (franjas claras e escuras)*: também descrevem uma maior interação entre o rebolo e a peça nas regiões mais claras. Porém, se as franjas permanecem ao longo dos mapas na mesma região, isso comprova que não está ocorrendo perda volumétrica do rebolo, ou seja, o rebolo não está perdendo grãos abrasivos (característica de rebolos duros). Por outro lado, pode se concluir que se os mapas consecutivos apresentarem modificação na posição das manchas claras e escuras, isso caracteriza perda excessiva de grãos abrasivos causando macrodesgaste do rebolo.
- c) *Diferença de intensidade luminosa nos mapas topográficos*: se a diferença for observada na mesma imagem, pode ser influência de três fatores; diferença de sobremetal (caso "a"), ciclo de retificação passando do corte para o alisamento ou empastamento do rebolo (na imagem inteira ou localizado em algumas franjas do mapa). Observou-se também diferença de intensidade entre as Figuras 46, 47 e 48. Esse fato deve-se primordialmente ao aumento da velocidade de avanço do rebolo que causa maior interação entre rebolo e a superfície da peça. Com isso, pode-se concluir que quanto maior é a velocidade de avanço maior será a luminosidade da imagem, e maior será o contraste entre as franjas claras e escuras. Porém, comparando as Figuras 46, 49 e 50A/B (mapas dos três materiais na mesma  $v_f$ ), é possível observar diferença de intensidade luminosa nos mapas topográficos. Isso mostra que a intensidade depende também do tipo de material que está sendo

retificado, uma vez que, nesses ensaios foi utilizado o mesmo rebolo, a mesma velocidade de avanço. Sendo assim, conclui-se que quanto maior o volume de níquel no material maior é a intensidade do mapa, ou seja, mais o rebolo sofre empastamento e maior é o atrito gerado entre as superfícies do rebolo e da peça.

Na Figura 48, é possível observar no mapa 7 uma franja escura bem pronunciada na parte central da imagem. Acompanhando a evolução desta franja escura ao longo do tempo, ou seja, desta região sem interação entre peça e rebolo, observa-se no meio do alisamento a inclinação desta franja escura caracterizando a defasagem entre a rotação da peça e a rotação do rebolo. Essa imagem caracteriza o defeito superficial no rebolo mostrado na Figura 38 e já comentada anteriormente. A Figura 52, mostra em detalhe ampliado o sétimo mapa de retificação mostrado na Figura 48. Sendo assim, podemos concluir que o software é hábil para captar e mostrar eventos de vibração dentro do sistema de retificação (máquina-rebolo-peça).

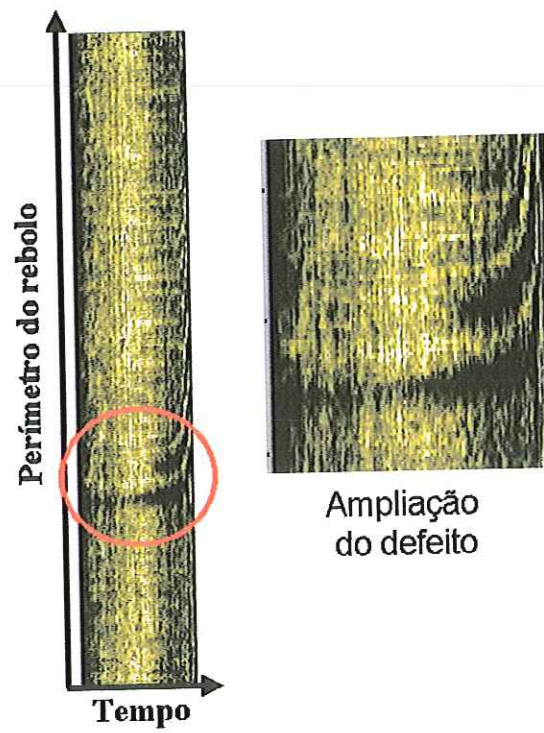


Figura 52 – Detalhe do defeito observado com o software de monitoramento.

#### 4.4 ENSAIOS DE OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE RETIFICAÇÃO

A fim de estabelecer qual o melhor parâmetro de velocidade de avanço ( $v_f$ ) e qual a melhor estratégia de retificação visando o melhor acabamento superficial e maior produtividade da operação, foram comparadas duas situações de processo; o processo de retificação convencional de mergulho e o processo de mergulho com deslizamento. Em ambos os casos o ciclo de retificação é composto por: um avanço rápido de aproximação, um avanço lento de corte ( $v_f$ ), um tempo de alisamento ou *spark out* e por um avanço rápido de retorno como mostrado na Figura 53.

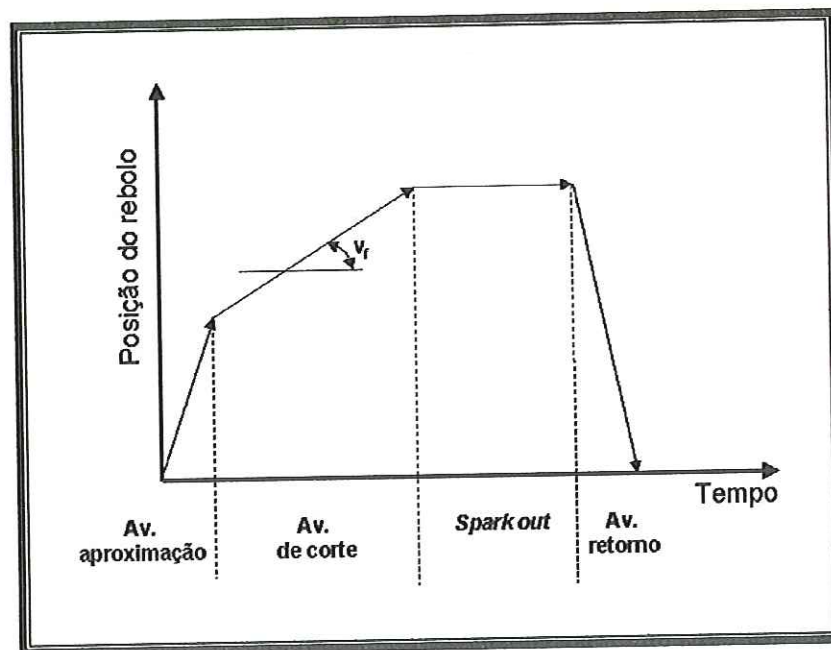


Figura 53 – Ciclo padrão de retificação.

No caso da retificação com deslizamento, o rebolo remove material da peça em mergulho, como na retificação convencional, porém, a superfície do rebolo desliza em relação à superfície da peça sem remoção de material (Figura 54), antes do retorno do rebolo para a posição de início de ciclo.

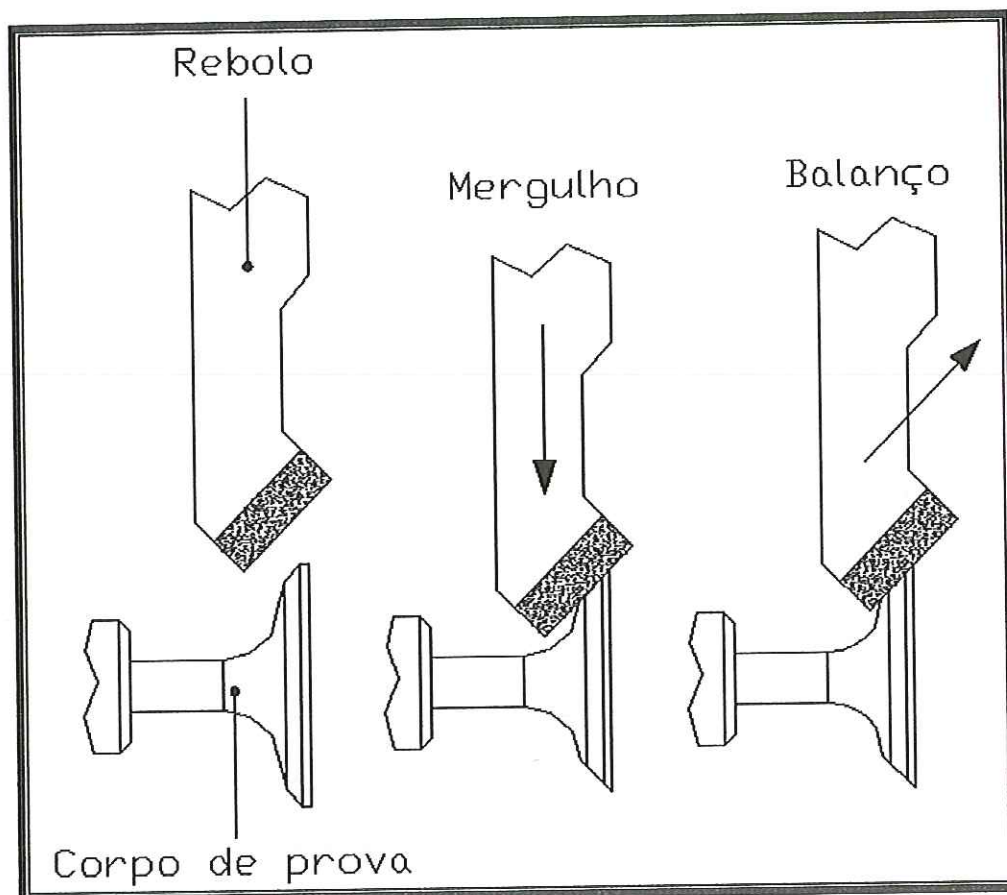


Figura 54 – Estratégia de retificação de mergulho com balanço sem remoção de material.

A Figura 55, apresenta o comparativo entre as duas estratégias de retificação citadas acima em termos da qualidade da peça retificada.



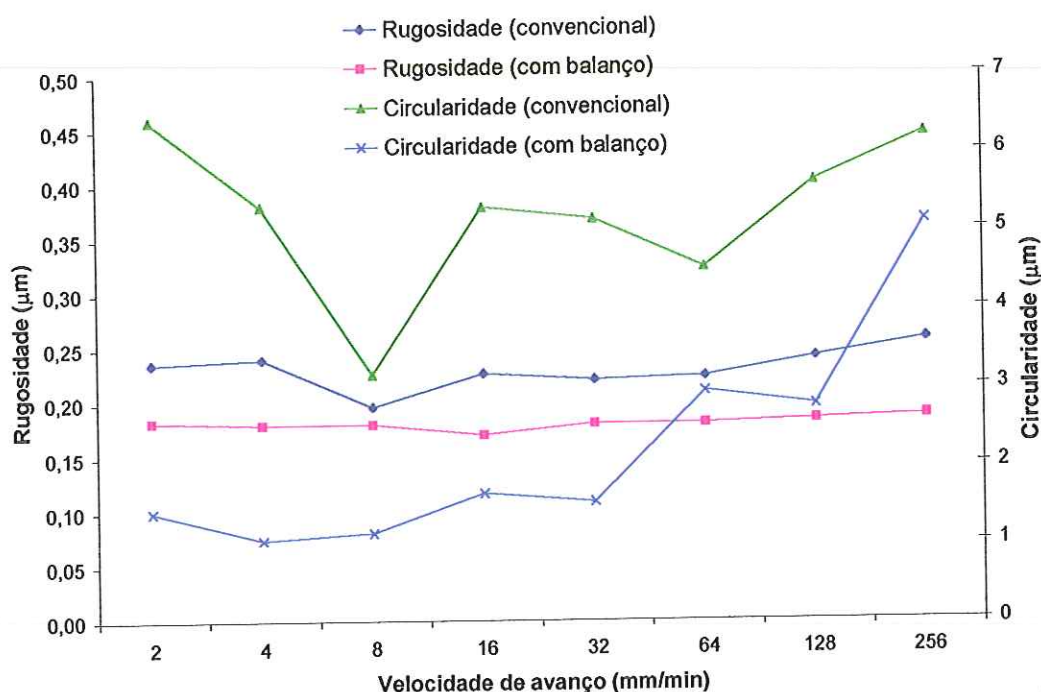


Figura 55 – Resultado comparativo entre as estratégias de retificação convencional e com balanço para o material 40CrMoV4.7.

Dentre as duas estratégias de retificação testadas neste trabalho a retificação com balanço mostrou-se como a melhor opção na retificação do material 40CrMoV4.7. Foi visto que, a movimentação tangencial da superfície do rebolo em relação à superfície da peça reduz em média 21% a rugosidade da peça retificada.

Observou-se também para os dois tipos de estratégia de retificação, o aumento da velocidade de avanço se mostra pouco influente na rugosidade superficial da peça retificada. Porém, por outro lado a  $v_f$  influencia na circularidade da peça, bem como o tipo de estratégia de retificação, sendo que no caso da retificação de mergulho convencional a circularidade mantém-se estável com o aumento da  $v_f$  sendo sua influência maior na

estratégia de retificação com balanço. No gráfico da Figura 55, é possível observar também que a circularidade da peça se mantém praticamente constante até a velocidade de avanço de 32mm/min. Nessas velocidades a deformação imposta à peça é pequena (menor que  $2\mu\text{m}$ ), mesmo a velocidade de avanço sendo considerada alta para a natureza da operação de retificação. Já acima de 32mm/min, os níveis de deformação são proporcionais ao aumento da velocidade de avanço, fazendo com que a circularidade da peça piore cada vez mais.

Levando em consideração a profundidade de corte usual para retificação de sede de válvulas (0,25mm) como base de cálculo, é possível calcular o tempo de corte teórico dividindo-se a profundidade de corte pela velocidade de avanço. A tabela a seguir, mostra o comparativo entre os tempos de corte teóricos resultantes da escolha da velocidade de avanço ( $V_f$ ).

Tabela 6 – Estudos dos tempos de corte teóricos (não leva em conta *sparkout*).

$V_f$ (mm/min)	Tempo de corte (s)
2	7,500
4	3,750
8	1,875
16	0,938
32	0,469
64	0,234
128	0,117
254	0,059

A partir dos tempos de corte expressos na tabela acima, pode-se observar que com o aumento da  $v_f$  ocorre uma redução do tempo de corte e conseqüentemente do tempo de ciclo. Contudo a escolha da  $v_f$  ideal deve estar compatível com a profundidade de corte utilizada na retificação, uma vez que, o aumento indiscriminado da  $v_f$  aliada a alta profundidade de corte, sérios danos à integridade superficial do rebolo e da peça podem ser causados, devido ao fenômeno de *chatter* conforme visto anteriormente.

Tendo em vista este problema, e comparando-se os tempos de corte, conclui-se que para a retificação de sede de válvulas (baixa profundidade de corte), a velocidade de avanço de 32mm/min pode ser considerada ideal, uma vez que a variação dos tempos de corte são muito pequenas para  $v_f$  acima deste valor. Nos casos de  $v_f$  acima de 32mm/min, o ganho efetivo no tempo de ciclo de retificação referente ao corte (aproximadamente 0,1s) é desprezível quando comparado com os outros tempos envolvidos no processo, como por exemplo, o tempo de alimentação automática da peça (aproximadamente 2s com variação de  $\pm 0,5s$ ).

## **4.5 COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS LABORATORIAIS E OS DADOS REAIS COLHIDOS EM CHÃO-DE-FÁBRICA**

Os dados mostrados a seguir foram gentilmente concedidos pela TRW Automotive Ltda., a fim de estabelecer uma comparação entre os dados laboratoriais e os dados reais utilizados no chão-de-fábrica da empresa. Basicamente no chão-de-fábrica dessa empresa, usa-se como base de comparação do desempenho dos rebolos, o número de peças retificadas entre duas dressagens consecutivas. Esse parâmetro, na prática é simplesmente chamado de número de peças por dressagem. Esse número expressa diretamente a vida útil do rebole ou o número de peças por rebole. A Figura 56 a seguir, mostra o comparativo do número de peças por dressagem e do número de peças retificadas por rebole, entre os processos de retificação convencional e o de retificação com rebole CBN vitrificado, tomando como base os dados referentes à retificação dos mesmos corpos de prova utilizados no presente trabalho.

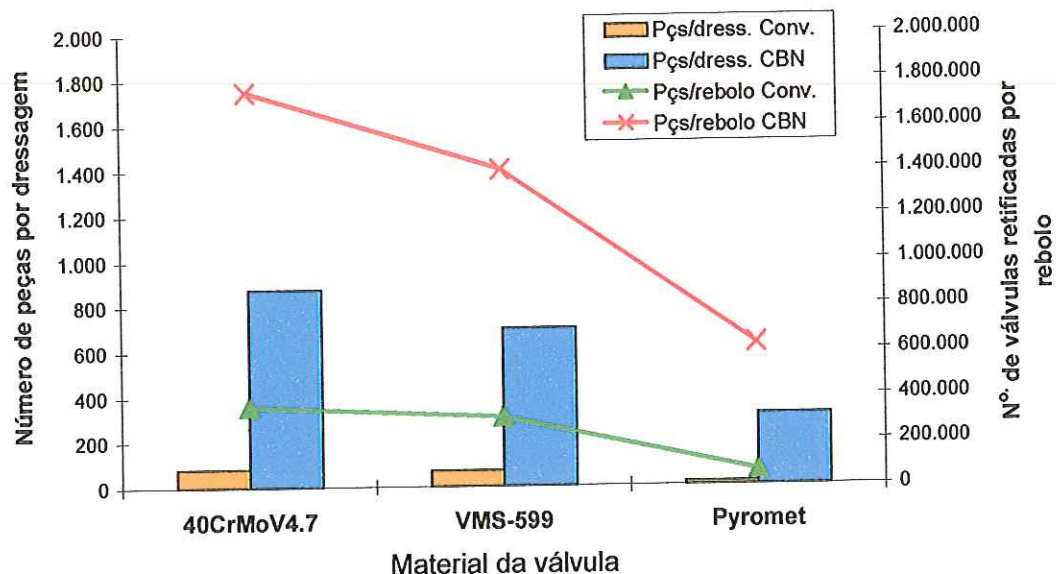


Figura 56 – Comparativo entre a retificação convencional e a retificação com rebolo de CBN de sede válvulas de combustão interna.

Da figura acima pôde se observar que o desempenho da retificação com rebolo CBN vitrificado é de 10 a 20 vezes superior ao da retificação convencional, quando se compara o número de peças por dressagem. Conseqüentemente, a vida útil do rebolo CBN também é maior, variando de 4 a 9 vezes nesse caso.

Contudo, em ambientes fabris, existem dois outros parâmetros que são comumente avaliados; o custo do ferramental utilizado em relação ao número de peças retificadas e o número de peças produzidas por hora. Na Figura 57 e na Figura 58 a seguir, são mostrados os comparativos entre a retificação convencional e a CBN nos dois itens comentados acima. Nesse estudo, utilizou-se como base de comparação a retificação de 1.000.000 de válvulas sendo estas compostas pelos três materiais e com profundidade de corte de 0,25mm.

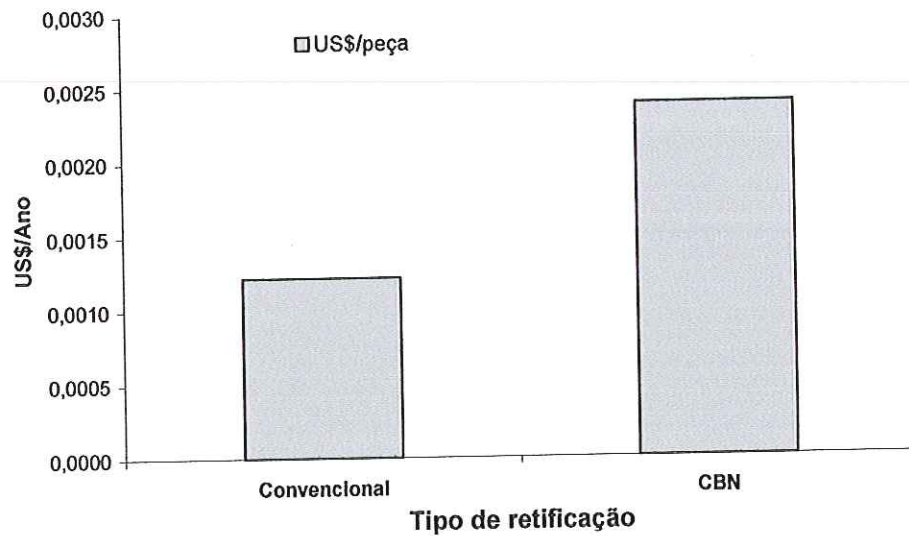


Figura 57 – Comparativo entre o custo de ferramental por peça retificada na retificação convencional e na retificação com rebolo CBN vitrificado.

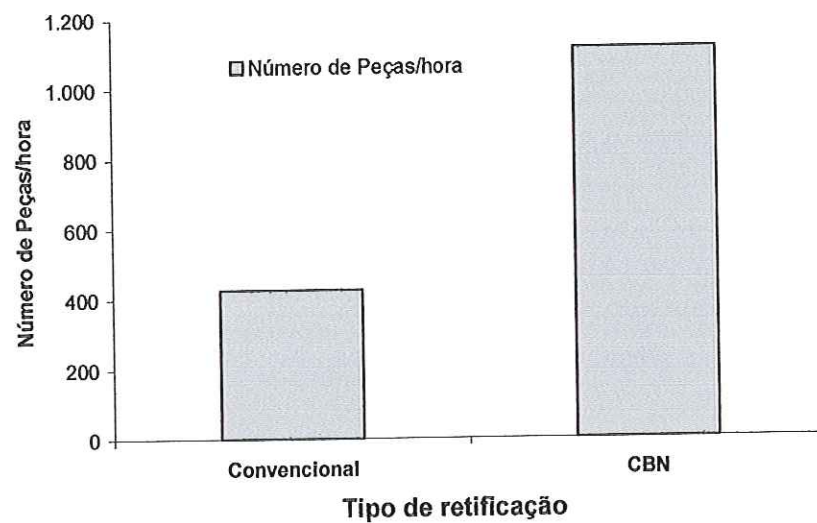


Figura 58 – Comparativo entre o número de peças retificadas por hora trabalhada, considerando mesmo tempo de alimentação das máquinas.

Das figuras acima, observa-se que o custo de ferramental da retificação com CBN vitrificado é 2 vezes maior quando comparado com o custo da retificação convencional. Entretanto, apesar de apresentar custo de

ferramental mais caro, a retificação com CBN vitrificado mostra-se aproximadamente 2,6 vezes mais produtiva que a convencional, ou seja, esse processo é ideal para altíssimos volumes de produção, ou na retificação de peças as quais apresentam longos ciclos de retificação. Desta forma, os custos de operação, de mão-de-obra, de manutenção, de lubrificação e etc., serão divididos proporcionalmente. Outro ponto positivo e já discutido anteriormente é quanto à qualidade da peça retificada. No caso da retificação CBN, espera-se que a qualidade dimensional e superficial da peça mantenha-se por muito mais tempo sem que sejam necessárias correções por parte dos operadores quando comparada com a retificação com rebolo convencional.

## 5. CONCLUSÃO

Do presente trabalho diversas conclusões puderam ser tomadas:

- A otimização do processo de retificação com rebolo CBN vitrificado depende primordialmente do condicionamento inicial do rebolo, ou seja, de sua montagem, balanceamento e dressagem.
- A escolha dos parâmetros de dressagem influenciam na agressividade da superfície do rebolo e conseqüentemente no acabamento superficial gerado na peça retificada.
- A dressagem por interpolação utilizando disco diamantado eletrodepositado se assemelha a dressagem com rolo diamantado, onde os fatores determinantes são a relação de velocidades ( $q_d$ ) e velocidade de passagem do dressador ( $v_d$ ).
- A fim de reduzir o desperdício de rebolo com dressagens desnecessárias ou em dressagem com profundidade ( $a_d$ ) exagerada, o monitoramento da dressagem é importante.
- Com a utilização do sistema DEAR no monitoramento da dressagem foi possível além de determinar a profundidade ótima de dressagem, determinar também os padrões topográficos associados com a relação de velocidades ( $q_d$ ).
- O rebolo de CBN vitrificado apresentou diferentes taxas de desgaste em relação aos três diferentes materiais retificados e em relação aos



parâmetros de retificação escolhidos, sendo que quanto maior é a porcentagem de níquel na composição química do material maior é o desgaste do rebolo.

- Observou-se que o valor do parâmetro G para o rebolo de CBN vitrificado é muito mais influenciado pelo tipo de material que está sendo retificado, do que pela velocidade de avanço a qual a retificação está sendo realizada.
- Observou-se que ao longo do tempo a rugosidade da peça retificada aumenta, independentemente do tipo de material sendo retificado. Contudo, a taxa com que a rugosidade da peça aumenta está intimamente ligada com a composição química e dureza do material retificado.
- Ao longo dos ciclos de retificação a circularidade do corpo de prova apresentou valores aleatórios e muito dispersos. Com isso, concluiu-se que a dispersão de valores foi fruto da excentricidade das peças (peças com cabeça soldada por fricção) e pela má fixação proporcionada pela placa de três castanhas utilizada nos experimentos, uma vez que os gráficos de circularidade acusaram uma figura ovalada com três regiões mais sobressalentes.
- Através do monitoramento da retificação, foi possível determinar qualitativamente a condição superficial do rebolo, uma vez que, os mapas não apontaram quaisquer perdas de grão ao longo da retificação. Nesse caso a especificação do rebolo atendeu satisfatoriamente a necessidade do processo de retificação.

- Foi possível também se determinar através dos mapas três padrões gráficos presentes na retificação com CBN vitrificado; Faixa vertical no início do ciclo, relacionada à diferença de sobremetal entre os corpos de prova; Franjas horizontais, determina a adequação da especificação do rebolo para a operação, ou seja, rebolo não perdeu grãos ao longo dos ciclos de retificação; Diferença na intensidade dos mapas em relação aos materiais retificados.
- Ao longo dos consecutivos ciclos de retificação aparecem na superfície do rebolo ondulações que estimulam trepidações durante a retificação e que são facilmente detectadas com o sistema DEAR.
- ✕ • Determinou-se 16mm/min, como sendo a velocidade de avanço crítica para retificação com grande profundidade de corte. Nessa velocidade, a superfície do rebolo fica sujeita à vibrações provenientes do excesso de material a ser removido por volta do rebolo. Esse fato ficou evidenciado neste trabalho devido à quebra do rebolo devido ao *chatter*.
- A estratégia de retificação com balanço, apresentou melhores resultados tanto na rugosidade quanto na circularidade do corpo de prova quando comparada com a retificação cilíndrica de mergulho convencional.
- ✕ • A velocidade de avanço de 32mm/min é o limite para a retificação de sede de válvulas. Acima deste valor a circularidade da superfície aumenta proporcionalmente à  $v_f$ .
- ✕ • No trabalho com baixas profundidades de corte (até 0,5mm), foi possível alcançar velocidades de avanço de até 256mm/min sem que houvesse quaisquer danos superficiais no rebolo ou na peça. Porém, a redução do

tempo de corte para velocidades de avanço acima de 32mm/min, podem ser consideradas desprezíveis quando comparadas com a variação de outros tempos que compõem o ciclo de retificação.

- Observou-se que o número de peças por dressagem na retificação com rebolos CBN é de 10 a 20 vezes maior que os valores apresentados na retificação convencional de sede de válvulas e o custo de ferramental por peça retificada de 2 vezes. Em termos de produtividade, a taxa de peças produzidas por hora é 2,6 vezes maior na retificação com CBN que na convencional.
- Apesar do custo de ferramental ser maior na retificação CBN que na convencional, o custo total de retificação (custo operacional, mão-de-obra, manutenção, lubrificação) é menor devido à maior taxa de produção, maior estabilidade da operação e menor quantidade de empregados necessários para manter a qualidade da peça.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREWS, C. Coolant Application in Creep Feed Grinding. In: Proceedings of International Conference on Creep Feed Grinding, p.167-183, Sept.1979.

AULT, W. Truing and Dressing of Grinding Wheels. In: Handbook of Modern Grinding Technology, 1.ed., New York: Chapman and Hall, 1986, cap.4, p. 88-97.

BAILEY, M. W; JUCHEM, H. O. The advantages of CBN grinding: low cutting forces and improved workpiece integrity. Industrial Diamond Review, v.58, n.578, p.83-89, Mar.1998.

BARNARD, J. M. Grinding Auto Camshafts with CBN wheels. Industrial Diamond Review, v.50, n.538, p.125-132, Mar.1990.

BIANCHI, E. C.; FERNANDES, O. C.; VALARELLI, I. D. D.; SILVA, E. J.; XAVIER, A. P.; SPINELLI, J. E., NEVES, R. C.; MOCINI, R. D.; CAGNIN, A. R.; SOUZA, G. F.; ALVES, A. S. A contribuição dos rebolos superabrasivos com ligantes resinóide e vitrificado. Máquinas e Metais, São Paulo, a.35, n.398, p.88-113 mar.1999.

BRINKSMEIER, E.; ÇINAR, M. Characterization of Dressing Processes by Determination of the Collision Number of the Abrasive Grits. Annals of the CIRP, v.44/1, p. 299-304, 1995.

CARIUS, A. C. Desenvolvimentos de produto e do mercado de CBN na América e na Europa. Máquinas e Metais, São Paulo, a.35, n.403, p.86-103, ago.1999.

DORNFELD, D; CAI, H. G. An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. ASME, v.106, p28-33, 1984.

DORNFELD, D. Application of acoustic emission techniques in manufacturing. NDT&E Int. 25 (6) p.259-269. 1992.

FERRIS, J.W.; KLARQUIST, V.L. Productivity in Carburetors, Pistons and Valves. Monthly Labor Review, p.43-46, Feb.1989.

GOMES, J. J.F. Identificação em processo de mecanismos de desgaste de rebolos, 2001, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GRAAFF, W. T. Grinding wheel having dead end grooves and method for grinding therewith. US Patent 5, 611, 724. 18/3/1997.

HAHN, R. S. Part Processing by Grinding. In: Handbook of Modern Grinding Technology, 1.ed., New York: Chapman and Hall, 1986, cap.1, p. 3-29.

HITCHINER, M. P. Technological Advances in Creep Feed Grinding of Superalloys with CBN. In: 3<sup>rd</sup> International Machining and Grinding Conference, 4-7, 1999, Cincinnati. Anais... Cincinnati: SME, 1999.

HWANG, T. W.; EVANS, C. J.; MALKIN, S. An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels. Annals of the CIRP, v.49/1, p. 245-248, 2000.

INASAKI, I. Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measurement. Annals of the CIRP, v.45/1, p. 347-350, 1996.

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

JOHNSON, G.; RATTERMAN, E. Enhanced Product Performance Through CBN Grinding. Journal of Gear Manufacturing, v.5, n.5, Sept./Oct. 1988.

KLOCK, F.; KÖNIG, W. Appropriate Conditioning Strategies Increase the Performance Capabilities of Vitriified-Bond CBN Grinding Wheels. Annals of the CIRP, v.44/1, p. 305-310, 1995.

KÖNIG, W.; KLUMEN, T. Monitoring and Sensor Concepts for Higher Process Reliability. Annals of 5<sup>th</sup> INTERNATIONAL GRINDING, Cincinnati, Ohio, 1993.

KÖNIG, W.; MEYEN, H. P. AE in Grinding and Dressing: Accuracy and Process Reliability. In: 4<sup>th</sup> International Grinding Conference, 1990, Anais..., Dearborn, Michigan. p.526/1-526/20, 1990.

LINDSAY, R. P. Principles of Grinding. In: Handbook of Modern Grinding Technology, 1.ed., New York: Chapman and Hall, 1986, cap.2, p. 30-71.

LINDSAY, R. P. Principles of Grinding with Borazon (CBN) Wheels. Diamond Wheel Manufactures Institute Conference, 1975, Chicago, p.1-7.

MALKIN, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. 1.ed., Chichester: Ellis Horwood, 1989, 275p.

MAHAR, R. L. Grinding with Superabrasives. In: Modern Grinding Process Technology. 1.ed. McGraw-Hill, 1992, cap.5, p.98-118.

- x OLIVEIRA, J. F. Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação, 1988, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

OLIVEIRA, J.F.; DORNFELD, D. A. Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. *Annals of the CIRP*, p. 305-310, 2001.

REDINGTON, P.; SULLIVAN, W. J. What about CBN?. *Manufacturing Engineering Society – SME*, p.76-83, Oct. 1998.

- x SALMON, S. C. The Manufacture and Properties of Abrasives. In: *Modern Grinding Process Technology*. 1.ed. McGraw-Hill, 1992, cap.2, p.9-39.

SHIH, A. J.; GRANT, M. B.; YONUSHONIS, T. M.; MORRIS, T. O.; MCSPADDEN, S. B. High Speed and High Removal Rate Grinding of Ceramics Using the Vitreous Bond CBN Wheels. 1998 Annual Meeting of American Society for Precision Engineering, oct. 25-30, 1998.

SUTO, T.; WAIDA, T.; NOGUCHI, H.; INOUE, H. Wheel Designs for Grinding. *Industrial Diamond Review*, v.50, n.538, p.133-136, Mar.1988.

TAKAGI, J.; FUKUDA, T.; SUBRAMANIAN, K. Sharpness Control of Vitrified-bonded CBN Wheel Face by Precision Rotary Truer. In: *Proceedings of the First International Conference on New Manufacturing Technology*, 1990, Annals... Chiba, 1990.

TAKAGI, J.; LIU, M. Fracture Characteristics of Grain Cutting Edges of CBN Wheel in Truing Operation. *Journal of Materials Processing Technology*, v.62, p.397-402, 1996.

TAWAKOLI, T. Requirements for High-efficiency Deep Grinding. *Industrial Diamond Review*, v.50, n.539, p.177-182, Apr.1990.

TLUSTY, J. Static and dynamic stiffness. In: *Tlusty, J. & Koenigsberger, F. Machine tool structures*. Oxford, Pergamon Press, 1970, vol.1, 519p..

TÖNSHOFF, H. K.; FALKENBERG, Y. High-speed grinding of cast iron crankshafts with CBN tools. *Industrial Diamond Review*, v.56, n.571, p.115-119, Apr.1996.

TÖNSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; DIRK H. Crushing Process for Vitreous Bonded CBN and Diamond Grinding Wheels. *Production Engineering*, v.8/1, p.13-16, 2001.



TÖNSHOFF, H. K.; KARPUSHEWSKI, B.; MANDRYSCH, T. Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities. *Annals of the CIRP*, v.47, p651-668, 1998.

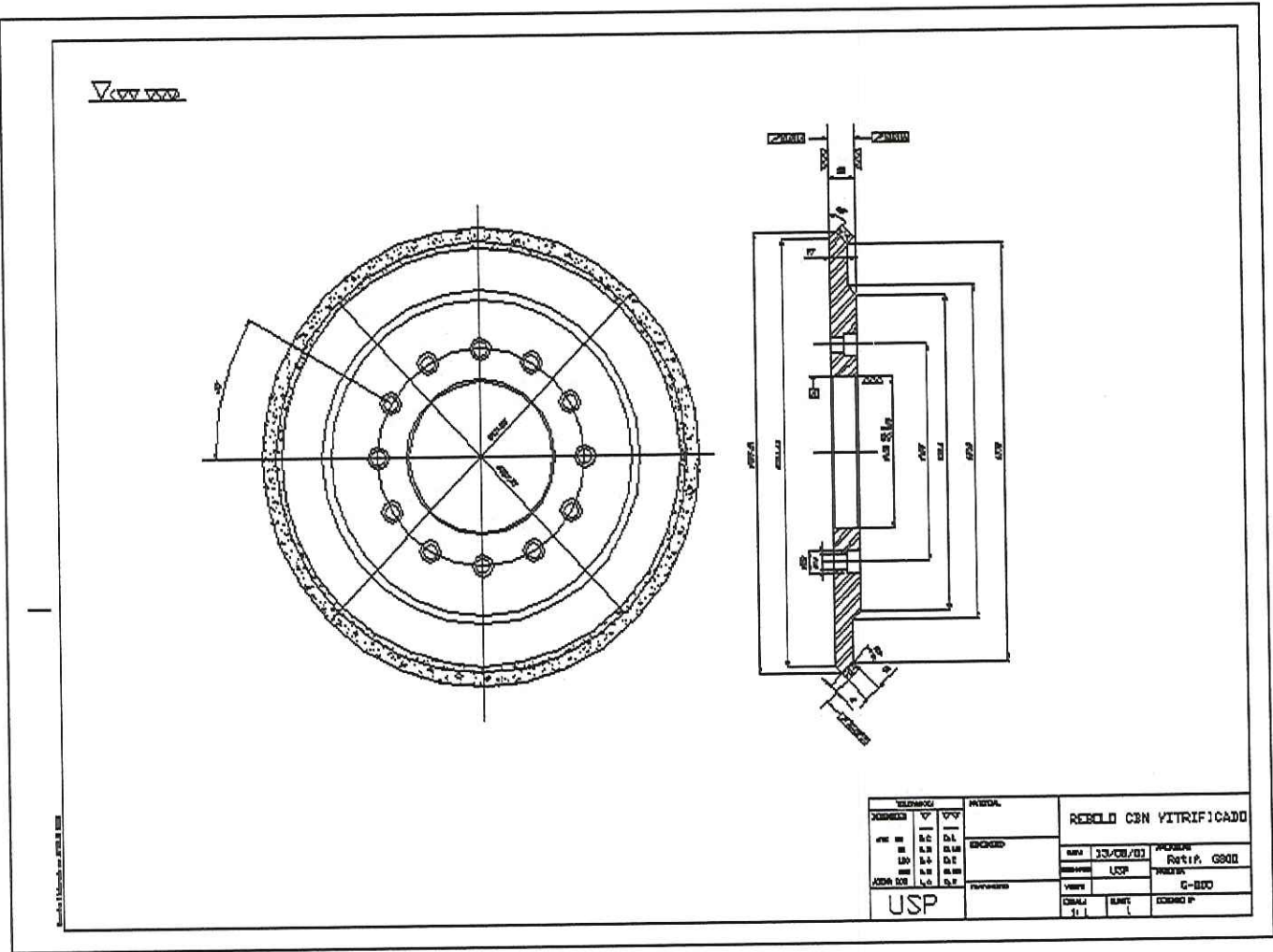
YUI, A.; LEE, H. Surface grinding with ultra high speed CBN wheel. *Journal of Materials Processing Technology*, v.62, p.393-396, 1996.

WERNER, G.; TAWAKOLI, T. High-efficiency Deep Grinding with CBN. *Industrial Diamond Review*, v.48, n.526, p.124-128, Mar.1988.

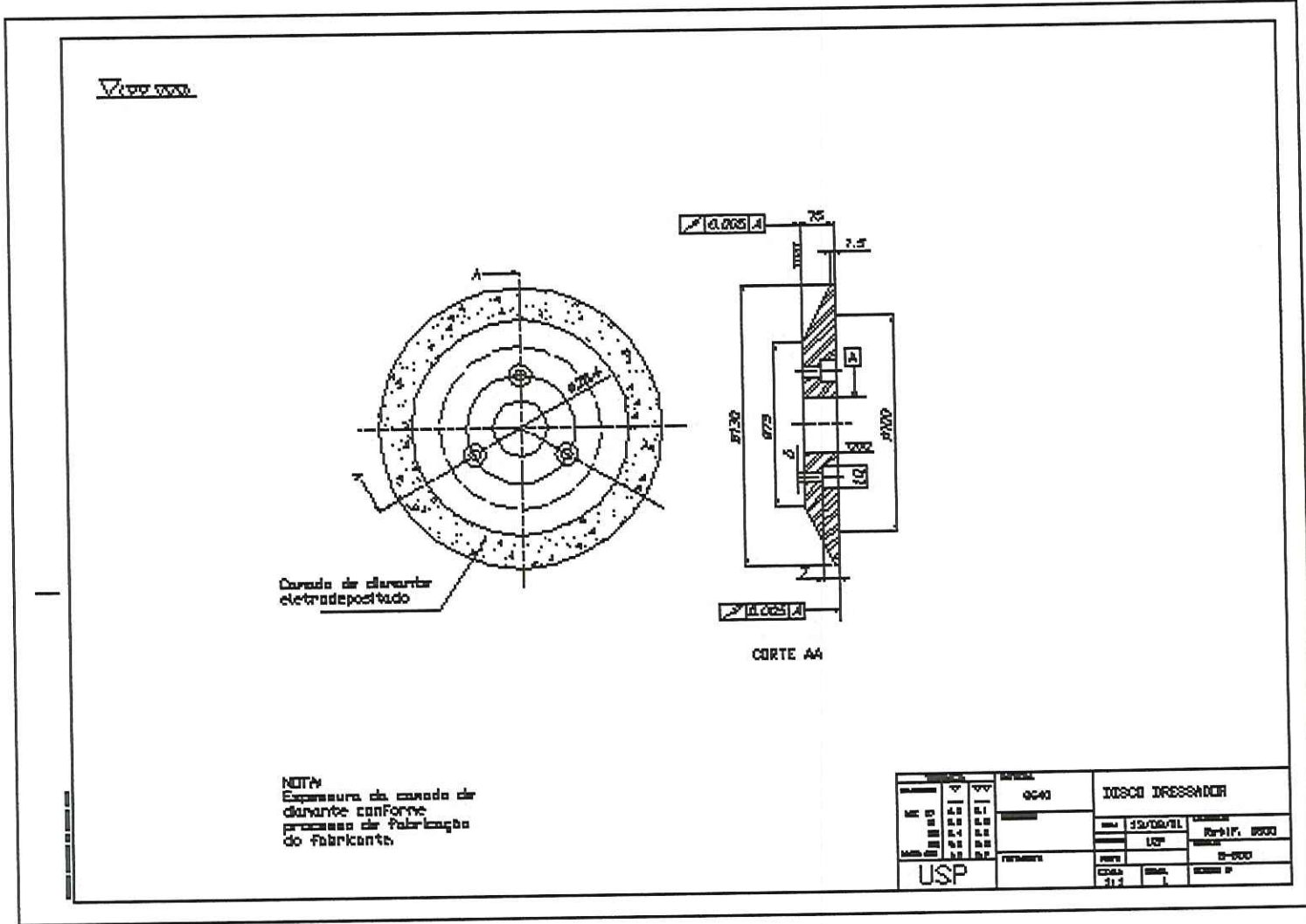
- × GE Superabrasives – General Electric. Worthington, Ohio, USA. Empresa de manufatura de grãos superabrasivos, disponibiliza diversos artigos técnicos com informações sobre propriedades e aplicações de seus produtos. Disponível em: <<http://www.ge.com/superabrasives>>. Acesso em 15 abr. 2001.

ANEXOS

ANEXO I







**ANEXO III**

Programa de dressagem utilizado nos experimentos.

O1000 (PROG DRESS CBN);

N10 M61;

N20 M11 S40;

N30 M51;

N40 G04 X12.;

N50 #1=1 (NR DE REPETICOES);

N60 G65 P1001;

N70 #1=[#1-1];

N80 IF [#1 GT 0] GOTO60;

N90 M52;

N100 M9;

N110 M30;

## Sub-programa de dressagem.

```
O1001 (SUB PROG DRESS CBN);  
N10 G94;  
N20 M8;  
N30 #1=0.002 (PROFUNDIDADE DRESSAGEM);  
N40 #2 = 100 (VEL. DRESSAGEM MM/MIN);  
N50 G190 U-#1 W[#1/2];  
N60 G00 X[#500+2];  
N70 G00 Z[#501-1];  
N80 G00 X#500;  
N90 G01 Z#501 F200.;  
N100 G01 U25 W12.5 F#2;  
N110 G00 Z[#501-3];  
N120 G00 X[#500+2] M1;  
N130 M99;
```

## Programa para retificação de sede de válvulas.

O1002 (RETIF. SEDE VALVULA C/CBN);

N10 M61;

N20 M11 S100;

N30 G04 X8.;

N40 #2=0 (CORRECAO EM X);

N50 #3=0 (CORRECAO EM Z);

N60 #4=2 (VELOC. AVANCO MM/MIN);

N70 #9=0.5 (VELOC. AVANCO BALANCO MM/MIN);

N80 #5=5 (TEMPO DE ALISAMENTO);

N90 #6=150 (ROTACAO PECA);

N100 #7=0.5 (SOBREMETAL NO DIAMETRO);

N110 #8=0 (OSCIL SIM #8=1 – NÃO #8=0);

N120 G94;

N130 M8;

N140 M3 S#6;

N150 G00 X[#500+2];

N160 G00 Z[0+#3];

N170 G00 X2.;


N180 G01 U[-2-#2] F150;

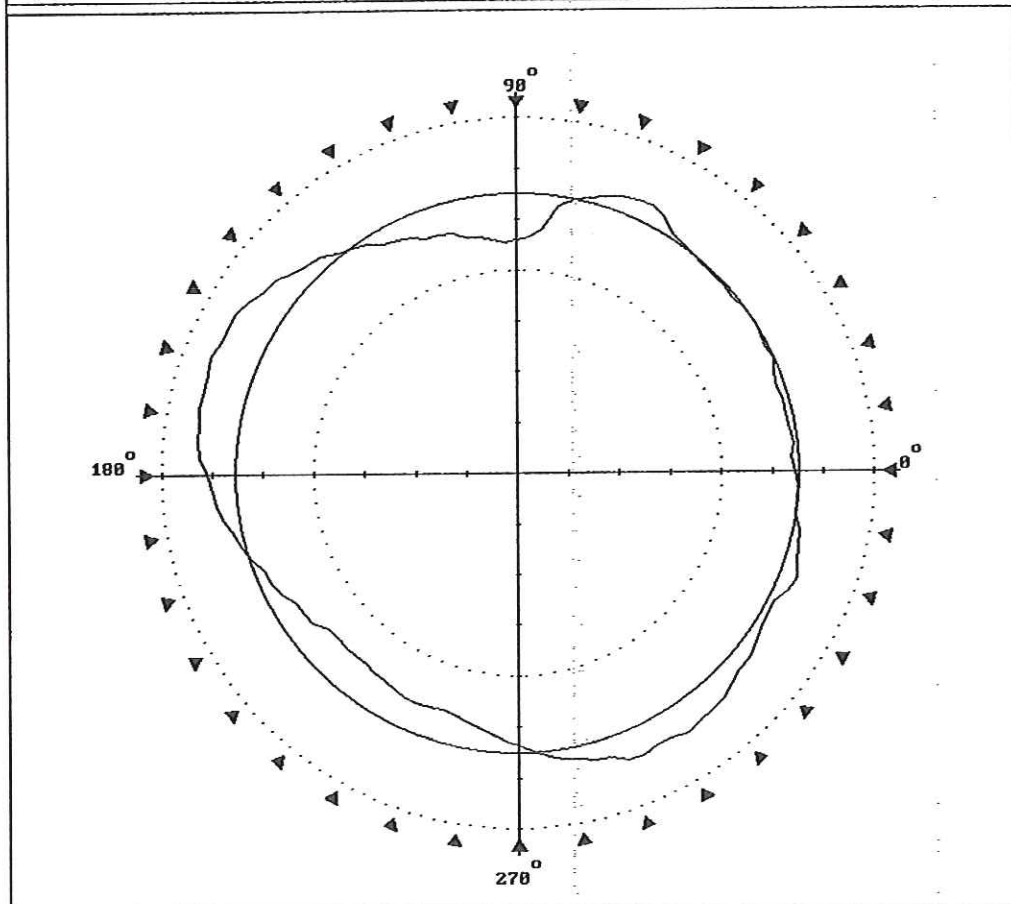
N190 G01 U-#7 F#4;


N200 G04 X#5;  
N210 IF[#8 NE 1] GOTO240;  
N220 G01 U5. W2.5 F#9;  
N230 G04 X1.0;  
N240 G01 U0.5 F1000.;  
N250 G00 X[#500+2];  
N260 M9;  
N270 M5;  
N280 M11 S40;  
N290 G04 X3.;  
N300 M30;

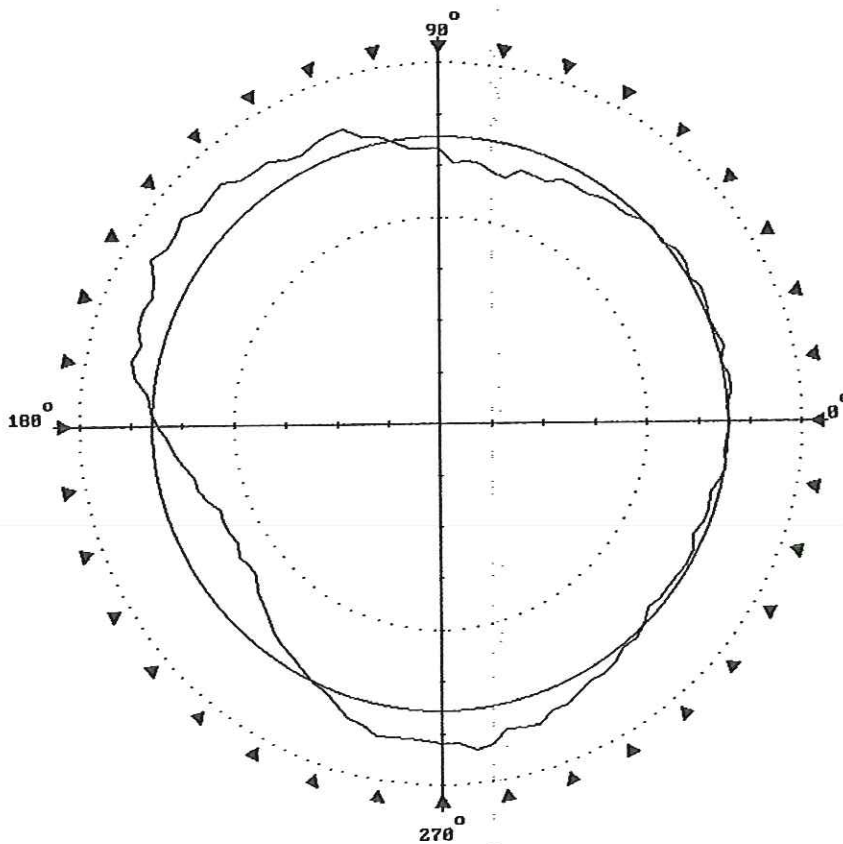
## ANEXO IV


Corpos de prova do material 40 Cr Mo V4.7 retificado com velocidade de avanço de 2 mm/min.

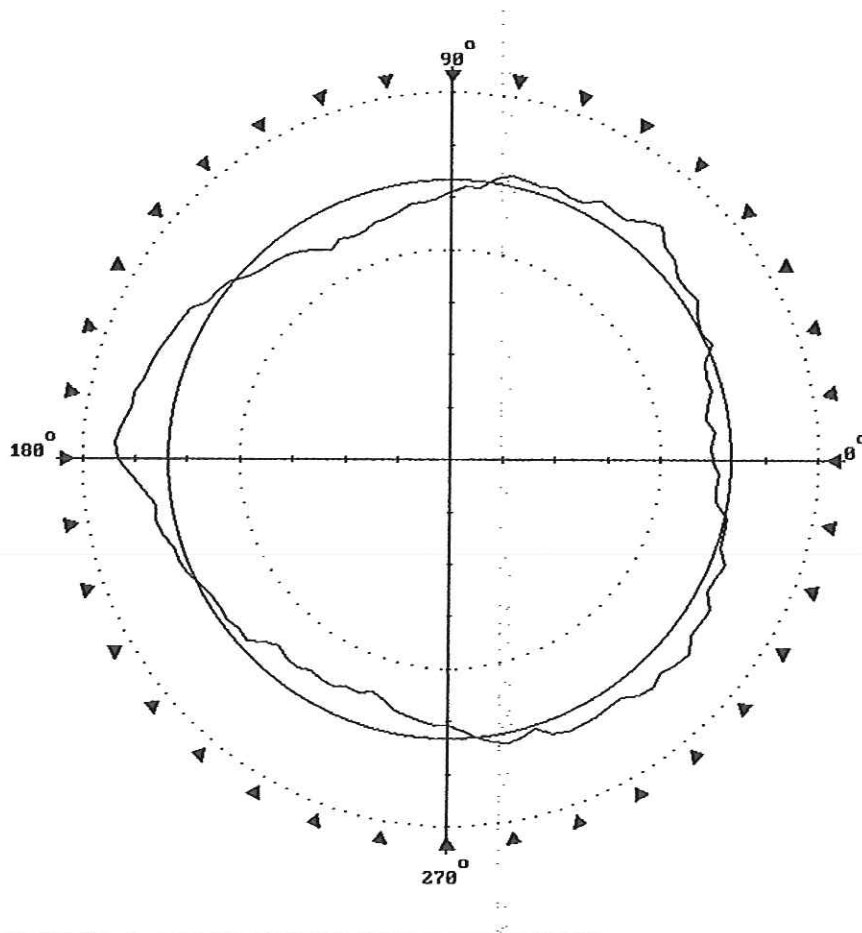
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			8.80 un	Modo Med	Extern
<b>Elemento</b>	<b>DFAULT</b>	<b>Escala</b>	2.88 un	<b>Data Medida</b>	18-07-2002
<b>Elemento No.</b>	00	<b>Altura Z</b>	128.1 mm	<b>Hora Medida</b>	13:02
<b>R</b>	102.40 mm	<b>Ref</b>	ARVORE		
<b>O</b>	3.82 un	<b>Filtro Tipo</b>	2CR		
<b>E</b>	3.33 un	<b>Filtro</b>	1-15 upr		
<b>Z</b>	52.4 graus	<b>Perfil</b>	100.0 %		



<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			6.93 um	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	1.00 um	Data Medida	18-07-2002
Elemento No.	00	Altura Z	126.5 mm	Hora Medida	13:05
R	102.26 mm	Ref	ARVORE		
O	1.98 um	Filtro Tipo	2CR		
E	2.93 um	Filtro	1-15 upr		
Z	18.5 graus	Perfil	100.0 %		




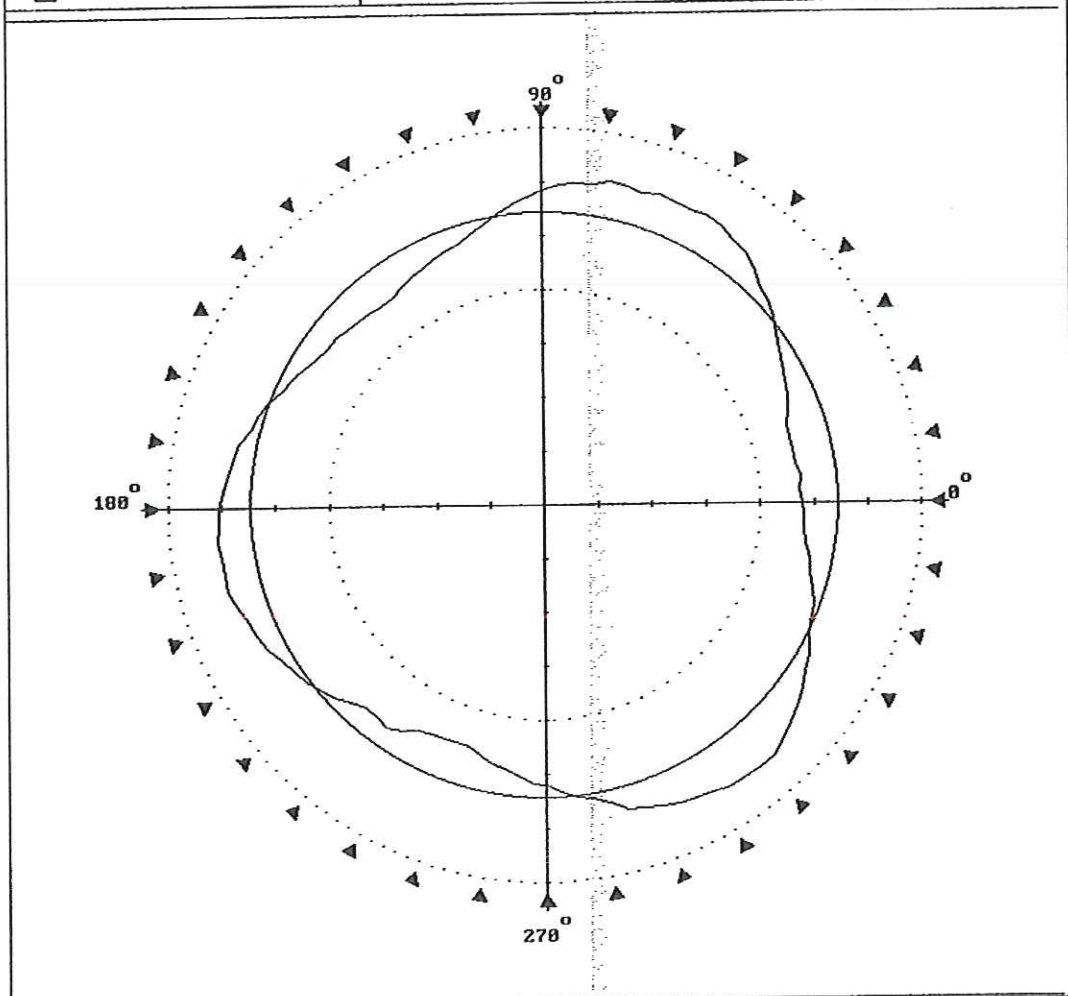
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			5.42 un	Modo Med	Extern
<b>Elemento</b>	DFAULT	<b>Escala</b>	1.00 un	<b>Data Medida</b>	18-07-200
<b>Elemento No.</b>	00	<b>Altura Z</b>	126.0 mm	<b>Hora Medida</b>	13:2
<b>R</b>	102.77 mm	<b>Ref</b>	ARVORE		
<b>Ø</b>	1.78 un	<b>Filtro Tipo</b>	2CR		
<b>E</b>	2.44 un	<b>Filtro</b>	1-15 upr		
<b>∠</b>	340.8 graus	<b>Perfil</b>	100.0 %		




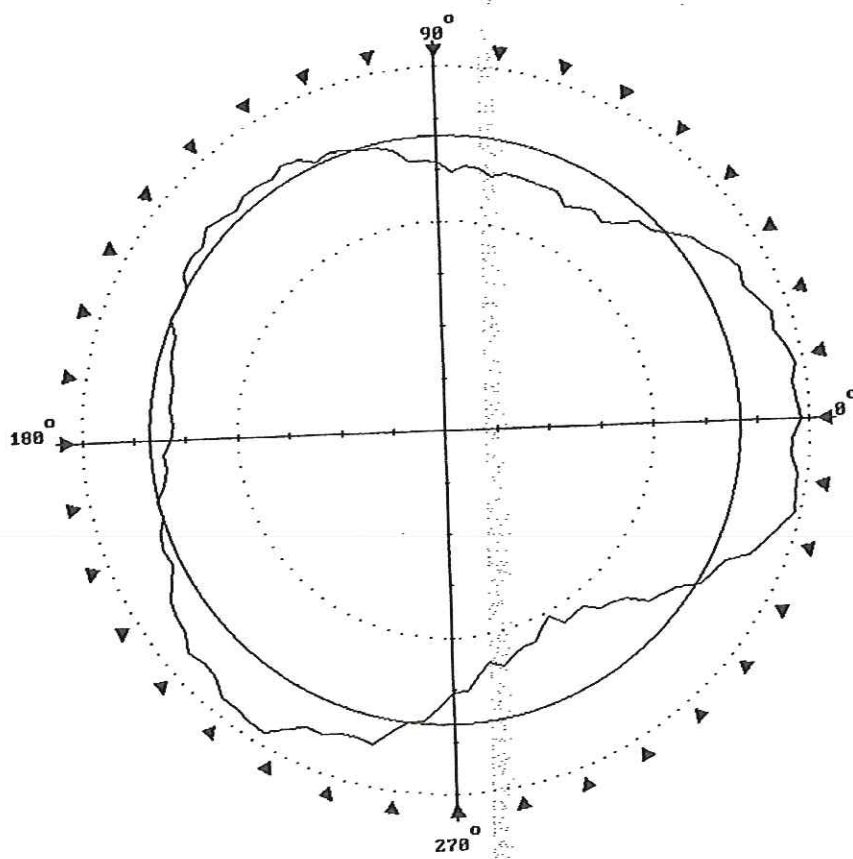


Corpos de prova do material 40 Cr Mo V4.7 retificado com velocidade de avanço de 8 mm/min.

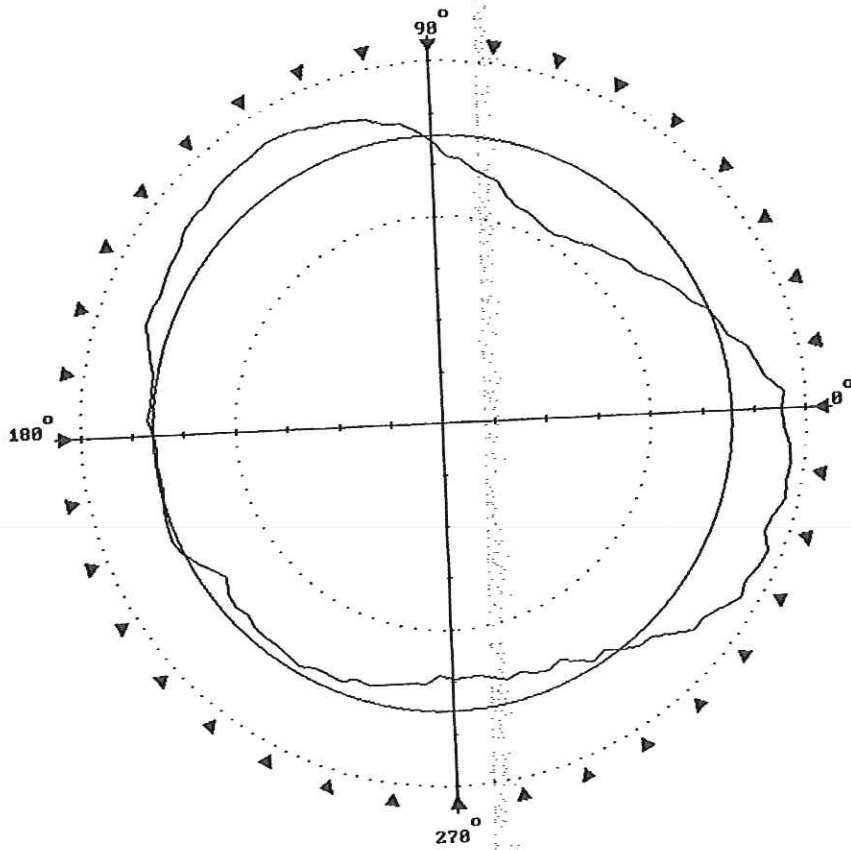
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			7.32 um	Modo Med	Extern
<b>Elemento</b>	<b>DFAULT</b>	<b>Escala</b>	2.00 um	<b>Data Medida</b>	29-07-200
<b>Elemento No.</b>	00	<b>Altura Z</b>	112.4 um	<b>Hora Medida</b>	11:1
<b>R</b>	126.75 um	<b>Ref</b>	ARVORE		
<b>O</b>	3.24 um	<b>Filtro Iipo</b>	2CR		
<b>E</b>	2.67 um	<b>Filtro</b>	1-15 upr		
<b>∠</b>	153.2 graus	<b>Perfil</b>	100.0 %		




<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			16.45 um	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	1.00 um	Data Medida	29-07-200
Elemento No.	00	Altura Z	111.0 um	Hora Medida	11:3
R	126.05 um	Ref	ARVORE		
O	2.00 um	Filtro Tipo	2CR		
E	7.47 um	Filtro	1-15 upr		
Z	5.7 graus	Perfil	100.0 %		

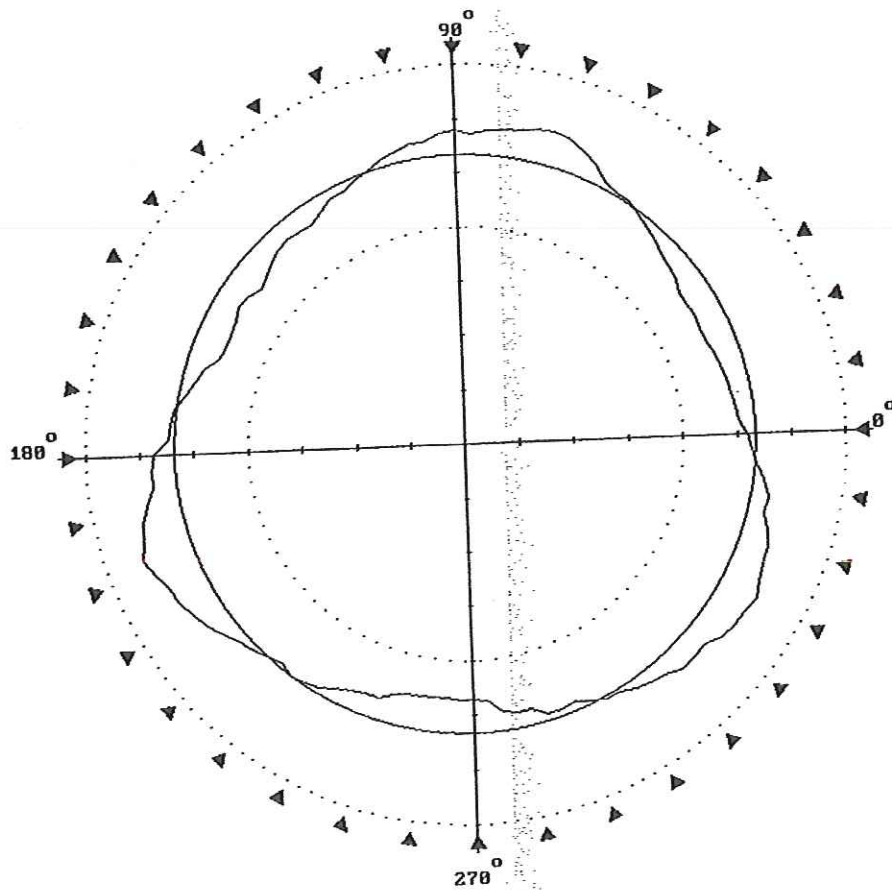



<b>RES CIRCULARIDADE IS</b>		↗	9.28 um	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	1.00 um	Data Medida	29-07-2007
Elemento No.	00	Altura Z	111.9 mm	Hora Medida	11:1
R	126.63 mm	Ref	ARVORE		
O	2.55 um	Filtro Tipo	2CR		
E	4.82 um	Filtro	1-15 upr		
Z	164.9 graus	Perfil	100.0 %		

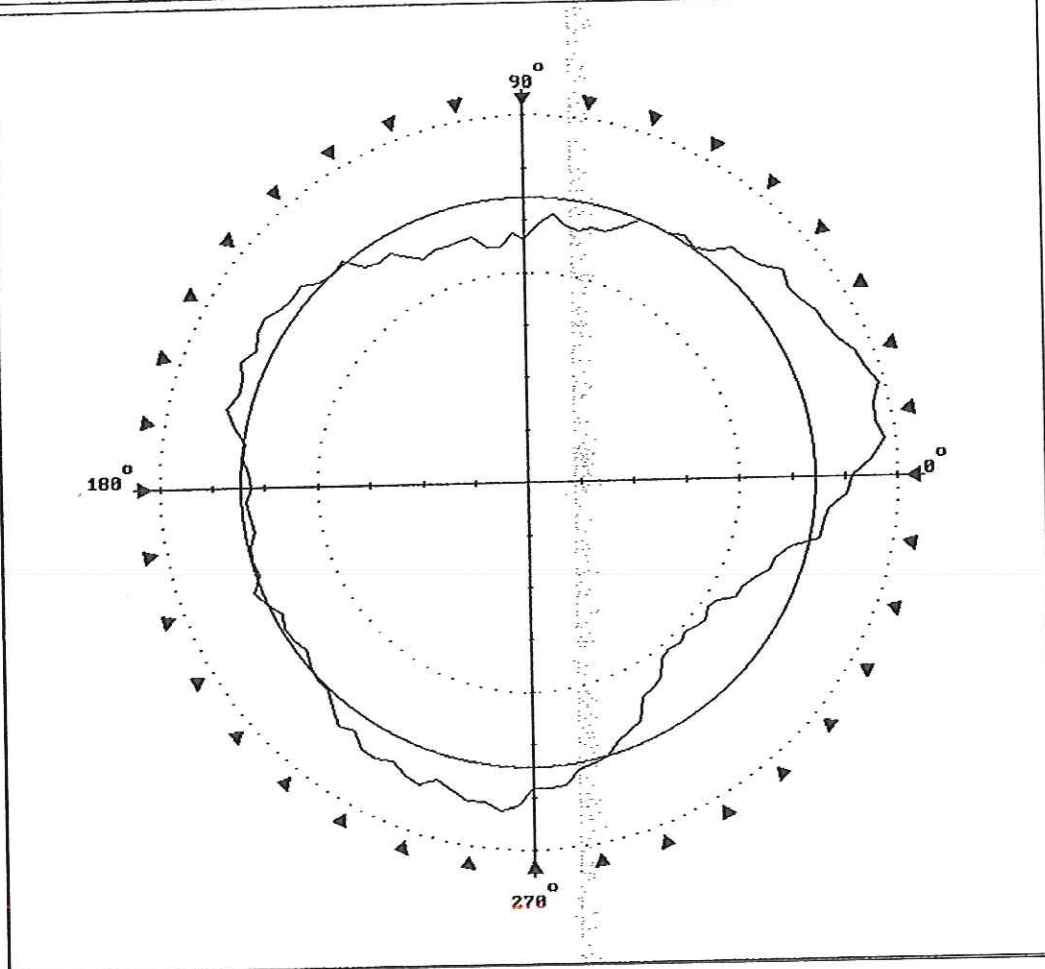


Corpos de prova do material 40 Cr Mo V4.7 retificado com velocidade de avanço de 16 mm/min.


<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			8.29 um	Modo Med	Extern
<b>Elemento</b>	DFault	Escala	2.88 um	Data Medida	29-07-200
<b>Elemento No.</b>	08	Altura Z	112.9 mm	Hora Medida	11:2
<b>R</b>	125.54 mm	Ref	ARVORE		
<b>O</b>	3.22 um	Filtro Tipo	2CR		
<b>E</b>	3.01 um	Filtro	1-15 upr		
<b>∠</b>	171.8 graus	Perfil	100.0 %		

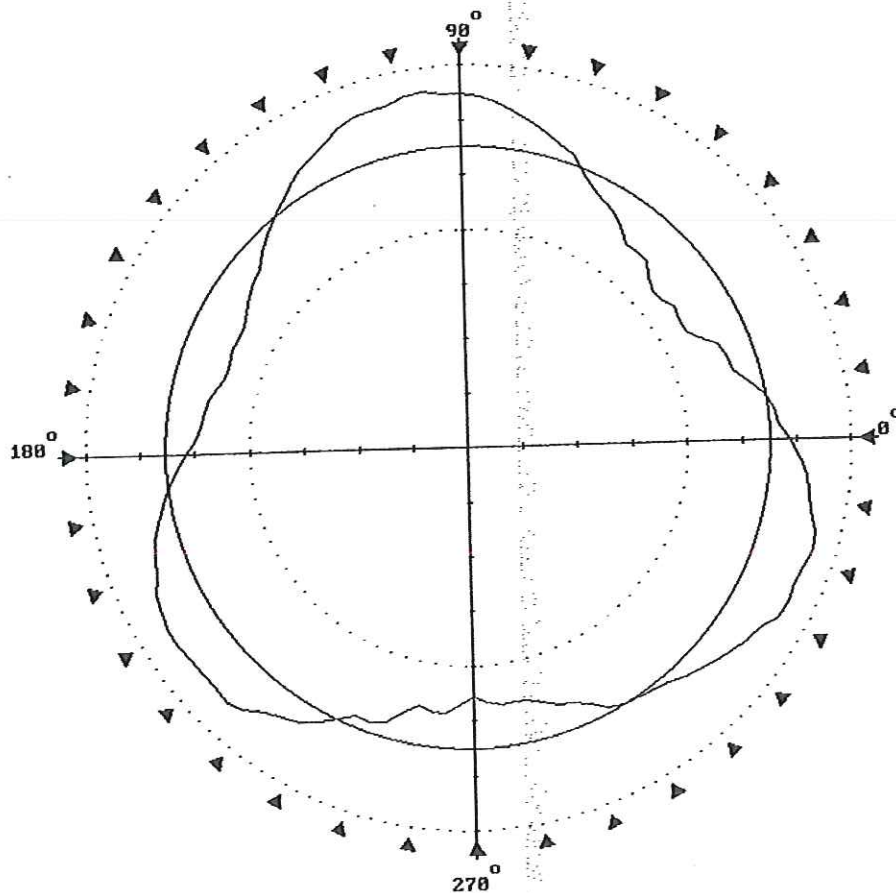


<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			3.06 un	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	1.00 un	Data Medida	29-07-200
Elemento No.	08	Altura Z	112.8 mm	Hora Medida	11:0
R	127.21 mm	Ref	ARVORE		
O	2.78 un	Filtro Tipo	2CR		
E	8.96 un	Filtro	1-15 upr		
Z	216.6 graus	Perfil	100.0 %		

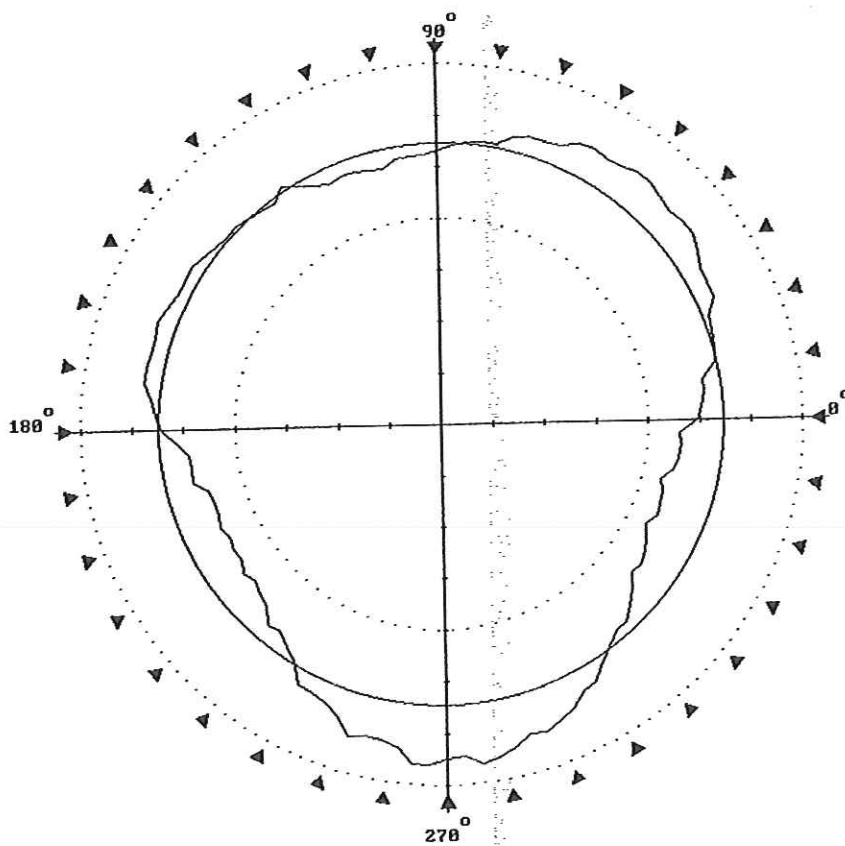



Corpos de prova do material Pyromet 31 retificado com velocidade de avanço de 2 mm/min.

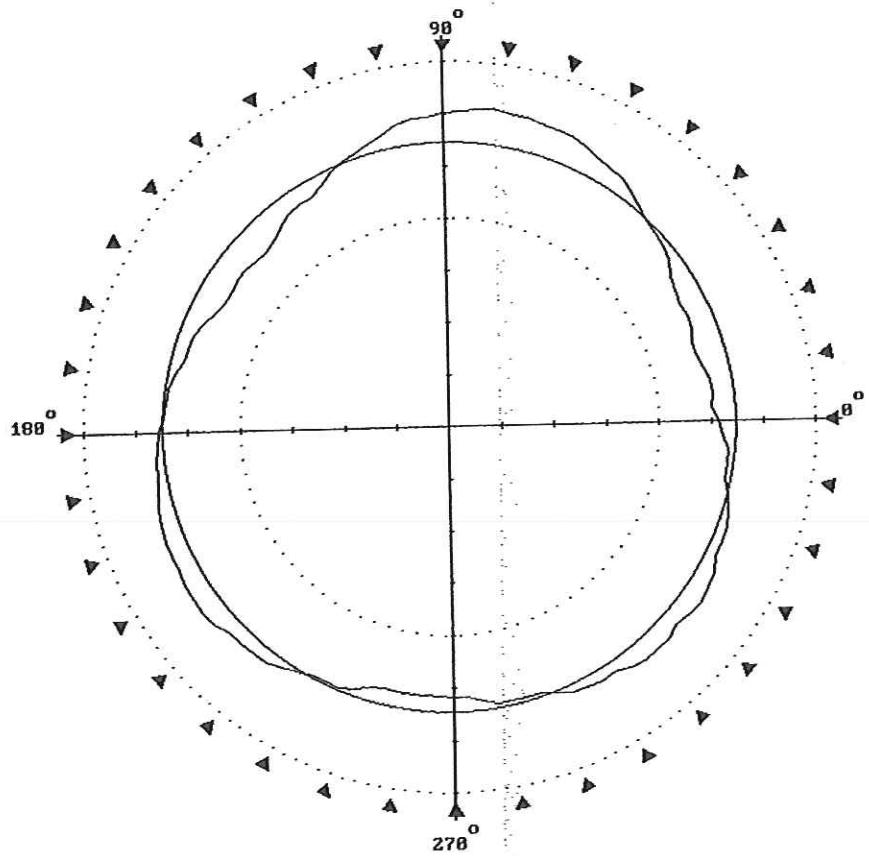
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			19.13 un	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	2.00 un	Data Medida	15-07-200:
Elemento No.	00	Altura Z	157.6 un	Hora Medida	13:0.
R	109.37 un	Ref	ARVORE		
O	4.32 un	Filtro Tipo	ZCR		
E	7.63 un	Filtro	1-15 upr		
Z	337.8 graus	Perfil	100.0 %		



<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>		↗	9.11 um	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	2.00 um	Data Medida	15-07-200:
Elemento No.	08	Altura Z	158.5 um	Hora Medida	13:21
R	109.93 um	Ref	ARVORE		
O	4.54 um	Filtro Tipo	2CR		
E	3.23 um	Filtro	1-15 upr		
Z	138.7 graus	Perfil	100.0 %		

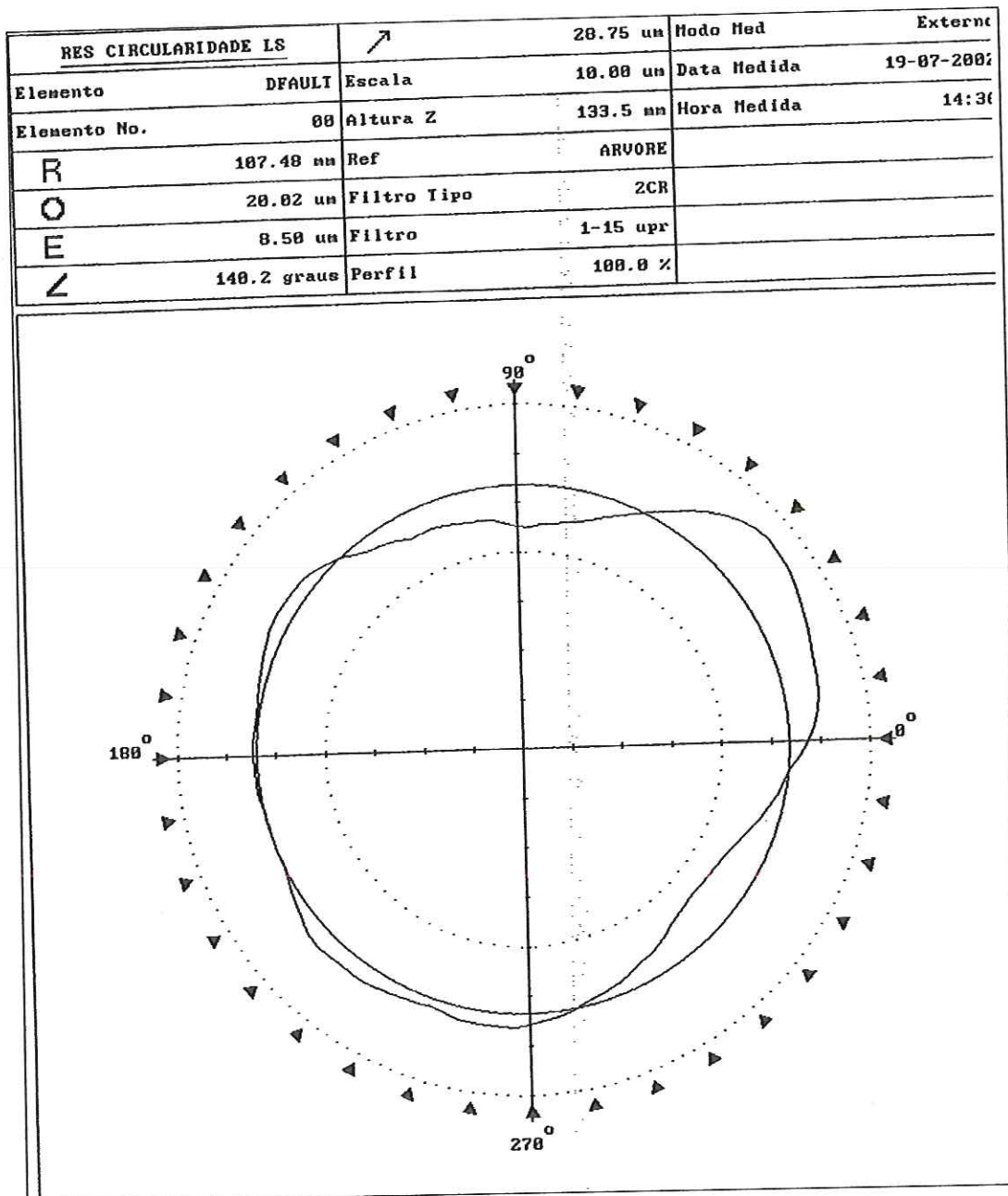



<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			8.55 un	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULI	Escala	5.88 un	Data Medida	15-07-2002
Elemento No.	08	Altura Z	159.7 un	Hora Medida	13:41
R	118.61 un	Ref	ARVORE		
O	6.53 un	Filtro Tipo	2CR		
E	2.56 un	Filtro	1-15 upr		
Z	259.9 graus	Perfil	100.0 %		

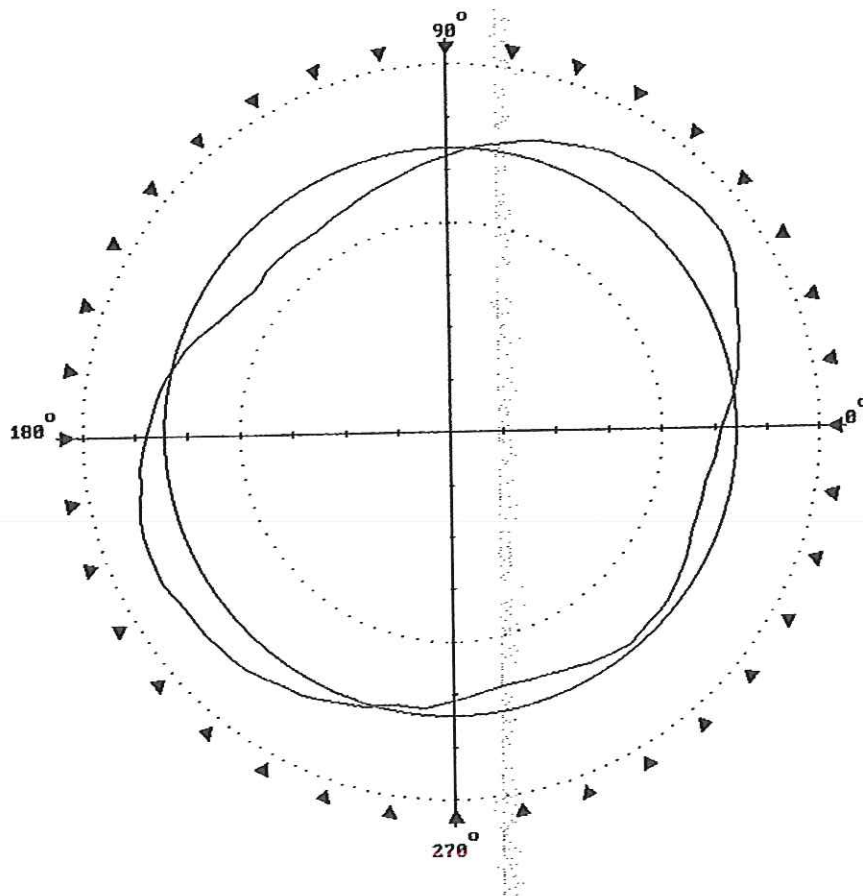





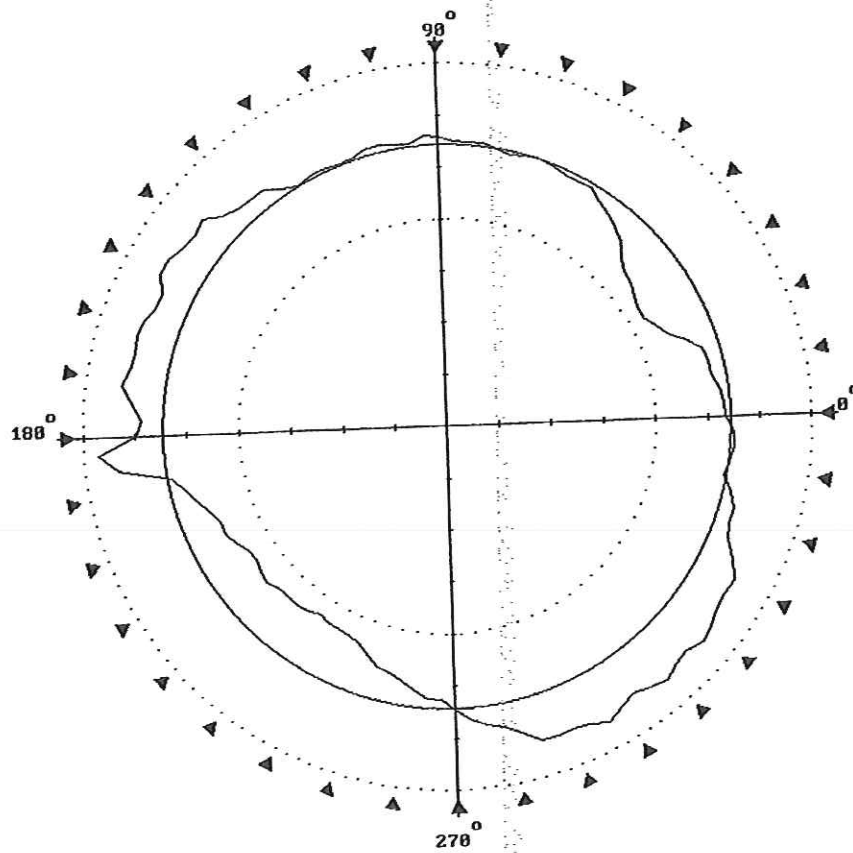
Corpos de prova do material VMS-599 retificado com velocidade de avanço de 2 mm/min.




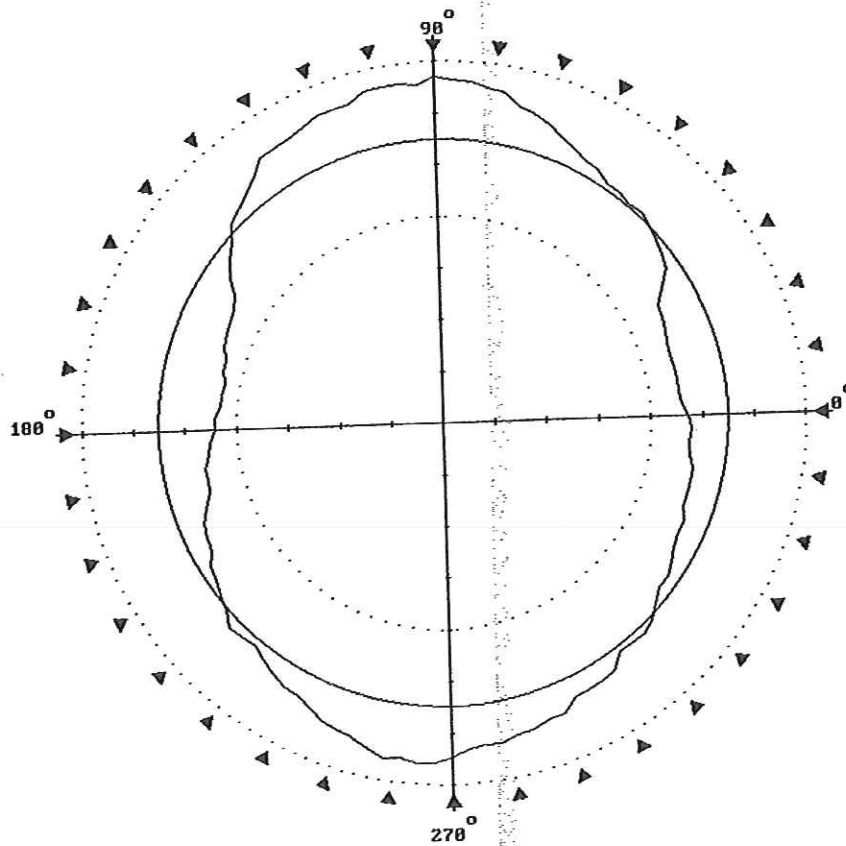
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			16.88 um	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULI	Escala	10.00 um	Data Medida	18-07-200
Elemento No.	00	Altura Z	137.7 mm	Hora Medida	14:0
R	103.06 mm	Ref	ARVORE		
O	17.84 um	Filtro Tipo	2CR		
E	1.47 um	Filtro	1-15 upr		
Z	144.5 graus	Perfil	100.0 %		




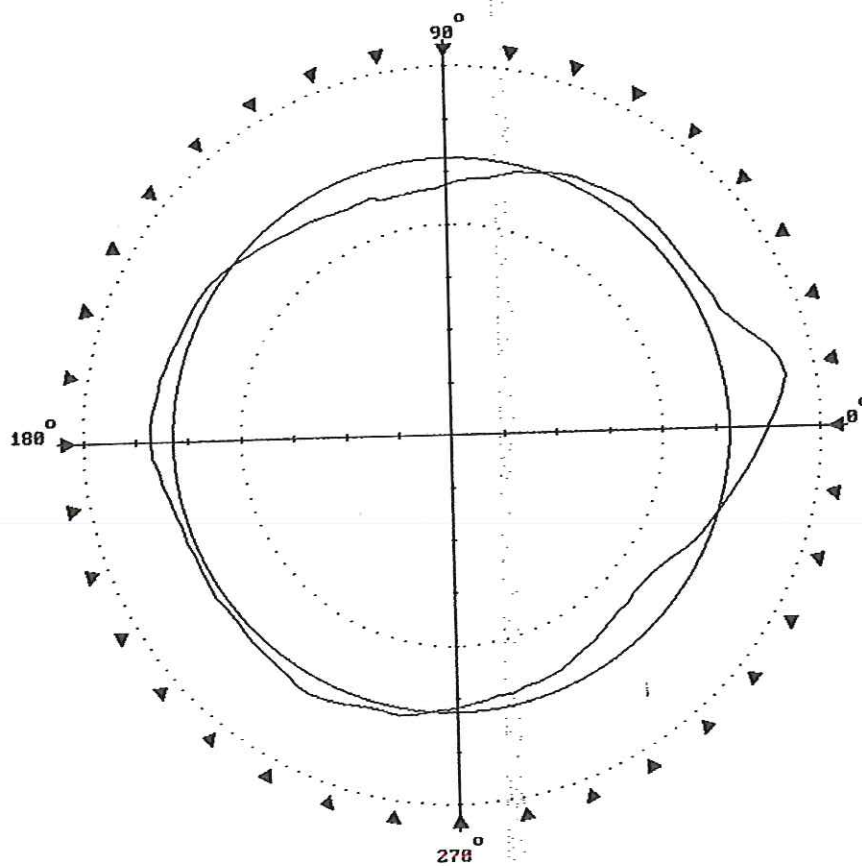
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			28.70 um	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	2.00 um	Data Medida	19-07-2002
Elemento No.	00	Altura Z	133.1 um	Hora Medida	14:30
R	100.17 um	Ref	ARVORE		
O	4.86 um	Filtro Tipo	2CR		
E	14.15 um	Filtro	1-15 upr		
Z	355.2 graus	Perfil	100.0 %		




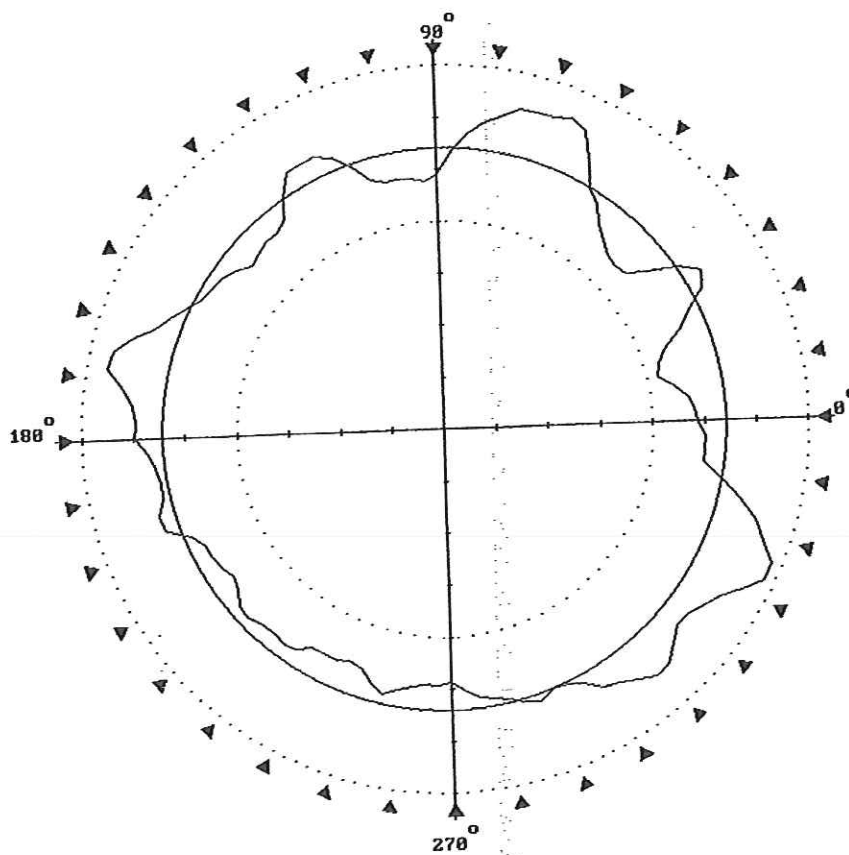
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			27.73 um	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	2.88 um	Data Medida	19-07-2008
Elemento No.	08	Altura Z	133.4 mm	Hora Medida	13:2
R	107.53 mm	Ref	ARVORE		
O	4.88 um	Filtro Tipo	ZCR		
E	13.28 um	Filtro	1-15 upr		
Z	351.1 graus	Perfil	100.0 %		




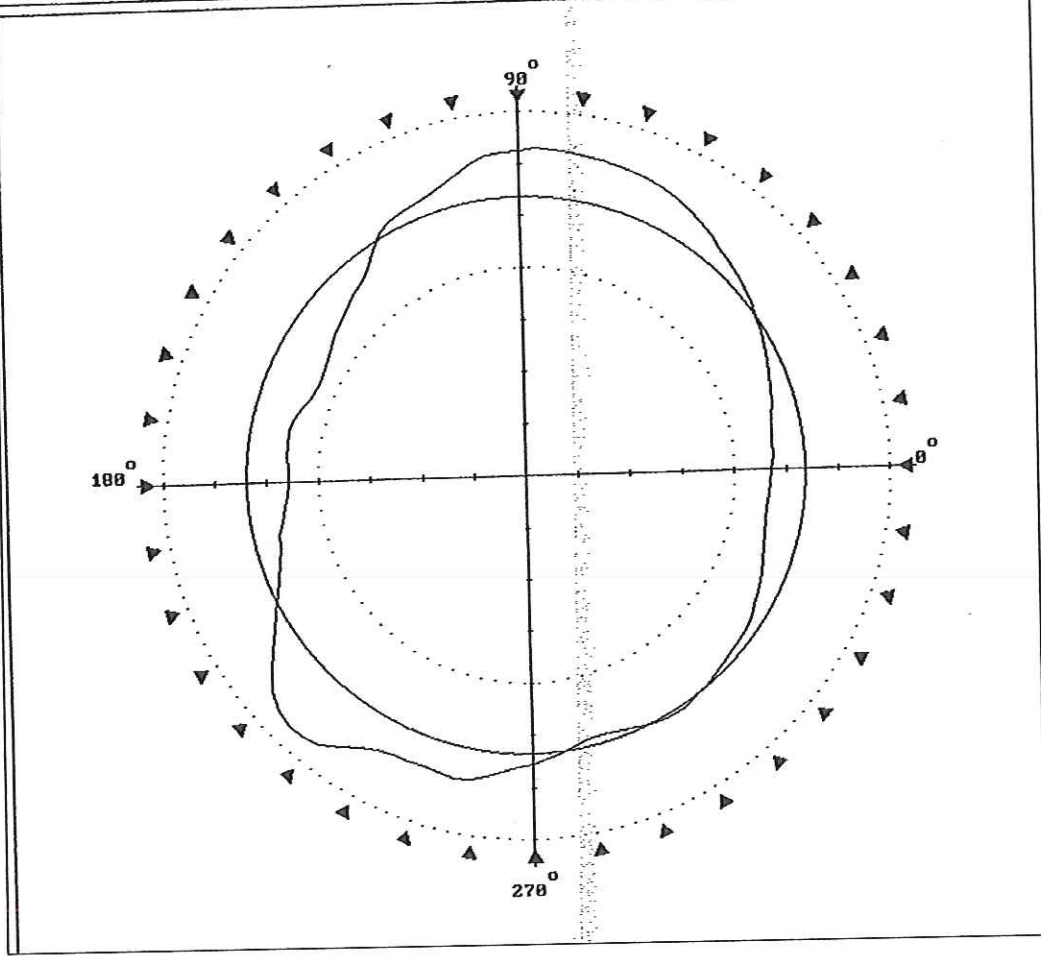
<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			13.67 un	Modo Med	Extern
Elemento	DFAULT	Escala	5.00 un	Data Medida	19-07-200
Elemento No.	00	Altura Z	131.2 un	Hora Medida	15:0
R	107.03 un	Ref	ARVORE		
O	9.31 un	Filtro Tipo	2CR		
E	4.15 un	Filtro	1-15 upr		
Z	10.6 graus	Perfil	100.0 %		



<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			32.62 un	Modo Med	Extern
<b>Elemento</b>	DFAULT	<b>Escala</b>	2.00 un	<b>Data Medida</b>	19-07-2003
<b>Elemento No.</b>	00	<b>Altura Z</b>	131.5 un	<b>Hora Medida</b>	14:31
<b>R</b>	106.77 un	<b>Ref</b>	ARVORE		
<b>O</b>	5.17 un	<b>Filtro Tipo</b>	2CR		
<b>E</b>	14.34 un	<b>Filtro</b>	1-15 upr		
<b>Z</b>	187.3 graus	<b>Perfil</b>	100.0 %		



<b>RES CIRCULARIDADE LS</b>			29.02 un	Modo Med	Externi
<b>Elemento</b>	DFAULT	<b>Escala</b>	10.00 un	<b>Data Medida</b>	19-07-2001
<b>Elemento No.</b>	00	<b>Altura Z</b>	130.7 un	<b>Hora Medida</b>	13:30
<b>R</b>	106.02 un	<b>Ref</b>	ARVORE		
<b>O</b>	22.45 un	<b>Filtro Tipo</b>	2CR		
<b>E</b>	5.04 un	<b>Filtro</b>	1-15 upr		
<b>Z</b>	224.9 graus	<b>Perfil</b>	100.0 %		



5-2-00