

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DETERMINAÇÃO DO POSICIONAMENTO RELATIVO ENTRE REBOLO E PEÇA  
COM O AUXÍLIO DA EMISSÃO ACÚSTICA**

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

**ADRIANO BOARON**

**FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 2009.**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DETERMINAÇÃO DO POSICIONAMENTO RELATIVO ENTRE REBOLO E PEÇA  
COM O AUXÍLIO DA EMISSÃO ACÚSTICA**

**ENG. ADRIANO BOARON**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE  
EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
FABRICAÇÃO SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL**

---

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

---

**Prof. D.Sc. Eduardo Alberto Fancello - Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter - Presidente**

---

**Prof. Dr.-Ing. Joel Martins Crichigno Filho**

---

**Dr. Sc. Fábio Wagner Pinto**



**Dedico este trabalho aos meus pais**



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, coordenador do LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão) pela confiança, pela oportunidade oferecida para a realização deste trabalho, pela amizade e por sua orientação durante as atividades.

Ao Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, por suas sugestões, apoio e amizade durante o período de realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ing. Carlos Alberto Martin pelo auxílio com equipamentos eletrônicos na fase inicial dos trabalhos e ao Prof. Ph. D. Fernando Cabral, pelas valiosas sugestões na fase de planejamento dos experimentos.

À CAPES, pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudos.

À FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pela participação no financiamento do Projeto Verde Amarelo, o que possibilitou a aquisição de equipamentos imprescindíveis para a realização deste trabalho.

À empresa ZEN S.A (Brusque-SC) pelo suporte nas atividades e pela disponibilidade de máquina-ferramenta para a realização dos ensaios.

Ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização deste trabalho

A Gilmar Martinenghi, Célio Brick, Jean Pierre pelo suporte ao longo das atividades desenvolvidas na empresa ZEN S.A. Aos técnicos Rodrigo Wippel e Nivaldo Schmitt pela ajuda e esclarecimentos ao longo dos ensaios na máquina-ferramenta.

Ao mestre Eng. Mec. Daniel Amoretti Gonçalves e ao futuro doutor Eng. Mec. Ângelo Marcos Gil Boeira pela amizade e auxílio na parte gráfica do presente trabalho.

Ao futuro mestre Eng. Mec. Francisco Augusto Arenhart pela constante ajuda durante a etapa de medições realizada no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) localizado junto à Fundação CERTI-UFSC

Ao técnicos da UFSC Valtair Fabriciano Garcez, Hélio Irineu José e ao Eng. Paulo de Farias Magalhães pela ajuda na confecção dos corpos de provas e pelo suporte durante atividades na UFSC.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.



## SUMÁRIO

<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>18</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E PROPOSTA DE TRABALHO.....</b>	<b>19</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>23</b>
2.1 Aspectos Gerais sobre o Processo de Retificação .....	23
2.2 Forma Média dos Gumes de Geometria não-Definida.....	25
2.3 Penetração do Gume.....	26
2.4 Desgaste de Rebolos.....	27
2.5 Classificação dos Processos de Retificação.....	29
2.6 Retificação Cilíndrica Externa em Mergulho .....	31
2.7 Retificação Cilíndrica Externa Helicoidal .....	32
2.8 Condicionamento de Rebolos .....	33
2.9 Dressamento de Rebolos .....	34
2.9.1 Dressamento de rebolos convencionais e rebolos de CBN.....	34
2.9.2 Parâmetros no dressamento e influência no resultado de trabalho.....	36
• Grau de recobrimento .....	36
• Profundidade de dressamento.....	37
• Relação de velocidades.....	38
2.10 Monitoramento de Processos .....	39
2.11 Monitoramento no Processo de Retificação .....	41
2.11.1 Métodos de monitoramento na retificação .....	43
• Métodos diretos de monitoramento .....	43
• Métodos indiretos de monitoramento .....	44
2.12 Estratégias de Monitoramento .....	44
2.13 Pré-requisitos para o Monitoramento de Processos .....	48
2.14 Transdutores para o Monitoramento de Processos .....	48
2.15 Transdutores para o Monitoramento do Processo de Retificação .....	49
2.15.1 Transdutores para monitoramento da potência .....	50
2.15.2 Transdutores para monitoramento da força.....	50
2.15.3 Transdutores para monitoramento da emissão acústica.....	51

2.16	Emissão Acústica (EA) no Processo de Retificação .....	54
2.16.1	Fontes de emissão acústica no processo de retificação.....	55
2.16.2	Faixa de frequências na emissão acústica.....	56
2.17	Sinais de Emissão Acústica (EA) na Região de Contato Rebolo-Peça.....	57
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
3.1	Máquinas-ferramentas .....	61
3.2	Ferramenta de Corte .....	64
3.3	Sistemas de Monitoramento por Emissão Acústica (EA) .....	65
3.3.1	Sistema de monitoramento SM-D .....	66
3.3.2	Sistema de monitoramento SM-S .....	68
3.4	Sistema Multianalisador de Sinais Oros .....	69
3.5	Corpos de prova.....	71
3.6	Bancada Experimental .....	73
3.7	Equipamentos Auxiliares .....	75
3.8	Dressamento de Rebolos .....	77
3.9	Ajuste dos Parâmetros de EA no SM-D para Reconhecimento de Contato..	80
3.9.1	Ajuste dos parâmetros no SM-D para a estratégia ZEROY <sub>AUTO</sub> .....	82
3.10	Ajuste dos Parâmetros de EA no SM-S no Reconhecimento de Contato ...	83
3.11	Amostragem de Sinais de EA.....	84
3.12	Posicionamento de Transdutores .....	85
3.12.1	Posicionamento dos transdutores de EA na máquina Zema Zselics Pratika Flexa 600I.....	85
3.12.2	Posicionamento dos transdutores de EA na retificadora cilíndrica CNC ZEN/Stauffer .....	89
3.13	Medição da Profundidade das Marcas Resultantes do Evento de Contato.	91
<b>4.</b>	<b>PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>97</b>
4.1	Reconhecimento de Contato entre Rebolo-CP .....	97
4.2	Planejamento dos Ensaios.....	100
4.2.1	Determinação do número de amostras para as situações experimentais envolvendo Análise Fatorial ( $n_{\text{ENSAIO1}}$ ).....	103
4.3	Verificação do Desempenho dos Sistemas de Monitoramento (SM) na Condição Otimizada.....	104
4.3.1	Comparação do desempenho dos SM utilizados com relação ao reconhecimento de contato .....	105

4.4	Proposição para a Determinação da Posição Centralizada entre Rebolo e Corpo de Prova (CP) na Empresa Parceira .....	106
4.4.1	Estratégia manual ( $ZEROY_{MANUAL}$ ) para a determinação da posição centralizada entre rebolo e CP .....	107
4.4.2	Estratégia automatizada ( $ZEROY_{AUTO}$ ) para a determinação da posição centralizada entre rebolo-CP .....	109
4.5	Otimização da Estratégia $ZEROY_{AUTO}$ (Etapa 1 dos Ensaios na Empresa Parceira) .....	111
4.6	Validação das Estratégias $ZEROY_{MANUAL}$ e $ZEROY_{AUTO}$ (Etapa 2 dos Ensaios na Empresa Parceira).....	114
4.7	Determinação do Perfil Teórico (de Projeto) para Estrias Usinadas no CP .	115
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>117</b>
5.1	Reconhecimento de Contato entre Rebolo-CP Utilizando-se Sistemas de Monitoramento (SM) Distintos – LMP (UFSC).....	117
5.2	Verificação do Desempenho dos Sistemas de Monitoramento (SM) na Condição Otimizada .....	124
5.2.1	Análise dos sinais de $E_{A_{RMS}}$ decorrentes do evento de contato .....	125
5.2.2	Comparação do desempenho dos SM utilizados com relação ao reconhecimento de contato.....	131
5.3	Determinação da Posição Centralizada entre Rebolo e CP ( $ZEROY_{MANUAL}$ ) .....	132
5.4	Determinação da Posição Centralizada entre Rebolo-CP ( $ZEROY_{AUTO}$ ).....	133
5.5	Otimização da Estratégia $ZEROY_{AUTO}$ (Etapa 1 dos Ensaios na Empresa Parceira) .....	138
5.6	Validação das Estratégias $ZEROY_{MANUAL}$ e $ZEROY_{AUTO}$ (Etapa 2 dos Ensaios na Empresa Parceira).....	140
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....</b>	<b>145</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>147</b>

## SIMBOLOGIA

### Letras Latinas (Romanas)

$A_{sC}$	$\text{mm}^2$	Superfície de desgaste total
$A_{sk}$	$\text{mm}^2$	Superfície de desgaste de quina do rebolo
$A_{sr}$	$\text{mm}^2$	Superfície de desgaste radial do rebolo
$D_{MIN}$	mm	Diâmetro interno no perfil da estria
$D_{MÁX}$	mm	Diâmetro externo no perfil da estria
$F_{MÁX}$	V	Valor máximo do sinal medido
$F_{MÉDIO}$	V	Valor médio do sinal medido
$F_n$	N	Força de corte normal
$F_t$	N	Força de corte tangencial
$F_{nS}$	N	Força normal do gume
$F_{tS}$	N	Força tangencial do gume
L	mm	Comprimentos no CP para ensaios com estratégia ZEROY <sub>AUTO</sub>
P	mm	Avanço por rotação do rebolo
$R_{ts}$	$\mu\text{m}$	Rugosidade efetiva
$S_p$	$\mu\text{m}$	Desvio-padrão combinado
U	V	Tensão elétrica
$U_d$	-	Grau de recobrimento
$W_{satheo}$	mm	Rugosidade teórica do rebolo na direção axial
$Y_D$	$\mu\text{m}$	Valor médio das 48 marcas obtidas com SM-D
$Y_S$	$\mu\text{m}$	Valor médio das 48 marcas obtidas com SM-S
Y1	mm	Posição associada ao início de faiscamento com utilização da estratégia ZEROY <sub>AUTO</sub>
Y2	mm	Posição associada ao fim de faiscamento com utilização da estratégia ZEROY <sub>AUTO</sub>

$a_d$	$\mu\text{m}$	Profundidade de penetração no dressamento com ponta diamantada
$a_e$	mm	Penetração na superfície de trabalho (no sentido do avanço)
$a_{ed}$	$\mu\text{m}$	Profundidade de penetração no dressamento com disco
$a_{e,m}$	$\mu\text{m}$	Profundidade medida por instrumentação
$a_{e,SINAL}$	$\mu\text{m}$	Profundidade da marca de contato estimada pela análise do sinal de $EA_{RMS}$
$a_p$	mm	Largura de corte (no sentido do eixo do rebolo)
$a_{pd}$	mm	Largura de corte no dressamento
$b_d$	mm	Largura efetiva da ferramenta de dressar
$b_s$	mm	Largura do rebolo
$d_s$	mm	Diâmetro do rebolo
$d_w$	mm	Diâmetro da peça
$f_A$	Hz	Freqüência de amostragem do sinal analógico
$f_{ad}$	mm	Avanço de dressamento a cada rotação do rebolo
$f_{MIN}$	Hz	Freqüência mínima contida no sinal analógico
$f_{MÁX}$	Hz	Freqüência máxima contida no sinal analógico
$h_{cu,max}$	mm	Profundidade de penetração máxima do gume
$n_D$	-	Número de amostras utilizando SM-D
$n_S$	-	Número de amostras utilizando SM-S
$n_s$	$\text{min}^{-1}$	Número de rotações do rebolo
$n_{ENSAIO1}$	-	Número de amostras para Análise Fatorial
$n_{ENSAIO2}$	-	Número de amostras para Teste de Hipóteses
$n_w$	$\text{min}^{-1}$	Número de rotações da peça
p-valor	-	Menor nível $\alpha$ em que os dados sejam significantes
$q_d$	-	Relação de velocidades no perfilamento
$r_d$	mm	Raio de curvatura da ferramenta de dressar
$r_p$	mm	Raio de ponta do disco dressador
$s_D$	$\mu\text{m}$	Desvio-padrão da amostra obtida com SM-D
$s_S$	$\mu\text{m}$	Desvio-padrão da amostra obtida com SM-S

$S_{\text{AUTO}}$	mm	Desvio-padrão nos valores de centro utilizando estratégia ZEROY <sub>AUTO</sub>
$S_{\text{MANUAL}}$	mm	Desvio-padrão nos valores de centro utilizando estratégia ZEROY <sub>MANUAL</sub>
$S_{\text{SINAL,D}}$	$\mu\text{m}$	Desvio-padrão das profundidades das marcas avaliadas pela análise do sinal de EA <sub>RMS</sub> com SM-D
$S_{\text{SINAL,S}}$	$\mu\text{m}$	Desvio-padrão das profundidades das marcas avaliadas pela análise do sinal de EA <sub>RMS</sub> com SM-S
$t_A$	ms	Tempo de aproximação no sinal EA <sub>RMS</sub> ( <i>approach time</i> )
$t_R$	ms	Tempo de crescimento do sinal EA <sub>RMS</sub> ( <i>rise time</i> )
$t_0$	ms	Tempo associado com a primeira ultrapassagem do limite estático ( <i>threshold</i> )
$V_{\text{fad}}$	mm/min	Velocidade de perfilamento (sentido axial)
$V_{\text{frd}}$	mm/min	Velocidade de avanço de dressamento no sentido radial
$V_{\text{fr}}$	mm/min	Velocidade de avanço do rebolo no sentido radial
$V_{\text{ft}}$	mm/min	Velocidade de avanço da mesa
$V_p$	mm/min	Velocidade de avanço do rebolo com componentes axial e radial
$V_R$	m/s	Velocidade periférica do rolo/disco dressador
$V_s$	m/s	Velocidade de corte do rebolo
$V_w$	m/s	Velocidade da peça
$\overline{x_D}$	$\mu\text{m}$	Valores médios das amostras obtidas com SM-D
$\overline{x_S}$	$\mu\text{m}$	Valores médios das amostras obtida com SM-S

### Letras Gregas

$\alpha$	-	Nível de significância (0,05)
$\alpha$	graus	Ângulo de incidência do gume
$\beta$	-	Erro tipo II (parâmetro estatístico)
$\gamma$	graus	Ângulo de saída do gume
$\rho_s$	$\mu\text{m}$	Raio do gume
$\nu$	-	Número de graus de liberdade

$\Delta-\Delta_0$	$\mu\text{m}$	Diferença nos valores médios das profundidades das marcas da população
$\Delta r_a$	mm	Limite de dressamento
$\Delta r_k$	$\text{mm}^2$	Desgaste de quina do rebolo
$\Delta r_s$	$\text{mm}^2$	Desgaste radial do rebolo
$\Delta I$	$\mu\text{m}$	Desvio entre perfis teórico e medido, na posição inferior do perfil da estria
$\Delta M$	$\mu\text{m}$	Desvio entre perfis teórico e medido, na posição Intermediária do perfil da estria
$\Delta S$	$\mu\text{m}$	Desvio entre perfis teórico e medido, na posição superior do perfil da estria
$\lambda$	graus	Posicionamento angular relativo entre rebolo e CP
$\theta_1$	graus	Incremento angular em torno do eixo do CP
$\delta$	$\mu\text{m}$	Desvio-padrão da população
$\mu_D$	$\mu\text{m}$	Média da população para SM-D
$\mu_S$	$\mu\text{m}$	Média da população para SM-S

### **Siglas/Abreviações**

A/D	Conversão analógico/digital
A, B, C	Superfícies de referência no CP
BNC/DAC	Conectores
CP	Corpo de Prova
CNC	Comando numérico computadorizado
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
$EA_{\text{RAW}}$	Sinal de emissão acústica bruto
$EA_{\text{RMS}}$	Conteúdo <i>RMS</i> do sinal de emissão acústica
<i>Flick Standardart</i>	Peça-padrão com um desvio de forma com valor conhecido
H0	Hipótese inicial
H1	Hipótese alternativa
I	Posição Inferior de medição no perfil da estria
LMD	Laboratório de Metrologia Dimensional

LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MCC	Menor circunferência circunscrita (ajuste matemático)
M	Posição intermediária de medição no perfil da estria
<i>Offset</i>	Subtração de interferências do sinal de EA
RMS	Raiz média quadrática ( <i>Root Mean Square</i> )
RAW	Puro, sem tratamento.
RJ45	Conexão para cabo <i>ethernet</i>
RS232	Conexão para comunicação entre SM e <i>laptop</i>
R	Repetições ao longo dos ensaios utilizando estratégia ZEROY <sub>AUTO</sub>
<i>spark in</i>	Início de faiscamento
<i>spark out</i>	Fim de faiscamento
SM-D	Sistema de monitoramento D
SM-S	Sistema de monitoramento S
S	Posição superior de medição no perfil da estria
T0	Estatística Teste para avaliação do Teste de Hipóteses
<i>Threshold</i>	Limite estático no sistema de monitoramento
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ZEROY <sub>AUTO</sub>	Estratégia para posicionamento centralizado e automatizado entre rebolo e CP
ZEROY <sub>MANUAL</sub>	Procedimento manual para detecção do posicionamento centralizado entre rebolo e CP
ZERO <sub>MÁQUINA</sub>	Referência fixa na máquina-ferramenta
ZEN S.A	Empresa parceira

## RESUMO

### **Boaron, A. Determinação do Posicionamento Relativo entre Rebolo e Peça com o Auxílio da Emissão Acústica. Dissertação**

Eng. Mec. Adriano Boaron

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner (orientador)

A tecnologia de monitoramento por emissão acústica (EA) é aproveitada para o reconhecimento de contato entre rebolo e peça no processo de retificação. Para avaliar as características de dois sistemas de monitoramento (SM) por EA, estes foram integrados ao comando numérico de uma retificadora cilíndrica CNC e conectados a um *laptop* visando a aquisição de sinais. Os sinais de  $EA_{RMS}$  decorrentes do evento de contato foram armazenados e analisados permitindo determinar qual sistema de monitoramento era mais adequado para o reconhecimento do contato entre rebolo e peça. Em uma segunda bancada implementada em uma retificadora de ferramentaria com um parceiro industrial, o SM mais adequado foi empregado para reconhecer o contato entre rebolo e peça e foi desenvolvida uma estratégia para centralizar o rebolo em relação ao eixo da peça. Este posicionamento relativo foi executado manualmente exercendo influência direta nos resultados de trabalho e demandando um tempo considerável por parte do operador da máquina. A automatização desta atividade com o emprego de um SM por EA integrado diretamente no comando numérico da máquina-ferramenta levou a resultados satisfatórios de centralização, reduzindo consideravelmente o tempo necessário para preparar a máquina para a produção de um componente. O trabalho é concluído pela validação da geometria de uma estria obtida por retificação, a qual foi posteriormente avaliada em uma máquina de medir por coordenadas. Estes resultados são comparados com o perfil teórico da estria.

Palavras-chave: Monitoramento; emissão acústica; retificação cilíndrica externa

## ABSTRACT

### **Boaron, A. Determination of the Relative Position between Grinding Wheel and Workpiece by Using Acoustic Emission**

Eng. Mec. Adriano Boaron

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner (orientador)

The acoustic emission (AE) technology is used for recognizing the contact between grinding wheel and workpiece in the grinding process. To estimate the characteristics of two acoustic emission monitoring systems (MS) it was necessary to settle and to integrate these systems into the NC command of the grinding machine. Both systems were also attached to a laptop in order to allow the signal acquisition. The  $AE_{RMS}$  signals from the contact between tool and workpiece have been stored and analyzed permitting to determine the most suitable AE monitoring system to recognize the contact. In a second experimental setup the most suitable monitoring system has been installed on a grinding machine inside a industrial partner. The relative position was determined without any device. This procedure has directly influenced the results depending on the technical skin of the machine's operator. The automatization of this activity by using an acoustic emission MS has led to satisfactory results regarding to the centralized position between grinding wheel and workpiece and also contributing to decrease the setup time. The work is concluded by validating the geometry of a ground groove on a coordinate measuring machine and these results are compared to the groove specific designed profile.

Palavras-chave: Monitoring; acoustic emission; external cylindrical grinding

## 1. INTRODUÇÃO E PROPOSTA DE TRABALHO

Em um cenário mundial marcado pela competitividade cada vez mais acirrada entre as empresas do ramo metal-mecânico, estratégias que auxiliem na redução dos custos nos processos produtivos são sempre bem-vindas e devem ser implementadas, na medida do possível, para que as empresas consigam se manter de forma competitiva no mercado. Dentre os processos de fabricação existentes, a retificação é um dos mais utilizados para a obtenção de peças com tolerâncias dimensionais estreitas e com valores reduzidos de rugosidade. Este processo, por situar-se geralmente nas etapas finais de fabricação de um determinado componente deve ser executado de maneira adequada, pois eventuais desvios ou falhas nas peças durante a retificação acarretam em aumentos dos custos de produção e geralmente no descarte do item fabricado.

Uma das formas encontradas para aumentar a segurança operacional da retificação consiste na utilização de sistemas de monitoramento para acompanhar o processo de retificação. Dentre as formas mais comuns de se monitorar o processo de retificação pode-se destacar o monitoramento por emissão acústica (EA). A emissão acústica contempla um sinal que apresenta uma relação direta com a dimensão da taxa de retificação, permitindo a verificação do comportamento do processo e possibilita detectar situações de ocorrências específicas durante o processo, como o exato momento de contato entre rebolo e peça ou ferramenta de dressamento. No condicionamento do rebolo (dressamento) e na fabricação a identificação do ponto de referência sobre a superfície da peça, a partir do qual se iniciam as operações de retificação, podem ser identificadas com auxílio da EA. Classicamente este ponto de referência é determinado através da movimentação de mergulho do rebolo contra a superfície da peça, até que ocorra o contato entre ambos. O contato é caracterizado pela impressão de uma marca, a qual deve ser tão pequena quanto possível, de maneira a não afetar as características dimensionais da peça nas tolerâncias exigidas.

No presente trabalho, estuda-se o reconhecimento do contato entre rebolo e peça empregando um sistema de monitoramento (SM) por EA integrado no comando numérico de uma retificadora Zema Zselics Ltda (modelo Flexa 600-L). Este SM está conectado a um *laptop*, permitindo-se o acompanhamento em tempo real dos sinais de  $EA_{RMS}$  decorrentes do evento de contato. Os sinais de  $EA_{RMS}$

dependem de vários fatores, como a velocidade de mergulho do rebolo  $v_{fr}$ , a constante de integração do sinal de  $EA_{RMS}$ , e também do transdutor de EA. Os sinais de EA são amostrados e gravados para uma posterior análise. As profundidades das marcas impressas na peça são medidas, e com o auxílio da Análise Fatorial é determinada a condição otimizada para o reconhecimento de contato. Com os resultados da Análise Fatorial procede-se um estudo comparativo entre dois SM integrados na máquina-ferramenta. A comparação entre os SM é realizada com o foco na eficiência apresentada por cada um destes com relação ao reconhecimento de contato entre rebolo e peça.

Baseados nos resultados obtidos no reconhecimento de contato assistido por EA, ampliam-se os estudos para uma aplicação desta tecnologia na empresa parceira ZEN S.A, Brusque-SC, no reconhecimento do contato entre rebolo e peça e na centralização do rebolo em relação ao eixo da peça. Esta empresa fabrica brochas para a produção de peças com perfis internos variados para o mercado automotivo, empregando o processo de retificação. Durante a fase de preparação (*setup*) da retificadora de ferramentaria para os trabalhos, uma atividade que consome tempo considerável, consiste no posicionamento radial e centralizado da ferramenta (rebolo) em relação ao eixo da peça. Em virtude das características construtivas desta máquina-ferramenta e da forma não referenciada que o rebolo está fixo no eixo-árvore da máquina, tem-se uma situação complexa para a determinação da posição relativa entre o rebolo e peça. A centralização do rebolo em relação à peça exerce influência direta sobre a simetria do perfil dos dentes usinados na brocha, os quais devem se situar dentro de tolerâncias estreitas.

Atualmente, este posicionamento é realizado de forma não instrumentada, baseado na experiência do operador. O reconhecimento visual da marca decorrente do contato entre rebolo-peça define a posição radial e centralizada do rebolo. Quanto maior o ângulo entre o eixo do rebolo e o eixo da peça, tanto maior é a dificuldade para se determinar a posição centralizada do rebolo.

Sugere-se uma forma instrumentada e automatizada para o posicionamento radial centralizado com o auxílio da tecnologia de EA. Para isto é integrado um SM por EA no comando da máquina-ferramenta, de forma a permitir a detecção das coordenadas das posições de interesse no instante de contato entre rebolo-peça. O transdutor de EA é instalado na posição mais adequada na máquina-ferramenta. As estratégias de condução do rebolo contra a superfície da peça são variadas de

forma a permitir a aquisição segura de sinais de  $EA_{RMS}$  para as menores interferências entre rebolo e peça. Os sinais de  $EA_{RMS}$ , na posição em que estes ultrapassam o limite estático, são relacionados aos pontos de início (*spark in*) e final de contato (*spark out*) e armazenados no comando numérico da máquina, o qual realiza um cálculo de média entre os pontos captados e posiciona o rebolo na posição associada ao valor médio. As estratégias são estudadas para posicionamentos angulares do rebolo de  $18^\circ$  e  $60^\circ$ , as quais representam os valores limites utilizados na máquina-ferramenta.

Este trabalho foi realizado no escopo de um projeto apoiado pela FINEP, em parceria com o Instituto Euvaldo Lodi, o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a empresa ZEN S.A.

No próximo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica contendo os embasamentos necessários para a realização das atividades. Nos capítulos subsequentes são apresentados os materiais e métodos empregados, o planejamento experimental para a condução dos ensaios, e os resultados obtidos.



## 2. ESTADO DA ARTE

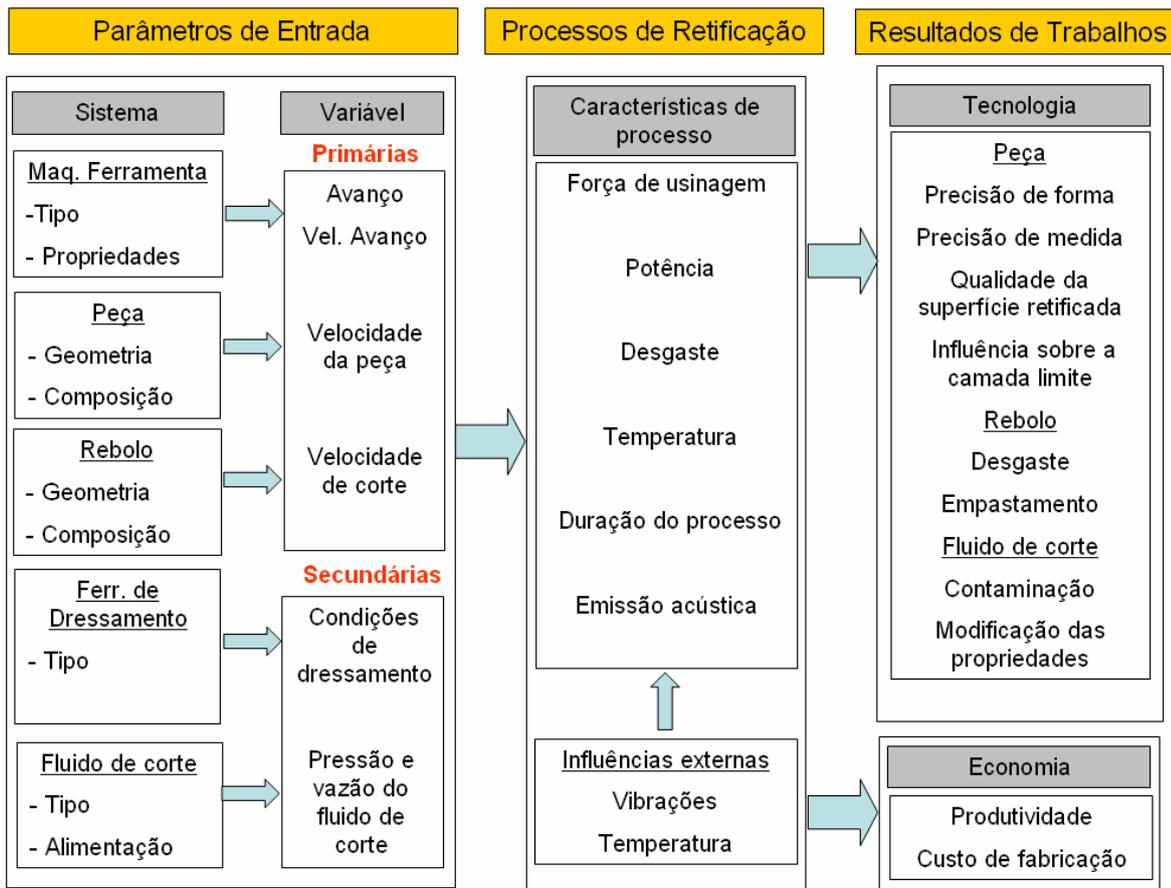
### 2.1 Aspectos Gerais sobre o Processo de Retificação

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

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

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

A retificação como processo de fabricação deve ser analisada em função das grandezas de entrada, características de processo e resultados de trabalho. As variáveis de entrada do processo de retificação influenciam as características do processo e o resultado de trabalho. Para um melhor entendimento das influências individuais das variáveis de entrada e sua interrelação com o resultado de trabalho é necessário entender as influências individuais e assim ter subsídios que permitam concluir sobre a complexa interação entre ferramenta e peça na retificação, **Figura 2.1.**



**Figura 2.1** - Relação entre variáveis de entrada e resultados de trabalho na retificação [1, 2].

Os parâmetros de entrada são divididos em parâmetros de sistema e parâmetros variáveis, **Figura 2.1**. Como parâmetros de sistema destacam-se a máquina-ferramenta, a peça, o rebolo, a ferramenta de dressamento e o sistema lubri-refrigerante. Os parâmetros variáveis são subdivididos em primários e secundários. Os parâmetros primários estão associados com a movimentação relativa entre rebolo-peça e a conseqüente remoção de material durante o processo. Os parâmetros variáveis secundários estão associados com a preparação da ferramenta e o emprego de meios auxiliares.

A caracterização do processo de retificação é feita com auxílio da interpretação das grandezas força de retificação e suas componentes, a potência de retificação, a temperatura na região de corte, o desgaste da ferramenta de corte, a duração do processo e a emissão acústica proveniente da ação do corte. Externamente avalia-se a influência de grandezas perturbadoras, como vibrações externas ao processo e temperatura ambiente.

O resultado de trabalho é avaliado pelas características macro e micro-geométricas da peça, da superfície retificada e da região termicamente afetada. No rebolo são avaliados o desgaste e o empastamento e no fluido de corte a contaminação e mudança de características. A viabilidade econômica de um processo e o custo de fabricação estão diretamente associados ao resultado tecnológico do processo.

## 2.2 Forma Média dos Gumes de Geometria não-Definida

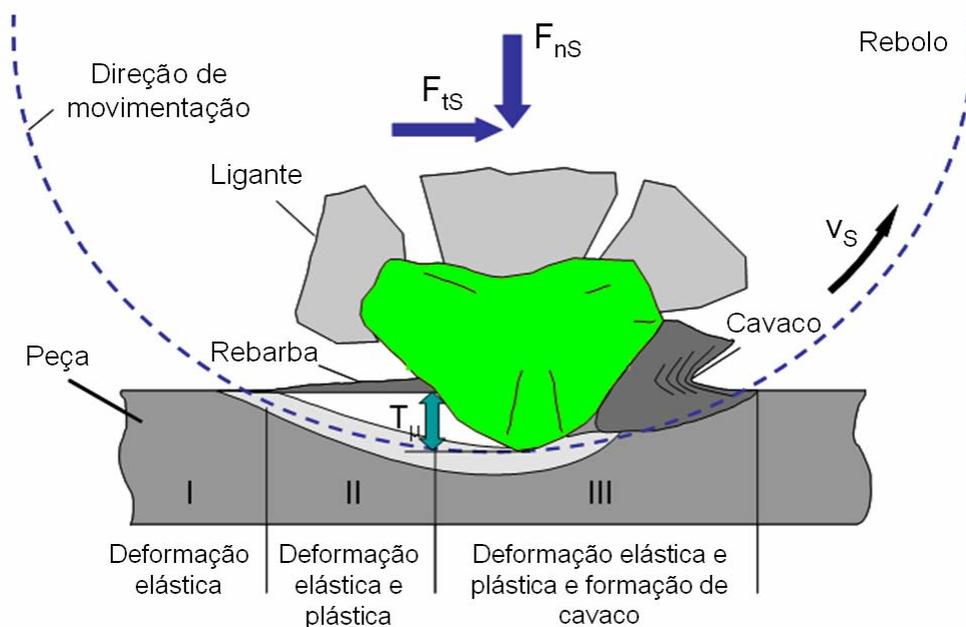
Os grãos abrasivos utilizados na ferramenta (rebolo) são de materiais cristalinos, com dureza normalmente superior à do material a ser usinado. Estes materiais são frágeis e o próprio processo de moagem faz os grãos racharem de uma forma geométrica aleatória, com cantos vivos. São estes cantos vivos que vão atuar como gumes do grão abrasivo. A **Figura 2.2** ilustra esquematicamente o perfil médio de um gume na retificação [1]. Durante o processo de retificação os gumes penetram até uma profundidade ( $h_{cu,max}$ ) na peça. A geometria da cunha de um gume, **Figura 2.2**, permite representar esquematicamente uma cunha de um grão abrasivo, explicitando o ângulo de saída  $\gamma$  (geralmente bastante negativo) e o ângulo de incidência  $\alpha$  [2].



**Figura 2.2** – Representação esquemática do perfil médio de um gume na retificação [2].

### 2.3 Penetração do Gume

Durante o processo de retificação, os gumes penetram na superfície da peça em uma trajetória quase plana, de modo que inicialmente ocorrem apenas deformações elásticas, região I, **Figura 2.3**. Na seqüência, região II, inicia-se o escoamento de material. Devido ao arredondamento do gume e pequena penetração passiva o ângulo de saída é extremamente negativo e não se produz um cavaco. O material é empurrado na direção de corte (sem formação de cavaco) e para os lados, resultando assim em elevações (rebarbas) nas laterais do sulco (aragem). Na terceira região, o gume atinge a profundidade na qual inicia a formação de cavaco, ( $T_{\mu}$ ), mantendo-se a deformação elástica e as deformações laterais não associadas à formação de cavacos [1].



**Figura 2.3** – Representação esquemática da trajetória do grão pela região de formação do cavaco explicitando o início do corte na retificação (König *apud* Fingerle [8]).

Além do calor gerado pelas deformações plásticas, todo o contato entre o gume e a peça é acompanhado pelo atrito, levando a um aumento de temperatura de contato em função da velocidade de retificação. A **Figura 2.3** ilustra as componentes da força de usinagem atuante sobre o gume durante a fase de ação do grão abrasivo, sendo uma componente no sentido do corte ( $F_{ts}$ ) e em uma normal ao

sentido do corte ( $F_{nS}$ ). A terceira componente, no plano normal ao plano formado pelas direções das componentes da força  $F_{nS} - F_{tS}$  não é significativa em relação à magnitude das componentes  $F_{nS}$  e  $F_{tS}$ . O quociente  $F_{nS}/F_{tS}$  é denominado de relação de força de usinagem.

Durante a fase em que inicia o escoamento do material, a força normal com a qual o gume deve ser pressionado para dentro do material é consideravelmente maior que a força tangencial e a relação entre as componentes das forças de usinagem é alta. No início da formação do cavaco, a força tangencial aumenta, de forma que a relação entre as forças diminui.

Na usinagem com ferramentas de geometria definida a relação entre deformação plástica associada à formação de cavacos e deformação plástica não associada à formação de cavacos é muito grande e a maior parte do calor gerado por deformação plástica e atrito é transportada pelos cavacos. Na usinagem com ferramentas de gumes de geometria não definida, a pouca afiação dos gumes e o ângulo de saída fortemente negativo fazem com que esta relação seja pequena e maior parte do calor produzido pela deformação plástica e atrito permaneça na peça, ocasionando um aumento localizado de temperatura. Dependendo do tempo em que estas deformações ocorrem e pela limitação da condução do calor para o interior da peça, o aumento da temperatura é elevado podendo ocorrer fenômenos de oxidação da peça e mudanças na estrutura cristalina do material [3].

## 2.4 Desgaste de Rebolos

O processo de retificação caracteriza-se por alta pressão e temperatura na região de contato rebolo/peça. Estas condições físicas podem trazer efeitos indesejáveis tanto para o rebolo quanto para a peça. A solicitação termo-mecânica cíclica do rebolo influencia o mecanismo de desgaste do mesmo. Os mecanismos de desgaste dos grãos abrasivos são ativados por ação mecânica, termo-mecânica e termo-química e são classificados em micro e macro-desgaste.

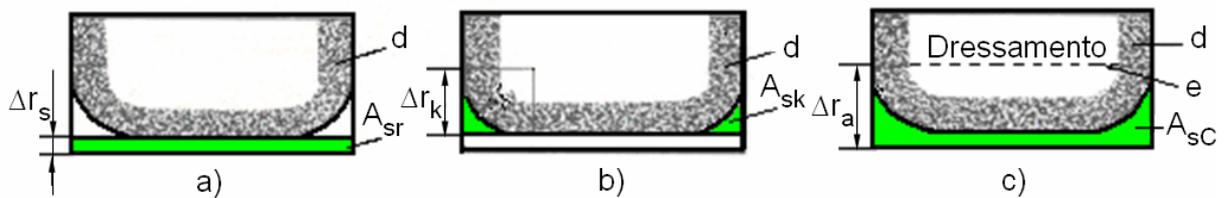
O micro-desgaste tem início nas camadas cristalinas da superfície do grão cristalino em contato com peça. Nestas regiões, pressões e temperaturas extremamente altas induzem a fenômenos termo-químicos (oxidação, difusão, formação de óxidos complexos, grafitização, formação de subprodutos com os

meios lubri-refrigerantes) que reduzem a resistência do material e, devido à ação mecânica subsequente, são removidas por abrasão. O mecanismo de micro-desgaste acarreta no arredondamento dos gumes dos grãos do rebolo, gerando um aumento das componentes da força de retificação. O micro-desgaste também tem como consequência um achatamento dos flancos dos grãos e uma perda da capacidade de corte do rebolo, aumentando o atrito e a temperatura na região de contato.

O macro-desgaste é caracterizado pela fratura de grãos e pela perda de grãos da estrutura do rebolo. Ele é predominantemente influenciado por solicitações mecânicas do gume e pelas características de dureza e porosidade do rebolo, bem como por todos os fatores mecânico, termo-mecânico, químico e termo-químico que atuam sobre o desgaste do ligante do rebolo. O macro-desgaste tem como consequência um avivamento e renovação dos gumes ativos e um aumento da capacidade de corte do rebolo, diminuindo o atrito e a temperatura na região de contato.

O micro-desgaste e o macro-desgaste atuam simultaneamente e são influenciados pela taxa de retificação e a velocidade de corte. Para taxas de retificação muito pequenas o mecanismo de micro-desgaste domina. Um aumento da taxa de retificação aumenta a influência do macro-desgaste e os efeitos do micro-desgaste são gradativamente menos percebidos. Um aumento da velocidade de corte, em decorrência da diminuição das secções de cavaco que atuam individualmente sobre cada um dos gumes, tem como consequência uma redução do efeito do macro-desgaste, evidenciando mais o efeito do micro-desgaste.

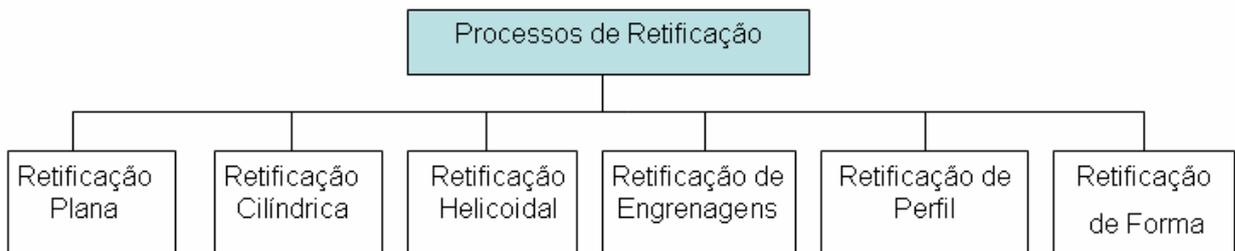
Em consequência dos efeitos do micro e do macro-desgaste ocorrem o desgaste radial e o desgaste de quina do rebolo. Estes levam a erros macro e micro-geométricos das peças usinadas, **Figura 2.4 [1]**.



**Figura 2.4** – Desgaste radial  $\Delta r_s$  e desgaste de quina  $\Delta r_k$  em rebolos. a) Superfície de desgaste radial  $A_{sr}$ . b) Superfície de desgaste de quina  $A_{sk}$ . c) Superfície de desgaste total  $A_{sc}$ . d - Rebolo. e – Limite para dressamento [4].

## 2.5 Classificação dos Processos de Retificação

Segundo a norma DIN8589, os processos de retificação são classificados segundo as principais aplicações, **Figura 2.5**.



**Figura 2.5** – Classificação geral dos processos de retificação [4].

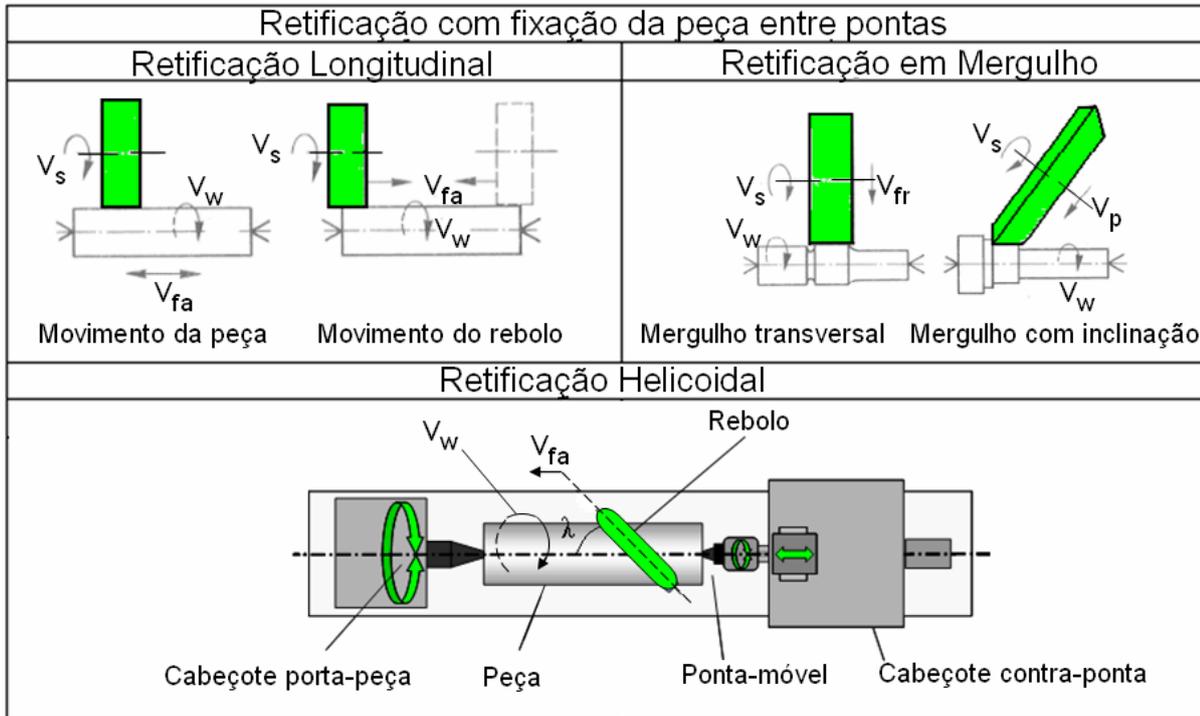
A retificação cilíndrica pode ser subdividida em cilíndrica interna e cilíndrica externa. A retificação cilíndrica externa está relacionada com a usinagem da superfície externa de uma peça que gira em torno de um eixo de rotação, podendo a peça ser fixa entre centros (retificação entre pontas) ou ser conduzida pela própria superfície em trabalho (retificação *centerless*). A superfície da peça pode ser cilíndrica, escalonada (ressaltos ou rebaixos), cônica, com filetes em forma de rosca (helicoidal), ou apresentar uma forma perfilada. Na retificação cilíndrica externa entre pontas a retificadora pode ser configurada para [2]:

a) Operação de mergulho simples, para a obtenção de diâmetros contínuos ou perfis complexos.

b) Aproximação angular (geralmente de  $30^\circ$  a  $45^\circ$ ) para a retificação de diâmetros e rebaixos.

c) Combinação entre retificação de mergulho e operações de deslocamento longitudinal em relação ao eixo da peça.

A **Figura 2.6** ilustra esquematicamente os principais tipos de retificação cilíndrica externa.



**Figura 2.6** – Variações do processo de retificação cilíndrica externa. Baseado em [4, 5].

Dentre os processos de retificação longitudinal, destacam-se os processos que empregam a movimentação do cabeçote porta-rebolo e aqueles que se utilizam apenas da movimentação do cabeçote porta-peça. No processo que emprega a movimentação do cabeçote porta-rebolo o movimento de translação da ferramenta (rebolo) ao longo do comprimento da peça é realizado pelo próprio cabeçote porta-rebolo. Com isto, os comprimentos necessários das mesas das retificadoras podem ser consideravelmente reduzidos, quando comparados com aqueles que utilizam a movimentação longitudinal da peça. Geralmente peças com grandes dimensões são trabalhadas com a estratégia de movimentação do rebolo.

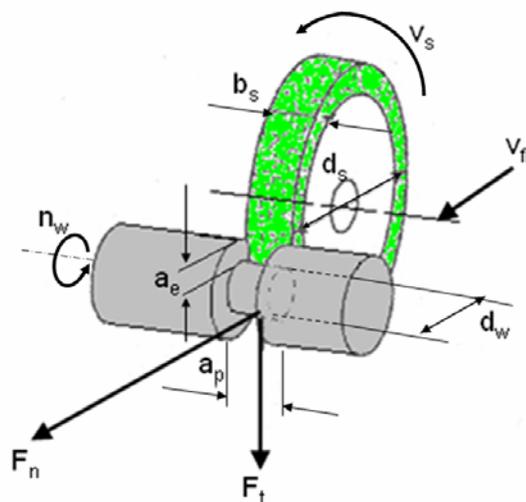
O processo de retificação cilíndrica externa com fixação da peça entre pontas é um processo universal que pode ser empregado para peças grandes e pequenas e é

especialmente vantajoso quando a concentricidade entre as superfícies cilíndricas deve ser garantida entre operações feitas separadamente.

Na técnica de retificação cilíndrica helicoidal a movimentação combinada de rotação da peça  $v_w$ , com o avanço do rebolo no sentido axial  $v_{fa}$ , encontra aplicação na fabricação de roscas externas bem como na fabricação de ferramentas de brochamento.

## 2.6 Retificação Cilíndrica Externa em Mergulho

No processo de retificação cilíndrica externa em mergulho, o rebolo é movimentado contra a peça na direção radial com uma velocidade linear de avanço  $v_{fr}$ , **Figura 2.7**. A velocidade periférica da peça  $v_w$ , é função da rotação  $n_w$ , e do diâmetro da peça  $d_w$ , e é normalmente muito menor que a velocidade periférica do rebolo  $v_s$  ( $v_w \approx v_s/60$ ). O resultado da interação entre rebolo e peça, nestas condições acarreta na remoção de uma camada de material por rotação da peça. Em decorrência do movimento contínuo de avanço do rebolo contra a peça e a rotação contínua da peça, a superfície gerada na peça apresenta um desvio de forma proporcional ao avanço do rebolo por rotação da peça (seção transversal na forma espiralar). Na retificação cilíndrica externa em mergulho, utilizam-se geralmente rebolos com uma espessura maior que o comprimento a ser usinado na peça, de forma que o movimento de avanço longitudinal pode ser omitido [6,7].

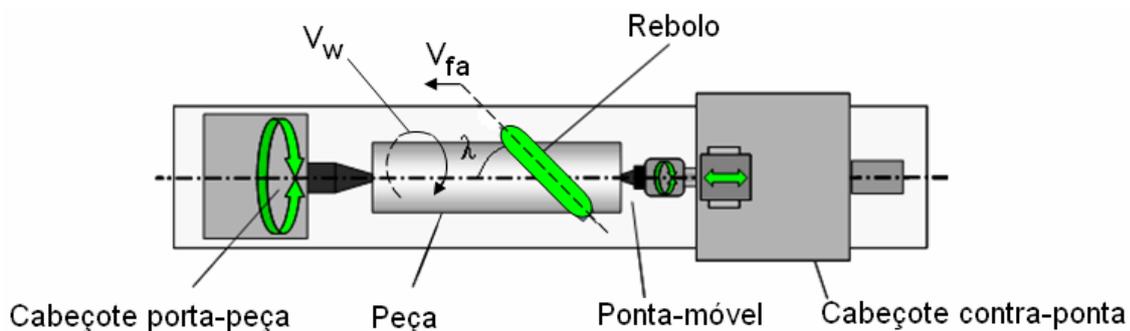


**Figura 2.7** – Parâmetros variáveis de entrada e componentes da força na retificação cilíndrica externa de mergulho [1].

A **Figura 2.7** ilustra os parâmetros complementares envolvidos na retificação cilíndrica externa de mergulho de um rebaixo, como a largura do rebolo  $b_s$  igual à profundidade de corte lateral  $a_p$ , penetração radial  $a_e$ , e o diâmetro do rebolo  $d_s$ . A figura mostra também as componentes da força de retificação no sentido radial (normal à velocidade de retificação)  $F_n$  e tangencial ao rebolo  $F_t$ .

## 2.7 Retificação Cilíndrica Externa Helicoidal

No processo de retificação cilíndrica externa helicoidal, o rebolo é movimentado na direção axial da peça com uma penetração  $a_e$ , uma inclinação angular  $\lambda$ , uma velocidade linear de avanço  $v_{fa}$ , e velocidade de corte  $v_s$ , combinado com uma rotação adequada da peça, de forma que o perfil do rebolo é transferido para o perfil helicoidal em execução na peça, **Figura 2.8**. Na retificação cilíndrica externa helicoidal, utilizam-se rebolos perfilados de acordo com a forma final desejada do perfil a produzir [6,7].

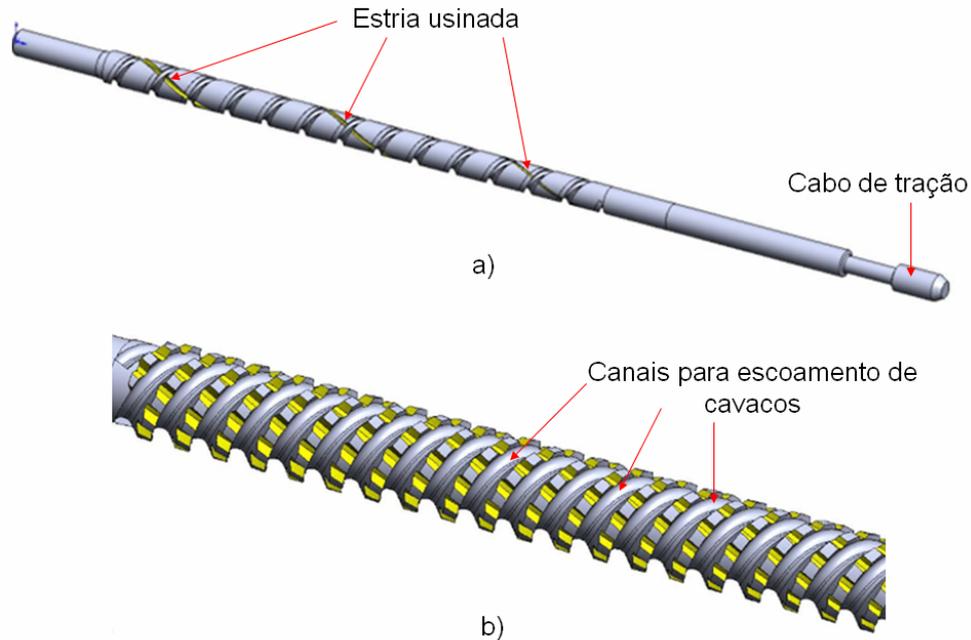


**Figura 2.8** – Parâmetros variáveis de entrada na retificação cilíndrica externa helicoidal.

Este processo de retificação encontra aplicação na fabricação de ferramentas de brochamento (brochas) [58]. A combinação simultânea dos movimentos anteriormente descritos permite que seja produzido um canal (estria) com hélice à esquerda ao longo do componente, conforme representado na **Figura 2.9-a**.

A **Figura 2.9-b** apresenta a brocha com um conjunto de estrias de hélice à direita (rebaixos para a saída dos cavacos) sobrepostas às estrias com hélices à esquerda. Assim, a superposição das hélices à esquerda com as hélices à direita

permite que sejam produzidos os dentes da brocha, os quais devem ser corretamente fabricados para gerar o perfil desejado no componente a ser brochado.



**Figura 2.9** – Estrias fabricadas em brochas através do processo de retificação cilíndrica helicoidal. Baseado em [15, 56, 57, 58].

## 2.8 Condicionamento de Rebolos

As ferramentas de retificação, quando novas ou após certo tempo de uso, encontram-se em uma condição “não adequada” à usinagem. Por isto devem ser preparadas antes de serem colocadas em uso ou na periodicidade que se mostrar necessária para a manutenção das suas características de corte [1].

A preparação dos rebolos para o corte é genericamente definida como sendo o condicionamento. O objetivo do condicionamento consiste em proporcionar ao rebole uma característica que satisfaça as exigências do processo de retificação. O termo “condicionamento” engloba vários processos usados para a preparação das ferramentas no processo de retificação. Uma distinção básica é feita entre o perfilamento, a afiação e a limpeza. Os dois subprocessos, perfilamento e afiação podem ocorrer de forma conjunta e então serem definidos como processo de dressamento do rebole. O subprocesso “perfilamento” elimina os erros geométricos e proporciona a forma desejada à ferramenta. Através deste processo é influenciada

a estrutura da superfície do rebolo, sua forma, sua dimensão e a concentricidade com o eixo de rotação do mancal porta-rebolo. O subprocesso de “limpeza” visa a retirada de restos de cavacos, grãos e ligantes alojados nos poros do rebolo, enquanto o subprocesso “afiação” está relacionado à recuperação da capacidade de corte do rebolo, segundo (Saljé *apud* Klocke [9]).

O condicionamento influi significativamente no rendimento do rebolo. O condicionamento é realizado de modo a possibilitar a melhor adaptação do rebolo às exigências do processo e possibilitar a usinagem de peças com diferentes perfis, materiais e/ou acabamentos diferentes [10].

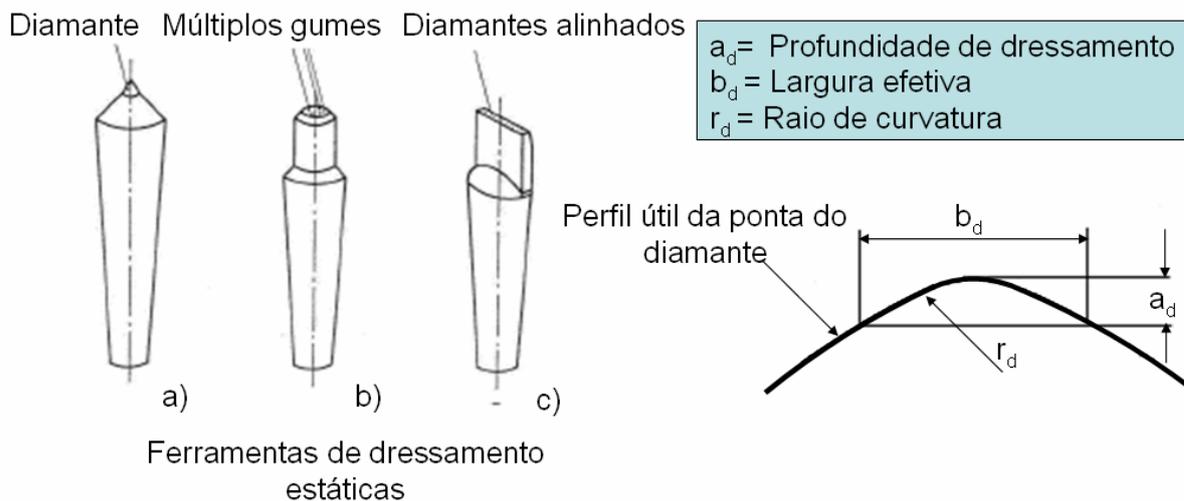
## 2.9 Dressamento de Rebolos

O processo de dressamento é aplicado para rebolos com porosidade intrínseca a seu processo de fabricação e consiste na recuperação do perfil geométrico do rebolo com simultânea obtenção da capacidade de corte através da remoção mecânica de parte do volume do rebolo. Com este procedimento uma camada de grãos fraturados e novos aflora na superfície de trabalho do rebolo e recupera-se a porosidade. O dressamento é realizado sempre que o rebolo perde a sua capacidade de corte e não gera peças dentro dos padrões de qualidade para os quais se aplica [1, 11]. O dressamento é responsável pela topografia dos rebolos e é função do grau de recobrimento. A vida do rebolo, o tempo de ciclo de retificação e a qualidade final da peça, são afetados pela operação de dressamento [11, 12].

### 2.9.1 Dressamento de rebolos convencionais e rebolos de CBN

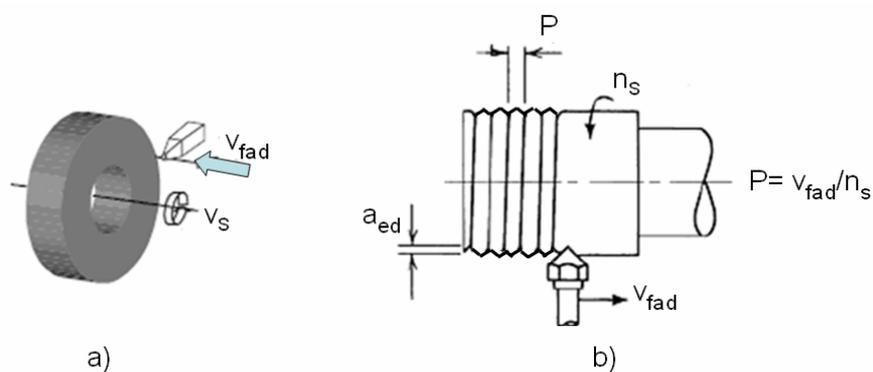
Para o dressamento são empregadas ferramentas que são classificadas segundo seu princípio de atuação em dois grupos: estáticas e cinemáticas [13]. Com relação às ferramentas estáticas, estas trabalham de maneira análoga a uma ferramenta de torneamento sobre o rebolo, não apresentando movimento na direção da velocidade tangencial do rebolo. Já as ferramentas cinemáticas possuem um movimento próprio de rotação podendo apresentar um movimento de translação em relação ao ponto de contato no rebolo [14]. A parte ativa das ferramentas estáticas pode ser composta de um ou mais diamantes embutidos em uma matriz metálica. A **Figura 2.10** representa esquematicamente um exemplo de ferramenta de ponta

única (**Figura 2.10-a**), uma ferramenta múltipla com distribuição aleatória (**Figura 2.10-b**) e uma ferramenta múltipla com distribuição linear (*Fliese*) (**Figura 2.10-c**). No lado direito da figura são mostrados os principais elementos que definem o perfil da ponta de diamante.



**Figura 2.10 – Ferramentas estáticas de diamante [15].**

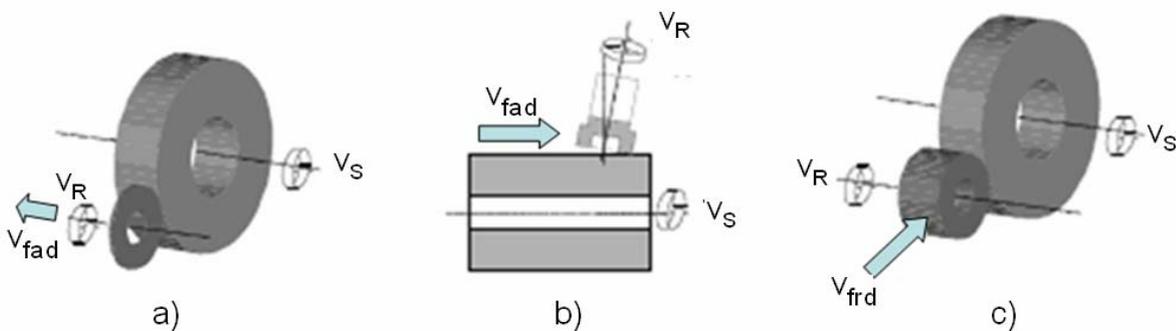
As ferramentas estáticas são deslocadas com uma velocidade de avanço constante  $v_{fad}$ , axialmente em relação ao rebolo, o qual apresenta uma velocidade de corte  $v_s$  (ou frequência de rotação  $n_s$ , em  $\text{min}^{-1}$ ). Entre dois passes de dressamento a ferramenta é avançada radialmente com um valor de profundidade de dressamento,  $a_{ed}$  [1]. A **Figura 2.11** ilustra os movimentos relativos entre a ferramenta de dressar (dressador) e o rebolo, ao se utilizar o processo de dressamento estático.



**Figura 2.11 - Movimentos relativos entre dressador e rebolo. a) Configuração geralmente utilizada na prática [14]. b) Analogia com o processo de torneamento. [16].**

Para rebolos que devem possuir uma determinada geometria (perfil), o dressamento é realizado por um dressador de forma (geometricamente definida) através da programação da trajetória por um programa NC ou copiador.

O dressamento de rebolos com ferramentas acionadas subdivide-se em ferramentas de perfil (que apresenta o perfil negativo do rebole), ferramentas em forma de copo e em forma de disco, **Figura 2.12**. O dressador de perfil executa apenas um deslocamento radial sobre o rebole. O copo serve apenas para dressar rebolos cilíndricos. Ferramentas na forma de um disco permitem desenvolver perfis no rebole por comando de trajetória [1, 15].



**Figura 2.12** - Dressadores cinemáticos. a) Disco dressador. b) Copo dressador. c) Rolo dressador [14].

## 2.9.2 Parâmetros no dressamento e influência no resultado de trabalho

A rugosidade efetiva do rebole é influenciada por diferentes variáveis cinemáticas. Para o processo de dressamento com ferramentas com trajetória guiada (*Bahngesteuertes Abrichten*), os principais parâmetros influentes são: o grau de recobrimento, a profundidade de dressamento, a relação de velocidades, e a forma construtiva das ferramentas.

### Grau de recobrimento

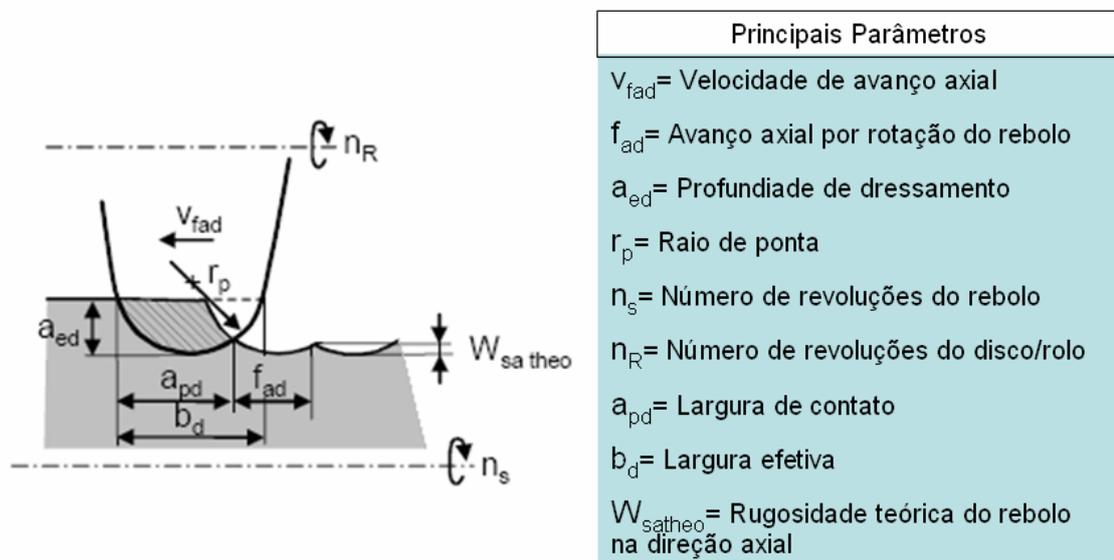
Para o processo de dressamento com movimento longitudinal do dressador, o grau de recobrimento é representado pelo número de vezes que o rebole gira até que um ponto no rebole percorre a largura de contato da ferramenta de dressar e é

definido pelo quociente entre a largura de contato  $a_{pd}$  do dressador e o avanço axial  $f_{ad}$  por rotação do rebolo, **Equações 2.1 e 2.2**, [14, 13].

$$U_d = \frac{a_{pd}}{f_{ad}} \quad (2.1)$$

$$v_{fad} = f_{ad} \cdot n_s \quad (2.2)$$

Através da remoção de material do rebolo provocada pelo dressador, teoricamente se forma um perfil em rosca ao longo do rebolo, **Figura 2.13**.



**Figura 2.13** – Representação esquemática do dressamento [14].

### Profundidade de dressamento

A profundidade de dressamento define a quantidade de material que é removida do rebolo por passe de dressamento. Para ferramentas estáticas ela é designada por  $a_{ep}$  e para dressadores rotativos por  $a_{ed}$ , e é ajustada como constante durante o deslocamento da ferramenta. Para o dressamento com rolos dressadores, a profundidade de dressamento equivale ao avanço radial de dressamento  $v_{frd}$  por rotação do rebolo. Nos dois casos, a profundidade de dressamento caracteriza a profundidade de penetração, no rebolo, dos diamantes de dressamento, na direção normal [14].

Em rebolos convencionais comumente são retirados de 25 a 50  $\mu\text{m}$  de material abrasivo por dressamento, consumindo-se cerca de metade do volume útil do rebolo nas operações de dressamento [17].

Nos rebolos de CBN o desgaste durante a retificação é bem menor e retirar grandes quantidades de material no perfilamento ou dressamento representa um desperdício desnecessário. Dressamentos mais freqüentes com penetrações totais na ordem de alguns micrometros garantem restaurar o perfil do rebolo de CBN e a qualidade das peças produzidas, sem influenciar em demasia o espaço para cavacos, de modo que para rebolos de CBN resinóides não é necessário afiar o rebolo. Para tornar esta técnica possível, é necessário integrar um sistema de detecção do contato entre o dressador e o rebolo, com precisão de posicionamento melhor que 1 $\mu\text{m}$ . Tais sistemas geralmente são baseados em emissão acústica [17].

### Relação de velocidades

Para ferramentas acionadas o quociente de velocidades  $q_d$  é definido como a relação entre a velocidade periférica do dressador e a velocidade periférica do rebolo, **Equação 2.3**. Para o caso de dressamento concordante, os vetores velocidade, no ponto de contato, estão alinhados, e a relação de velocidades assume um valor positivo. Para casos de dressamento discordante, a relação de velocidades assume um valor negativo [1, 18].

$$q_d = \pm \frac{V_R}{V_S} \quad (2.3)$$

Mantendo-se as demais condições constantes, com exceção do sentido de rotação, em condições de perfilamento discordante tem-se uma rugosidade efetiva  $R_{ts}$  menor do que no perfilamento concordante. Para casos de trabalho que exigem uma elevada taxa de retificação específica, é recomendado perfilar em movimento concordante, ao passo que para obter uma boa qualidade da superfície retificada para pequenas taxas de retificação específica, recomenda-se o dressamento discordante. No caso do perfilamento discordante, a velocidade periférica do rebolo e da ferramenta de perfilar se somam na região de contato, podendo levar a uma

velocidade relativa muito alta. No perfilamento de rebolos superabrasivos, podem ocorrer problemas de superaquecimento e conseqüente perda de material da ferramenta de perfilamento por grafitização dos diamantes. Desta forma, no perfilamento de rebolos de CBN é mais comum o emprego de um processo concordante, onde as velocidades se subtraem e a velocidade relativa é menor [1].

A qualidade do processo de dressamento é influenciada pela eficiência com a qual o perfil da ferramenta é transferido e a conseqüente microtopografia obtida no rebolo [1, 14]. A caracterização da superfície do rebolo é representada pela rugosidade efetiva,  $R_{ts}$ . A rugosidade efetiva é medida num corpo de prova retificado com uma relação de rotações entre peça e rebolo de 1 para 3, de modo que a topografia do rebolo se reproduz 3 vezes na superfície da peça [1].

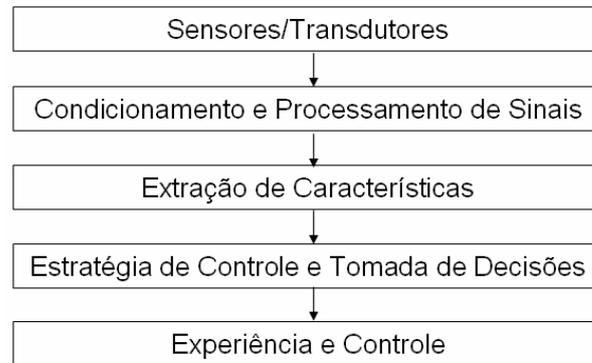
## 2.10 Monitoramento de Processos

Nos últimos anos a globalização e a necessidade de produzir com custos cada vez mais baixos levaram a mudanças no setor de manufatura. Um dos desenvolvimentos mais significativos foi a busca da redução de custos pelo melhor entendimento dos processos produtivos, objetivando-se a obtenção de melhorias na qualidade dos produtos e redução dos tempos de produção, ao mesmo tempo em que se torna possível uma maior automação parcial ou total do processo [19].

Os processos de fabricação são encontrados em várias etapas fabris, desde aquelas que exigem uma elevada remoção de material da peça, até operações com acabamento de precisão. As grandezas que descrevem os processos de usinagem (componentes da força de usinagem, temperatura, emissão acústica) são função das variáveis de entrada. Variações destas grandezas, se adequadamente reconhecidas e processadas, permitem concluir sobre o estado do processo e da ferramenta de corte, além de permitirem o reconhecimento de quebras, alterações das características do material, entre outras e monitorar o processo e a ferramenta. O monitoramento de processos complexos depende da disponibilidade de dados sobre as condições do processo e grande experiência em controle [20].

Novas aplicações dos sistemas de monitoramento estão sendo vislumbradas no ambiente de produção, devido a desenvolvimentos recentes e novas tendências na tecnologia de fabricação e no projeto de máquinas. Dentre os principais estágios

envolvidos no monitoramento do processo, destacam-se, por exemplo, aqueles ilustrados na **Figura 2.14**.



**Figura 2.14** - Principais estágios envolvidos no monitoramento de processos e seqüência lógica para obtenção de informações [20].

O primeiro passo a ser observado para se obter êxito no monitoramento de um processo depende da escolha adequada de sensores e transdutores, os quais devem ser capazes de detectar as variações das características dos processos (força, potência, emissão acústica etc.) e convertê-las em sinais apropriados.

Os sinais disponibilizados pelos transdutores devem ser tratados de forma a se reduzirem as interferências mecânicas e elétricas (ruídos) que estejam eventualmente presentes no sinal, para que as informações obtidas possam ser representativas. Nesta etapa, empregam-se geralmente técnicas específicas de condicionamento de sinal envolvendo, por exemplo: amplificação, filtragem passa-banda, retificação do sinal, filtragem passa-baixa, entre outras [21].

Após o condicionamento, é possível efetuar-se a aquisição (amostragem) e armazenamento dos sinais através da utilização de um conversor analógico/digital, visando à extração de características do processo. Toda conversão analógico/digital ocorre em intervalos de tempo discretos a partir de uma taxa de amostragem específica, a qual pode ser definida pelo Teorema de *Shannon*. Este teorema indica que se um sinal analógico apresentar uma frequência mínima  $f_{\text{MIN}}$  e uma frequência máxima  $f_{\text{MAX}}$ , este deve ser amostrado com uma frequência de amostragem  $f_A$  duas vezes maior que a frequência máxima, **Equação 2.4**. A observação desta equação evita que ocorram perdas de informação (*aliasing*) devido à utilização de taxas de aquisição muito baixas [23, 24].

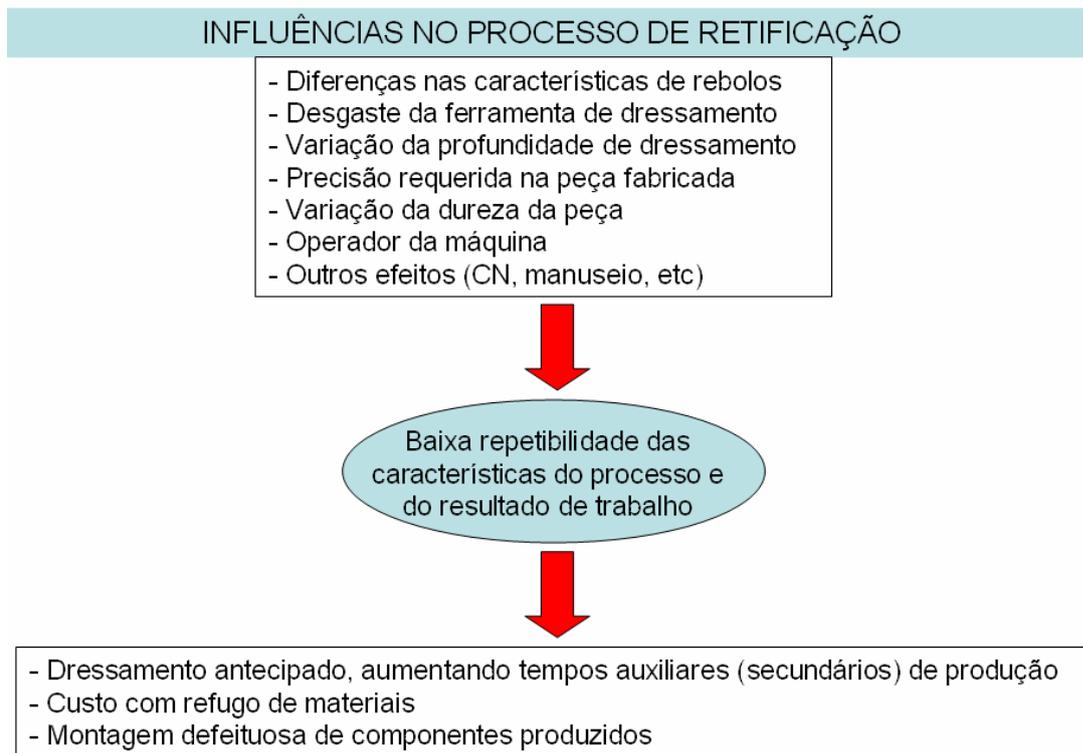
$$f_A \geq 2 * f_{MAX} \quad (2.4)$$

A partir das características extraídas dos sinais é possível a implementação de estratégias de controle que auxiliem na tomada de decisões a respeito do andamento do processo investigado, visando um aumento de experiência e controle do mesmo [21].

## 2.11 Monitoramento no Processo de Retificação

Para poder atender a necessidade de elevada produtividade, baixos custos e boa qualidade dos produtos a serem fabricados, o monitoramento do processo de usinagem em tempo real (*on-line*) se torna indispensável. O monitoramento permite buscar informações relacionadas ao processo de retificação (detecção de contato para eliminação de tempos improdutivos, solicitações do rebolo, vibrações, desgaste do rebolo, necessidade de dressamento do rebolo, potenciais danificações térmicas na peça etc.) dentro do ambiente fabril. Estas exigências têm estimulado, ao longo das últimas décadas, pesquisas extensas no monitoramento do processo de retificação para atender demandas específicas [22].

A operação de retificação é influenciada por perturbações periódicas e aleatórias, cujos efeitos não podem ser sempre completamente compensados em processos não monitorados. O comportamento da vida da ferramenta (rebolo) está sujeito a dispersões, resultando em processos automatizados extremamente conservadores com grande dificuldade em assegurar as qualidades desejadas. Não obstante, peças e ciclos de processos defeituosos são repetidamente observados [21]. As perturbações mais significativas no processo de retificação são provocadas pela dispersão da dureza na matéria-prima a ser trabalhada, as variações das propriedades do rebolo bem como das variáveis de entrada modificadas pelo operador. Conseqüentemente, um comportamento previsível e consistente do processo não pode ser assumido, e os benefícios trazidos por um monitoramento confiável e de implementação simples se tornam evidentes. A **Figura 2.15** destaca os principais efeitos de caráter aleatório que perturbam o processo de retificação e que evidenciam a necessidade do monitoramento adequado do processo [21].



**Figura 2.15** – Fatores influentes no processo de retificação. Baseado em [21].

Para atingir as demandas crescentes por maior flexibilidade e confiabilidade, o processo de retificação deve se tornar cada vez mais independente do operador. Ao mesmo tempo, o surgimento de máquinas comandadas numericamente, verificado ao longo dos últimos anos, acelera cada vez mais a necessidade de tornar o processo de retificação mais autônomo e menos dependente de interpretações do operador [25, 26]. O aumento da utilização de rebolos de CBN e de diamante, os quais são muito mais caros do que os rebolos convencionais requerem que o fim de vida dos mesmos seja corretamente reconhecido, e que o dressamento seja efetuado com remoção minimizada de material para a redução dos custos [25]. O emprego de sistemas de monitoramento é assim justificado.

Embora uma variedade de técnicas tenham sido estudadas para a implementação do monitoramento no processo de retificação, (como por exemplo, medição da força, potência e vibrações durante o processo de retificação) as técnicas que se utilizam da emissão acústica oriunda deste processo tem se apresentado como sendo as mais promissoras. Desta forma, o monitoramento através da emissão acústica tem sido utilizado para diferentes finalidades dentro do processo de retificação, englobando as seguintes aplicações:

- Detecção do desgaste do rebolo e solicitações sobre o mesmo (Dornfeld, Inasaki, König *apud* Webster [22]);
- Análise de vibrações (König, Chang, *apud* Webster [22]);
- Detecção de colisão [53];
- Detecção de queimas e fraturas (Blum, König, Tonshoff *apud* Webster [22]);
- Redução do tempo de usinagem em vazio (*gap elimination*) (Inasaki, Blum, Kluff, König, Taylor *apud* Webster [22]);
- Controle do processo (Blum, König, Kluff, Dornfeld *apud* Webster [22]);
- Controle do dressamento (Inasaki, König, Kluff, Tonshoff *apud* Webster [22], [54]).

### 2.11.1 Métodos de monitoramento na retificação

Dentre as várias formas de se proceder o monitoramento no processo de retificação, duas alternativas encontram emprego constante nas atividades envolvendo este processo. Estas consistem nos métodos diretos e nos métodos indiretos de monitoramento. [27, 28, 29, 30, 31].

#### Métodos diretos de monitoramento

Os métodos de monitoramento diretos funcionam através da medição direta da grandeza em questão no processo de usinagem (dimensão da peça, ou do rebolo, por exemplo) e são comumente empregados no processo de retificação para a tomada de decisões. Dessa forma, associa-se o resultado da medição ao processo, com o intuito de direcionar a ferramenta na posição correta e somente parar a retificação quando todas as dimensões forem atingidas [27, 28, 29].

A medição pode ser contínua ou intermitente. A medição contínua permite influenciar diretamente a posição do rebolo e garantir que o componente retificado atinja as dimensões desejadas e independe do desgaste do rebolo. A medição intermitente requer a parada do processo e a posição do rebolo deve ser corrigida pelo operador. A restrição a este último tipo de monitoramento consiste na necessidade de se paralisar o processo, somando-se assim os tempos de parada e mensuração ao tempo de produção. A vantagem principal das técnicas de

monitoramento direto consiste no fato de que estes métodos dependem somente do parâmetro medido, apresentando então maior confiabilidade [30].

### **Métodos indiretos de monitoramento**

Os métodos indiretos de monitoramento no processo de retificação consistem na medição *on-line* de sinais característicos associados ao processo de retificação através de transdutores. Os transdutores empregados fornecem um sinal elétrico em resposta a alguma grandeza física adquirida [30].

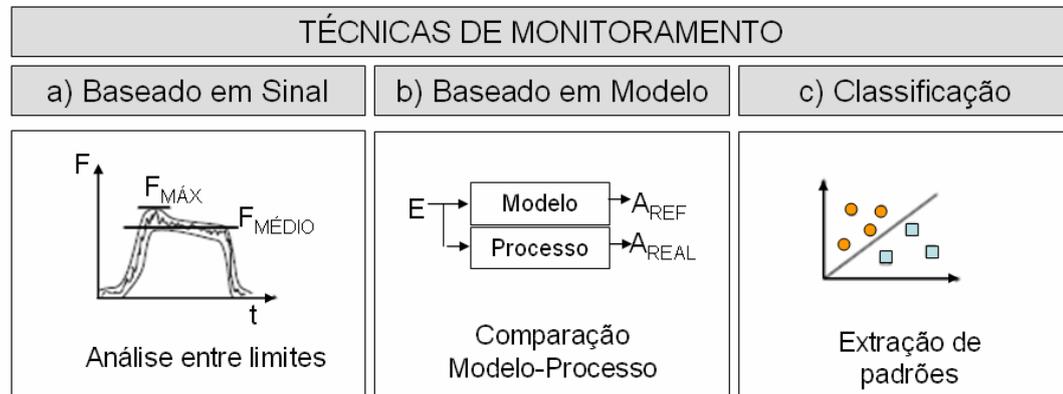
Os sinais obtidos com estes transdutores são geralmente funções de uma ou mais características do processo e servem para transportar a informação sobre um determinado fenômeno físico a um sistema de tratamento de sinais específico. Uma forma de supervisionar o processo de retificação consiste na aquisição de sinais relativos às vibrações, forças, emissão acústica, potência de corte e temperatura através de transdutores localizados em locais estratégicos na máquina-ferramenta e/ou peça [30]. A emissão acústica tornou-se uma das grandezas mais empregadas no monitoramento da retificação por ser possível detectar níveis ínfimos através de transdutores com sensibilidade e faixa de frequência adequada, sendo capaz de detectar avarias, a evolução do desgaste, reconhecer o contato entre rebolo e peça e permitir concluir sobre a taxa de retificação empregada [31].

### **2.12 Estratégias de Monitoramento**

Dependendo da complexidade do processo de fabricação, os métodos existentes para o seu monitoramento podem ser divididos em três tipos básicos: a) monitoramento baseado em sinais, b) monitoramento baseado em modelos, e c) monitoramento baseado em uma classificação, **Figura 2.16**.

No monitoramento baseado em sinais, o sinal de saída do transdutor (resultados obtidos) apresenta uma relação com as características do processo. Estabelecem-se limites superiores e limites inferiores para um comportamento considerado como normal. Observa-se o comportamento do sinal até que o mesmo desvie em relação ao padrão estabelecido, indicando então um problema [19]. Na utilização dos métodos baseados em sinais (ou valores limites), os valores dos sinais

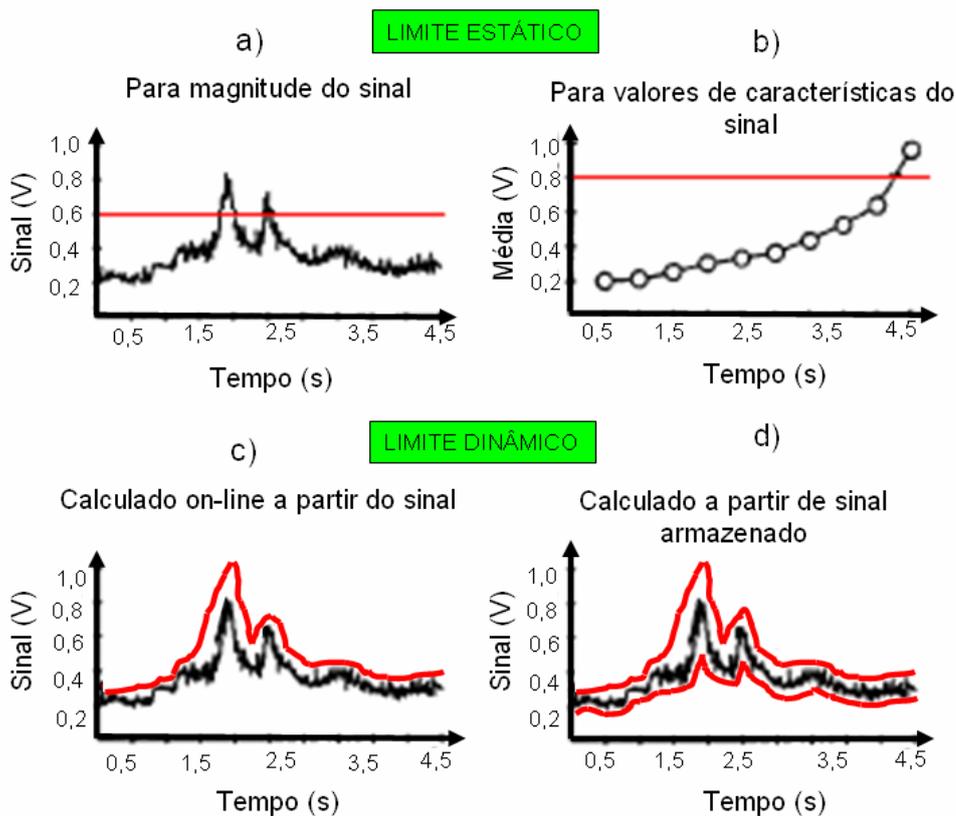
medidos devem ser comparados aos valores pré-definidos, ou à uma faixa do sinal em tempo real (ou quase real) [32], **Figura 2.16-a**.



**Figura 2.16** – Estratégias de Monitoramento [32, 27].

No monitoramento baseado em modelo (**Figura 2.16-b**) estabelece-se um modelo relacionando o processo com um sinal esperado no transdutor, ou seja, usa-se um modelo para prever o comportamento do processo [19]. Os fundamentos dos modelos de processos podem ser determinados empiricamente ou através de relações físicas. Na utilização de modelos para o controle de processos, é importante que o modelo seja alimentado com variáveis de entradas úteis, descrevendo de melhor forma possível o processo que deve ser analisado [32]. O método de reconhecimento de padrões, representado na **Figura 2.16-c**, objetiva identificar o padrão atual com um padrão característico pré-estabelecido [32].

Os dois primeiros métodos avaliam o sinal instantâneo. O primeiro (monitoramento baseado em sinais) é o mais direto, mas está sujeito a interpretações errôneas caso algumas mudanças imprevisíveis no processo ocorram. Algumas estratégias de processamento de sinal são necessárias. O sinal que é fornecido pelo transdutor precisa ser processado para detectar perturbações. A forma mais simples de monitoramento de sinais consiste em usar um limite (*threshold*) estático superior, **Figura 2.17- a** e **Figura 2.17-b**.



**Figura 2.17** – Implementação de estratégias de monitoramento usando limites [19, 33, 34].

No caso do limite estático ser ultrapassado pelo sinal devido a algumas mudanças no processo, como por exemplo um sobre-material maior na peça, uma dureza maior na peça ou uma colisão, a perturbação é facilmente detectada e o sistema de monitoramento interfere no processo [19]. Esta estratégia pode ser aplicada no monitoramento da magnitude do sinal no tempo e no monitoramento da magnitude de características do sinal, como o valor médio, desvio-padrão etc. [33]. Este método só funciona bem quando todas as restrições (profundidade de corte, material da peça etc.) permanecem dentro de faixas toleráveis [19].

Os limites dinâmicos consistem em limites definidos a partir do sinal gerado pelo processo. Para valores grandes (desbaste) os limites superior e inferior são estabelecidos para uma maior faixa de tolerância. Para valores pequenos do sinal gerado no processo (acabamento), os limites são aproximados ao valor do sinal. Para que o sinal possa ser interpretado adequadamente, os limites dinâmicos são gerados com um certo atraso em relação ao sinal medido. Com isto, um aumento gradativo do sinal não ultrapassa os limites estabelecidos. No caso de uma colisão,

com uma variação abrupta do sinal, o sinal ultrapassa o limite superior antes que o valor do limite tenha sido substituído. Neste instante o limite superior é congelado e a seqüência do comportamento do sinal permite tomar decisões específicas, **Figura 2.17-c**. No caso da utilização de sinais de EA, devido à grande largura de banda (*bandwidth*) verificada nestes sinais, respostas rápidas no tempo podem ser garantidas no caso de quebras ou impactos. Alterações no processo não relacionadas a colisões, taxa de retificação excessiva, corte interrompido e inclusões duras na peça, que afetem o sinal, podem causar falsas interpretações. Alterações do sinal provocadas por características geométricas da peça podem ser informadas ao sistema de monitoramento. Alterações provocadas de forma imprevisível exigem interpretações mais complexas do sinal (reconhecimento de padrões) [19].

A comparação de um sinal com outro sinal armazenado, **Figura 2.17-d**, estabelece o limite a partir do sinal de um ciclo de usinagem normal, previamente adquirido. Este procedimento necessita de um ciclo inicial chamado “*teach in*”. A partir do sinal armazenado pode-se calcular um limite superior e um inferior definindo uma faixa de trabalho, que acompanha a forma do sinal. No caso da faixa de trabalho, que também pode ser definida com a utilização das outras estratégias, a transgressão do limite superior representa um evento e a transgressão do limite inferior representa outro, cujos mesmos são identificados por comparadores diferentes que atuam conduzindo a ações correspondentes a cada situação [19, 33].

Os métodos citados (para o monitoramento baseado em sinais) têm encontrado aplicabilidade tanto para estratégias de monitoramento baseadas em sinais de EA como para aquelas baseadas em sinais de força. Estas estratégias funcionam bem para eventos discretos como quebra e impactos de ferramentas, mas são geralmente mais difíceis de empregar para mudanças em processos contínuos, por exemplo, o desgaste de ferramentas. A variação contínua das propriedades do material (condições de usinagem etc.) pode mascarar a característica do sinal relacionada ao desgaste, ou pelo menos, limitar a faixa de aplicabilidade, bem como, necessitar treinamentos extensos do sistema. Uma técnica com maior êxito é baseada na localização de parâmetros que são extraídos da característica do sinal filtrado, para remover as variáveis relacionadas ao processo (por exemplo, a velocidade de corte) [19].

### 2.13 Pré-requisitos para o Monitoramento de Processos

Os transdutores destinados ao monitoramento de processos devem cumprir requisitos específicos para cada função que deve ser monitorada. Os sinais que ocorrem como função do processo, como função de quebra de ferramentas, de colisões e vibrações e variação dos sinais provocada pelo desgaste da ferramenta têm em comum interferirem no sinal de força e no sinal dinâmico que acompanha toda deformação que ocorre na região de contato e raiz do cavaco. Transdutores piezelétricos são empregados para detectar e transformar estas características. Devido à magnitude dos sinais na retificação a instalação dos transdutores deve ser adequadamente planejada na máquina-ferramenta. Segundo (Tonshoff *et al. apud* Byrne, Xiaoqi [19, 20]): a- a medição deve ser mais próxima possível ao local onde ocorre a transformação de energia; b- não deve ocorrer nenhuma redução na rigidez estática ou dinâmica da máquina-ferramenta em decorrência da instalação dos transdutores na máquina-ferramenta; c- a instalação dos transdutores não deve levar a restrições no espaço de trabalho e nos parâmetros de corte; d- os transdutores não devem apresentar desgaste, e- devem apresentar baixas exigências por manutenção, fácil substituição e baixo custo; f- devem ser resistentes a cavacos, sujeira, e a influências térmicas, mecânicas e eletromagnéticas; g- devem apresentar um funcionamento independente da ferramenta e da peça; h- apresentar características metrológicas adequadas; i- apresentar transmissão confiável de sinais.

### 2.14 Transdutores para o Monitoramento de Processos

Segundo (Iyengar *et al. apud* Karpuschewski [26]), sensores são entendidos como sendo instrumentos ou dispositivos que apresentam um mecanismo apropriado para detectar uma variável física a partir de um sistema físico, onde o princípio de detecção pode ser mecânico, elétrico, eletromecânico, eletrônico, magnético, eletromagnético ou mesmo óptico, (Usher *apud* Karpuschewski [26]).

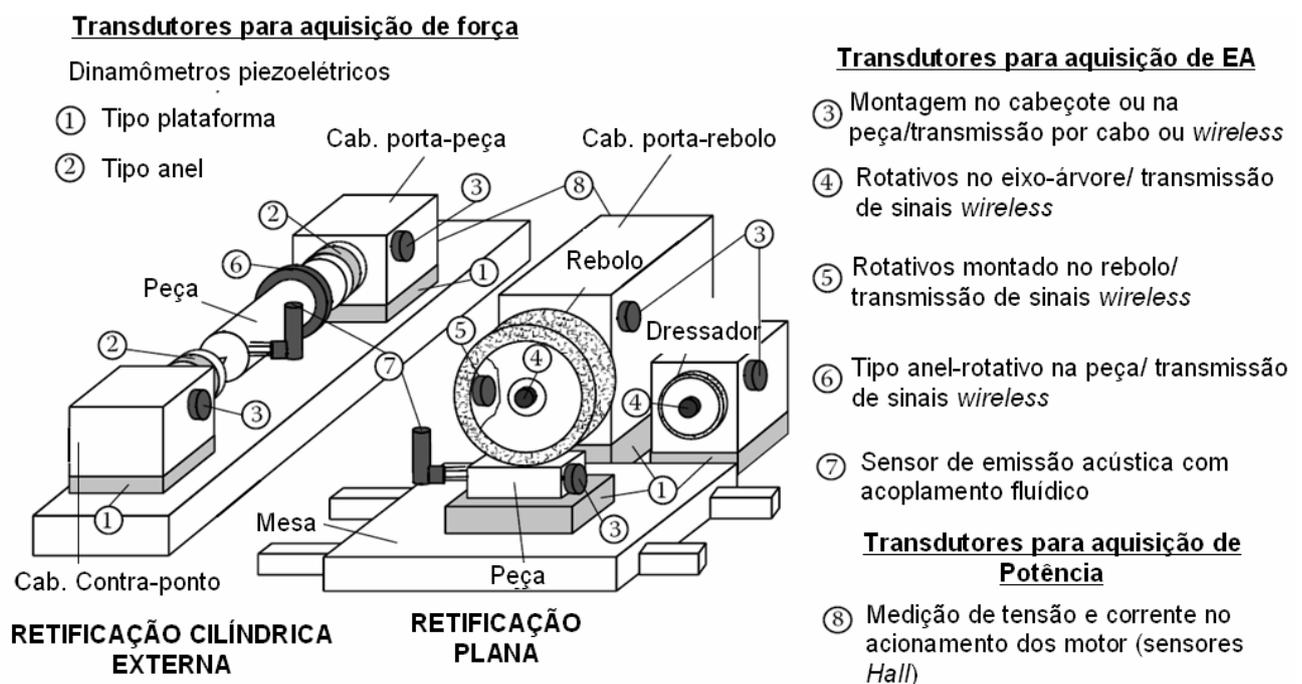
Um transdutor é um dispositivo que transforma um tipo de energia em outro tipo de energia, utilizando para isto um elemento sensor que recebe os dados e os transforma. Por exemplo, o sensor pode traduzir informação não elétrica (velocidade, posição, temperatura, pH) em informação elétrica (corrente, tensão,

resistência). Um tipo de transdutor freqüentemente empregado no monitoramento de processos e ferramentas é elaborado a partir de cristais naturais "piezelétricos" que transduzem energia mecânica em energia elétrica e vice-versa [35, 11].

O primeiro ponto a ser esclarecido para a consideração sistemática da utilização de sensores e transdutores nos processos de fabricação, consiste em se determinar qual tipo de característica do processo deve ser monitorada. Geralmente isto é desejável para todos os processos de fabricação, cujas características de interesse estejam tão próximas quanto possível do evento a ser detectado.

## 2.15 Transdutores para o Monitoramento do Processo de Retificação

O processo de retificação é influenciado por um grande número de variáveis de entrada as quais influenciam as características e o resultado de trabalho. As grandezas mais comumente avaliadas no processo de retificação (tanto para fins industriais, como para ambientes de pesquisa), são baseadas na potência, na força de retificação e na emissão acústica (EA), (Byrne et al. *apud* Marinescu [2]). A **Figura 2.18** ilustra a integração de transdutores no processo de retificação cilíndrica externa e no processo de retificação plana.



**Figura 2.18** – Instalação de transdutores de força, potência e emissão acústica na retificação cilíndrica e na retificação plana [2].

### 2.15.1 Transdutores para monitoramento da potência

A medição da potência efetiva ou da corrente dos acionamentos de alimentação dos motores de avanço, bem como da árvore principal, representam uma forma alternativa simples para monitorar o processo de usinagem. Nas modernas máquinas-ferramentas os inversores de frequência oferecem saídas nas quais a tensão e a corrente podem ser adequadamente lidas. A utilização destes transdutores apresenta certas desvantagens. No caso da potência ou corrente de acionamento dos motores de avanço ser medida, o sinal característico de interesse pode ser substancialmente menor do que as componentes do sinal referente ao atrito nas guias e pode variar fortemente devido ao estado de lubrificação e da velocidade de avanço utilizado (Weck *apud* Byrne [19]). Devido à inércia das massas, a saída do sinal apresenta uma característica de filtro passa-baixa. Desta forma, sinais súbitos ou de curta duração não são detectados, e apenas após os valores do sinal medido terem atingido limites extremos uma reação é efetuada pelo sistema de monitoramento.

Uma medição da potência do eixo-árvore geralmente falha em produzir bons resultados quando o processo de corte consome uma fração da potência medida [19, 36]. Apesar destes problemas, transdutores de potência podem ser utilizados para detectar desgaste nos casos em que as taxas de remoção são elevadas. Colisão e quebra de ferramentas são detectados de forma tardia (Brons *apud* Byrne [19]).

### 2.15.2 Transdutores para monitoramento da força

A medição de força é fundamentalmente baseada na determinação de um deslocamento. Todo deslocamento ocorre devido à limitação da rigidez de um sistema, sendo que sua medição pode ser realizada através de muitos tipos diferentes de transdutores. Na década de 1950, os extensômetros de resistência elétrica foram primeiramente usados para analisar forças na retificação (Marshall e Shaw *apud* Tönshoff [27]). Embora os sistemas desenvolvidos tenham apresentado bons valores e permitido a obtenção de dados significativos no processo de retificação, suas grandes desvantagens estavam relacionadas com a redução da rigidez total do sistema. Os extensômetros de resistência elétrica devem ser

montados em componentes do sistema que estejam sujeitos diretamente ao carregamento de força, sendo necessário para isso um enfraquecimento de um dos componentes do círculo de força [27, 37].

A introdução de transdutores de força com elementos piezelétricos, à base de quartzo ou cerâmicas piezelétricas, com boa rigidez, montados diretamente no fluxo de força reduziu a perda de rigidez anteriormente necessária. Devido ao comportamento anisotrópico (alteração das propriedades com a direção) de materiais piezelétricos à base de quartzo, é possível configurar uma montagem destes materiais agrupando-os de forma sobreposta para formar um transdutor de medição de força de três componentes ortogonais. Diferentes tipos e dimensões de plataformas estão disponíveis comercialmente. Para garantir um bom funcionamento as plataformas piezelétricas são adequadamente protegidas para poderem trabalhar no ambiente industrial. Todo sistema à base de elementos piezelétricos necessita de um amplificador de carga adicional para transformar as cargas resultantes do efeito piezelétrico em um sinal de tensão elétrica [27].

### 2.15.3 Transdutores para monitoramento da emissão acústica

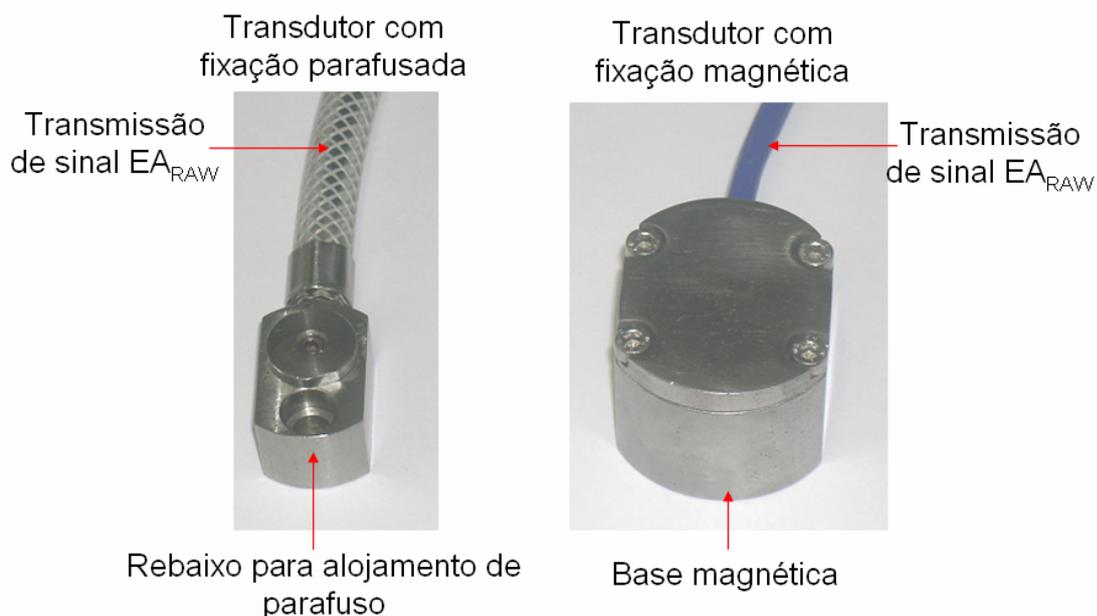
Os processos abrasivos são caracterizados pelo contato simultâneo de muitos gumes com a peça na região de trabalho. Cada contato individual gera ondas de tensão que se propagam através da peça, da ferramenta, e da estrutura da máquina (emissão acústica). A superposição destas ondas de tensão de alta frequência com ondas elásticas de outras fontes de ruído do sistema (máquina-ferramenta), como por exemplo, aqueles gerados por rolamentos e fluido de corte, exigem um tratamento adequado dos sinais para um posterior aproveitamento no monitoramento do processo. Para atingir boas respostas por parte dos transdutores, o local de sua instalação e a trajetória de transmissão do sinal, são aspectos muito importantes a serem considerados na técnica de EA na retificação (Muckli, Sporer *apud* Tönshoff [27]), [21].

Os transdutores de emissão acústica utilizados para o monitoramento do processo de retificação geralmente apresentam o princípio de medição por aceleração “princípio de um detector sísmico (*seismischer Aufnehmer*)”. Neste caso, o princípio básico do transdutor depende da ação de aceleração, de um sistema massa-mola amortecido, a ser medida. O comportamento de medição do transdutor

é influenciado diretamente através do dimensionamento da massa sísmica  $m$ , a constante de mola  $k$ , assim como a constante de amortecimento  $c$ . Como formas construtivas possíveis de serem utilizadas, destacam-se por exemplo, os transdutores de aceleração, transdutores capacitivos, magnéticos, indutivos e piezelétricos [26].

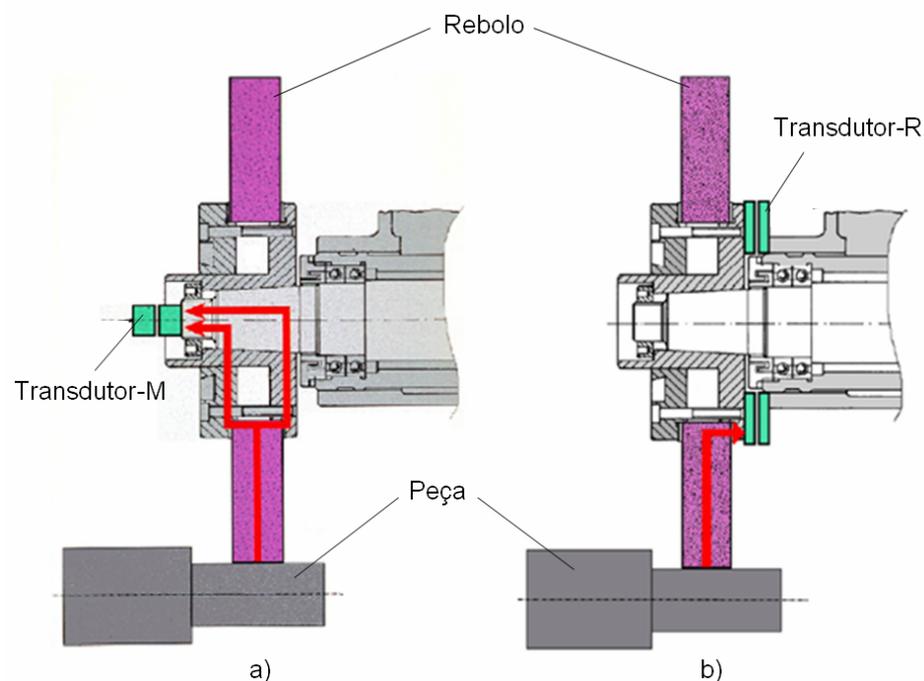
Os transdutores de EA que utilizam elementos piezelétricos apresentam uma ampla utilização na fabricação. Nestes transdutores o material piezelétrico (quartzo ou cerâmica), ao ser acionado periodicamente por uma força, converte a aceleração gerada no elemento piezelétrico em uma carga elétrica proporcional à aceleração [21].

Basicamente, existem dois tipos diferentes de transdutores de EA. Existem transdutores de transmissão direta e transdutores de transmissão indireta, (Hesse, Muckli *apud* Klein [36]). Para os transdutores de transmissão direta o sinal captado é transmitido diretamente para uma unidade externa. Como exemplos deste tipo de transdutor, destacam-se os transdutores com fixação parafusada e magnética, **Figura 2.19**. O transdutor magnético é empregado em situações onde se deseja fazer medições em diferentes posições, ajudando na escolha do melhor lugar para a instalação de um transdutor fixo. O transdutor com fixação parafusada é fixado com auxílio de um parafuso na posição desejada da máquina para uso definitivo. A **Figura 2.19** ilustra exemplos destes transdutores [38].



**Figura 2.19** – Transdutores de EA com transmissão direta de sinais [38].

Transdutores de transmissão indireta transmitem os sinais sem que haja contato entre o transdutor e o receptor. Como exemplo de transdutores que trabalham com a transmissão indireta de sinais destacam-se os transdutores M e R (**Figura 2.20-a** e **Figura.2.10-b**, respectivamente). Estes transdutores apresentam basicamente dois componentes principais, sendo que um deles consiste em uma peça que deve ser fixada no eixo-árvore (transdutor-emissor), e o outro componente consiste em um elemento fixo (transdutor-receptor) que recebe o sinal de EA sem a existência de contato. Para isto é necessário que o transdutor-receptor esteja fixo de forma centralizada em relação ao transdutor-emissor e distante do mesmo em um intervalo de 0,5 mm a 1 mm. Para ambos os transdutores, as posições mais adequadas para a instalação na máquina-ferramenta consistem basicamente no eixo-árvore do rebolo, no eixo do cabeçote porta-peça, ou no eixo ou flange da unidade de dressamento. **A Figura 2.20** mostra um corte do cabeçote porta-rebolo com a instalação de cada um dos transdutores. As setas indicam o caminho percorrido pelo sinal de EA, desde a fonte geradora de sinal de EA (contato rebolo-peça, por exemplo) até a chegada no transdutor-receptor.



**Figura 2.20** – Transdutores de EA com transmissão indireta de sinais [39].

Devido às vantagens comuns dos transdutores de EA e também de suas variedades, praticamente qualquer processo de usinagem com abrasivos ligados

tem sido investigado com o uso da EA. De modo mais específico, todas as principais variações do processo de retificação (por exemplo retificação plana, retificação cilíndrica interna, retificação cilíndrica externa, retificação *centerless*, assim como retificação de engrenagens) tem sido investigadas com o uso da EA [27].

## 2.16 Emissão Acústica (EA) no Processo de Retificação

Quando um material é deformado de alguma forma por um estímulo externo como ocorre, por exemplo, no processo de retificação, o atrito gerado entre a ferramenta e a peça, ou o simples contato entre ambos provoca a deformação e a reordenação da estrutura cristalina do material. Neste processo existe a liberação de uma quantidade de energia suficiente para produzir ondas de tensão que proporcionam mais deslocamentos sobre as superfícies do material, acarretando na atenuação exponencial dos deslocamentos na medida em que estes se dirigem da superfície para dentro do mesmo [40]. Tais deslocamentos são denominados como “ondas Rayleigh”, também chamadas de emissão acústica [21, 42]. A emissão acústica é entendida como sendo a propagação de uma onda num meio (gasoso, líquido ou sólido) cuja velocidade de propagação é função da densidade e módulo de elasticidade do meio no qual a onda se propaga. Quanto maior a força atômica entre átomos (módulo de elasticidade), maior será a velocidade de propagação da onda, já que os átomos estão mais próximos uns dos outros. Quanto maior a massa atômica (densidade), maior a força necessária para movimentar estes átomos, o que diminui a velocidade de propagação da onda [41].

As ondas de energia elástica propagam-se nos meios na forma de ondas volumétricas, ou seja, apresentam componentes transversais e longitudinais com o sentido de deslocamento, sendo que suas amplitudes ( $A$ ) estão relacionadas com a distância ( $r$ ) da fonte geradora, conforme mostrado pela **Equação 2.5** [42].

$$A \approx \frac{1}{r} \quad (2.5)$$

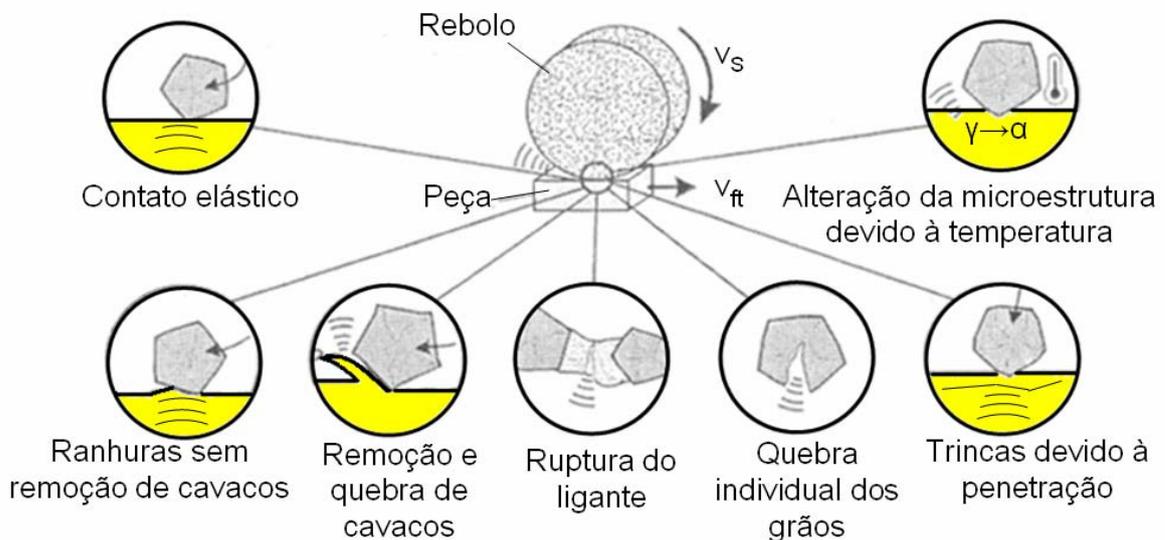
Esta equação apresenta um aspecto de natureza restritiva na utilização da emissão acústica como forma de se monitorar o processo de retificação, implicando

na necessidade de se instalar os transdutores com a maior proximidade possível da fonte geradora do ruído.

### 2.16.1 Fontes de emissão acústica no processo de retificação

O processo de retificação é caracterizado pelo contato simultâneo de um grande número de gumes com a superfície de trabalho na peça. Todos os contatos individuais proporcionados por cada um dos gumes presentes originam um pulso de deformação ou tensão sobre a peça. Durante o trabalho, as características individuais de cada grão sofrem alterações devido à presença do desgaste inerente ao processo, e com isso modificam-se também os gumes bem como suas distribuições ao longo da periferia do rebolo.

Desta forma, muitas causas distintas devem ser consideradas como possíveis fontes de emissão acústica no processo de retificação, conforme pode ser observado na **Figura 2.21**.



**Figura 2.21** – Fontes de emissão acústica na região de contato através do processo de retificação [26].

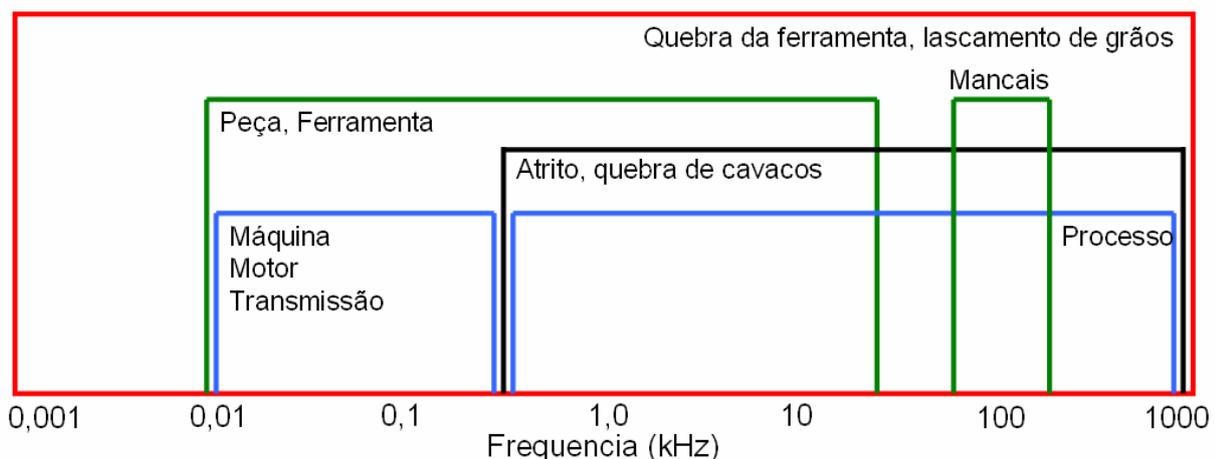
Os pulsos isolados gerados neste processo são uma combinação da penetração dos grãos sobre a peça, assim como de seus comportamentos de quebra e de desgaste aliados ao desgaste do material ligante entre os grãos. Além disto, um outro fator que contribui para a emissão acústica consiste na mudança de

fase (alteração da microestrutura) que é verificada no material da peça devido às sobrecargas térmicas na interface de contato rebolo-peça [26, 40, 43, 44].

### 2.16.2 Faixa de freqüências na emissão acústica

O intervalo de freqüência no qual as ondas de tensão elástica são consideradas para o aproveitamento no monitoramento por emissão acústica não é definido de forma exata. Normalmente a faixa de freqüência característica varia entre 30 kHz a 1000 kHz, situando-se acima da faixa de freqüência audível e da maioria das freqüências provenientes de fontes externas ao próprio processo de retificação e limitado pela máxima freqüência que ainda pode ser captada pelos transdutores [45]. O monitoramento por emissão acústica apresenta-se como uma técnica sensível na captação de ondas de tensão elástica de alta freqüência e adequada para o processo de retificação [46].

O espectro de freqüência de uma máquina-ferramenta em operação contém interferências em freqüências particulares. A influência destas interferências é acentuada em baixas freqüências e reduzida consideravelmente com o aumento da freqüência. As interferências mais significativas relacionadas aos aspectos construtivos da máquina-ferramenta situam-se na faixa de 10 Hz a 300 Hz, **Figura 2.22** [40, 43, 47, 48]. O eixo horizontal se apresenta em escala logarítmica.



**Figura 2.22** - Diagrama das faixas de freqüências comumente encontradas para máquina e processo. Baseado em [42].

As interferências causadas pelos mancais de rolamento situam-se em faixas de frequências maiores que os acionamentos, as transmissões e a máquina como um todo e se situam na faixa de frequência do processo de retificação, podendo causar problemas na interpretação dos sinais de EA. Sempre que possível, as interferências ou perturbações mais críticas devem ser minimizadas pela escolha mais adequada do posicionamento dos transdutores de EA na máquina-ferramenta e/ou pelo emprego de filtros [42].

### 2.17 Sinais de Emissão Acústica (EA) na Região de Contato Rebolo-Peça

No processo de retificação duas situações são de particular interesse para o monitoramento. A primeira situação diz respeito ao contato entre o rebolo e a peça e a segunda está relacionada com o próprio processo de retificação. A interpretação dos sinais de EA em cada uma destas situações deve ser efetuada de tal forma que se possa maximizar o aproveitamento das informações.

Uma das formas mais empregadas para se extrair informações relevantes a partir do sinal bruto de EA ( $EA_{RAW}$ ) consiste na utilização do valor RMS (*Root Mean Square*) [49]. O valor  $EA_{RMS}$  consiste em um valor retificado (sem componentes negativas) do sinal de  $EA_{RAW}$  e depende diretamente da quantidade de energia e da dispersão das tensões no material. Segundo Hwang T. *et. al* [49], os sinais de  $EA_{RMS}$  podem ser definidos como demonstrado na **Equação 2.6**.

$$EA_{RMS} = \left[ \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

Onde:

V= Sinal de EA puro ( $EA_{RAW}$ ) e,

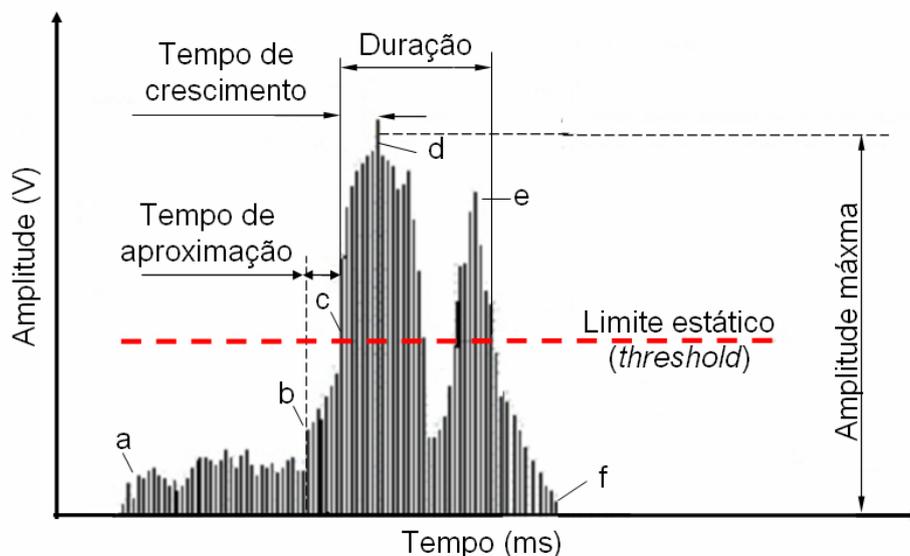
$\Delta T$ = Intervalo de integração (constante de integração), no domínio do tempo.

O valor  $EA_{RMS}$  é amplamente utilizado para o monitoramento do processo de retificação. Dependendo do intervalo de integração, informações com características pulsivas são perdidas e não podem ser interpretadas [33].

Na técnica binária de monitoramento do sinal de emissão acústica  $EA_{RMS}$ , empregam-se valores extremamente reduzidos para o limite estático (*threshold*), definido pelo usuário do sistema de monitoramento e se utilizam valores elevados de

ganho do sinal (amplitude) combinados com valores reduzidos do tempo de integração do sinal  $EA_{RMS}$ ,  $\Delta T$  [31, 50]. A técnica binária consiste em uma das formas mais comuns e simples para se reconhecer o contato inicial entre rebolo-peça (ou entre rebolo e ferramenta de dressamento) no processo de retificação.

A partir da detecção precisa do contato entre rebolo-peça (ou entre rebolo-ferramenta de dressamento) diversas aplicações distintas podem ser implementadas como por exemplo: sistemas anti-colisão, controle do final de faiscamento (*spark out*), *preset* automático do rebolo (medição do rebolo com diamante) medição dimensional da peça antes do início da retificação (para monitorar as operações de usinagem antecedentes) [50]. A **Figura 2.23** mostra um exemplo típico de um sinal de  $EA_{RMS}$  obtido durante o processo de retificação em mergulho de uma peça cilíndrica que apresenta uma velocidade periférica  $v_w$ , e com um erro geométrico na superfície usinada.



**Figura 2.23** – Parâmetros característicos em sinais de  $EA_{RMS}$  no domínio do tempo [8, 51, 52].

A captação do sinal de  $EA_{RMS}$  é comandada pelo movimento inicial de aproximação em mergulho do rebolo em relação à peça (intervalo a-b, **Figura 2.23**). Esta movimentação induz geralmente a interferências no sinal de  $EA_{RMS}$  (ruído de fundo), devido à atuação de componentes móveis na máquina-ferramenta (fuso de esferas, rolamentos etc.) e deve ser controlada através do sistema de monitoramento para que a detecção do contato entre rebolo-peça possa ser

realizada de forma adequada. No instante em que ocorre o contato entre rebolo-peça, um aumento na amplitude do sinal de  $EA_{RMS}$  (**Figura 2.23**, ponto b) é percebido.

Quando muitos grãos do rebolo passam a atuar na usinagem da superfície da peça (não necessariamente no mesmo local) de forma que o intervalo entre dois cortes sucessivos é muito menor do que o tempo de queda do sinal pulsivo (*decay time*), então ocorre o aparecimento de um sinal contínuo de  $EA_{RMS}$  (**Figura 2.23**, pontos b-c-d). Desta forma, o evento de contato entre rebolo-peça pode ser representado por duas fases, sendo que a primeira é definida como “contato dos grãos”, na qual ocorrem sinais em forma de pulsos, devido ao corte de apenas alguns grãos protusos. A segunda fase pode ser considerada como “contato do rebolo” na qual o mesmo está continuamente em contato com a peça, gerando então sinais contínuos de  $EA_{RMS}$ . A duração da primeira fase depende da topografia do rebolo, do erro geométrico da peça, e da velocidade de avanço em mergulho  $v_{fr}$ , utilizada no processo [22].

A detecção do contato está relacionada diretamente com o tempo de integração  $\Delta T$ , do sinal de  $EA_{RMS}$ , e com o ajuste do limite estático (*threshold*). Para a caracterização do evento de contato, utilizam-se parâmetros específicos (no domínio do tempo) relacionados diretamente com o nível do limite estático ajustado. Um primeiro parâmetro que pode ser mencionado consiste no tempo de aproximação do sinal (*approach time*,  $t_A$ ). Este pode ser definido como o intervalo de tempo transcorrido entre a primeira elevação da amplitude verificada no sinal de  $EA_{RMS}$  (**Figura 2.23**, ponto b) até o momento em que ocorre uma ultrapassagem ascendente da linha associada com o limite estático (*threshold*) definida pelo usuário, (**Figura 2.23**, ponto c). Outro atributo que pode ser extraído da **Figura 2.23** consiste no parâmetro “tempo de crescimento” (*rise time*,  $t_R$ ), o qual se caracteriza como sendo o período compreendido entre a primeira ultrapassagem do limite estático até o instante no qual o sinal de  $EA_{RMS}$  apresenta sua maior amplitude (intervalo c-d). Outro parâmetro de interesse quando são analisados sinais de  $EA_{RMS}$  no domínio do tempo consiste na duração do evento de contato, o qual pode ser caracterizado pelo período compreendido entre a primeira e última ultrapassagem (descendente) do limite estático previamente definido pelo usuário. Todos os parâmetros anteriormente descritos são medidos geralmente em milsegundos (ms). Como último parâmetro de interesse pode-se citar a “amplitude máxima” (**Figura**

**2.23** ponto d) atingida pelo sinal de  $EA_{RMS}$ . Este parâmetro demonstra a intensidade que a fonte geradora de EA disponibiliza sobre o material ou componente em estudo [47].

O comportamento verificado no sinal de  $EA_{RMS}$  entre o intervalo de tempo associado aos pontos d-e na **Figura 2.23** indica uma redução na interferência entre rebolo-peça durante o processo de retificação, podendo ser ocasionado, por exemplo, por uma irregularidade (erro de circularidade) existente na superfície da peça usinada ou devido a um etalhe (rasgo) ao longo da superfície trabalhada. O recuo do rebolo em relação à superfície usinada reflete-se em um decréscimo dos níveis de  $EA_{RMS}$ , representado entre os pontos e-f na **Figura 2.23**.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios realizados foram desenvolvidos em duas etapas, sendo uma delas desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP)-UFSC e outra na empresa parceira ZEN S.A. Este capítulo descreve os equipamentos e métodos empregados na realização dos trabalhos.

#### 3.1 Máquinas-ferramentas

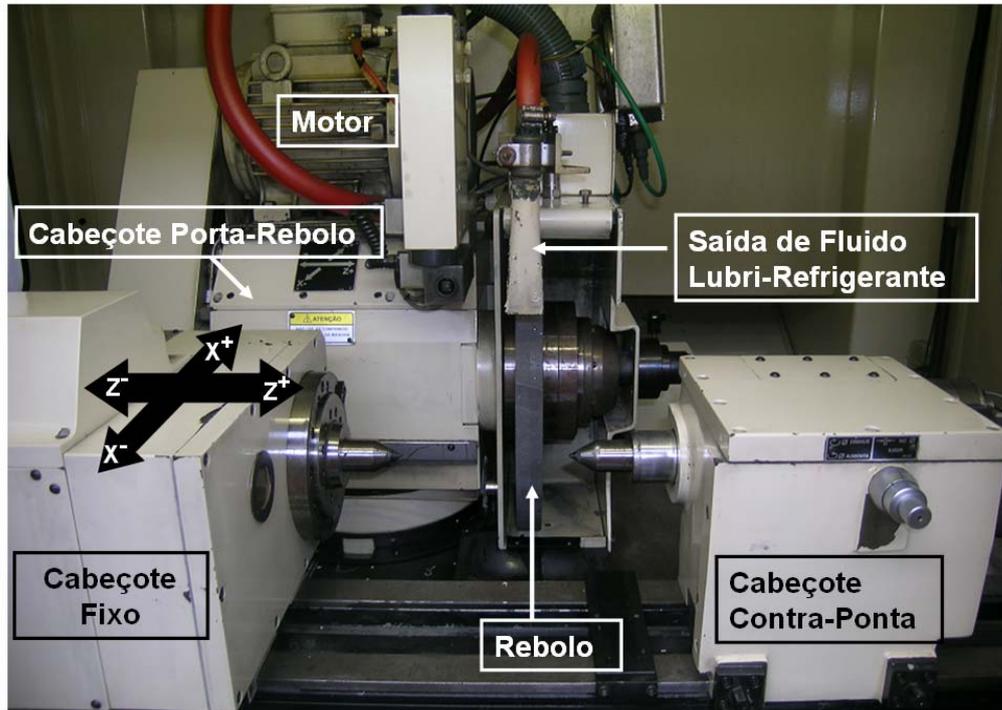
A etapa de ensaios desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP)-UFSC ocorreu em uma retificadora cilíndrica universal comandada numericamente (CNC), modelo Pratika Flexa-600L da empresa Zema Zselics Ltda, **Figura 3.1**, equipada com um comando numérico da Siemens, modelo Sinumerik 840D.



**Figura 3.1** – Retificadora cilíndrica universal Pratika Flexa-600L.

A potência de acionamento desta retificadora é de 5,6 kW (7,5 HP) e possibilita, para o máximo diâmetro de rebolo de 406 mm, atingir velocidades de corte de 100 m/s. O mancal do eixo-árvore é hidrostático. Os carros longitudinais nos eixos X (transversal) e Z (longitudinal) são movimentados sobre guias hidrostáticas e

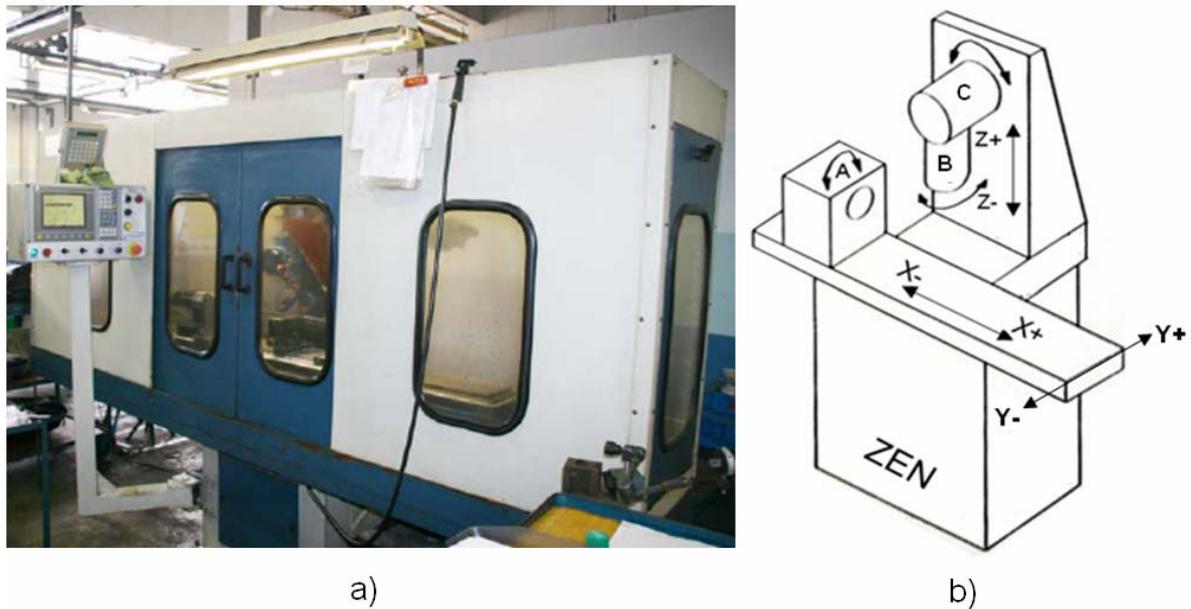
acionados por servo-motores e fusos de esferas recirculantes. A máquina-ferramenta permite a retificação de peças com comprimento e diâmetro máximos de 600 mm e 275 mm, respectivamente. A **Figura 3.2** mostra a região de trabalho desta máquina, destacando os principais componentes.



**Figura 3.2** – Compartimento de trabalho da retificadora cilíndrica CNC Zema Zselics, Pratika Flexa-600L.

Os pontos de apoio da peça na máquina são fixos (não executam rotação). A rotação da peça é proporcionada por um arrastador. O cabeçote contra-ponta é posicionado manualmente e sua ponta-móvel é acionada através de um pedal, pelo operador. A pressão de fixação da peça é controlada por mola.

Os ensaios realizados na empresa ZEN S.A, Brusque-SC, foram efetuados em uma retificadora cilíndrica CNC projetada para a fabricação de ferramentas de brochamento (brochas), **Figura 3.3-a**. A estrutura mecânica da máquina (cabeçote porta-rebolo, cabeçote fixo, cabeçote contra-ponta, mesa etc.) foi desenvolvida pelo departamento de projetos da empresa ZEN S.A. A integração mecânica-eletrônica dos componentes relacionados aos acionamentos e controles da máquina foi projetada e implementada pela empresa de automação Stauffer, Brusque-SC.

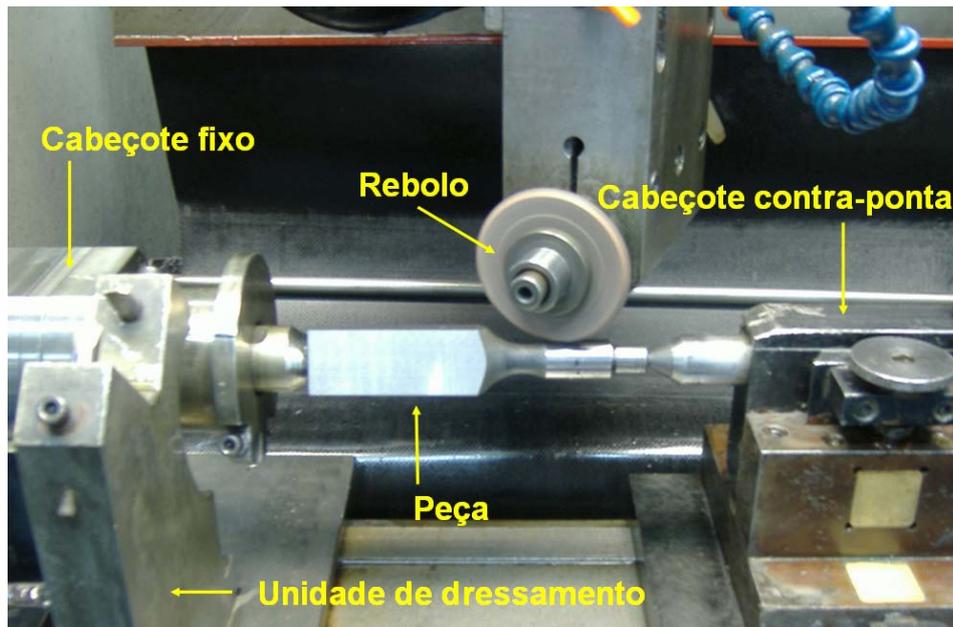


**Figura 3.3** – Retificadora cilíndrica CNC para fabricação de brochas. a) Vista frontal. b) Eixos-móveis na retificadora.

Os eixos lineares X e Y permitem a movimentação da mesa da máquina que suporta a peça. O eixo-Z permite elevar e abaixar o rebole em relação à peça. O eixo-A permite a rotação da peça. Os eixos X, Y, Z e A são comandados numericamente e acionados por um sistema de servo-motor e fuso de esferas recirculantes.

As ferramentas (brochas) fabricadas nesta máquina apresentam canais (ou estrias) helicoidais (inclinados em relação ao eixo longitudinal da peça). Para que se consigam usinar os canais com os ângulos de hélices definidos pelo projeto, é necessário proceder a inclinação do rebole em relação ao eixo da peça, rotacionando o eixo-B da máquina, **Figura 3.3-b**. Esta figura ilustra também os demais eixos móveis desta máquina-ferramenta. A geração de uma estria é obtida pela rotação simultânea da peça e o deslocamento axial segundo o eixo-X, garantindo-se um passo de hélice idêntico à inclinação dada ao rebole sobre o eixo-B.

A inclinação do eixo-C é realizada manualmente, com indicação digital, para proceder a usinagem dos ângulos de saída e de incidência nos dentes das brochas. O acionamento do rebole é realizado por um motor de 0,37 kW. A transmissão da rotação do motor para o eixo do rebole é efetuada por correia. A **Figura 3.4** ilustra a área de trabalho desta máquina-ferramenta.



**Figura 3.4** – Compartimento de trabalho na retificadora ZEN/Stauffer.

### 3.2 Ferramenta de Corte

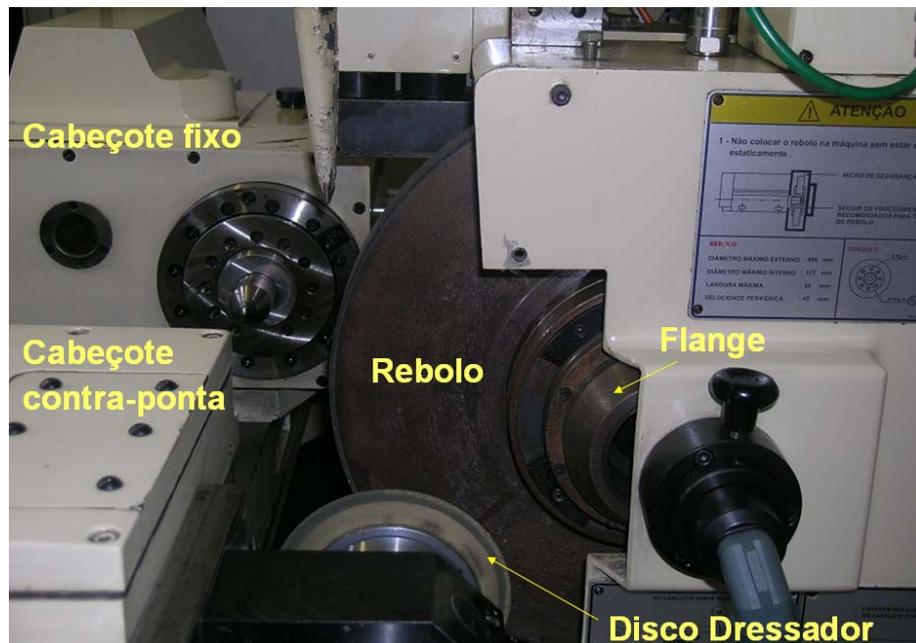
Nos ensaios foram utilizados rebolos convencionais e de CBN. As principais características das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios no LMP-UFSC e na empresa ZEN S.A. são descritas abaixo.

Para os ensaios implementados no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP)-UFSC, foi utilizado um rebolo de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) CB7 e 18B12, com ligante cerâmico-vítreo, fabricado pela empresa Diamant Werkzeuge Hameln (DWH), fornecido ao LMP pela Dr. Kaiser do Brasil, **Tabela 3.1 [18]**.

**Tabela 3.1** – Rebolo utilizado durante ensaios no LMP-UFSC [18].

Dados técnicos do rebolo de CBN	
Especificação completa do rebolo	14A1 V B151 C150 CB7 18B12 ST
Tipo de grão	CBN (CB7)
Perfil do rebolo	Reto (14A1)
Diâmetro	400 mm
Largura do rebolo	30 mm
Espessura do revestimento	5 mm
Diâmetro do furo de fixação	127 mm
Granulometria (tamanho do grão)	151 $\mu\text{m}$ (B151)
Tipo de ligante	Vitrificado (V) – 18B12
Corpo do disco ST	Aço

O rebolo é montado no flange de interface na máquina, **Figura 3.5**.



**Figura 3.5** – Rebolo, disco dressador e cabeçotes na retificadora Zema Zselics.

Nos ensaios na empresa parceira ZEN S.A foram utilizados rebolos convencionais 55A100 OVH, de óxido de alumínio com ligante vitrificado com granulometria de Mesh 100 (corresponde ao tamanho médio dos grãos de 125  $\mu\text{m}$  a 149  $\mu\text{m}$ ), e fabricado pela empresa Norton. Os rebolos apresentam um diâmetro máximo de 100 mm e largura de 6 mm. A velocidade angular máxima destes rebolos é de  $8460 \text{ min}^{-1}$ , o que equivale a uma velocidade de corte máxima de  $v_s = 45 \text{ m/s}$ . Os rebolos foram perfilados especificamente para cada uma das duas etapas dos ensaios na empresa.

### 3.3 Sistemas de Monitoramento por Emissão Acústica (EA)

Nos ensaios executados no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP)-UFSC, foram utilizados dois sistemas de monitoramento (SM). Um dos equipamentos é importado e outro nacional. O sistema importado é o SM-D da empresa alemã Dittel GmbH (modelo AE 6000) e o nacional consiste no modelo SM-S (modelo MSM) da empresa Sensis Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda. (São Carlos-SP).

O SM-D foi utilizado também para o monitoramento do processo de dressamento do rebolo, anteriormente à fase de ensaios, bem como na usinagem das superfícies de referência do corpo de prova (CP). Durante a etapa de ensaios realizada na empresa ZEN S.A, apenas o SM-D foi utilizado para os ensaios de validação de uma estratégia para o posicionamento centralizado automatizado entre rebolo-CP (estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>)

### 3.3.1 Sistema de monitoramento SM-D

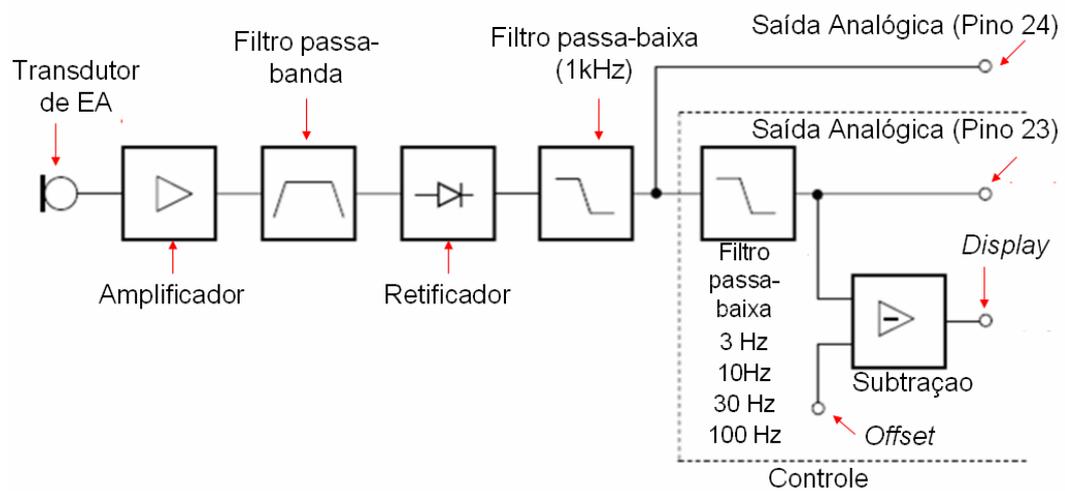
A **Figura 3.6** mostra o painel do SM-D (modelo AE 6000). Merecem destaque as conexões para acoplamento dos transdutores de emissão acústica (EA), a entrada para energia elétrica (alimentação), a conexão de saída para comunicação com o comando da máquina (conector DB25), a conexão de saída para comunicação com computador (RS 232 C) e a conexão para aterramento do SM-D (*Ground*). O conector RS 232 C permite que os sinais de EA<sub>RMS</sub> sejam armazenados e visualizados (em um *laptop*, por exemplo) através do software *Dittel System Control Center*, que acompanha o SM-D. É possível também exportar os arquivos armazenados no *laptop* para o software *MS Excel* para proceder uma análise estatística dos resultados e a plotagem dos sinais de EA<sub>RMS</sub>.



**Figura 3.6** – SM-D e principais conexões utilizadas durante ensaios.

O funcionamento do SM-D é baseado na captação de eventos geradores de EA através dos transdutores. Estes sinais são enviados ao SM por meio das conexões “21” a “24” do equipamento. Apesar deste SM disponibilizar até 4 entradas para transdutores, os sinais de  $EA_{RMS}$  são referentes apenas ao transdutor selecionado e uma análise multitransdutores em tempo real não é possível com este equipamento.

O tratamento dos sinais de EA bem como a amostragem dos mesmos é realizado pelo próprio SM-D. O diagrama de blocos da **Figura 3.7** ilustra os principais estágios de condicionamento dos sinais de EA no SM-D.



**Figura 3.7** – Diagrama de blocos demonstrando seqüência para tratamento do sinal de EA no SM-D.

O sinal de EA captado pelo transdutor de EA é enviado por meio de cabo apropriado para o SM-D, onde sofre primeiramente uma amplificação. O sinal bruto de emissão acústica ( $EA_{RAW}$ ) amplificado é em seguida enviado a um filtro passa-banda, o qual permite a seleção, por parte do usuário, de 4 faixas específicas de frequências. Dentre as faixas de frequências disponíveis para seleção, destacam-se: *low* (35 kHz a 50 kHz) , *medium-low* (70 kHz a 100 kHz) , *medium-high* (250 kHz a 350 kHz) e *high* (400 kHz a 600 kHz) . Em seguida, o sinal é retificado e passa posteriormente por um filtro passa-baixa com frequência de corte de 1 kHz, podendo então ser enviado para um analisador de sinais através da saída analógica associada ao pino 24 presente no conector DB25 do SM-D. O sinal mostrado na tela do *laptop* deve sofrer ainda uma filtragem passa-baixa com a possibilidade de escolha livre por parte do usuário de 4 valores específicos: 3 Hz, 10 Hz, 30 Hz, e

100 Hz. Segundo informações do fabricante [39] estes valores atuam diretamente sobre a constante de integração do sinal de  $EA_{RMS}$  ( $EA_{RMS}$ ) variando assim o “alisamento” (*smoothing*) percebido no sinal  $EA_{RMS}$ . Após sofrer a filtragem passa-baixa, o sinal  $EA_{RMS}$  pode ser visualizado no monitor do *laptop* ou de um PC através da utilização do software que acompanha o equipamento. Paralelamente, pode-se enviar também o sinal  $EA_{RMS}$  obtido nesta etapa de tratamento para um sistema analisador de sinais, no caso de se desejar proceder análises adicionais no domínio do tempo e frequência. Para isto deve-se utilizar a saída analógica associada ao pino 23.

### 3.3.2 Sistema de monitoramento SM-S

O SM-S (modelo MSM) permite a ligação de até 13 transdutores. Os transdutores conectados podem ser selecionados pelo teclado no painel frontal do equipamento. Os sinais destes transdutores são tratados e comparados pelo SM-S. O conector “In ch2” é usado para conectar um transdutor de EA ativo, enquanto os outros conectam transdutores passivos. Apesar do SM-S disponibilizar até 13 entradas para transdutores, a utilização destas pode ser feita apenas de forma individual, ou seja, um transdutor por vez.

A **Figura 3.8** ilustra o painel frontal e traseiro do SM-S. As conexões para o acoplamento dos transdutores de EA, entrada para energia elétrica, conexão BNC para saída analógica e sinais *RMS* e conexão DB15 para interfaceamento com o comando CNC da máquina situam-se no painel traseiro deste SM. A conexão DB15 é utilizada para a integração do SM-S na máquina-ferramenta, com o objetivo de comandar a paralisação do avanço de mergulho do rebolo  $v_{fr}$ , quando fosse detectado o contato entre rebolo-CP, nos ensaios de reconhecimento de contato.



**Figura 3.8** – Principais componentes utilizados no SM-S. a) Painel frontal. b) Painel traseiro.

Este SM apresenta duas saídas analógicas de sinal, sendo uma de sinal bruto (*RAW*) e outra de sinal tratado (*RMS*). Estas saídas podem ser conectadas a um microcomputador com placa de aquisição de dados para análise do sinal, por meio dos conectores BNC no painel traseiro, ou diretamente pelo conector DAC no painel frontal. O conector DAC possui 50 pinos e pode ser acoplado a uma placa de aquisição *National Instruments*. Este conector está interligado diretamente aos nove conectores de entrada do painel traseiro. Para se adquirir e gravar os sinais decorrentes do contato entre rebolo-CP, é empregado um analisador de sinais complementar, o qual deve ser interligado com este SM.

### 3.4 Sistema Multianalisador de Sinais Oros

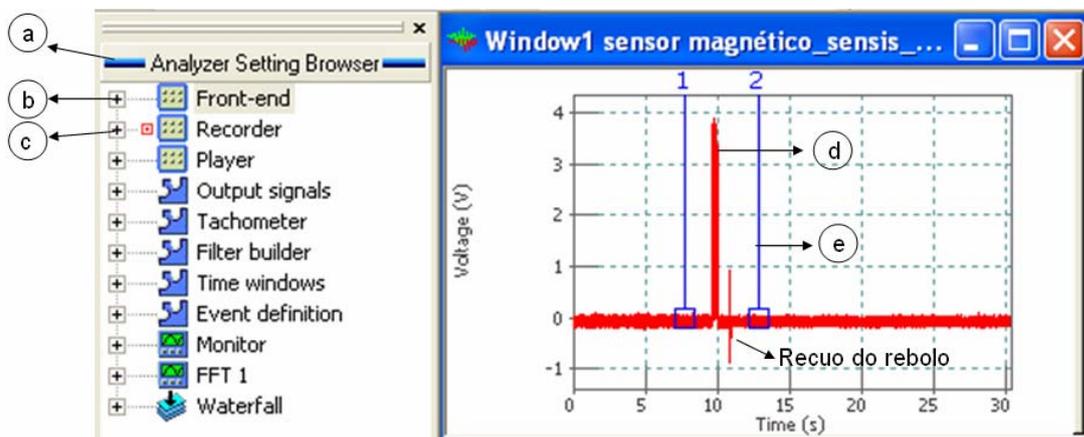
O sistema multianalisador de sinais da empresa Oros (modelo OR-34) é composto de um hardware e um software. Ele permite a visualização, armazenamento e análise dos sinais de emissão acústica *RMS* ( $EA_{RMS}$ ). A visualização em tempo real dos sinais de  $EA_{RMS}$  é possibilitada através do software *NVGate*<sup>®</sup> que acompanha o equipamento. O equipamento multianalisador apresenta no seu painel frontal, 4 canais de entrada (*input*), uma saída analógica (*output*), e dois canais para *Trigger*, **Figura 3.9-a**. Os canais para *Trigger* podem ser utilizados quando se desejar a automatização de medições com o equipamento. Na parte traseira, **Figura 3.9-b**, encontram-se disponíveis as entradas para alimentação, botão de acionamento e uma entrada RJ45 para a conexão de cabo *ethernet*, com o

qual é possível interligar o equipamento ao *laptop* para a transferência de dados e visualização dos sinais de  $EA_{RMS}$ .



**Figura 3.9** – Sistema multianalisador Oros OR-34.

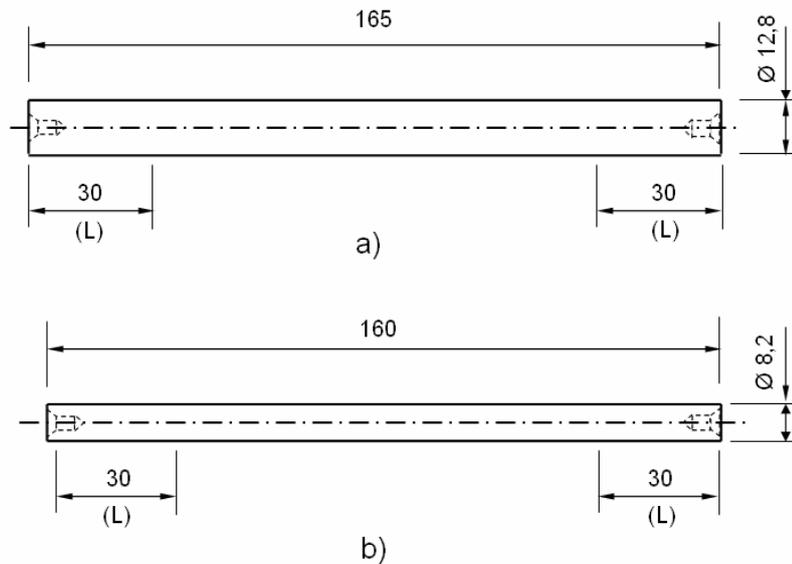
Os 4 canais (*input*) podem operar numa faixa máxima de tensão de  $\pm 10$  V, idêntica com a saída analógica *RMS* do SM-S. As principais funções utilizadas no software *NVGate*<sup>®</sup> são destacadas na **Figura 3.10**.



**Figura 3.10** – Principais funções utilizadas no software *NVGate*<sup>®</sup>.

Na janela do navegador “*Analyzer Setting Browser*” (**Figura 3.10-a**), os principais parâmetros relacionados com os canais de entrada (*input*) podem ser configurados na subfunção “*Front-end*” (**Figura 3.10-b**). Dentre estes, destacam-se por exemplo, a faixa de tensão (*Range pk*), o transdutor (*Transducer*), a variável física sendo medida (*Physical qty*), ajuste da sensibilidade (*Sensitivity*) e tipo de sinal

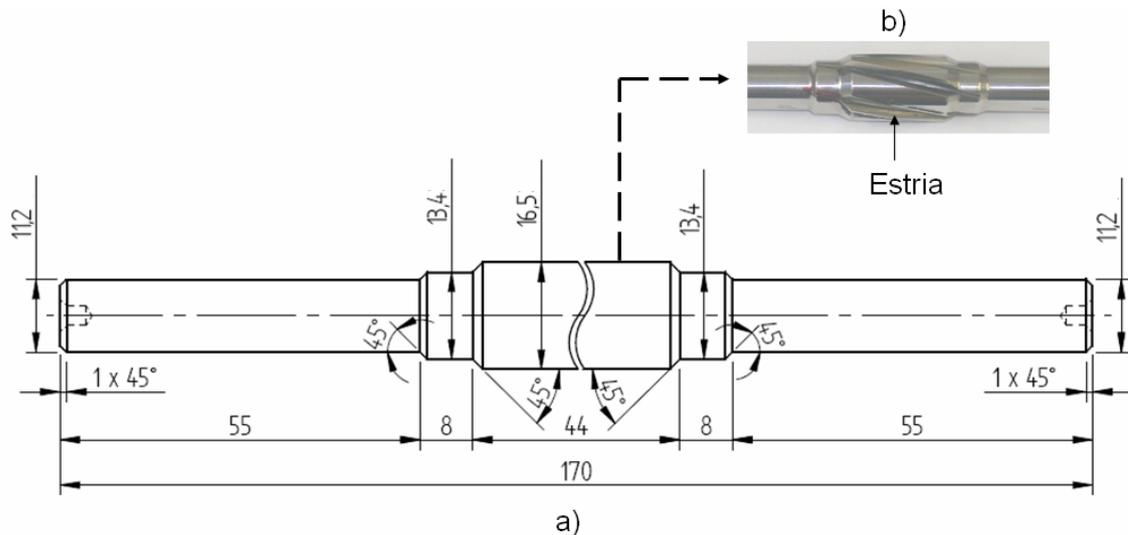




**Figura 3.12** – Dimensões dos CP utilizados na etapa 1 dos ensaios na ZEN S.A.  
Cotas em mm. Tolerância dimensional =  $\pm 0,05$  mm.

Na etapa 1 dos ensaios na empresa ZEN S.A, utilizaram-se os comprimentos de ensaio L, destacados na **Figura 3.12**. Primeiramente, aproveitou-se o comprimento de ensaio em um lado do CP e assim que o espaço disponível nesta superfície fosse totalmente ocupado pelas marcas impressas, o CP foi reposicionado para que o outro comprimento pudesse ser utilizado.

Para a segunda etapa dos ensaios, foi necessário torneiar um CP escalonado em aço M2 temperado, **Figura 3.13-a**. A superfície cilíndrica de maior diâmetro foi destinada à usinagem das estrias com a utilização de um perfil específico de rebolo, **Figura 3.13-b**. A superfície de menor diâmetro foi empregada para a obtenção de valores médios com a utilização das estratégias ZEROY<sub>AUTO</sub> e ZEROY<sub>MANUAL</sub>.

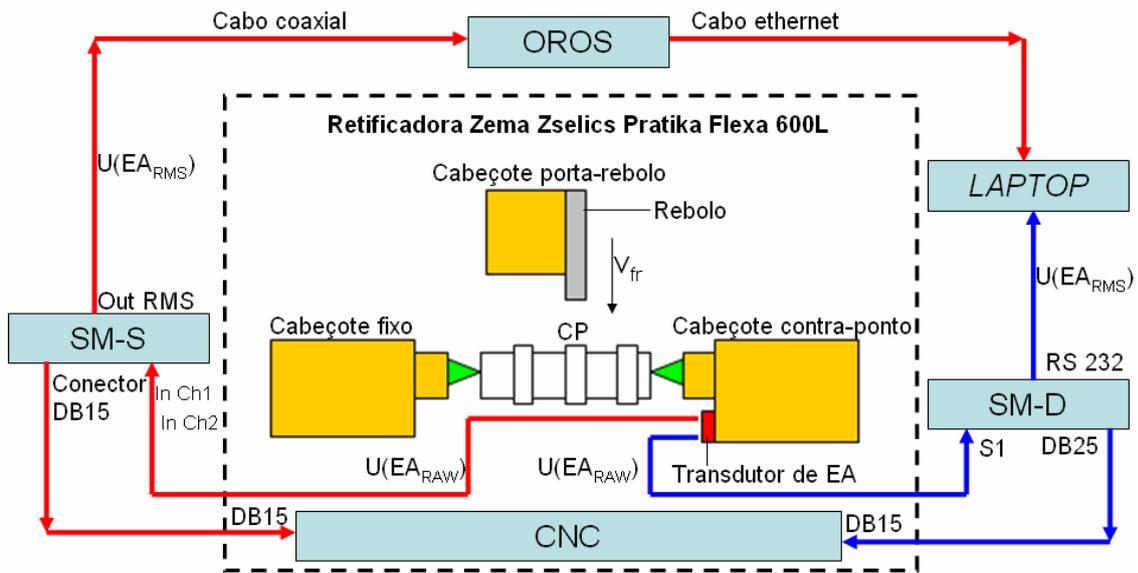


**Figura 3.13** – a) Dimensões do CP utilizado na etapa 2 dos ensaios na ZEN S.A. b) Estria usinada na porção central do CP. Tolerâncias dimensionais variando entre  $\pm 0,05$  mm.

### 3.6 Bancada Experimental

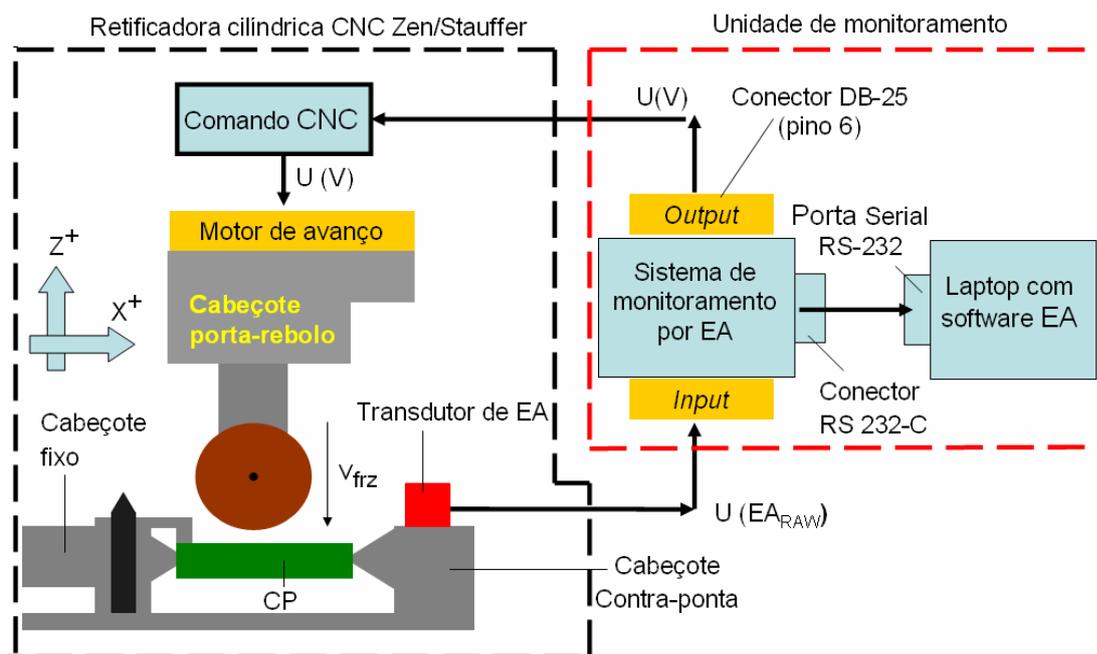
Para os ensaios de reconhecimento de contato no LMP-UFSC foi necessária a preparação de uma bancada experimental composta por dois SM, uma retificadora cilíndrica CNC da empresa Zema Zselics (modelo: Pratika Flexa 600-L) um computador (*laptop*) e um sistema multianalisador de sinais da empresa Oros (modelo: OR-34). A **Figura 3.14** ilustra esquematicamente o fluxo de sinais na bancada experimental utilizada para os ensaios.

Os sinais de  $EA_{RAW}$  captados pelos transdutores de EA são enviados para os SM por meio de cabos apropriados (transmissão direta). Os SM realizam o tratamento dos sinais, de forma a converter os sinais de  $EA_{RAW}$ , em sinais  $EA_{RMS}$  e enviam os mesmos para um *laptop* através de um cabo RS-232. O SM-S necessita de um processamento intermediário, realizado pelo sistema multianalisador OR-34. O sistema multianalisador foi conectado também a um *laptop*, podendo-se então armazenar e visualizar os sinais de EA com o auxílio do software *NVGate*, para uma posterior análise. Os SM utilizados são interfaceados com o comando da máquina-ferramenta com o objetivo de paralisar instantaneamente o avanço de mergulho do rebolo  $v_{fr}$ , assim que o contato entre rebolo-peça é detectado.



**Figura 3.14** – Fluxo de sinais na bancada de ensaios para reconhecimento de contato, LMP-UFSC.

Para a realização dos ensaios no setor de Ferramentaria da empresa ZEN S.A foi necessária a concepção de uma bancada de ensaios específica. A **Figura 3.15** mostra o fluxo de sinais para a realização dos ensaios, bem como os equipamentos integrantes.



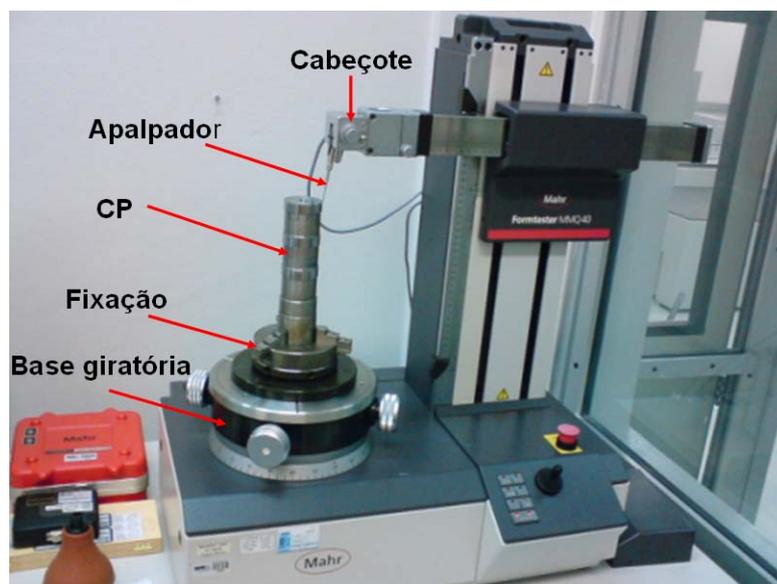
**Figura 3.15** – Fluxo de sinais na bancada para ensaios com estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  na empresa parceira ZEN S.A.

Os sinais de  $EA_{RAW}$  captados pelo transdutor de EA foram transmitidos para a entrada (*input*) “S1” do SM-D por meio de um cabo apropriado. O SM-D realiza o tratamento dos sinais, de forma a converter os sinais de  $EA_{RAW}$  em sinais  $EA_{RMS}$ , os quais podem ser visualizados na tela de um *laptop*. Além de permitir a visualização dos sinais  $EA_{RMS}$ , é possível também amostrar (aquisição) e armazenar os sinais de  $EA_{RMS}$  obtidos.

A comunicação entre o SM-D com o CNC da máquina é realizada a partir da conexão do conector DB25 no SM-D a uma interface fotoacoplada (relê fotoativado) instalada no CLP da máquina. Através deste interfaceamento é possível parar o acionamento de avanço para um sinal de EA especificado ou armazenar as posições das coordenadas relativas ao início e ao fim da EA provocada pelo processo de retificação.

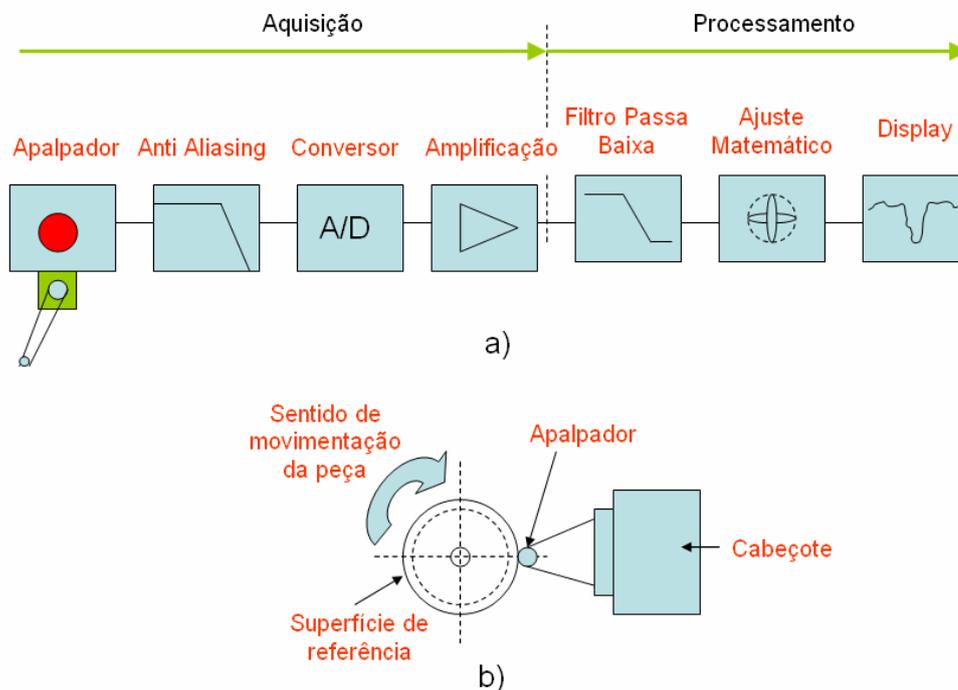
### 3.7 Equipamentos Auxiliares

Para a medição das profundidades das marcas de contato executadas nos CP durante os ensaios no LMP-UFSC foi empregada uma máquina de medir forma da empresa Mahr, modelo Formtester MMQ40, **Figura 3.16**.



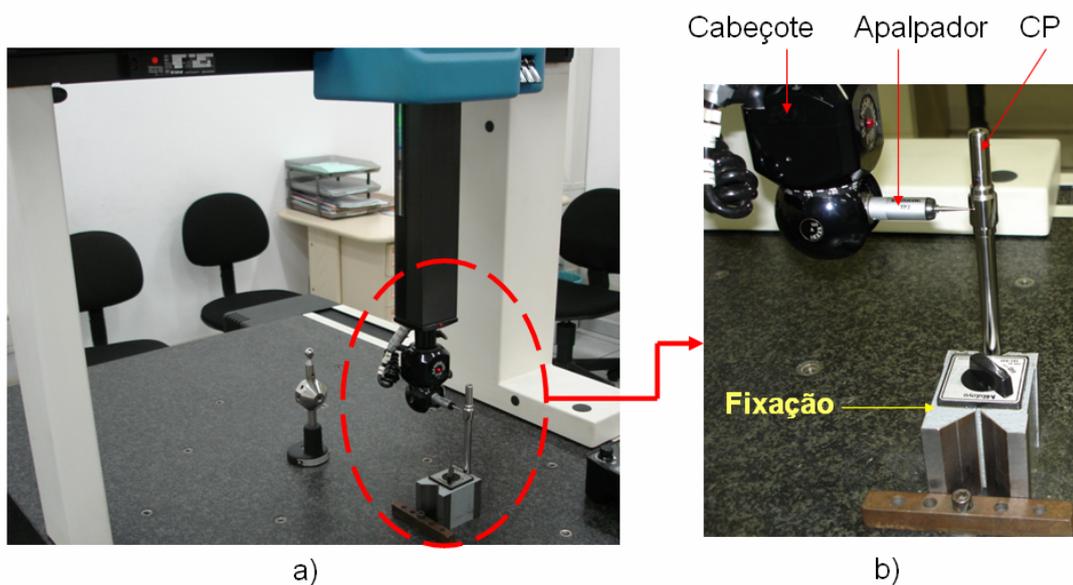
**Figura 3.16** – Máquina de medição por forma da empresa Mahr, modelo Formtester MMQ40 [55].

O apalpador Mahr TW6 é um transdutor tipo alavanca (*lever*), com sinal de deslocamento transformado em sinal elétrico. O ganho do transdutor varia com a configuração do mesmo (comprimento do apalpador e o ângulo utilizado na medição), e é ajustado com um padrão tipo *flick standard*. O perfil medido é determinado pela aquisição de pontos com espaçamentos angulares de  $0,1^\circ$ . A **Figura 3.17-a** ilustra o fluxo de sinais na máquina de medição enquanto a **Figura 3.17-b** mostra esquematicamente a disposição do CP e apalpador na máquina, indicando o movimento relativo utilizado entre o CP e o apalpador durante a medição da profundidade das marcas.



**Figura 3.17** – Princípio de medição e movimentação do CP durante medições.

Nos ensaios realizados na ZEN S.A, a medição do perfil das estrias usinadas nos CP foi realizada no laboratório de metrologia do setor de Ferramentaria da empresa em uma máquina de medir por coordenadas marca DEA (modelo Mistral), **Figura 3.18-a**, a qual apresenta um cabeçote com um apalpador (modelo TP2), **Figura 3.18-b**. Os perfis escaneados nesta máquina foram sobrepostos aos perfis de projeto. A **Figura 3.18-b** demonstra a forma de fixação do CP (fixação magnética) durante as medições e o posicionamento relativo entre o apalpador e a estria sendo medida.



**Figura 3.18** – a) Máquina de medição por coordenadas. b) Posicionamento do cabeçote durante medição.

### 3.8 Dressamento de Rebolos

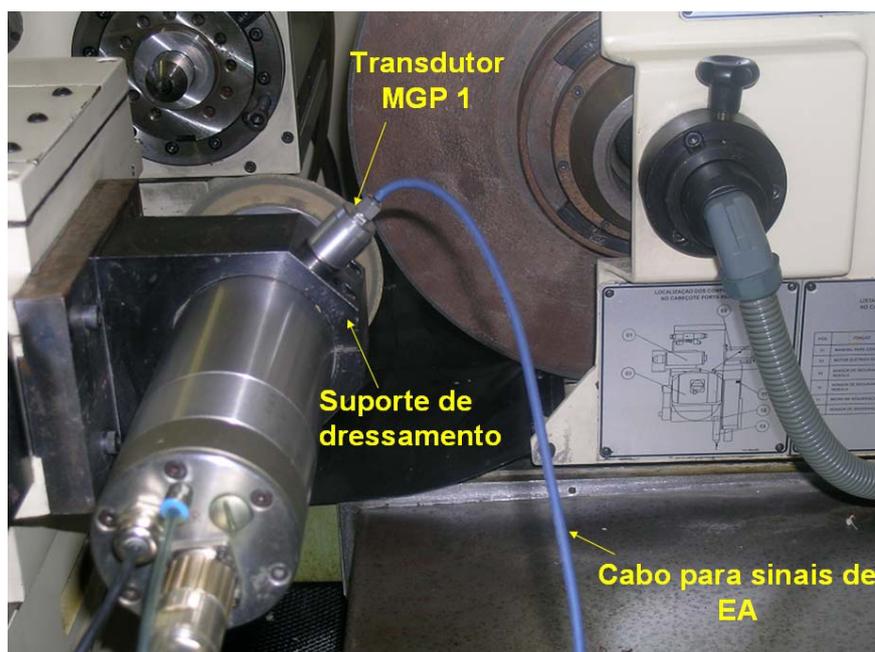
O dressamento dos rebolos tem como objetivo estabelecer uma característica preestabelecida ao rebolo.

No dressamento do rebolo de CBN foi conferida uma superfície plana (perfil reto) à ferramenta, empregando um disco dressador diamantado, **Tabela 3.2**. O disco dressador ( $\varnothing = 110$  mm) é acionado, permitindo a variação da rotação entre  $1500 \text{ min}^{-1}$  a  $16000 \text{ min}^{-1}$ .

**Tabela 3.2** – Disco diamantado empregado no dressamento do rebolo vitrificado.

Dados técnicos do disco dressador	
Fabricante	Diamantwerkzeuge Hameln
Especificação completa do disco dressador	R140 IN2515 1100,8 6 40 10 TK D251 C150
Tipo de grão	Diamante
Perfil do disco dressador	Reto (Formato RI)
Diâmetro	110 mm
Largura da parte ativa	0,8 mm
Espessura do revestimento	6 mm
Diâmetro do furo de fixação	40 mm
Granulometria (tamanho do grão)	251 $\mu\text{m}$ (D251)
Tipo de ligante cerâmico-vitrificado	Sinterizado
Corpo do disco	Aço

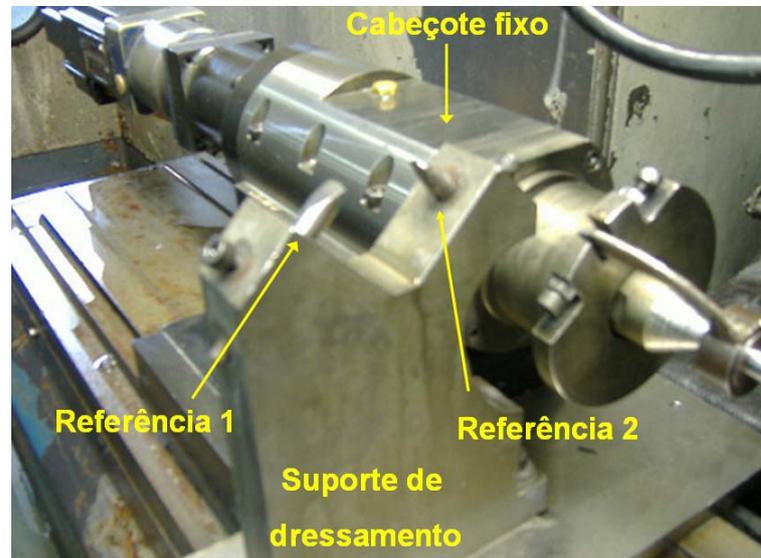
A velocidade de corte do disco dressador foi ajustada em  $v_R = 17$  m/s e uma velocidade axial de  $v_{fad} = 140$  mm/min. A velocidade periférica do rebolo foi ajustada para  $v_S = 22,5$  m/s, resultando em uma velocidade relativa de dressamento de 5,5 m/s (dressamento concordante). O avanço axial por rotação do rebolo  $v_{fad} \approx 0,05$  mm leva a um grau de recobrimento  $U_d \approx 16$ . A profundidade de dressamento é de  $a_d = 0,005$  mm para cada ciclo de dressamento. Para garantir uma eliminação de defeitos de aplicações anteriores do rebolo foram efetuados 30 passes. Os sinais de EA foram acompanhados durante o dressamento do rebolo em tempo real, de forma a possibilitar um acompanhamento do processo e decidir pelo fim do dressamento. Para isto foi necessário utilizar o transdutor de base magnética do SM-D, o qual captou os sinais de  $EA_{RMS}$  ao longo do dressamento. A **Figura 3.19** mostra a unidade de dressamento instalada na máquina-ferramenta, ressaltando o transdutor de EA.



**Figura 3.19** – Unidade de dressamento.

O dressamento dos rebolos de óxido de alumínio foi realizado com dressadores estáticos com ponta única de diamante de geometria definida. No dressamento dos rebolos de óxido de alumínio foi conferido um perfil trapezoidal e um perfil de forma específica para a obtenção de uma ranhura com forma de perfil evolvente. Para efetuar o dressamento do rebolo foi necessário o referenciamento do mesmo em

relação às ferramentas de diamante fixas, as quais apresentam uma inclinação de trabalho de  $45^\circ$  no suporte de dressamento, **Figura 3.20**.



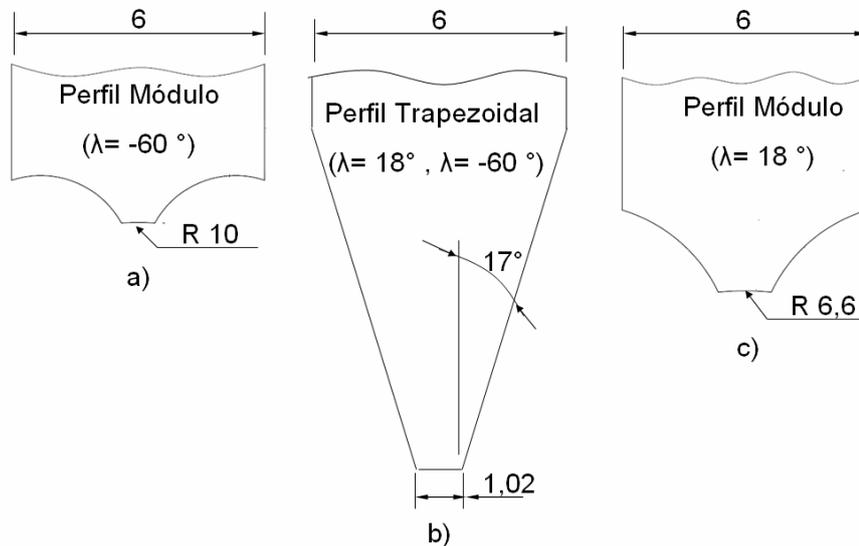
**Figura 3.20** – Unidade de dressamento com ferramenta de diamante perfilada.

No referenciamento verifica-se a altura das ferramentas de dressamento de diamante em relação ao eixo-Z com o auxílio de um relógio-comparador. Em seguida são dressadas as duas laterais do rebolo, estabelecendo as referências 1 e 2 no eixo-Y. Com auxílio de um paquímetro mede-se a espessura do rebolo. No procedimento atual empregado na empresa estas referências são encontradas de maneira manual, sem nenhuma forma de monitoramento que permita auxiliar o operador no reconhecimento dos pontos de contato entre as ferramentas de dressamento e o rebolo.

O dressamento de forma é efetuado com auxílio de um programa CNC específico, até que o perfil desejado seja obtido. O número de passes necessários no dressamento varia de acordo com o desvio de forma inicial apresentado pelo rebolo.

No dressamento foram empregadas uma profundidade de dressamento  $a_{ed} = 0,025$  mm, uma velocidade de avanço axial,  $v_{fad} = 75$  mm/min e a rotação do rebolo,  $n_s = 6000$  min<sup>-1</sup>. A verificação do perfil do rebolo é feita através da impressão do mesmo em um gabarito conduzido manualmente contra o rebolo em rotação. Para a conferência das dimensões principais no rebolo utiliza-se um projetor-de-perfis para a visualização amplificada das impressões realizadas no material polimérico. A

**Figura 3.21** mostra a geometria dos perfis obtidos nos dressamentos dos rebolos de óxido de alumínio e os posicionamentos relativos  $\lambda$ , para cada rebolo empregado na fase de ensaios.



**Figura 3.21** – Perfis dos rebolos utilizados durante os ensaios na empresa ZEN S.A.

### 3.9 Ajuste dos Parâmetros de EA no SM-D para Reconhecimento de Contato

Os principais parâmetros de EA e a faixa de ajuste dos mesmos para o SM-D, durante a fase de ensaios no LMP-UFSC, estão mostrados na **Figura 3.22**. Estes parâmetros estão relacionados com a amplificação, sensibilidade dos sinais de  $EA_{RMS}$ , assim como o nível do Limite-1 (*threshold*).

O parâmetro “*Measurement Time*” ajusta o tempo de gravação do sinal de  $EA_{RMS}$ . Apesar do evento de contato entre rebolo-CP ocorrer de forma rápida, o tempo de aquisição foi selecionado em 30s devido ao tempo necessário para poder acionar todos os comandos responsáveis pela movimentação de mergulho do rebolo contra o CP.

O parâmetro “*AE Input*” está relacionado à habilitação do transdutor de EA em uma das entradas do equipamento. Em todos os ensaios na máquina foi utilizada a entrada S1 do equipamento.

Parameter Min/Max Ranges	Minimum	Maximum	Unit
Measurement Time	1	90	s
AE Input	S1	S4	--
AE Signal Smoothing	3	100	Hz
AE Frequency Range	Low	High	--
AE Amplification	0	70	dB
AE Offset	0	25	%
AE Limit 1	0	99	%
AE Limit 2	0	99	%
AE Limit 3	0	99	%
AE Limit 4	0	99	%

Parameter Min/Max Ranges   Parameter Defaults   AE Parameters   Parameter   Identification Data   ◀ ▶

**Figura 3.22** – Parâmetros de EA para o reconhecimento de contato.

O parâmetro “*Signal Smoothing*” promove o alisamento do sinal de EA, podendo este ser mais “liso” quando são utilizados valores menores deste parâmetro (3 Hz). O alisamento de sinal altera a constante de integração  $\Delta T$  do sinal  $EA_{RMS}$ . Como este parâmetro possui unidade em Hertz (Hz), o valor da constante de tempo  $\Delta T$  para a integração do sinal de  $EA_{RMS}$  é calculado a partir da relação  $f=1/\Delta T$ , fornecendo valores em segundos. Nos ensaios de reconhecimento de contato, este parâmetro assumiu valores de máximo (100 Hz) e mínimo (3 Hz) correspondendo à 10 ms e 333,33 ms, respectivamente.

O parâmetro “*AE Frequency Range*” ajusta a faixa de freqüências em que se deseja trabalhar e pode assumir 4 valores distintos: *Low*, *Medium-Low*, *Medium-High*, ou *High*. (baixo, médio-baixo, médio-alto e alto).

No parâmetro “*AE Amplification*”, a amplificação do sinal de  $EA_{RMS}$  pode ser ajustada entre 0 a 70 dB.

O parâmetro “*AE Offset*” estabelece o nível do ruído de fundo do sinal de  $EA_{RMS}$ . Este parâmetro deve ser ajustado de tal forma que interferências devido a elementos móveis da máquina-ferramenta não sejam reconhecidas como sendo do evento que está sendo monitorado. Adotou-se o nível máximo permitido pelo SM-D, que neste caso corresponde a 25%.

O parâmetro “*AE Limit 1*” permite aumentar ou diminuir o nível do limite estático 1 (*threshold*) referente ao sinal que deve ser monitorado. No valor ajustado o SM-D

toma uma decisão e comanda um sinal para o CNC. Pode ser programado de forma livre. O SM-D possui outros 4 limites estáticos para o monitoramento do processo de retificação. Apenas o limite estático 1 foi utilizado.

Na aba “*AE Parameters*” parte inferior da **Figura 3.22**, é permitido o ajuste do tempo de ativação da saída digital associada com o limite estático 1 (“*AE Limit 1*”), assim que o sinal de  $EA_{RMS}$  ultrapasse o limite 1 de forma ascendente. Foi escolhido um tempo de ativação de sinal de 250 ms para todos dos ensaios.

### 3.9.1 Ajuste dos parâmetros no SM-D para a estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>

Para a estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub> os parâmetros de EA no SM-D foram adequadamente ajustados seguindo a técnica binária de reconhecimento de contato, visando a utilização de níveis máximos de amplitude de sinal e redução de ruído de fundo bem como a utilização de um limite estático (*threshold*) com o valor mais baixo possível.

A faixa de frequências “*Low*” (35 kHz a 50 kHz) foi a que apresentou os melhores resultados na avaliação dos sinais de  $EA_{RMS}$  provenientes das interferências entre rebolo-CP, eliminando os demais ruídos e sinais oriundos da máquina-ferramenta. Este parâmetro permaneceu fixo durante os ensaios. O parâmetro de redução de ruído de fundo (*AE Offset*) foi mantido constante em 25%.

O parâmetro de alisamento de sinal “*Signal Smoothing*” influenciou o valor do parâmetro relacionado à amplitude do sinal “*AE Amplification*”. A utilização do parâmetro “*Signal Smoothing*” no valor de 100 Hz acarretou num aumento do ruído de fundo verificado no sinal de  $EA_{RMS}$ . Desta forma foi necessário elevar o nível do limite estático 3, para que um falso reconhecimento de contato fosse evitado. A **Tabela 3.3** mostra os principais valores dos parâmetros de EA ajustados no SM-D para a estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>.

**Tabela 3.3** – Parâmetros de EA utilizados no SM-D para a estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>.

PARÂMETROS DE EA	<i>Signal Smoothing</i>	
	30 (Hz)	100 (Hz)
<i>AE Amplification (dB)</i>	33	30
<i>AE Limit-1 (%)</i>	3	5
<i>AE Offset (%)</i>	25	25
<i>AE Frequency Range</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>

### 3.10 Ajuste dos Parâmetros de EA no SM-S no Reconhecimento de Contato

Os principais parâmetros de EA ajustados no SM-S estão mostrados na **Tabela 3.4**. Os parâmetros são relacionados à amplificação, à sensibilidade dos sinais e, conseqüentemente, à amplitude da curva de EA.

**Tabela 3.4** – Parâmetros de EA ajustados no SM-S e seus intervalos de variação.

PARÂMETROS DE EA (SM-S)	
Canal de Entrada	1-4
Constante de Tempo (ms)	0,02 - 800
Filtro Passa Alta (kHz)	0,05 - 200
Filtro Passa Baixa (kHz)	0,03 - 100
Limites Estáticos (Lim1/Lim2) (%)	0 -99
Ganho de Sinal (%)	0 - 99
Redução de Ruído (%)	0 - 99

O parâmetro “Canal do Transdutor” habilita o transdutor de EA em uma das 4 entradas do equipamento no painel traseiro do SM-S. Os canais utilizados foram o “In ch1” e “In ch2”, sendo o primeiro destinado para a instalação do transdutor passivo com fixação parafusada, e o segundo para o transdutor ativo com fixação por base magnética.

O parâmetro “Constante de Tempo” está relacionado com o comportamento do sinal de EA observado. Este parâmetro altera a constante de integração do sinal *RMS*, influenciando conseqüentemente no tempo de reação e na aparência do sinal de EA<sub>RMS</sub>. A faixa de variação deste parâmetro está compreendida entre 0,02 ms a 800 ms. Este parâmetro foi selecionado para 10 ms e 400 ms ao longo dos ensaios.

O ajuste da faixa de freqüências que se deseja trabalhar pode ser definido com a utilização dos parâmetros “Filtro Passa Alta” e “Filtro Passa Baixa”. Estes valores foram escolhidos com base na faixa de freqüências adotada com o SM-D (70 kHz a 100 kHz), a qual apresentou bons resultados em termos das baixas interferências e ruídos de fundo verificados durante os ensaios. Estes parâmetros foram selecionados para: “Filtro Passa Alta”= 70 kHz e “Filtro Passa Baixa”= 100 kHz

A amplificação do sinal de EA pode ser alterada sob o parâmetro “Ganho de Sinal”, o qual pode variar entre 0% a 100%, sendo caracterizado por um valor relativo percentual.

A redução do ruído de fundo do sinal de EA poder ser implementada com o parâmetro “Redução de Ruído”. Aumentando-se este valor, pode-se diminuir a influência do ruído de fundo que age sobre o sinal de EA mantendo-se o mesmo valor do parâmetro “Ganho de Sinal”. Durante os ensaios procurou-se adotar este valor em um nível máximo permitido pelo SM-S, que neste caso corresponde a 99%.

O parâmetro “Limite 1” permite distanciar ou aproximar o nível do limite estático 1 em relação ao nível de ruído de fundo do sinal. O SM-S possui outro limite estático que pode ser acionado pelo parâmetro “Limite 2”. Durante os ensaios os dois limites foram utilizados sob o mesmo valor, assumindo valores entre 10% e 20%.

O tempo de gravação do sinal, bem como a taxa de amostragem dos sinais de EA decorrentes do contato não podem ser programados no SM-S. Para programar estas variáveis foi necessário intercalar o sistema multianalisador Oros OR-34 que recebeu os sinais de  $EA_{RMS}$  da saída analógica *RMS* (“*Out RMS*”) do painel posterior do SM-S.

### 3.11 Amostragem de Sinais de EA

A amostragem de sinais de EA decorrentes do evento de contato, ao se utilizar o SM-D, foi implementada de forma direta por este sistema com o auxílio do software *Dittel System Control Center* que acompanha o equipamento. O valor máximo disponibilizado corresponde a 1000 aquisições por segundo (1 kS/s). Este valor foi utilizado tanto para os ensaios no LMP-UFSC quanto nos ensaios realizados na empresa parceira.

Ao se utilizar o SM-S, as informações relativas à maneira correta de amostragem dos sinais, através do sistema multianalisador (Oros OR-34), foram

conseguidas diretamente com o departamento técnico da empresa. Segundo [38], o conteúdo de frequência depende diretamente do valor da constante de integração do sinal  $EA_{RMS}$  ( $\Delta T$ ) selecionado no SM-S. A **Tabela 3.5** mostra os valores da frequência de amostragem sugeridos para diferentes valores de  $\Delta T$ . Estes valores levam em consideração o critério de *Shannon*, evitando-se, assim, eventuais problemas de *aliasing*.

**Tabela 3.5** – Amostragem dos sinais de EA com SM-S.

$\Delta T$ (ms)	Frequência de amostragem ( <i>Sampling/s</i> )
1	2000
10	200
100	20

Durante os ensaios para o reconhecimento de contato entre rebolo-CP, efetuados com o SM-S, utilizou-se no sistema multianalisador Oros OR-34 um valor de frequência de amostragem  $f_A = 2,048$  kS/s. Este valor apresentou-se como sendo o menor valor disponível no sistema multianalisador e foi adequado para os valores de  $\Delta T$  empregados nos ensaios (10 ms e 400 ms).

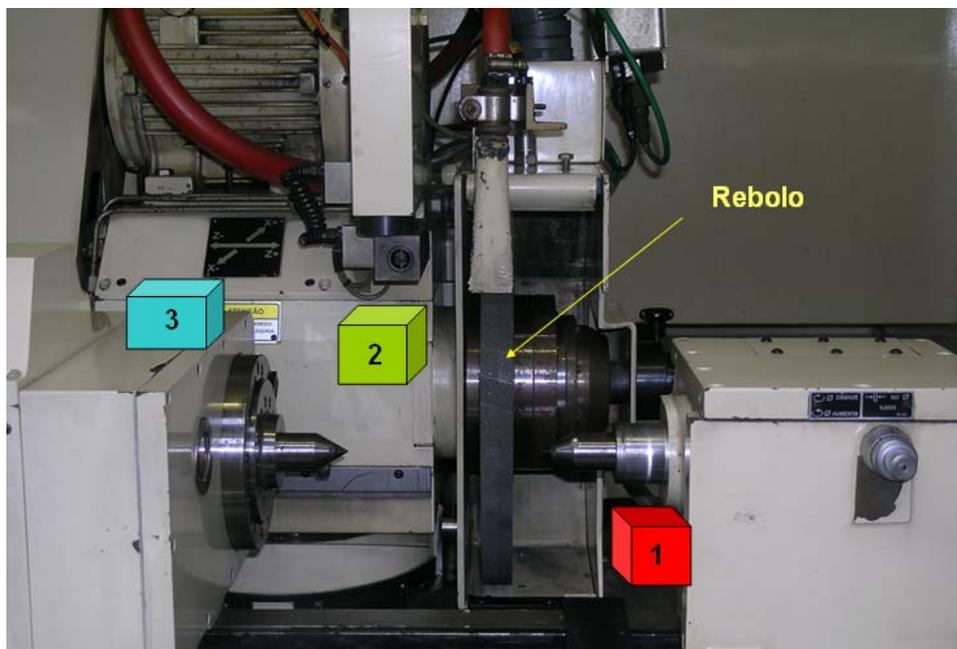
### 3.12 Posicionamento de Transdutores

Nesta seção serão comentados os principais procedimentos e adaptações necessárias para a instalação dos transdutores de EA nas retificadoras utilizadas.

#### 3.12.1 Posicionamento dos transdutores de EA na máquina Zema Zselics Pratika Flexa 600I

Para obter um bom sinal de EA decorrente do contato entre rebolo e CP foi necessário conhecer a posição mais adequada na retificadora para a instalação dos transdutores de EA. Na retificadora cilíndrica CNC Flexa 600-L, foram comparadas 3 posições: o cabeçote fixo, o cabeçote contra-ponta, e o cabeçote porta-rebolo. Durante esta etapa dos trabalhos foi utilizado o sistema de monitoramento SM-D

juntamente com o transdutor de EA de base magnética. A **Figura 3.23** mostra os locais onde o transdutor de EA foi instalado na área de trabalho da retificadora.

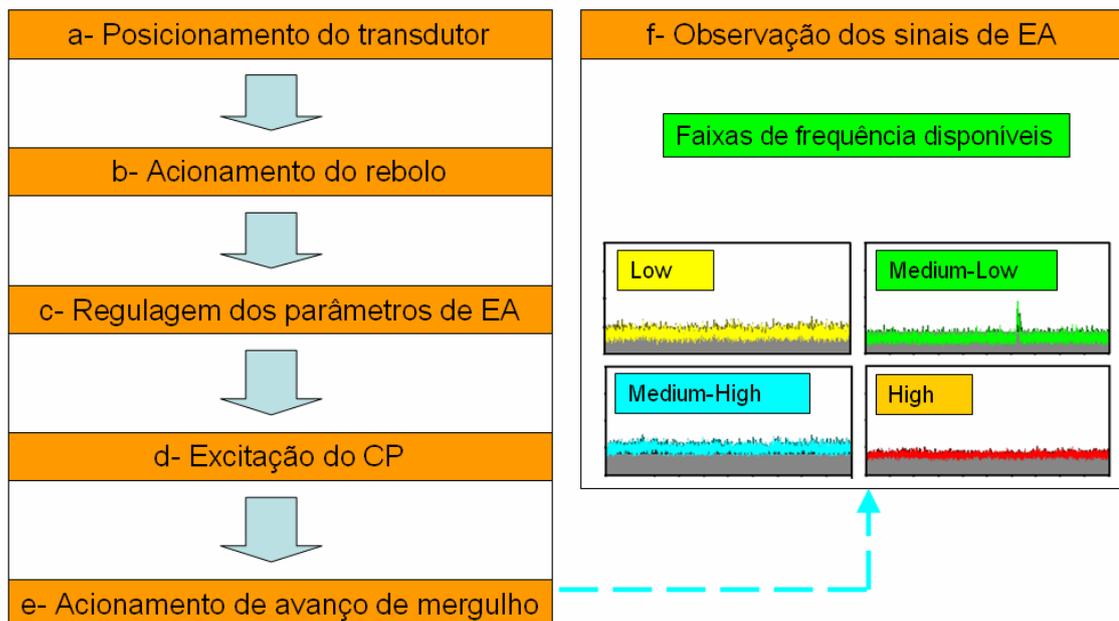


**Figura 3.23** – Instalação do transdutor de EA na retificadora Zema. 1- Cabeçote conta-ponto, 2- Cabeçote porta-rebolo, 3- Cabeçote fixo.

Para este estudo o SM-D apresentou-se mais adequado que o SM-S devido ao fato de que o software do SM-D disponibiliza 4 faixas de filtragem do sinal de EA, que podem ser selecionadas livremente pelo usuário. Ao mesmo tempo, o SM-D permite que as 4 faixas sejam visualizadas em tempo real na tela do *laptop*. A escolha do transdutor de base magnética está vinculada à maior versatilidade apresentada por este transdutor em relação ao transdutor de EA com base parafusada, podendo ser fixado em qualquer superfície plana nos 3 locais comparados.

Para o estudo dos sinais de EA foi seguida uma seqüência lógica de procedimentos. Após o posicionamento do transdutor no local desejado (posições 1, 2, ou 3) foi avaliada a intensidade do sinal para ações típicas de operação da máquina-ferramenta, como movimentar o rebolo em velocidades de avanço específicas e acionar a rotação do rebolo para  $v_s = 22,5$  m/s. Este procedimento foi realizado com o objetivo de avaliar se as interferências inerentes aos componentes móveis (rolamentos, eixo-árvore etc.) poderiam ser adequadamente excluídas pelos

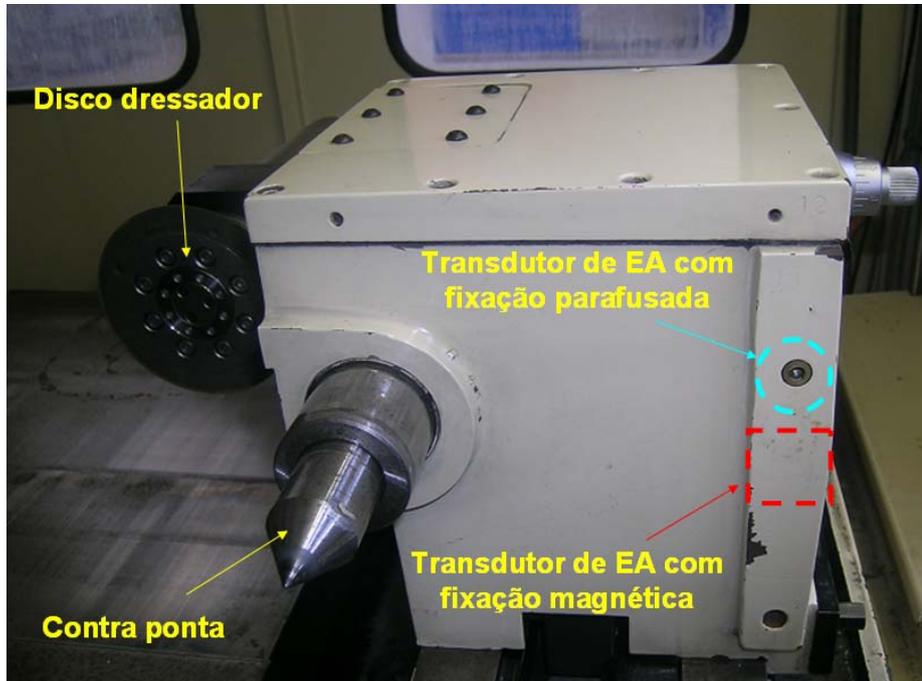
filtros disponíveis no SM-D. Em seguida, foram ajustados os principais parâmetros de EA relacionados à técnica binária para o reconhecimento de contato: amplitude do sinal de EA; a redução de ruído; o limite estático-1; e a constante de integração do sinal  $EA_{RMS}$ . Após ajustados os parâmetros de EA, verificava-se o reconhecimento do contato. Para isso simulou-se o evento de contato através de toques sobre a superfície do CP com o auxílio de uma barra metálica, de forma a observar se ocorria a variação dos níveis lógicos (0 e 1) no comando da máquina. Nas posições de estudo em que foi possível verificar esta variação, o rebolo é conduzido contra o CP com uma velocidade de avanço de mergulho de  $v_{fr2} = 3$  mm/min e  $v_{fr2} = 6$  mm/min. Os sinais decorrentes do contato puderam ser visualizados na tela do *laptop* para os diversos filtros do SM-D. A **Figura 3.24** ilustra os procedimentos adotados no estudo para a determinação do melhor posicionamento do transdutor de EA.



**Figura 3.24** – Etapas necessárias durante estudo com transdutor de EA.

O sinal de EA obtido com a fixação do transdutor no cabeçote porta-rebolo e no cabeçote fixo foi fortemente influenciado pelo ruído de fundo gerado pelo acionamento do rebolo. O melhor sinal de EA foi obtido para a fixação do transdutor magnético na estrutura do cabeçote contra-ponta. O transdutor parafusado foi

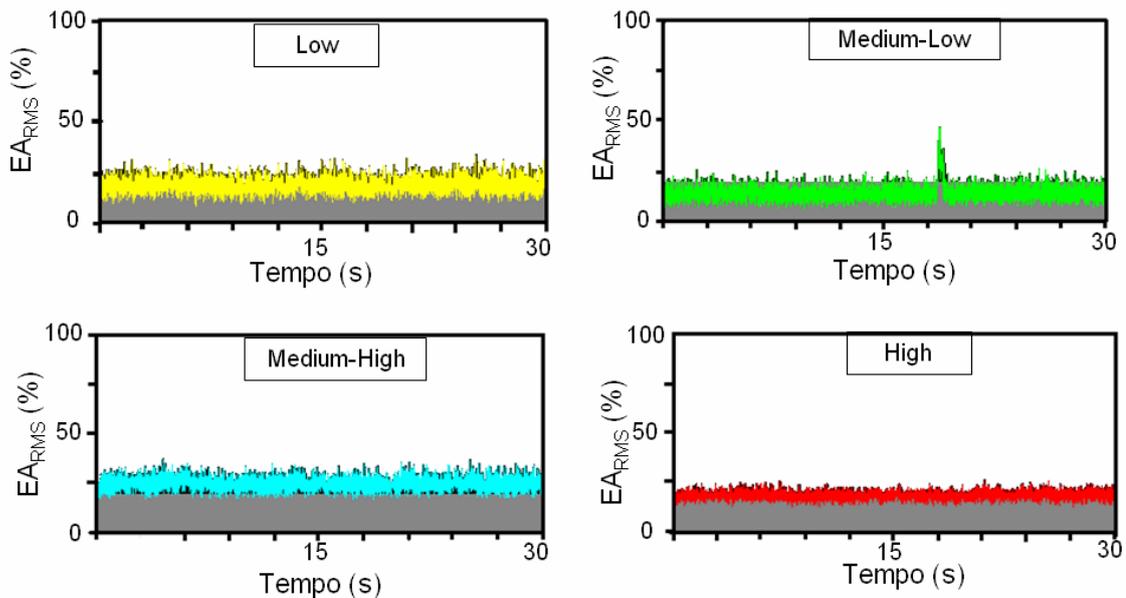
montado próximo à região utilizada com o transdutor de base magnética, aproveitando um furo na estrutura deste cabeçote, **Figura 3.25**.



**Figura 3.25** – Local de instalação dos transdutores de EA na posição 1.

Devido ao aspecto construtivo do cabeçote contra-ponta, foi necessário posicionar o transdutor de EA na superfície plana existente ao longo da face lateral esquerda do mesmo, conforme mostrado na **Figura 3.25**. Esta figura mostra também o local de instalação do transdutor de EA com base parafusada, durante os ensaios realizados na máquina.

Na posição superior deste cabeçote, a existência de uma montagem fixada por união parafusada gerou uma interface de separação a qual influenciou significativamente nos sinais de EA obtidos, proporcionando relações (amplitude)/(ruído de fundo) muito menores que aquelas verificadas nas posições lateral esquerda e frontal do cabeçote. Na posição frontal, a presença de um revestimento extremamente aderente e com espessura de aproximadamente 0,5 mm, dificultou a captação dos sinais de EA, agindo como um fator amortizante do sinal gerado após o contato. Levando-se em consideração estas restrições, os sinais de EA obtidos com cada um dos filtros disponíveis pelo SM-D foram captados e comparados entre si para uma posterior escolha. A **Figura 3.26** mostra os resultados obtidos para a posição 1.

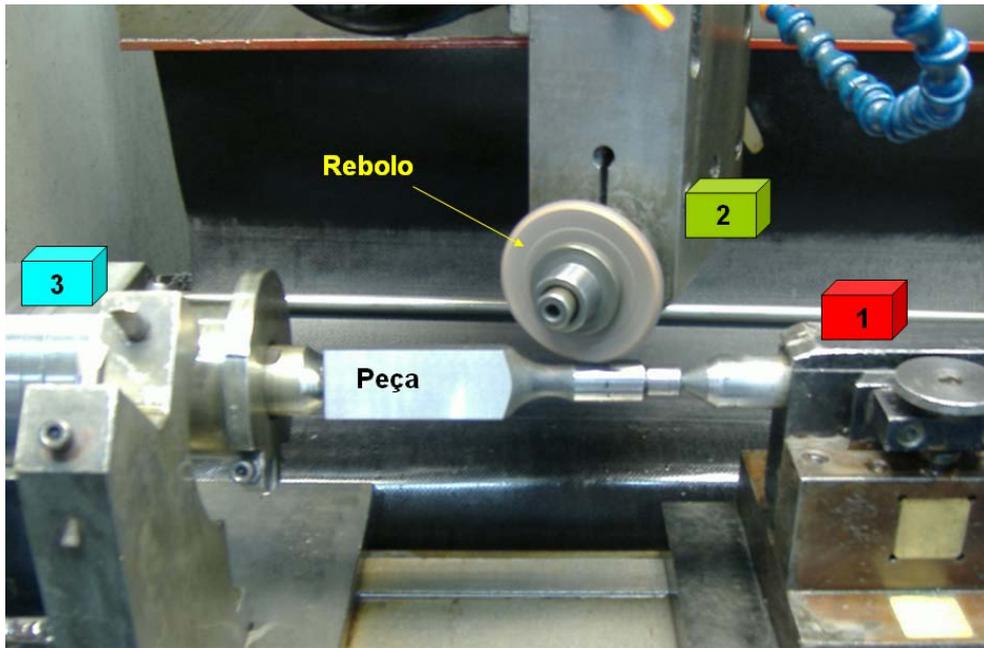


**Figura 3.26** – Sinais de EA após o contato entre rebolo-CP para a posição 1 na região de trabalho.

Os gráficos mostram que após o contato entre rebolo-CP apenas o filtro “Medium-Low” foi capaz de reduzir as interferências externas e reconhecer o contato a ponto de se obter um sinal de EA<sub>RMS</sub> característico. Os sinais com a utilização deste filtro apresentaram uma relação amplitude/ruído de fundo que pode ser mensurada, quando comparada aos demais valores de filtro. Este filtro captura o evento de EA em uma faixa de frequências que varia de 70 kHz a 100 kHz, eliminando a perturbação de frequências que se situam fora desta banda. Desta forma, para a posição 1, este valor de filtro apresentou-se como sendo o mais adequado.

### 3.12.2 Posicionamento dos transdutores de EA na retificadora cilíndrica CNC ZEN/Stauffer

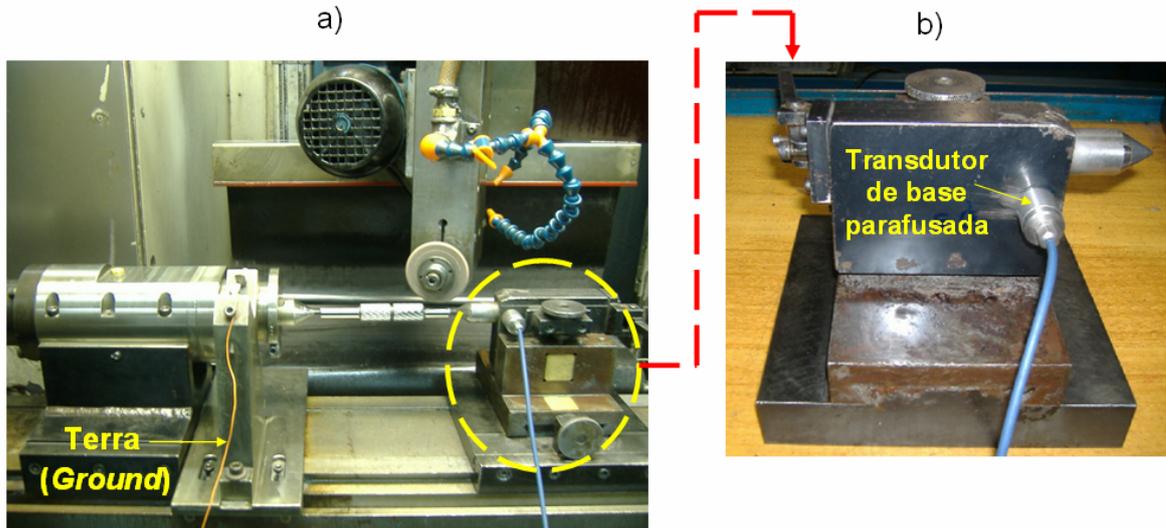
Na retificadora cilíndrica CNC ZEN/Stauffer foram comparadas 3 posições para instalação do transdutor de EA, destacando-se o cabeçote porta-rebolo, o cabeçote fixo e o cabeçote contra-ponta. Utilizou-se o SM-D e o transdutor de base magnética (MGP1). A **Figura 3.27** mostra os 3 locais escolhidos para o posicionamento do transdutor de EA.



**Figura 3.27** – Área de trabalho na retificadora cilíndrica CNC ZEN/Stauffer. 1- Cabeçote contra-ponta, 2- Cabeçote porta-rebolo, 3- Cabeçote fixo.

Na fixação do transdutor no cabeçote fixo, o acionamento por servo motor causou interferências fortes sobre o sinal de  $EA_{RMS}$ , não sendo possível distinguir os eventos de contato entre rebolo-CP. Na fixação do transdutor no cabeçote porta-rebolo o sinal de  $EA_{RMS}$  foi ainda mais influenciado pelos ruídos de fundo, não sendo adequado para a instalação do transdutor de EA.

Os melhores resultados foram obtidos com a fixação do transdutor no cabeçote contra-ponta. A existência de uma montagem na parte superior deste cabeçote acabou resultando em sinais fracos, devido à existência de uma interface de separação entre a estrutura e a tampa do cabeçote contra-ponta. Melhores resultados foram obtidos em montagens no lado frontal (**Figura 3.28-a**) e posterior (**Figura 3.28-b**) do cabeçote contra-ponta. Devido ao fato de se visar uma implantação futura do SM-D nesta máquina-ferramenta, optou-se pela instalação do transdutor de EA com base parafusada na posição posterior do cabeçote contra-ponta (**Figura 3.28-b**), a qual apresentou uma menor interferência no espaço da região de trabalho da máquina-ferramenta. Nesta posição uma superfície plana adequada permitiu a realização de uma furação rosqueada (M6 x 8 mm) para a fixação do transdutor, **Figura 3.28-b**.

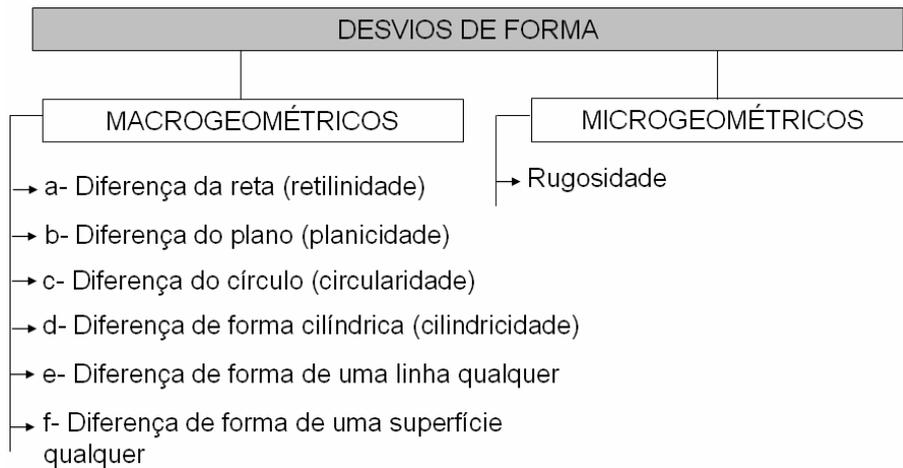


**Figura 3.28** – Locais de instalação dos transdutores na posição 1.

Para minimizar as interferências elétricas sobre o sinal (ruído elétrico) foi necessário providenciar um aterramento único (*Ground*) para os equipamentos envolvidos nos ensaios.

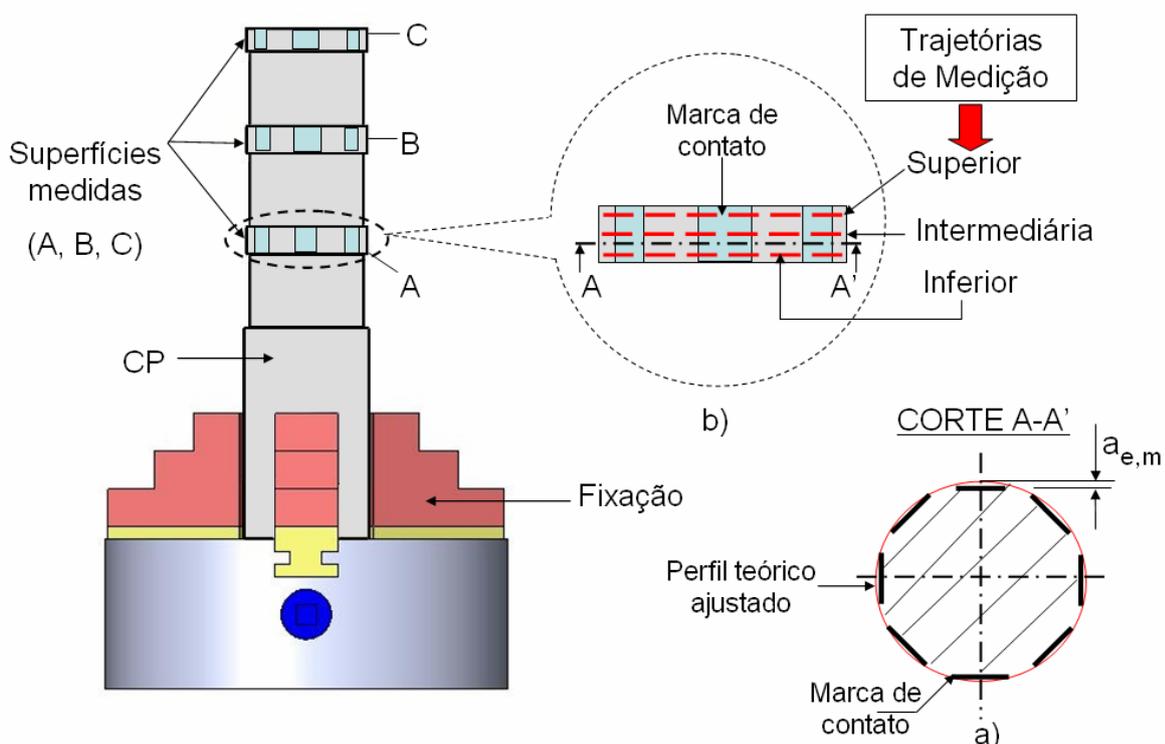
### 3.13 Medição da Profundidade das Marcas Resultantes do Evento de Contato

A medição das profundidades das marcas de contato entre rebolo-CP foram medidas no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) localizado junto à Fundação CERTI-UFSC, numa máquina de medição por forma da empresa Mahr (modelo Formtester MMQ40), com apalpador de ponta esférica com diâmetro igual a 1,5 mm. As profundidades das marcas medidas ( $a_{e,m}$ ) caracterizaram-se na prática como sendo um desvio de forma. As normas ISO R-1101 e DIN7184 definem os desvios de formas como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que as definem [59]. Os desvios de forma podem ainda ser subdivididos em desvios macro e microgeométricos, **Figura 3.29**.



**Figura 3.29** – Desvios de forma segundo normas ISO R-1101 e DIN 7184 [59].

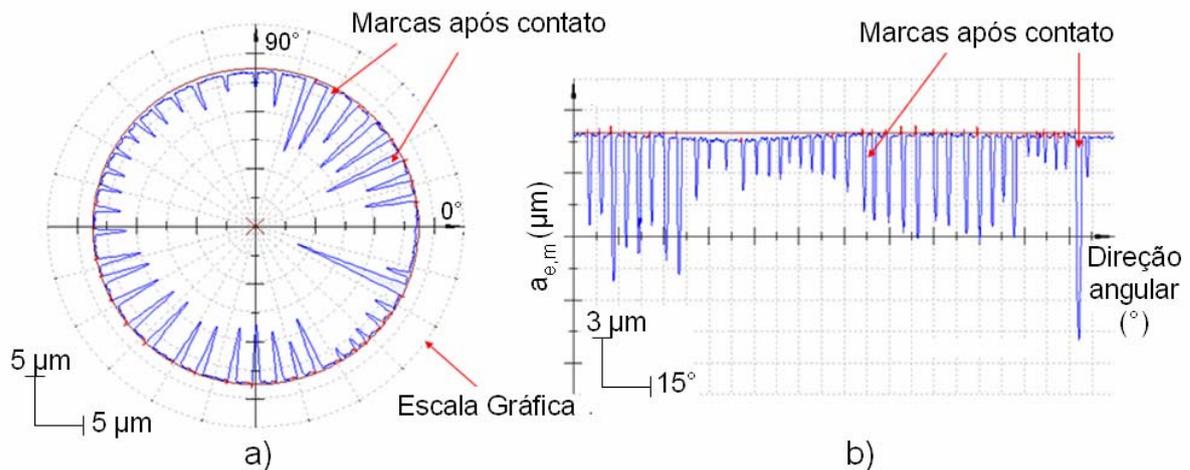
As profundidades das marcas medidas ( $a_{e,m}$ ) são associadas aos desvios de forma macrogeométrica e enquadraram-se no item “f” (**Figura 3.29**), e foram caracterizadas mais especificamente como um desvio de forma geométrica em relação a um perfil teórico ajustado, **Figura 3.30-a**. Durante a etapa de medição das marcas impressas no CP, cada uma das 3 superfícies de referência foram medidas em 3 seções (Superior, Intermediária, e Inferior) equidistantes entre si, e separadas a 2 mm, conforme mostrado na **Figura 3.30-b**.



**Figura 3.30** – Medição das marcas nas superfícies de referência.

Para que a medição das marcas pudesse ser realizada com sucesso, foi necessário deixar o CP estabilizado com a temperatura da sala de medição ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ) por um período de aproximadamente 24h.

Através do software FormPC v4.28.07-15, obtém-se o perfil das marcas impressas sobre o CP. O software permite que a visualização das marcas seja apresentada de forma amplificada. Como forma de visualização, é possível apresentar as marcas na forma polar e planificada (**Figura 3.31–a, Figura 3.31-b**, respectivamente). Os arquivos que contêm estas formas de representação das marcas foram gravados para uma posterior medição utilizando um *software* de desenho específico.



**Figura 3.31** – Formas de representação gráfica das marcas obtidas durante a medição. a) Marcas dispostas na direção circunferencial. b) Marcas dispostas na direção linear.

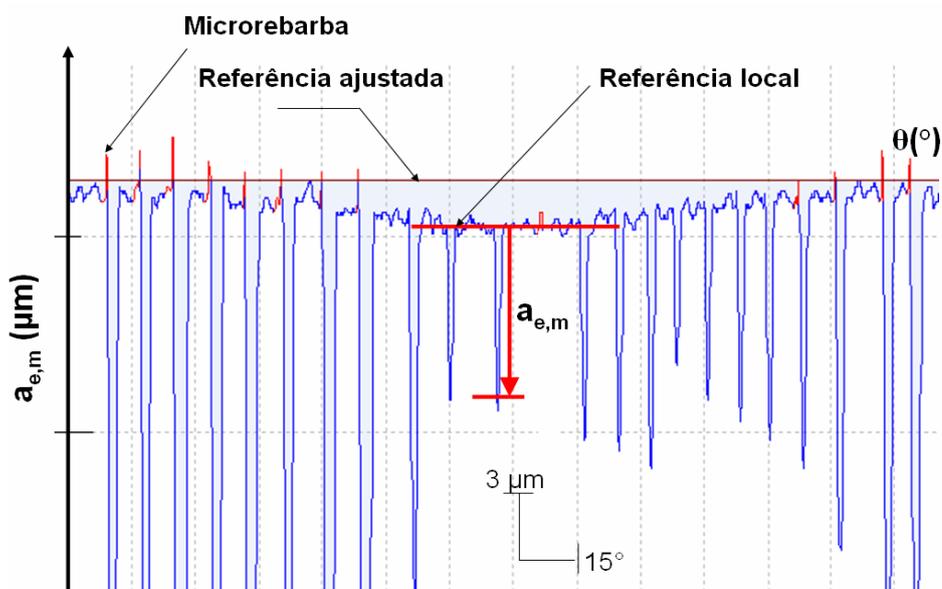
As profundidades das marcas nestes gráficos foram medidas tendo-se como referência a superfície cilíndrica do CP (superfícies de referências A, B, C). Esta superfície apresenta variações macro e microgeométricas inerentes ao último processo de fabricação pelo qual foi submetida, neste caso, o processo de retificação.

Durante os trabalhos de medição, foi necessário selecionar previamente (através do software instalado na máquina Formtester MMQ40) um método de ajuste e filtragem adequados que amenizassem as características topográficas do CP, de forma que estas não interferissem nos valores das profundidades obtidas. Uma

forma de ajuste que foi considerada adequada para esta situação, consistiu na utilização do método da Menor Circunferência Circunscrita (MCC). Este método ajusta um círculo de referência externo ao perfil do CP, de forma que o posicionamento das marcas (que se encontravam dispostas de maneira assimétrica tanto no sentido radial quanto angular) não influenciassem na posição do centro ajustado para as medições.

As variações na topografia (desvios macro e microgeométricos) das superfícies de referências do CP foram melhor percebidas com uma amplificação adequada (**Figura 3.32**) e refletiram-se num desvio entre a superfície ajustada e o contorno da superfície do CP, o qual situou-se em aproximadamente  $1\ \mu\text{m}$  para as três superfícies de referências no CP (superfícies A, B, C). Assim, foi necessário proceder a medição das marcas individualmente, sendo a profundidade ( $a_{e,m}$ ) caracterizada pela dimensão linear entre uma referência local na marca e o ponto mais afastado em relação a esta referência, **Figura 3.32**.

A característica pontiaguda observada nas marcas foi ocasionada devido ao fator de amplificação utilizado, o qual situou-se em aproximadamente 10000 vezes. A amplificação de cada ponto situado sobre a marca medida é obtida através da relação  $a/d$ , onde “a” é a distância radial do ponto situado na superfície da marca e “d” é a distância entre a circunferência teórica (perfil ajustado) e o ponto mais afastado sobre a superfície da marca.



**Figura 3.32** – Medição da profundidade das marcas decorrentes do contato. Forma planificada.

O ajuste para a determinação do ganho foi feito anteriormente às medições através da utilização de um padrão “*flickstander*” sobre o qual existe uma marca com um desvio de forma conhecido. Com a amplificação utilizada durante as medições, foi possível inclusive detectar a existência de microrrebarbas na porção lateral-esquerda das marcas mais profundas sobre o CP.



## 4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios são divididos em dois grupos principais, sendo o primeiro grupo referente às atividades executadas no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP)-UFSC, e o segundo grupo relacionado às atividades desenvolvidas na empresa ZEN S.A., Brusque-SC. Nos ensaios realizados no LMP foi estudado o reconhecimento do contato entre rebolo e corpo de prova (CP) para definir a menor interferência que ainda permite um reconhecimento seguro do contato através de um sistema de monitoramento por emissão acústica (EA). Dois sistemas de EA (SM-D e SM-S) [38, 39] são avaliados com relação à eficiência no reconhecimento de contato. Nos ensaios desenvolvidos na empresa parceira ZEN S.A. objetivou-se o posicionamento centralizado do rebolo de forma referenciada em relação ao CP. O reconhecimento do contato entre rebolo-CP determina a posição de referência no eixo-Z e através de uma estratégia de centralização se determina a posição centralizada do rebolo em relação ao CP no eixo-Y.

### 4.1 Reconhecimento de Contato entre Rebolo-CP

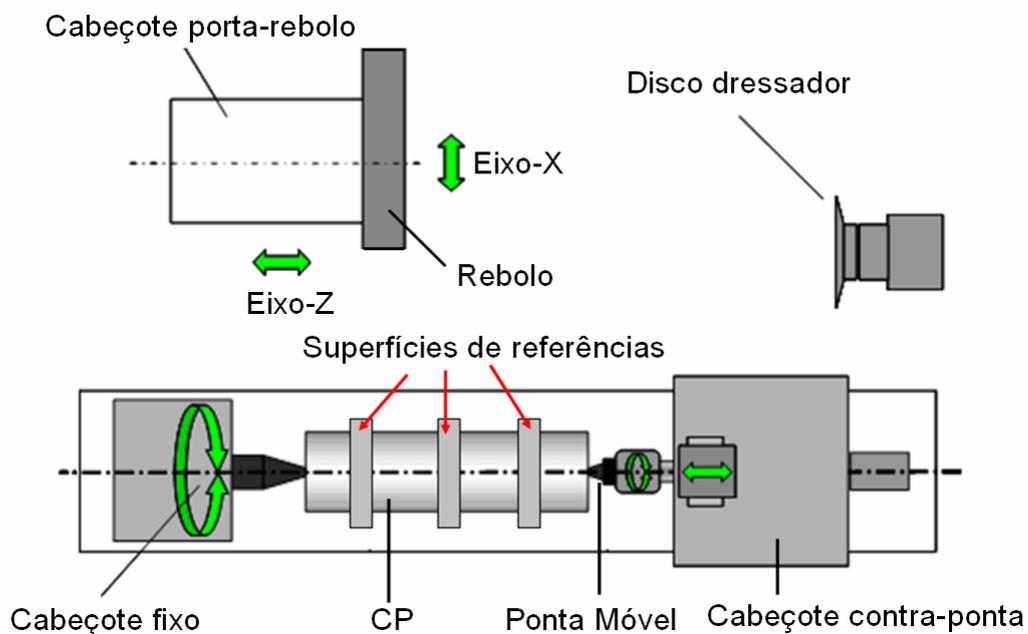
Os ensaios de reconhecimento de contato realizados na retificadora Zema CNC Flexa 600L por retificação de mergulho empregando um rebolo de CBN vitrificado e corpos de provas (CP) em aço ABNT 1040 objetivaram a comparação dos resultados obtidos com dois sistemas de monitoramento (SM). Para cada conjunto de ensaios, um SM por emissão acústica (EA) é integrado na retificadora e seus respectivos transdutores de EA são utilizados. A utilização dos transdutores de EA durante os ensaios também ocorreu de forma individual, ou seja, enquanto um dos transdutores de EA era usado por um dos SM, o outro transdutor de EA permaneceu desativado. O posicionamento de cada transdutor foi mantido constante durante os ensaios. O CP é fixo entre pontas e mantido estático (sem rotação) durante cada ensaio. Os ensaios de contato entre rebolo-CP são realizados a seco. A velocidade de corte em todos os ensaios foi de  $v_s = 22,5$  m/s.

A consequência do contato entre rebolo e CP é caracterizada por uma marca resultante da remoção de material no CP. De interesse é uma marca tão pequena, que na aplicação industrial não ultrapasse os limites de tolerância do componente fabricado. Para o reconhecimento do contato entre rebolo-CP um SM por EA

acompanha o ensaio. O sinal de  $EA_{RMS}$  associado ao evento de contato depende de vários fatores: a velocidade de mergulho do rebolo  $v_{fr}$ , a constante de integração  $\Delta T$  do sinal de  $EA_{RMS}$ , e o transdutor de EA empregado. As profundidades das marcas impressas no CP em cada ensaio de determinação de contato foram medidas posteriormente aos ensaios (conforme **seção 3.13**) e estes valores foram empregados como dados de entrada em uma Análise Fatorial Estatística para determinar uma condição otimizada para o reconhecimento de contato entre rebolo-CP. A Análise Fatorial serviu também para analisar os resultados obtidos durante os ensaios, os quais estão descritos no Capítulo 5.

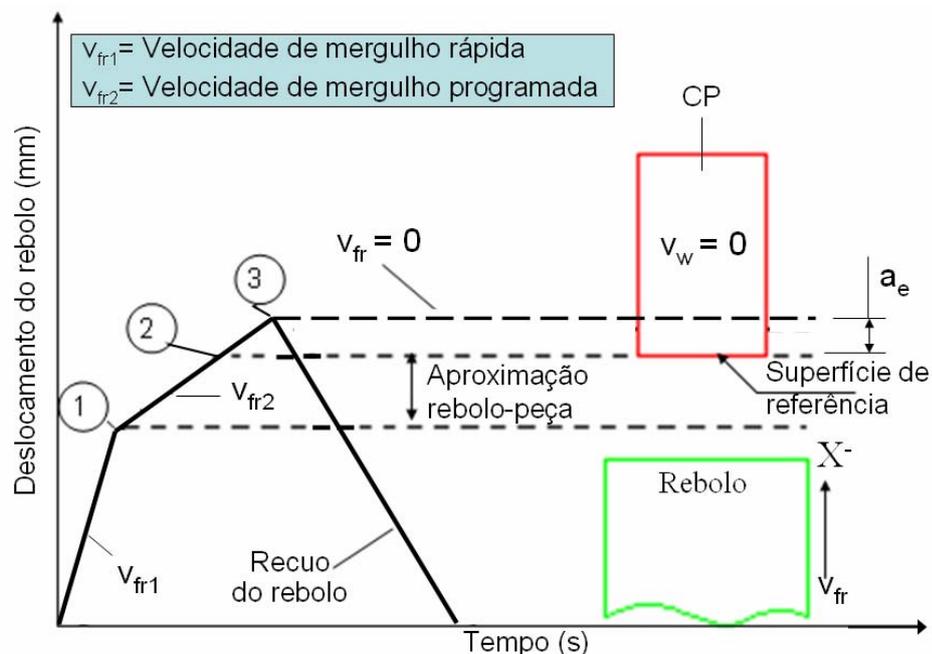
Antes de se iniciarem os ensaios na máquina, foi necessário proceder o dressamento do rebolo, conforme descrito no **item 3.8**. Como o volume de material removido por ensaio é extremamente baixo (devido aos reduzidos valores de penetração,  $a_e$ ) e a taxa de retificação é reduzida (devido às baixas velocidades de avanço empregadas) admitiu-se que o desgaste do rebolo pode ser desprezado.

O CP utilizado nos ensaios foi fixo entre pontas na máquina-ferramenta, sendo posicionado ortogonalmente em relação à direção de avanço de mergulho do cabeçote porta-rebolo, conforme indicado esquematicamente na **Figura 4.1**.



**Figura 4.1** – Vista esquemática da região de trabalho na máquina-ferramenta.

No início de cada ensaio o rebolo foi posicionado a uma distância de 250 mm do CP ( $X^+ = 250$ ). O rebolo acionado, com uma velocidade de corte  $v_s = 22,5$  m/s, é deslocado contra o CP com uma velocidade de mergulho rápida ( $v_{fr1} = 600$  mm/min) até uma posição de 0,5 mm distante da superfície do CP (ponto 1 na **Figura 4.2**). A partir desta posição a velocidade de avanço de mergulho do rebolo foi alterada para uma velocidade de aproximação  $v_{fr2}$ , até que o contato fosse reconhecido pelo SM (ponto 2 na **Figura 4.2**). O reconhecimento do contato pelo SM de EA integrado no comando da máquina ativa a parada do eixo de avanço do cabeçote porta-rebolo. As marcas impressas pelo rebolo no CP são decorrentes do percurso de avanço do rebolo entre o início do contato do rebolo contra o CP, e o efetivo desligamento do movimento de avanço ( $v_{fr2}$ ), somados ao deslocamento provocado pela inércia do sistema e à elasticidade do sistema. A posição máxima de avanço do rebolo até que este alcance a velocidade de avanço  $v_{fr} = 0$  mm/min é descrita pelo ponto 3 na **Figura 4.2**. Após o reconhecimento de contato e paralisação do avanço do rebolo, o mesmo é novamente recuado para uma distância de segurança. Para um novo ensaio, o CP é girado manualmente por aproximadamente  $\theta_1 = 15^\circ$ . A **Figura 4.2** demonstra os estágios de movimentação do rebolo na fase de ensaios.



**Figura 4.2** – Estágios de movimentação do rebolo e avanços  $v_{fr}$ , associados.

## 4.2 Planejamento dos Ensaios

Dentre os fatores estudados que exercem influência direta no reconhecimento de contato, merecem destaque a constante de integração  $\Delta T$  do sinal de  $EA_{RMS}$ , (selecionada nos SM), a velocidade de mergulho do rebolo  $v_{fr2}$ , e o tipo de transdutor utilizado. Os dois primeiros fatores foram variados em 2 níveis, denominados de “alto”(↑) e “baixo”(↓) enquanto o fator “transdutor” foi variado em dois tipos distintos: transdutor de base magnética e transdutor de base parafusada. Dessa forma, o planejamento dos ensaios foi embasado em uma Análise Fatorial Estatística. Para cada SM, 8 combinações possíveis entre os fatores e seus respectivos níveis de variação podem ser atingidas [60], Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Possíveis combinações entre os fatores e seus respectivos níveis de variação, durante ensaios com o SM-D.

SM-D			
Ensaio (Nomenclatura)	$\Delta T$ ↑ = 333,33 ms ↓ = 10 ms	Avanço ↑ = 6 mm/min ↓ = 3 mm/min	Transdutor ↑ = Base parafusada ↓ = Base magnética
1D	↓	↓	↓
2D	↓	↑	↓
3D	↑	↑	↓
4D	↑	↓	↓
5D	↓	↓	↑
6D	↓	↑	↑
7D	↑	↑	↑
8D	↑	↓	↑

Na primeira linha (1D), por exemplo, tem-se a situação experimental que combina a regulagem do fator “ $\Delta T$ ” em um nível baixo (10 ms), o fator “Avanço” também no nível baixo (3 mm/min) e o fator “Transdutor” em um nível baixo (transdutor de base magnética). A letra “D” se refere ao SM-D. Para cada uma das 8 situações experimentais, foram efetuadas 6 repetições (número de amostras) obtendo-se então 48 marcas impressas no CP. O cálculo do número de amostras

está relatado na **seção 4.2.1.** deste capítulo. Para os ensaios com o SM-S, a mesma metodologia foi utilizada, sendo selecionado para o nível alto ( $\uparrow$ ) do fator “ $\Delta T$ ”, um tempo de 400 ms. Isto foi necessário devido ao SM-S não disponibilizar o mesmo valor da constante de integração que o SM-D. Este valor foi adotado também porque se situou mais próximo daquele usado no SM-D.

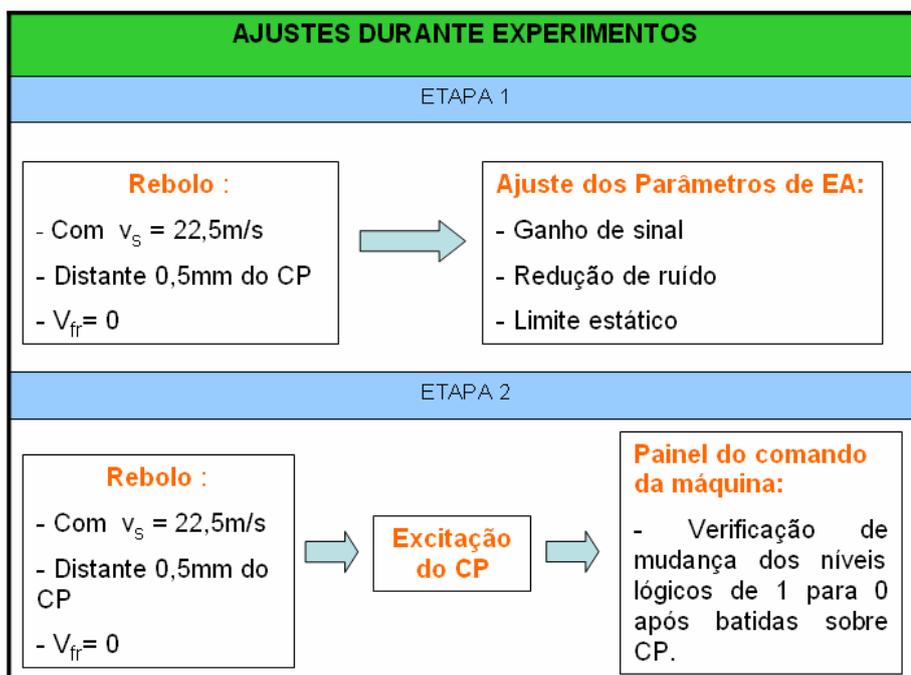
Os fatores “ $\Delta T$ ” e tipo de fixação do “Transdutor” exercem uma forte influência no ruído observado no sinal de  $EA_{RMS}$ . Conforme descrito no Capítulo 2, a técnica binária sugere que sejam utilizados valores elevados de amplificação, valores elevados de redução de ruído de fundo e valores baixos do limite estático. No decorrer dos ensaios foi necessário ajustar a sensibilidade dos SM com relação ao reconhecimento do contato, toda vez que se alteravam os fatores “ $\Delta T$ ” ou “Transdutor”. A variação destes dois fatores exerce influência direta no comportamento do sinal de  $EA_{RMS}$  observado antes do evento de contato, alterando a sensibilidade do SM em uso, uma vez que levavam ao ajuste dos parâmetros de EA (por exemplo: ganho, redução de ruído e limite estático) a serem selecionados em cada SM. A **Tabela 4.2** ilustra os momentos em que foi necessário realizar o ajuste da sensibilidade com relação ao reconhecimento de contato, quando se utilizou o SM-D. O mesmo procedimento foi usado durante os ensaios com o SM-S.

**Tabela 4.2** - Ajustes necessários para a condução dos ensaios.

SM-D			
Ensaio (Nomenclatura)	$\Delta T$ (ms)	Avanço (mm/min)	Transdutor
1D	↓	↓	↓
2D	↓	↑	↓
AJUSTES			
3D	↑	↑	↓
4D	↑	↓	↓
AJUSTES			
5D	↓	↓	↑
6D	↓	↑	↑
AJUSTES			
7D	↑	↑	↑
8D	↑	↓	↑

Em todas as vezes em que os ajustes da sensibilidade dos SM foram implementados (ver **Tabela 4.2**), seguiu-se um procedimento padrão, baseado na técnica binária (ver **item 2.17**). Foi necessário posicionar o rebolo (acionado com  $v_s = 22,5$  m/s) a uma distância de 0,5 mm da superfície de referência do CP, ajustando o parâmetro de ganho do SM para o percurso em avanço rápido, de forma que não fosse ultrapassado o limite estático neste percurso (proporcionado pelas vibrações do sistema). Esta etapa dos ajustes evitou que um “falso” reconhecimento de contato entre rebolo-CP viesse a ser detectado, no caso do ruído de fundo ser aumentado durante a aproximação do rebolo contra a superfície de referência do CP.

O segundo passo realizado na fase de ajustes consistiu na simulação do contato entre rebolo-CP através da excitação do CP com batidas sucessivas sobre o mesmo. Com o auxílio de uma barra metálica, observou-se a alteração na entrada do CLP (variação dos níveis lógicos de 1 para 0), toda vez que o sinal de  $EA_{RMS}$  ultrapassava o limite estático, selecionado na etapa anterior. Este procedimento foi necessário para evitar choques indesejados entre rebolo-CP no caso do SM não reconhecer o contato. A **Figura 4.3** ilustra de forma resumida os procedimentos adotados durante as fases de ajustes ao longo dos experimentos.



**Figura 4.3** - Etapas necessárias durante fase de ajustes.

#### 4.2.1 Determinação do número de amostras para as situações experimentais envolvendo Análise Fatorial ( $n_{\text{ENSAIO1}}$ )

Conforme comentado anteriormente, cada uma das linhas da **Tabela 4.1** representa uma combinação experimental que foi verificada na fase de ensaios. Segundo Montgomery [60], é necessário que sejam definidas previamente aos ensaios o número de repetições (número de amostras) para cada uma das rodadas dos ensaios quando se utiliza um estudo baseado em Análise Fatorial.

No presente trabalho o número de amostras para os ensaios relativos à Análise Fatorial ( $n_{\text{ENSAIO1}}$ ) foi calculado através de uma estimativa inicial baseada nos valores médios das marcas obtidas com ambos os SM. Para isto foram realizadas 6 marcas sobre o CP utilizando-se as condições 1D e 1S dos experimentos. Estas 6 marcas foram posteriormente medidas fornecendo valores de profundidade médios de  $\bar{x}_D = 3,13 \mu\text{m}$  e  $\bar{x}_S = 2,21 \mu\text{m}$  para os SM-D e SM-S, respectivamente, e valores de desvio-padrão de  $s_D = 0,3 \mu\text{m}$  e  $s_S = 0,17 \mu\text{m}$ . Paralelamente, foi necessário adotar para os cálculos um valor para o nível de significância, o qual correspondeu a  $\alpha=0,05$  (ou 5%) e um poder de teste, P, sendo igual a 0,9 ( $\beta=0,1$ ).

Tendo-se estes dados em mãos, utilizou-se a Curva Característica Operacional VI-g, [60]. Esta curva exige que sejam fornecidos os valores de  $\beta$  (Erro tipo II) e da relação  $d = (\Delta - \Delta_0) / 2\delta$ , onde:

$(\Delta - \Delta_0)$  = Diferença nos valores médios das profundidades das marcas.

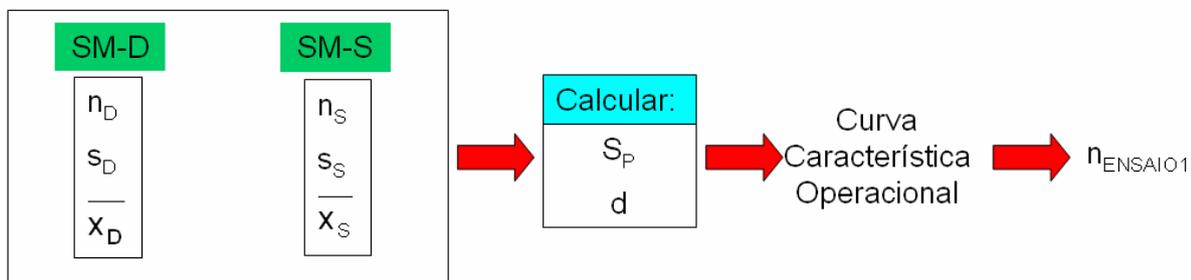
$\delta$  = Desvio-padrão da população.

Como o desvio-padrão das profundidades das marcas não era conhecido, foi necessário estimá-lo através de um desvio-padrão combinado ( $S_p$ ) obtido a partir de um mesmo número de observações ( $n=6$ ) para ambos os SM, e definido, segundo Montgomery [60], como:

$$S_p^2 = \frac{(n_D - 1)S_D^2 + (n_S - 1)S_S^2}{n_D + n_S - 2} \quad (4.1)$$

Para a estimativa do valor de  $(\Delta - \Delta_0)$  foi utilizada a diferença  $(\bar{x}_D - \bar{x}_S)$ , a qual representa a diferença dos valores médios nas 6 marcas obtidas para cada SM.

Com estes dados em mãos, conseguiu-se extrair da curva VI-g um valor de  $n=4$ , [60]. Para efeito conservativo, adotou-se então  $n_{\text{ENSAIO1}}=6$ , o qual foi utilizado como sendo o valor necessário para todas as combinações experimentais previamente citadas. A **Figura 4.4** ilustra o procedimento geral para determinação do número de amostras necessárias para os ensaios envolvendo Análise Fatorial,  $n_{\text{ENSAIO1}}$ .



**Figura 4.4** – Procedimento geral para determinação de  $n_{\text{ENSAIO1}}$ .

### 4.3 Verificação do Desempenho dos Sistemas de Monitoramento (SM) na Condição Otimizada

Após determinadas as condições em que o reconhecimento de contato entre rebolo-CP era verificado, deu-se continuidade ao trabalho com um estudo comparativo entre os SM através da Análise Fatorial. Primeiramente foi feito um estudo do comportamento dos SM com relação ao reconhecimento de contato, variando-se os valores de velocidade de avanço de mergulho  $v_{fr2}$ , de maneira decrescente, a partir de um valor escolhido (1,5 mm/min). O objetivo desta atividade foi verificar se, após o reconhecimento de contato, as marcas impressas sobre a superfície do CP poderiam ser perceptíveis e demonstrar, eventualmente, uma melhor performance por parte de um dos SM estudados. As marcas impressas foram medidas posteriormente, de maneira a poder quantificar o desempenho dos SM.

Nesta etapa, os sinais de EA decorrentes do evento de contato entre rebolo-CP foram amostrados e gravados para uma análise complementar. Quando se utilizou o SM-D, a amostragem dos sinais decorrentes do contato entre rebolo-CP, bem como a gravação destes sinais, pode ser feita através do próprio software que acompanha

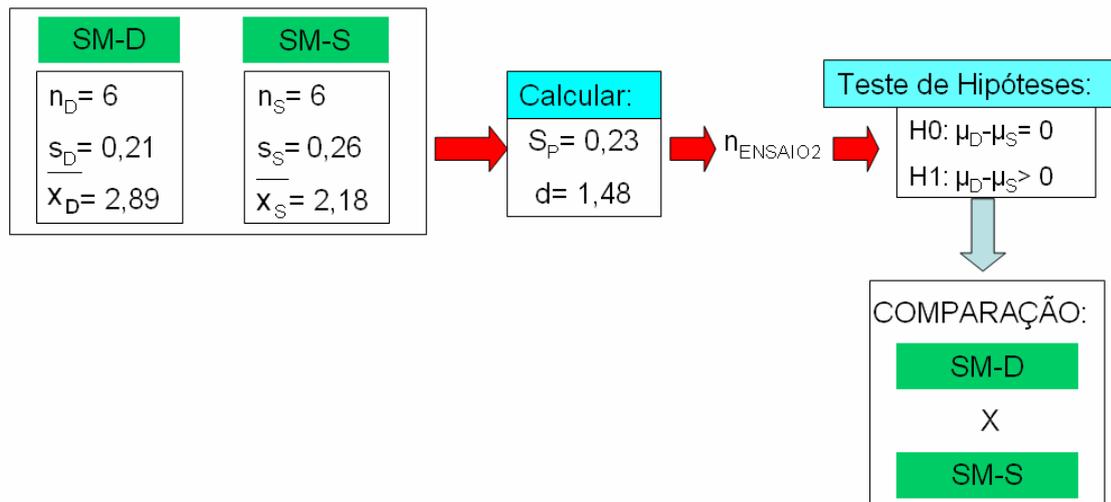
o equipamento. Nos momentos em que se trabalhou com o SM-S, os sinais de EA foram amostrados e gravados através de um analisador de sinais da empresa Oros (modelo OR-34).

#### **4.3.1 Comparação do desempenho dos SM utilizados com relação ao reconhecimento de contato**

Como forma de comprovar os resultados obtidos pelos ensaios anteriormente descritos, foi necessário proceder uma verificação adicional que levasse em consideração a diferença entre os valores médios das profundidades das marcas obtidas, com a utilização de cada SM, nas condições otimizadas para o reconhecimento de contato.

A forma mais apropriada para proceder tal verificação consistiu em um Teste de Hipóteses (Teste  $t$  combinado para duas amostras), que utilizou como hipótese inicial  $H_0$ , o fato de que a diferença verificada nas médias das marcas, poderia ser considerada igual a zero, ( $H_0: \mu_D - \mu_S = 0$ ). Como hipótese alternativa  $H_1$ , considerou-se que a diferença entre os valores médios das marcas obtidas poderia representar um melhor desempenho do SM-S no reconhecimento do contato ( $H_1: \mu_D - \mu_S > 0$ ), conduzindo a marcas com menores profundidades.

Para a implementação do Teste de Hipóteses foi necessário calcular um número de observações ( $n_{\text{ENSAIO2}}$ ) adequado, o qual seguiu o mesmo procedimento da **seção 4.2.1**. A determinação do desvio-padrão se baseou na execução de 6 repetições ( $n = 6$ ) para cada um dos SM, medindo-se posteriormente as profundidades das marcas obtidas. A profundidade média das marcas para os dois SM envolvidos bem como os valores de desvio-padrão para cada SM estão demonstrados na **Figura 4.5**, a qual ilustra o procedimento geral utilizado para a comparação entre os SM.



**Figura 4.5** - Procedimento geral utilizado para a comparação da eficiência entre os SM, no reconhecimento de contato entre rebolo-CP.

Como estimativa do valor de  $(\Delta - \Delta_0)$  foi utilizada a diferença  $(\bar{x}_D - \bar{x}_S)$ , a qual representa a diferença dos valores médios nas 6 marcas obtidas para cada SM. Com os valores de  $\beta = 0,1$  e  $d = 1,48$  foi obtido um valor de  $n \approx 4$  para os ensaios. Este valor foi extraído da Curva Característica Operacional VI-g, [60]. Como este valor se situou muito próximo daquele utilizado como estimativa inicial ( $n = 6$ ), não foi necessário repetir os ensaios para  $n = 4$ . Todos os valores de entrada para o Teste de Hipóteses foram baseados nos valores obtidos para  $n_{\text{ENSAIO2}} = 6$ , conforme demonstrado na figura anterior.

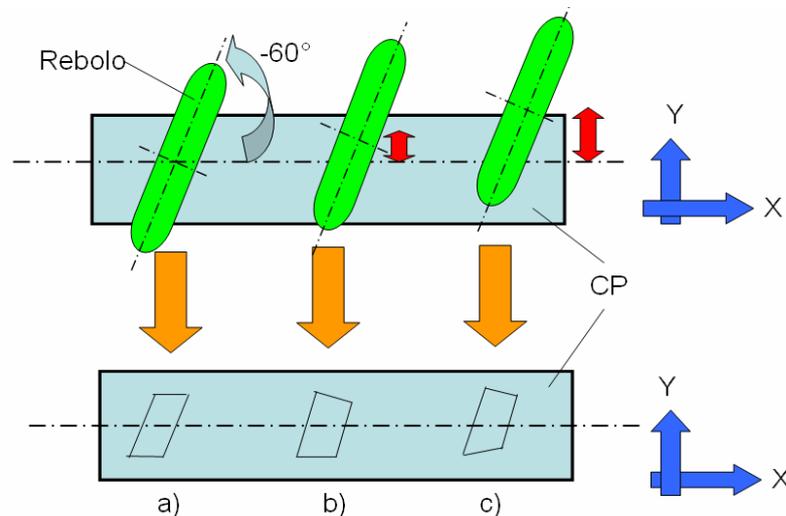
#### 4.4 Proposição para a Determinação da Posição Centralizada entre Rebolo e Corpo de Prova (CP) na Empresa Parceira

Baseado na experiência dos operadores do parceiro industrial em centralizar manualmente um rebolo em relação ao CP em uma retificadora de ferramentaria, propõe-se uma estratégia que permita efetuar esta centralização de forma automatizada. Para poder desenvolver a estratégia, em ensaios preliminares foram estabelecidas: a posição mais adequada do transdutor de EA na máquina-ferramenta; os valores da constante de integração  $\Delta T$  do sinal de  $EA_{\text{RMS}}$  que permitissem um reconhecimento de contato entre rebolo e peça; as penetrações de trabalho  $a_{e2}$ , que permitissem identificar um resultado seguro de contato e

verificações de sinais de  $EA_{RMS}$  com deslocamento transversal do rebolo sobre o CP.

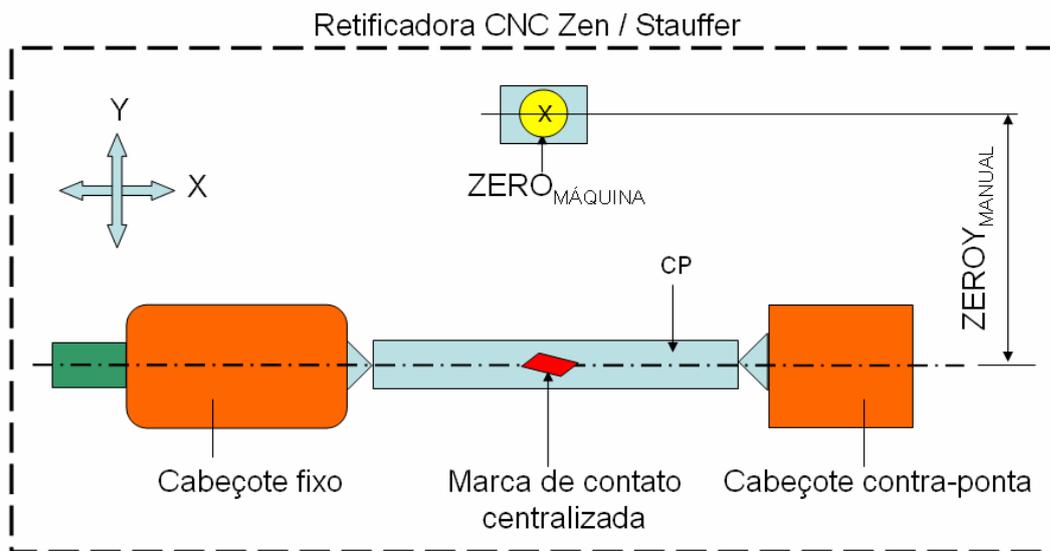
#### 4.4.1 Estratégia manual ( $ZEROY_{MANUAL}$ ) para a determinação da posição centralizada entre rebolo e CP

A estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$  é desempenhada pelo operador da máquina e depende de sua experiência e sensibilidade desenvolvida ao longo dos trabalhos na máquina-ferramenta. O operador fixa um CP entre pontas e aproxima o rebolo ao CP até uma distância de segurança numa posição aproximadamente centralizada sobre o CP. O operador aproxima o rebolo através de um mergulho contra o CP (eixo-Z) até que ele detecta (visual e auditivamente) uma interferência do rebolo com a peça, mantendo-se constantes as coordenadas associadas aos eixos X e Y. Em seguida, ele recua o rebolo sobre o eixo-Z para possibilitar a visualização da marca impressa sobre a superfície do CP com esse procedimento. O aspecto geométrico das marcas impressas depende da geometria do rebolo, da inclinação do rebolo em relação ao eixo longitudinal do CP (ângulo de hélice,  $\lambda$ ), da penetração e do desvio da posição centralizada entre rebolo-CP. As formas das marcas produzidas se assemelham a losângulos. A **Figura 4.6** ilustra de forma esquemática as formas das marcas decorrentes do contato entre rebolo-CP (ao longo do eixo-Z) para diferentes posicionamentos relativos entre rebolo e CP (em relação ao eixo-Y), (**Figura 4.6**, a, b, c).



**Figura 4.6** – Forma das marcas impressas no contato entre rebolo-CP para posicionamento angular  $\lambda = -60^\circ$ .

O operador analisa visualmente o comprimento e inclinação das arestas do contorno das impressões, comparando-as duas a duas. Quando as arestas apresentam comprimentos ou inclinações desiguais entre si (**Figura 4.6 b, c**), o posicionamento entre rebolo-CP não é considerado centralizado e o procedimento de centralização entre rebolo-CP deve ser novamente repetido para uma nova posição do rebolo ao longo do eixo-Y. Caso seja verificada uma simetria entre as arestas (**Figura 4.6-a**), então a posição associada ao eixo-Y é considerada adequada e é empregada para a fabricação da estria na brocha. Esta posição (coordenada Y) é armazenada no comando da máquina-ferramenta e é adotada como referência ( $ZERO_{Y_{MANUAL}}$ ). O valor de  $ZERO_{Y_{MANUAL}}$  representa a distância física entre a referência fixa na máquina-ferramenta ( $ZERO_{MÁQUINA}$ ) e a posição centralizada determinada pelo operador, conforme mostrado na **Figura 4.7**.



**Figura 4.7** – Representação esquemática das posições  $ZERO_{MÁQUINA}$  e marca de contato centralizada na estratégia  $ZERO_{Y_{MANUAL}}$

As marcas de contato centralizadas obtidas com a estratégia  $ZERO_{Y_{MANUAL}}$ , serviram como uma referência inicial no estabelecimento de uma estratégia automatizada para a determinação do posicionamento centralizado entre rebolo-CP, a qual foi convencionada neste trabalho por  $ZERO_{Y_{AUTO}}$ .

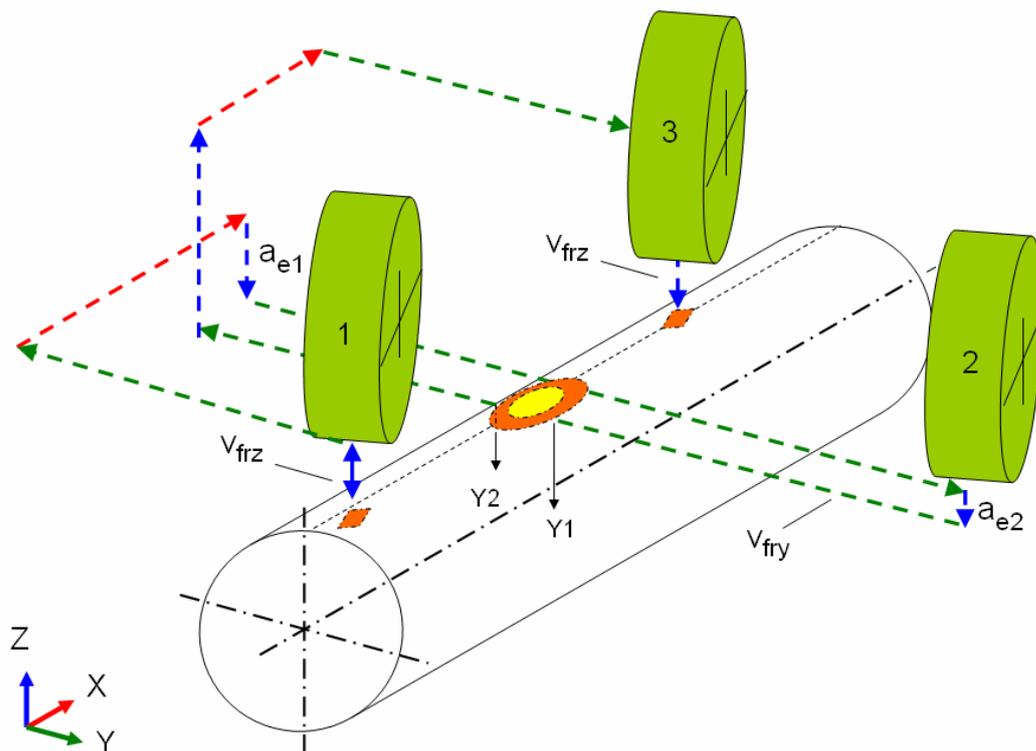
#### 4.4.2 Estratégia automatizada ( $ZEROY_{AUTO}$ ) para a determinação da posição centralizada entre rebolo-CP

A análise de diversas possibilidades de estratégias de centralização automática do rebolo em relação à peça levou à conclusão de que a forma mais conveniente de automatização da centralização não deveria considerar os procedimentos adotados pelo operador. Embora seja possível integrar sistemas de visão e processamento de imagem em uma máquina-ferramenta que apresentem a resolução necessária para interpretar imagens de marcas deixadas pelo contato entre rebolo e CP e concluir sobre a centralização ou não do rebolo, um sistema destes também requer sensores que detectem o contato do rebolo com a peça.

Para a centralização do rebolo em relação à peça na estratégia proposta, é necessário que a máquina-ferramenta tenha apenas um sistema de monitoramento por EA integrado em seu comando numérico.

Na máquina-ferramenta em questão a posição centralizada entre rebolo e CP está vinculada ao eixo-Y. Em decorrência, esta estratégia foi denominada " $ZEROY_{AUTO}$ ", onde o termo "ZERO" se refere à posição centralizada entre rebolo-CP, e o termo " $AUTO$ " à automação através do emprego de um sistema de monitoramento por EA.

Para que a estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  pudesse ser implementada foi necessário primeiramente integrar o SM-D no comando numérico da máquina-ferramenta. Na estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ , o rebolo é posicionado a uma distância de segurança acima da superfície do CP ( $Z = +2$  mm), visualmente próximo da posição centralizada entre rebolo e o eixo longitudinal do CP (**Figura 4.8 "b"**).



**Figura 4.8** – Estágios de movimentação do rebolo durante ensaios com estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>.

O rebolo é acionado para a velocidade de corte  $v_s$  de trabalho. Subseqüentemente, o rebolo executa um avanço de mergulho ( $v_{frz} = 10$  mm/min) contra a superfície do CP, até que o contato com o CP é reconhecido pelo SM-D. Ao reconhecer o contato do rebolo com o CP (**Figura 4.8**, posição “a”), o SM-D comanda a paralisação do movimento de avanço do rebolo. As coordenadas da posição de contato são armazenadas no comando da máquina para uso posterior. Depois de reconhecido o contato, o rebolo é recuado para a posição “b” e move-se ao longo do eixo-Y e do eixo-X por 10 mm (**Figura 4.8**, posições “c” e “d”, respectivamente). O rebolo então mergulha até atingir a posição de referência em Z, detectada no ponto “a”. A partir desta posição procede-se um incremento  $a_{e1} = 0,01$  mm no eixo-Z (**Figura 4.8**, posição “e”). Para esta penetração de corte, o rebolo é guiado ao longo do eixo-Y até ultrapassar completamente o CP (**Figura 4.8**, posição “f”). Durante este deslocamento o rebolo tangencia o CP. Este contato é reconhecido pelo SM-D e é identificado no CP pela menor marca representada esquematicamente na **Figura 4.8**. A seguir, para um incremento  $a_{e2}$  da posição do rebolo no eixo-Z (**Figura 4.8**, posição “g”), o rebolo é novamente deslocado sobre o

eixo-Y até a posição “h”. Durante este movimento, o rebolo tangencia o CP (marca maior representada na **Figura 4.8**) e as posições associadas ao início e final de contato (Y1 e Y2, respectivamente) são armazenadas no CNC da máquina-ferramenta, servindo de referência para o cálculo da posição centralizada do rebolo em relação ao CP. A posição centralizada calculada é denominada de  $ZEROY_{AUTO}$  e representa a distância relativa à posição de  $ZERO_{MÁQUINA}$ . O rebolo é guiado para as posições “i” e “j”, e em seguida para a posição centralizada “k” em relação ao CP. A partir da posição “k”, o rebolo é mergulhado contra a superfície do CP até que o contato seja reconhecido pelo SM-D na posição “l”. No instante do reconhecimento do contato o SM-D comanda a parada do avanço  $v_{frz}$  do rebolo. A partir desta posição o rebolo é recuado sobre o eixo-Z e levado para um afastamento de segurança em relação ao CP. Este último contato entre rebolo-CP objetiva visualizar a forma geométrica da marca impressa.

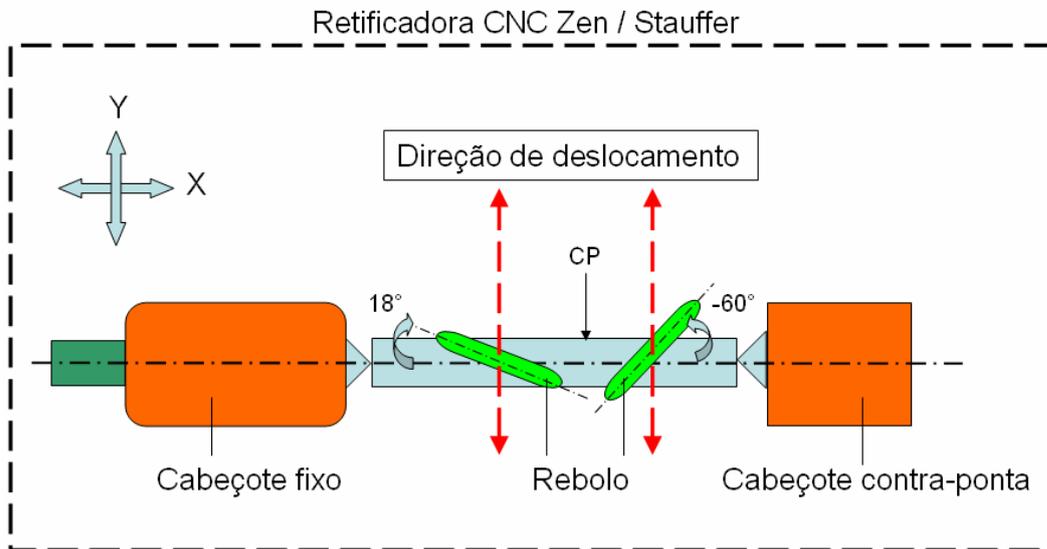
Caso a marca visualizada nesta etapa fosse significativamente diferente daquela obtida com a estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$ , novos ajustes deveriam ser realizados sobre os principais parâmetros influentes nos valores de  $ZEROY_{AUTO}$ , até que se alcançassem marcas visualmente semelhantes.

#### **4.5 Otimização da Estratégia $ZEROY_{AUTO}$ (Etapa 1 dos Ensaios na Empresa Parceira)**

A otimização dos parâmetros variáveis influentes sobre a centralização automática do rebolo em relação ao CP foi realizada na empresa parceira ZEN S.A. em uma retificadora cilíndrica CNC ZEN/Stauffer, destinada à fabricação de brochas. O objetivo destes ensaios consiste na implementação de uma estratégia segura para a determinação automatizada do posicionamento centralizado entre rebolo e CP. Durante os ensaios foi utilizado o SM-D (modelo AE 6000).

Objetivou-se também a comparação entre os resultados da centralização empregando a estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  com os resultados obtidos através da forma usual praticada pelo operador da máquina para a detecção do posicionamento centralizado entre rebolo-CP, denominado neste trabalho por  $ZEROY_{MANUAL}$ . Para atender às necessidades da empresa, os ensaios de centralização foram realizados com o rebolo inclinado em relação ao eixo longitudinal do CP, conforme ilustrado

esquemáticamente na **Figura 4.9**. Estas inclinações representam os valores limites ( $\lambda = 18^\circ$  e  $\lambda = -60^\circ$ ) utilizados na confecção das estrias das brochas fabricadas nesta máquina-ferramenta.



**Figura 4.9** – Posicionamentos angulares do rebolo utilizados durante ensaios de centralização.

Nesta etapa, os ensaios foram realizados com rebolos de óxido de alumínio (corindum), com geometrias distintas. Para abranger um maior leque de forma dos rebolos, estes foram dressados com perfis simétricos trapezoidal e perfil módulo (perfil composto de segmentos curvos e raios de concordância). Os CP, de aço ferramenta M2 temperado, foram fixos entre pontas na máquina-ferramenta, sendo posicionados na direção do eixo-X da máquina. Os CP utilizados permaneceram estáticos ( $v_w = 0$  m/min) ao longo dos ensaios para a determinação do posicionamento centralizado, não sendo utilizado fluido de corte (fluido lubri-refrigerante) durante esta etapa.

Para a avaliação dos resultados desta etapa dos ensaios, os resultados de tangenciamento final na estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  (formação de uma marca losangular no CP, e posição associada ao eixo-Y indicada na tela do CNC) são comparados com aqueles obtidos na estratégia manual de centralização,  $ZEROY_{MANUAL}$ .

Para obter um sinal de  $EA_{RMS}$  melhor definido na entrada e saída do rebolo durante a movimentação transversal deste em relação ao CP, e uma marca

geometricamente melhor definida durante o tangenciamento final de mergulho do rebolo contra o CP, empregou-se inicialmente um rebolo com perfil trapezoidal.

Dentre os fatores que influenciam diretamente o valor de  $ZEROY_{AUTO}$ , destacam-se: rotação do rebolo  $n_s$ , profundidade de corte  $a_{e2}$ , velocidade de avanço  $v_{fry}$ , bem como o valor da constante de integração  $\Delta T$  do sinal de  $EA_{RMS}$  utilizado no SM-D. Os 4 fatores foram variados em dois níveis preestabelecidos e os ensaios foram conduzidos baseando-se em uma Análise Fatorial Estatística. A combinação entre os 4 fatores e seus respectivos níveis de variação leva a 16 situações experimentais possíveis, **Tabela 4.3**.

**Tabela 4.3** – Combinações entre os fatores constante de integração  $\Delta T$ , velocidade de avanço  $v_{fry}$ , profundidade de corte  $a_{e2}$ , e rotação do rebolo  $n_s$ .

ENSAIOS (Nomenclatura)	FATORES			
	A= $\Delta T$ (ms)	B= $v_{fry}$ (mm/min)	C= $a_{e2}$ (mm)	D= $n_s$ ( $\text{min}^{-1}$ )
	$\uparrow= 33,33$ $\downarrow= 10$	$\uparrow= 300$ $\downarrow= 200$	$\uparrow= 0,01$ $\downarrow= 0,005$	$\uparrow= 6000$ $\downarrow= 5000$
1	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
a	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
b	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
c	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
d	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
ab	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
ac	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
ad	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
bc	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
bd	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
cd	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
abc	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
abd	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
bcd	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
adc	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
abcd	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$

Para cada uma das situações experimentais, foram realizadas 3 repetições (R1, R2, e R3), obtendo-se como resultado um valor médio de  $ZEROY_{AUTO}$ , bem como uma noção da variabilidade (desvio-padrão).

Os valores médios obtidos nas 16 condições experimentais foram comparados ao valor médio de  $ZEROY_{MANUAL}$  definido anteriormente aos ensaios (pelo operador) e adotado como referência inicial.

Os valores de constante de integração  $\Delta T$ , escolhidos para os níveis alto e baixo ( $\uparrow$  e  $\downarrow$ ) se baseiam nos valores estabelecidos nos ensaios prévios. Os valores empregados para os níveis alto e baixo da rotação do rebolo  $n_s$ , profundidade de corte  $a_{e2}$ , e velocidade de avanço  $v_{fry}$ , foram baseados na experiência do operador da máquina-ferramenta. No caso específico do fator profundidade de corte, apenas a penetração anterior ao movimento de retorno do rebolo ( $a_{e2}$ ) (significativa para o resultado) foi variada durante os ensaios. O menor valor do fator profundidade de corte ( $a_{e2} = 0,005$  mm) foi estabelecido em ensaios prévios e limitado pelo fato de que baixas remoções efetivas de material do CP não fornecem um sinal de  $EA_{RMS}$  que possa ser reconhecido pelo SM. Valores de  $a_{e2}$  acima de 0,01 mm originam desgastes de quina pronunciados no rebolo, sendo considerados como proibitivos na prática. Com relação aos fatores rotação do rebolo  $n_s$ , e da velocidade de avanço  $v_{fry}$ , foram escolhidas as faixas usuais de operação para os níveis baixo e alto destes fatores ( $n_s = 5000 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_s = 6000 \text{ min}^{-1}$  e  $v_{fry} = 200 \text{ mm/min}$ ,  $v_{fry} = 300 \text{ mm/min}$ , respectivamente). Os 48 ensaios foram realizados sem dressamentos intermediários.

#### **4.6 Validação das Estratégias $ZEROY_{MANUAL}$ e $ZEROY_{AUTO}$ (Etapa 2 dos Ensaios na Empresa Parceira)**

Esta etapa dos trabalhos visa uma comparação entre as estratégias  $ZEROY_{MANUAL}$  e  $ZEROY_{AUTO}$  para um posicionamento angular relativo entre rebolo e CP de  $\lambda = 18^\circ$ . Os ensaios foram conduzidos com a utilização de um rebolo com perfil módulo com arcos e raios de concordância na porção central e lateral do perfil. A validação das estratégias manuais e automáticas de centralização do rebolo é efetuada em um CP específico, através da retificação de uma estria padronizada a partir das posições centralizadas obtidas com ambas as estratégias. Estas estrias

retificadas são medidas em uma máquina de medição de coordenadas e o perfil obtido é comparado com o perfil teórico do perfil padronizado.

Nesta etapa dos ensaios foi necessário executar o dressamento do rebolo anteriormente à usinagem das estrias sobre os CP, com o objetivo de conferir o perfil especificado. No momento de usinagem das estrias, a partir da utilização dos valores de centro encontrados pelas estratégias  $ZEROY_{AUTO}$  e  $ZEROY_{MANUAL}$ , o número de rotações do CP foi de  $n_w = 50 \text{ min}^{-1}$  e fez-se necessária a utilização de fluido de corte (óleo refrigerante Syntilo 920).

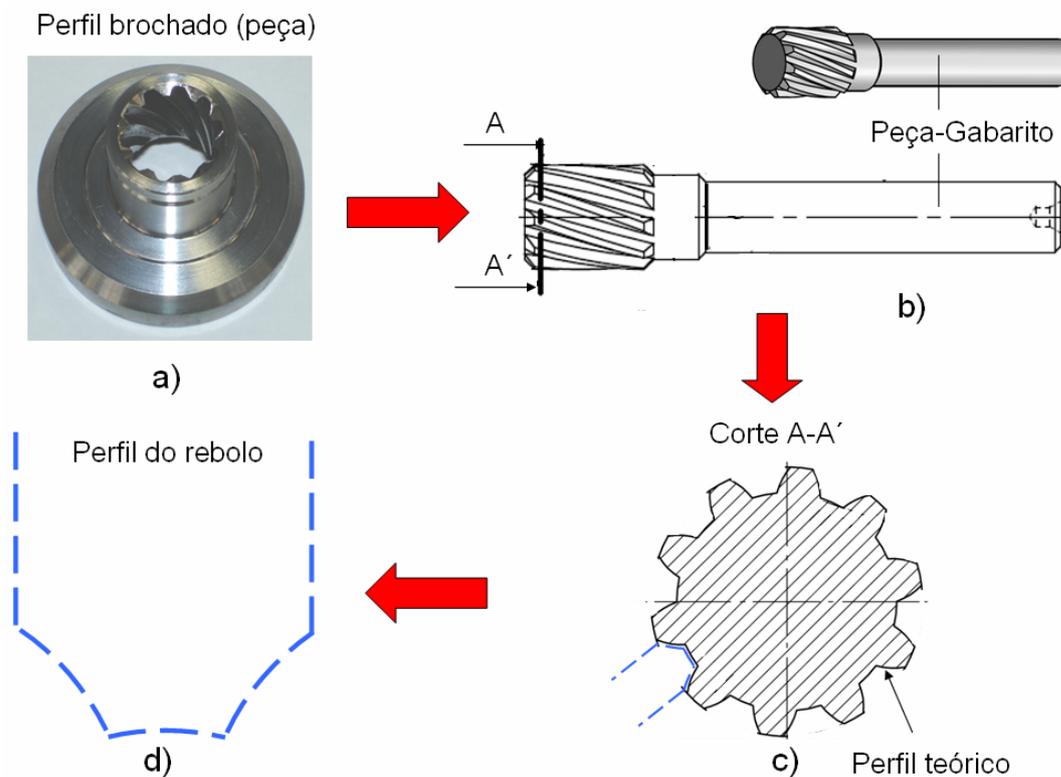
A comparação entre as duas estratégias visou descobrir qual destas poderia proporcionar menores desvios relativos entre o perfil medido (na estria do CP) e o perfil de projeto definido para o CP. Com a sobreposição subsequente dos perfis (medido e projetado) conseguiu-se obter uma noção mais precisa da eficiência atingida por cada uma das estratégias. A usinagem das estrias foi desempenhada de forma análoga à procedida nas atividades diárias realizadas na máquina-ferramenta, até que se atingisse o diâmetro interno ( $D_{MIN}$ ) especificado para a estria usinada.

#### 4.7 Determinação do Perfil Teórico (de Projeto) para Estrias Usinadas no CP

Um momento importante dos trabalhos desempenhados na empresa ZEN S.A consistiu na determinação do perfil teórico para o corpo de prova (CP). Esta atividade visou determinar uma referência fixa para possibilitar uma comparação entre as estratégias  $ZEROY_{AUTO}$  e  $ZEROY_{MANUAL}$ , para o posicionamento angular relativo,  $\lambda = 18^\circ$ . Com a determinação do perfil teórico para o CP, foi possível analisar qual das estratégias empregadas seria a mais adequada para a centralização do rebolo em relação ao CP.

Durante esta etapa dos trabalhos, decidiu-se que o perfil teórico deveria estar baseado no perfil das estrias a serem atingidas no produto final brochado. Como o produto final consiste em uma peça-fêmea (**Figura 4.10-a**) a qual deve ser montada na prática com outro componente sob tolerâncias estreitas, a fabricação de uma peça-gabarito deve ser realizada para a verificação da possibilidade do encaixe correto entre ambos (**Figura 4.10-b**). A peça-gabarito deve apresentar então dimensões intermediárias entre a peça-fêmea e a peça-macho. Desta forma, o perfil

das estrias da peça-gabarito foi adotado como sendo o perfil teórico a ser utilizado como referência durante os ensaios na empresa, **Figura 4.10-c**. A partir do perfil teórico foi dressado um rebolo com perfil específico (**Figura 4.10-d**) de forma a possibilitar a usinagem das estrias no CP.



**Figura 4.10** – Determinação do perfil teórico (projeto) para etapa 2 dos ensaios na empresa parceira.

## 5. RESULTADOS

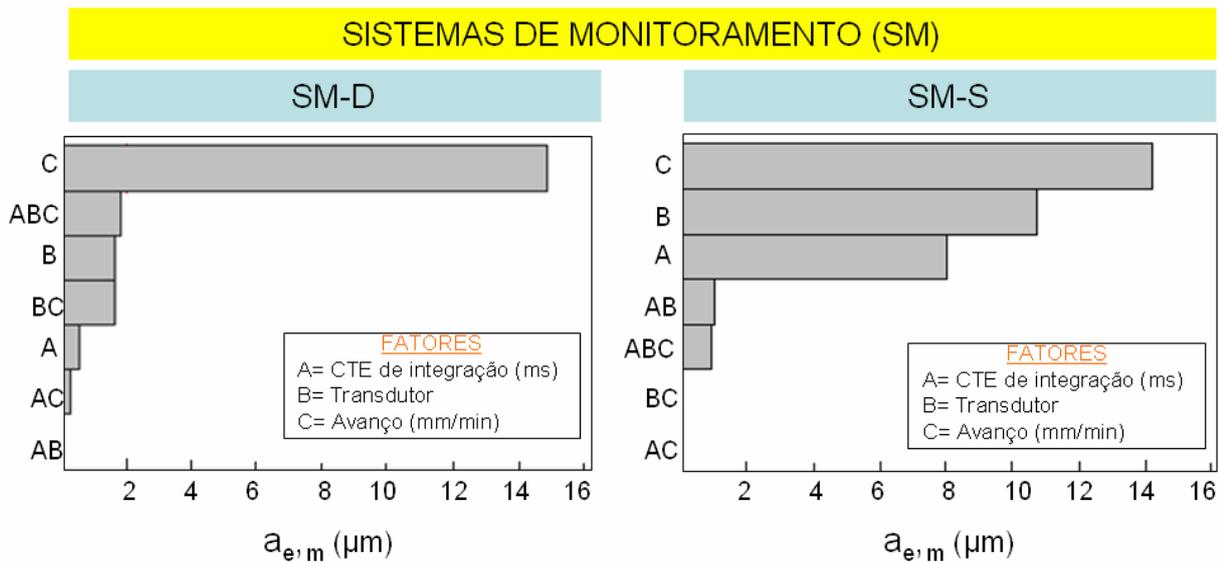
Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos com a realização dos ensaios.

### 5.1 Reconhecimento de Contato entre Rebolo-CP Utilizando-se Sistemas de Monitoramento (SM) Distintos – LMP (UFSC)

Através da realização de um estudo baseado em uma Análise Fatorial Estatística, foi possível obter um modelo empírico para cada um dos SM envolvidos na fase de ensaios. Este modelo representa as condições que otimizam o reconhecimento de contato por parte de cada SM, levando em consideração os 3 fatores relatados no capítulo anterior. A Análise Fatorial utilizada possibilita verificar as possíveis interações entre os fatores em seus respectivos níveis de variação (alto ↑, e baixo ↓) envolvidos nos estudos.

Os valores de entrada utilizados para a Análise Fatorial foram os valores das profundidades das marcas  $a_{e,m}$  (obtidas por medição) decorrentes do evento de contato entre rebolo e corpo de prova (CP).

A condição otimizada dos SM com relação ao reconhecimento de contato entre rebolo-CP esteve associada à combinação de fatores (e seus respectivos níveis) que conduzissem a profundidades reduzidas das marcas impressas no CP. A partir desta análise, foi possível determinar quais fatores representaram, isoladamente, as maiores influências com relação à resposta obtida (profundidade das marcas medidas,  $a_{e,m}$ ). **A Figura 5.1** ilustra dois diagramas de Pareto demonstrando os efeitos de cada um dos 3 fatores analisados, bem como o efeito das interações entre os fatores, para cada um dos SM estudados.



**Figura 5.1** – Diagrama de Pareto representando os efeitos dos fatores e de suas interações.

Os diagramas demonstram claramente que o fator “Avanço de mergulho” ( $v_{fr2}$ ) contribui com a parcela mais significativa sobre a profundidade das marcas impressas. No entanto, apenas a redução deste fator em seu nível mínimo não representa uma garantia efetiva de otimização no reconhecimento do contato entre rebolo-CP, uma vez que podem existir interações entre os níveis dos 3 fatores envolvidos no estudo. Ao mesmo tempo, valores de  $v_{fr2}$  muito baixos tornariam o reconhecimento de contato inviável de ser realizado em situações na prática industrial. Segundo Montgomery [60] a interação entre fatores representa o impacto que a alteração de um nível de um fator exerce sobre outro fator. Ao mesmo tempo, foi importante também conhecer quais os níveis utilizados para os fatores “Transdutor” e “Constante de integração” ( $\Delta T$ ) poderiam ser mais adequados para uma otimização do reconhecimento de contato efetiva em ambos os SM.

As Tabelas 5.1 e 5.2 ilustram os resultados obtidos a partir da Análise Fatorial reduzida (simplificada), ou seja, após uma Análise Fatorial levando em consideração apenas os fatores mais significativos mostrados na figura anterior, e excluindo os demais fatores.

**Tabela 5.1** - Análise Fatorial reduzida para SM-D. Fator A=  $\Delta T$ , Fator B= Transdutor, Fator C= Avanço.

SM-D			
FATOR	EFEITO	COEFICIENTE	P-VALOR
Constante		6,70	0,000
A	0,20	0,10	0,585
B	0,70	0,35	0,104
C	6,20	3,10	<b>0,001</b>
BC	0,70	0,35	0,107
A x B x C	0,80	0,40	0,075

**Tabela 5.2** - Análise Fatorial reduzida para SM-S. Fator A=  $\Delta T$ , Fator B= Transdutor, Fator C= Avanço.

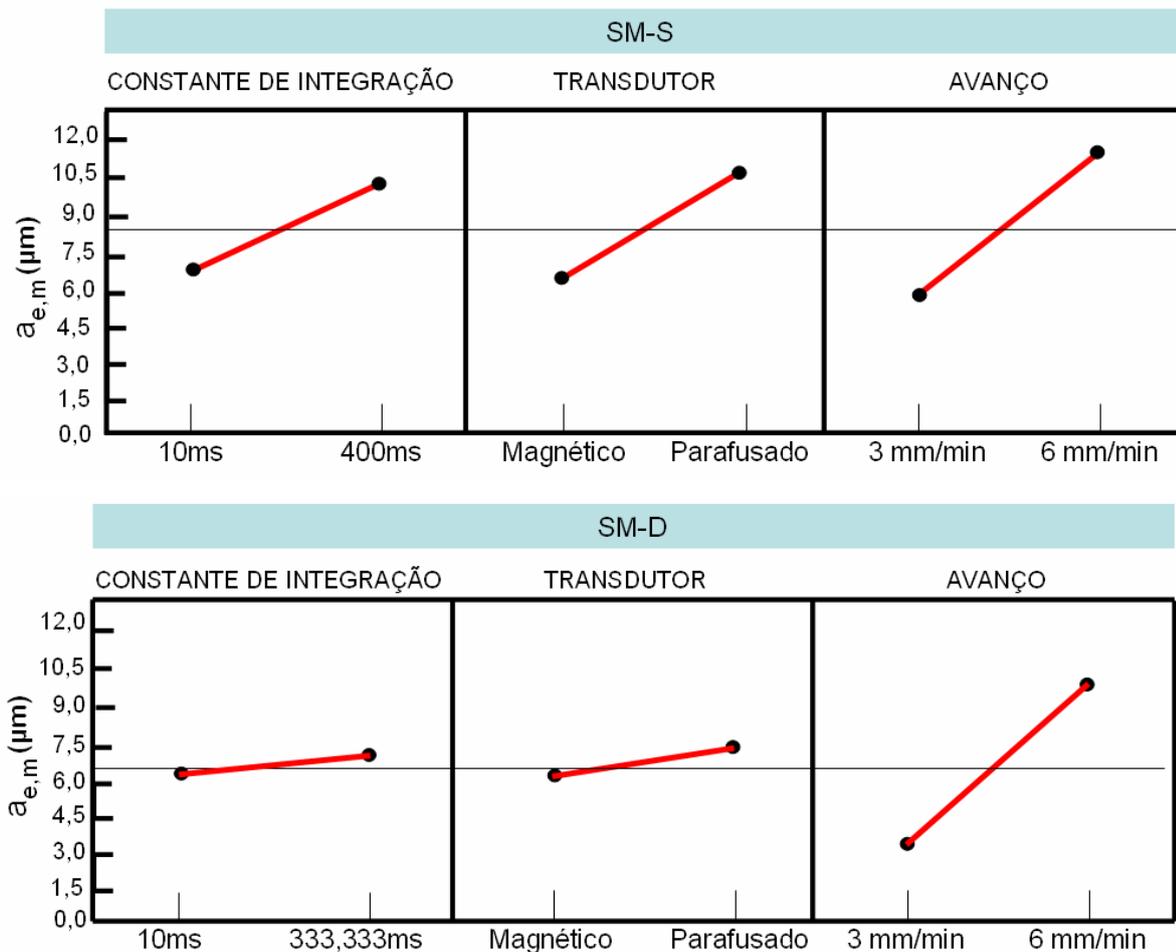
SM-S			
FATOR	EFEITO	COEFICIENTE	P-VALOR
Constante		8,60	0,000
A	3,10	1,55	<b>0,001</b>
B	4,20	2,1	<b>0,001</b>
C	5,60	2,80	<b>0,001</b>
A x B	0,40	0,20	0,301

Percebe-se, através dos resultados expostos, que para o SM-D, o fator “Avanço” é o único que apresenta um p-valor abaixo de 0,05 (nível de significância estabelecido anteriormente aos ensaios), podendo ser considerado como o fator mais significativo para uma modificação na resposta (profundidade das marcas  $a_{e,m}$ ).

Já para o SM-S, as influências dos 3 fatores parecem ser significativas, uma vez que seus p-valores calculados resultaram abaixo de 0,05.

Plotando-se os gráficos dos efeitos para os fatores considerados na Análise Fatorial reduzida, (ver **Tabelas 5.1 e 5.2**), percebe-se para o SM-D que o fator “Avanço” exerce realmente maior influência sobre as profundidades médias obtidas, sendo evidenciado pela inclinação acentuada da reta que une os dois níveis de variação (3 mm/min e 6 mm/min), quando comparado aos demais fatores.

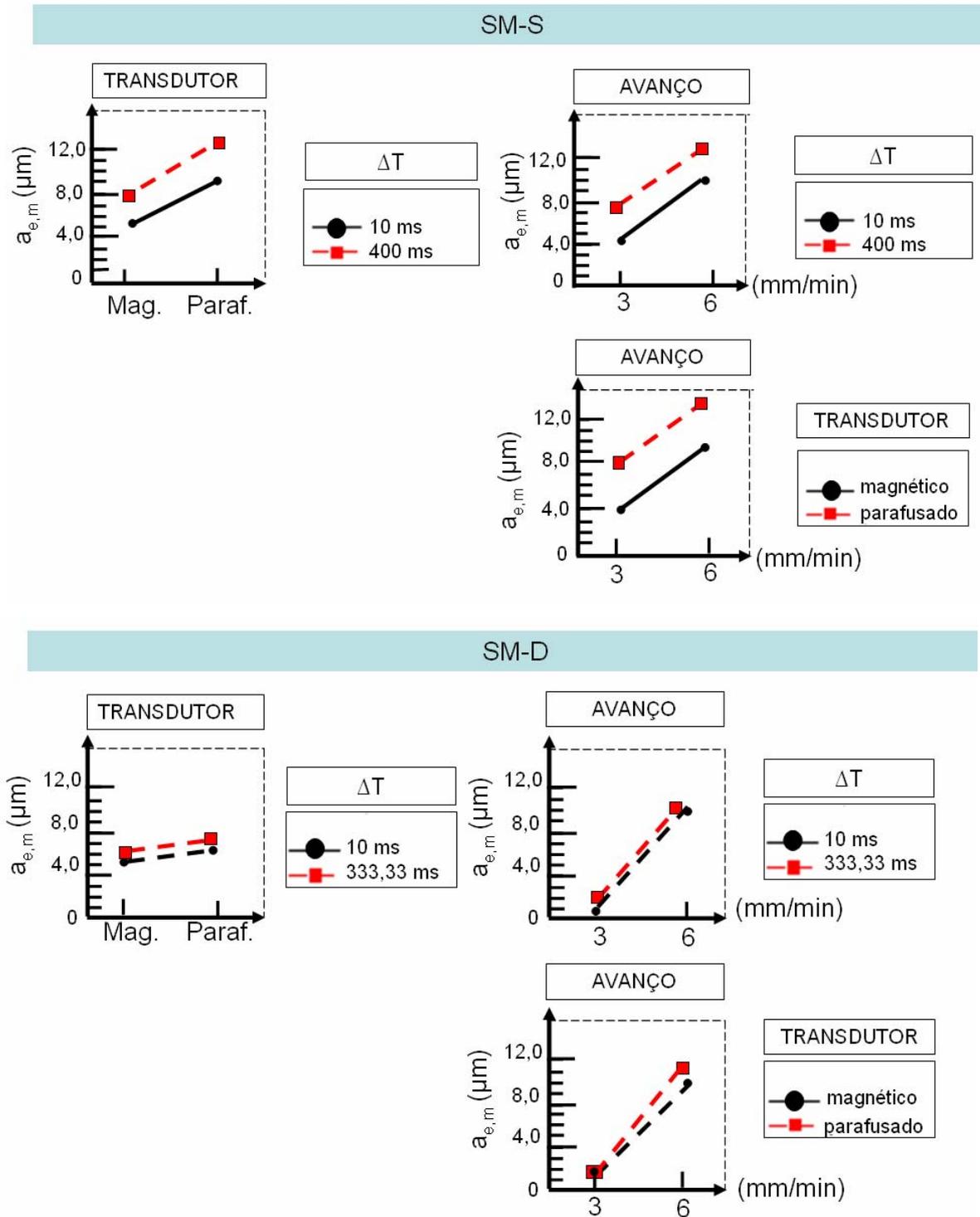
Com relação ao SM-S, é possível verificar que os efeitos calculados para os 3 fatores apresentaram um comportamento semelhante entre si. Neste SM, as contribuições dos fatores “ $\Delta T$ ” e “Transdutor” mostraram ter influência significativa sobre as profundidades das marcas, quando comparado ao SM-D. A **Figura 5.2** ilustra os efeitos dos fatores envolvidos sobre a profundidade das marcas obtidas ( $a_{e,m}$ ) com a utilização dos dois SM em estudo.



**Figura 5.2** – Gráficos representando os efeitos dos fatores envolvidos sobre a profundidade das marcas obtidas.

Estes gráficos evidenciam, em seus eixos verticais, os valores médios das profundidades das marcas obtidas em cada um dos níveis de variação dos fatores. Desta forma, pode-se eventualmente concluir, através da observação isolada destes gráficos, que a seleção dos níveis de “baixa” para cada um dos 3 fatores envolvidos, poderia conduzir à obtenção de marcas com os menores valores médios de  $a_{e,m}$ . No entanto, como já comentado anteriormente, torna-se necessário verificar se existe

realmente uma interação entre os níveis dos fatores, o que poderia levar a falsas conclusões com relação às condições otimizadas a serem alcançadas. A **Figura 5.3** ilustra os gráficos para a verificação da existência de interação entre os fatores envolvidos no estudo.

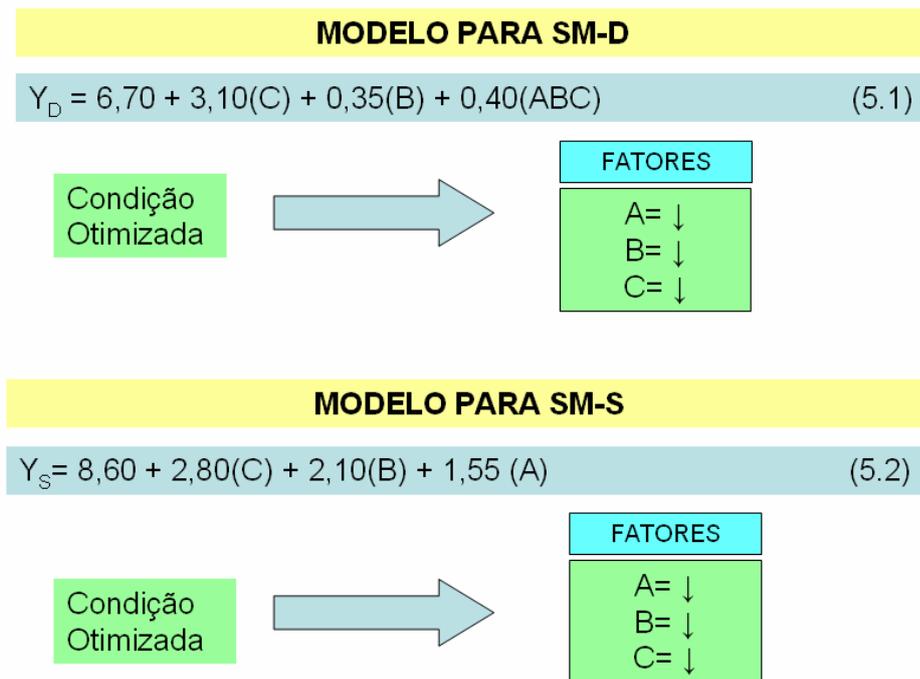


**Figura 5.3** – Gráficos para verificação de interação entre os fatores envolvidos.

Através da análise dos gráficos para o SM-D é possível notar que o grau de interação existente entre os fatores constante de integração “ $\Delta T$ ” e “Transdutor” bem como constante de integração “ $\Delta T$ ” e “Avanço” é realmente baixo, uma vez que as retas ligando os valores médios das profundidades das marcas medidas ( $a_{e,m}$ ), nos dois níveis variados, são praticamente paralelas entre si. Já quando se observa a combinação entre os fatores “Avanço” e “Transdutor”, pode-se afirmar que existe uma interação entre os mesmos, devido à diferença verificada nas inclinações das retas. No entanto, avaliando-se o p-valor associado com esta interação (**Tabela 5.1**), pode-se admitir que a mesma deva ser desprezada. Dessa forma, a observação adicional da **Figura 5.2** conduz à interpretação de que os níveis dos fatores constante de integração “ $\Delta T$ ” e “Transdutor” não apresentam influência significativa no reconhecimento de contato para este SM.

Para o SM-S, os gráficos demonstram que nenhuma interação significativa entre os fatores pode vir a influenciar os resultados. Desta forma, é possível afirmar que a utilização dos 3 fatores em seus níveis de “baixa” conduz às menores profundidades médias, caracterizando-se pela condição otimizada para a detecção de contato entre rebolo-CP.

Reunindo-se as informações obtidas com a Análise Fatorial, foi possível elaborar um modelo generalizado através do qual se determinou a condição otimizada para os dois SM, levando em consideração as características individuais apresentadas. Como os níveis variados nos fatores “Transdutor” e constante de integração “ $\Delta T$ ”, para o SM-D, não representaram influência direta na obtenção de marcas com baixos valores de profundidade  $a_{e,m}$ , decidiu-se adotar seus níveis nos valores de “baixa”, para que estes coincidissem com aqueles a serem utilizados pelo SM-S. Isto facilitou também a posterior comparação entre os SM, a qual está descrita no **item 5.2.2** deste capítulo. Através dos valores calculados para os coeficientes mostrados nas **Tabelas 5.1 e 5.2**, o reconhecimento de contato otimizado entre rebolo-CP pode ser representado conforme as **Equações 5.1 e 5.2** na **Figura 5.4**.



**Figura 5.4** – Equações gerais para o reconhecimento de contato otimizado. (A = constante de integração “ $\Delta T$ ”, B = “Transdutor” e C = “Avanço”).

Na **Figura 5.4**,  $Y_D$  representa a profundidade média das marcas decorrentes do evento de contato rebolo-CP, utilizando-se o SM-D enquanto  $Y_S$  designa a profundidade média das marcas ao se utilizar o SM-S. As letras A, B e C representam os fatores constante de integração “ $\Delta T$ ”, “Transdutor” e “Avanço”, respectivamente.

Os coeficientes dos fatores C, B, e ABC na **Equação 5.1** e os coeficientes A, B, e C, da **Equação 5.2**, representam os valores de seus respectivos efeitos/2 e as constantes de 6,7 e 8,6 consistem nos valores médios de todas as 48 marcas obtidas após a realização dos ensaios para os SM-D e SM-S, respectivamente. Pela análise das **Equações 5.1** e **5.2** confirma-se que a melhor situação para o reconhecimento do contato entre rebolo-CP, em ambos os SM, conduz à seleção dos fatores A, B, e C em seus níveis de baixa (↓), ou seja, A= 10 ms, B= Transdutor de base magnética, e C= 3 mm/min, respectivamente. Apesar desta análise demonstrar que a profundidade média das marcas obtidas foi menor quando se utilizou o SM-D, foi necessário proceder um estudo adicional para a comprovação de qual SM apresenta a melhor eficiência para o reconhecimento do contato entre rebolo-CP.

No transcorrer das medições das profundidades das marcas foi constatado que, na condição otimizada proposta pelas **Equações 5.1 e 5.2**, o SM-S apresentou um valor médio de profundidade das marcas menor que aquele obtido com a utilização do SM-D. Isso contribuiu para que um estudo adicional fosse implementado para auxiliar nas conclusões finais a respeito da eficiência dos SM com relação ao reconhecimento de contato entre rebolo-CP.

## 5.2 Verificação do Desempenho dos Sistemas de Monitoramento (SM) na Condição Otimizada

A partir das medições das marcas impressas no CP, decorrentes da variação decrescente de valores de avanço  $v_{fr2}$ , foi possível obter uma informação do desempenho individual dos SM com relação ao reconhecimento de contato. A **Tabela 5.3** ilustra os valores das profundidades das marcas obtidas por medição  $a_{e,m}$ , para cada valor de avanço de mergulho  $v_{fr2}$ , utilizado. A variação decrescente dos valores de avanço  $v_{fr2}$ , foi realizada adotando-se os valores propostos pela condição otimizada (**Figura 5.4**) para os fatores “Transdutor” e “Filtro”.

**Tabela 5.3** – Profundidades das marcas obtidas por medição  $a_{e,m}$ , para valores decrescentes de avanço  $v_{fr2}$ , na condição otimizada.

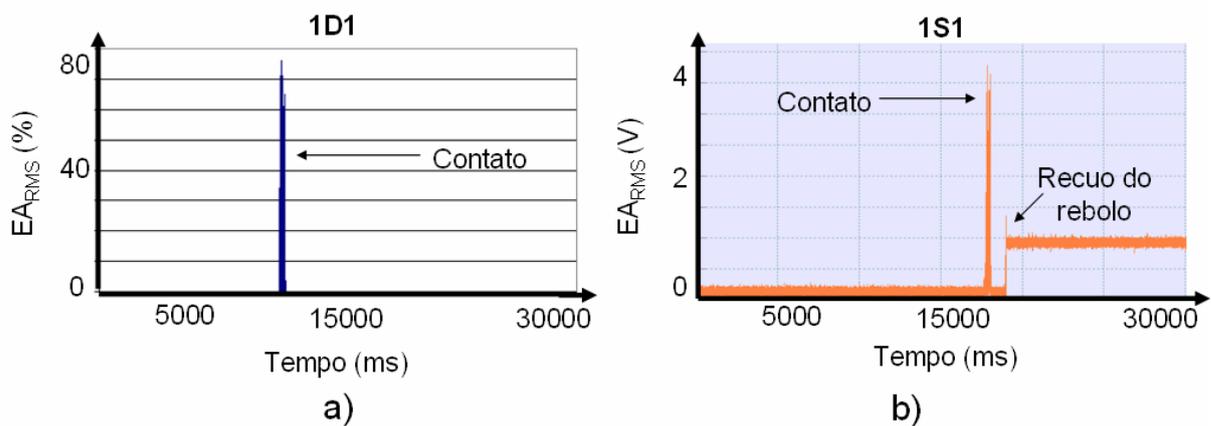
Valores de $a_{e,m}$ obtidos para diferentes valores de $v_{fr2}$										
$v_{fr2}$ (mm/min)	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1
SM	S	D	S	D	S	D	S	D	S	D
$a_{e,m}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,83	1,77	0,52	1,31	0,22	0,44	0,13	0,22	0,13	0,09

Para valores maiores de avanço o SM-S apresentou melhores resultados verificados pelas menores marcas após o reconhecimento do contato entre rebolo-peça. Apenas para o valor de avanço igual a 0,1 mm/min o SM-D demonstrou melhor desempenho.

### 5.2.1 Análise dos sinais de $EA_{RMS}$ decorrentes do evento de contato

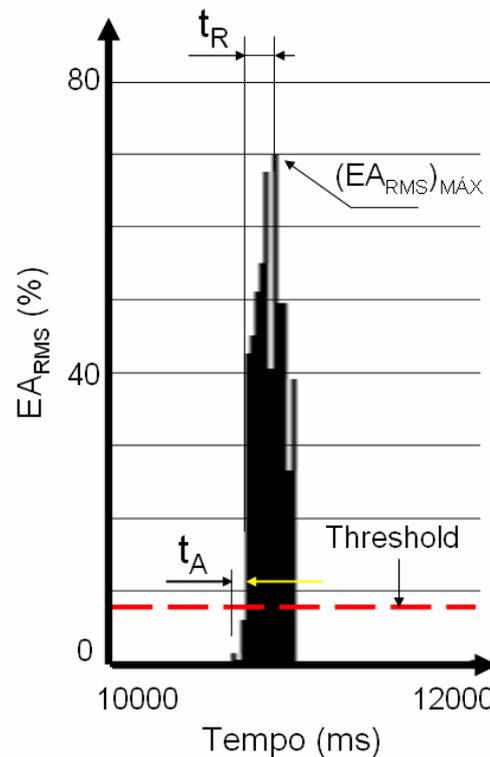
Durante a etapa de verificação do desempenho dos sistemas de monitoramento (SM), na condição otimizada, os sinais de  $EA_{RMS}$  decorrentes do evento de contato entre rebolo e corpo de prova (CP) foram amostrados e gravados, conforme comentado no **item 3.11** do trabalho.

Quando se observam os sinais oriundos do contato entre rebolo-CP, com a utilização do SM-D (**Figura 5.5-a**) e SM-S (**Figura. 5.5-b**), algumas características importantes podem ser extraídas. A **Figura 5.5** mostra o sinal de  $EA_{RMS}$  obtido na condição otimizada encontrada para estes SM, após o estudo baseado na Análise Fatorial relatado no **tópico 5.1**.



**Figura 5.5** – Sinais de  $EA_{RMS}$  de contato na condição otimizada. a) Sinal com SM-D. b) Sinal com SM-S.

A ordenada dos gráficos da **Figura 5.5** corresponde à energia do sinal de  $EA_{RMS}$ . No SM-D se verifica apenas o pico de sinal referente ao contato entre rebolo e CP. Para o SM-S verifica-se o contato e um pico de sinal complementar que é relacionado ao início do avanço de recuo do cabeçote porta-rebolo,  $v_{fr3} = 600$  mm/min. A amplificação do sinal de  $EA_{RMS}$  durante o contato, adquirido com o SM-D, é evidenciada na **Figura 5.6**.



**Figura 5.6** - Sinal de contato 1D1 amplificado.

Esta figura mostra que o tempo transcorrido entre o instante do primeiro contato e o instante em que o sinal de emissão acústica ultrapassa o limite estático ajustado no SM é muito menor do que o tempo associado ao parâmetro  $t_R$ . Para o caso específico deste sinal,  $t_A = 4$  ms e  $t_R = 228$  ms. Durante o tempo  $t_A$ , a velocidade de avanço do rebolo é a velocidade de avanço programada. A partir do instante de ultrapassagem do limite estático pelo sinal de emissão acústica, o SM comanda a parada do eixo de avanço do rebolo. Até a parada total do rebolo, identificado pelo pico máximo de emissão acústica  $(EA_{RMS})_{MÁX}$ , transcorre um tempo  $t_R = 228$  ms. Supondo-se que a velocidade de avanço de mergulho do rebolo  $v_{fr2}$ , é uniformemente desacelerada durante o intervalo de tempo  $t_R$ , pode-se admitir que a velocidade de avanço média do rebolo é igual à metade da velocidade de avanço  $v_{fr2}$  programada para a aproximação do rebolo ao CP. De maneira análoga, pode-se admitir que o deslocamento do rebolo durante esta desaceleração corresponde numericamente à área no gráfico  $v \times t$  (para movimento uniformemente variado). Para o caso dos sinais de EA associados com os ensaios 1D1 e 1D2, a profundidade da marca da penetração passiva  $a_{e.SINAL}$ , baseada nos sinais de  $EA_{RMS}$ , pôde ser estimada da seguinte forma:

Tempo de aproximação, $t_A$ :	$t_{A,1D1} = 4 \text{ ms}$	$t_{A,1D2} = 2 \text{ ms}$
Tempo de reação, $t_R$ :	$t_{R,1D1} = 228 \text{ ms}$	$t_{R,1D2} = 236 \text{ ms}$
Velocidade de avanço, $v_{fr2}$ :	$v_{fr2} = 3 \text{ mm/min} = 50 \text{ } \mu\text{m/s}$	

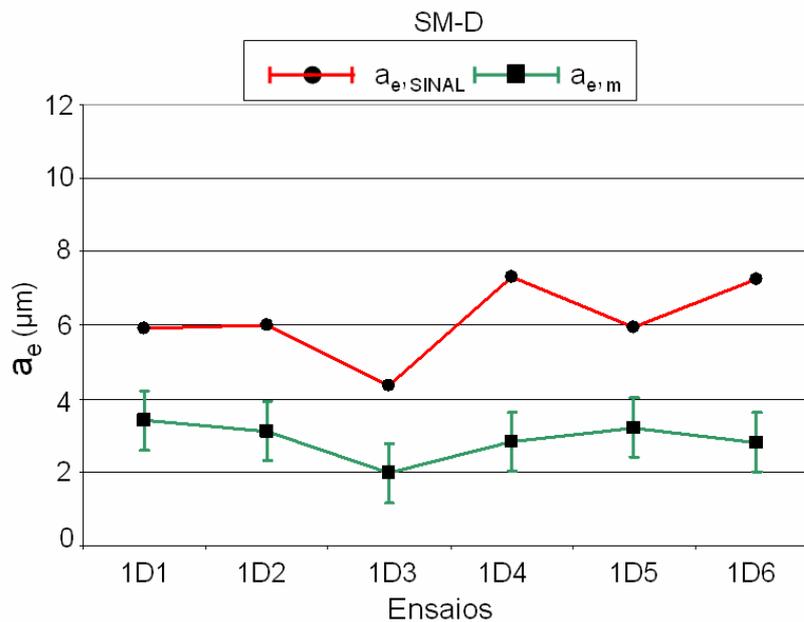
A penetração de contato estimada pelo sinal de  $EA_{RMS}$  ( $a_{e,SINAL}$ ) corresponde ao tempo durante o qual é reconhecido um sinal de  $EA_{RMS}$  e pode ser calculada por:

$$a_{e,SINAL} = t_A \cdot v_{fr2} + (t_R \cdot v_{fr2}) / 2 \quad (5.3)$$

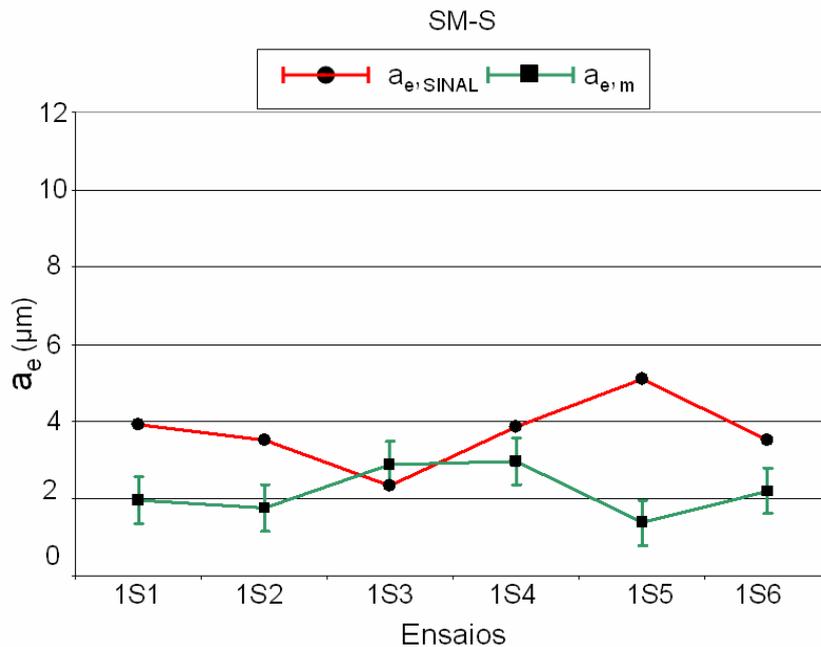
Exemplificando:

$$(a_e)_{1D1} = 4 \cdot 50 + 228 \cdot 25 = 5,95 \text{ } \mu\text{m}$$

As **Figuras 5.7 e 5.8** mostram o comportamento das profundidades das marcas medidas ( $a_{e,m}$ ) e calculadas ( $a_{e,SINAL}$ ) para os dois sistemas de monitoramento.



**Figura 5.7** – Valores obtidos para  $a_{e,SINAL}$  com a utilização do SM-D.



**Figura 5.8** – Valores obtidos para  $a_{e,SINAL}$  com a utilização do SM-S.

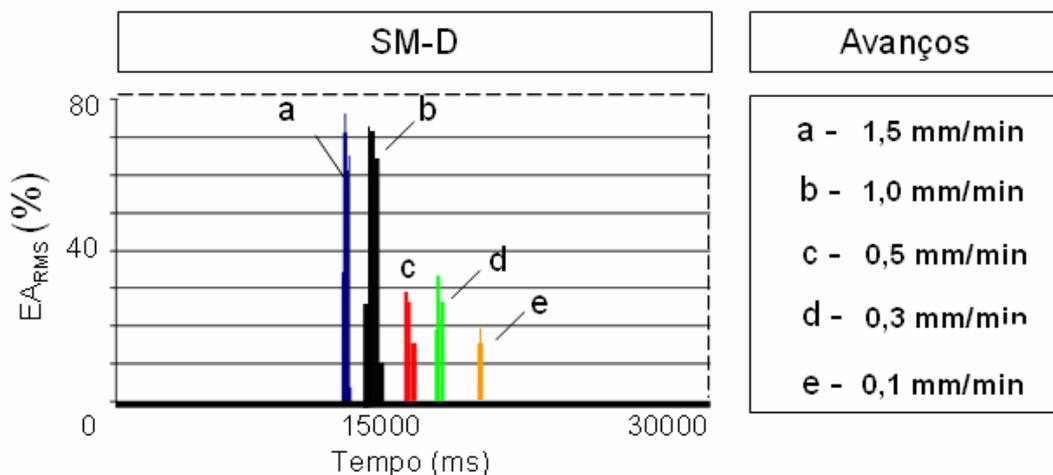
Através da observação dos valores da penetração calculada e medida, mostrados nas **Figuras 5.7 e 5.8** é possível perceber que os valores de  $a_{e,SINAL}$  são levemente maiores que  $a_{e,m}$  para a maior parte das repetições efetuadas nos ensaios. Apenas para a repetição 1S3 este comportamento não foi observado. Os valores maiores verificados de  $a_{e,SINAL}$  fazem sentido, uma vez que durante o tempo em que se tem um sinal de EA, não necessariamente ocorre a remoção de material. No início do contato as deformações elásticas do sistema (rebolo, peça, máquina-ferramenta) aumentam, até que surjam deformações plásticas (inicialmente não associadas à formação de cavaco) e só depois se inicia a formação de cavacos. Após a parada e inversão do avanço, o contato entre rebolo e peça continua a existir até que todas as deformações elásticas do sistema tenham sido relaxadas.

Os cálculos demonstraram que os valores médios da profundidade das marcas  $a_{e,SINAL}$ , obtidos para os 6 sinais de  $EA_{RMS}$  na condição otimizada, foram aproximadamente duas vezes maiores que os valores médios das marcas  $a_{e,m}$  no CP, obtidas através da medição, **Figura 5.7**.

Ao se realizar a mesma análise para o SM-S, verificou-se que os valores de  $a_{e,SINAL}$  demonstraram ser significativamente menores que os obtidos para o SM-D, resultando em valores médios na ordem de  $3,7 \mu m$ , bem como em menores valores da relação  $a_{e,SINAL}/a_{e,m}$ . Os resultados indicaram uma melhor eficiência por parte do

SM-S no reconhecimento do contato entre rebolo-CP. Além disso, a variabilidade dos valores de  $a_{e,SINAL}$  demonstrou ser menor para este sistema nos cálculos envolvidos, conduzindo a valores de  $s_{SINAL,S} = 0,88 \mu\text{m}$  contra  $s_{SINAL,D} = 1,08 \mu\text{m}$ .

Da mesma forma como foi realizado para os ensaios de contato na condição otimizada, foi efetuada uma análise dos sinais de  $EA_{RMS}$  no contato entre rebolo e CP obtidos com uma redução do avanço  $v_{fr2}$ . A **Figura 5.9** ilustra os sinais de  $EA_{RMS}$  obtidos no contato entre rebolo-CP empregando o SM-D.

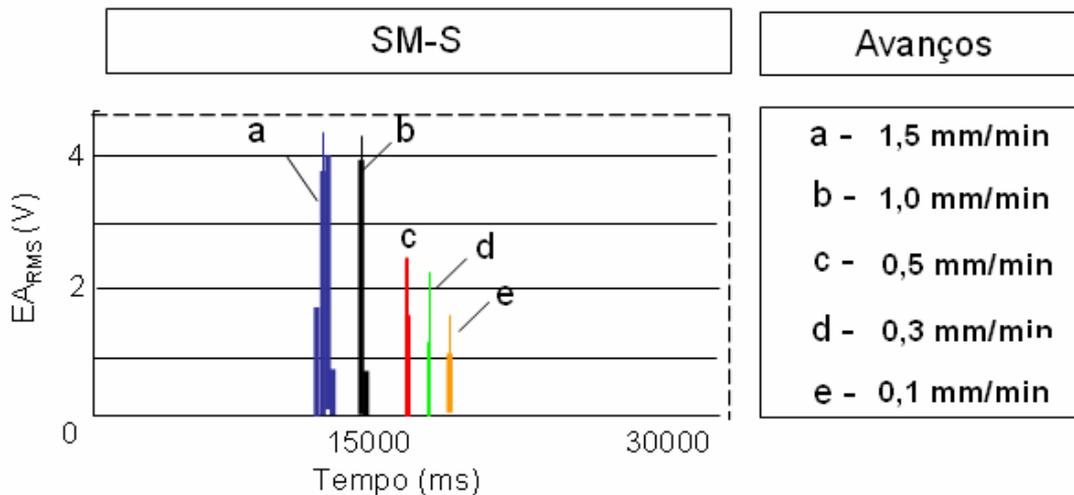


**Figura 5.9** – Sinais de  $EA_{RMS}$  no contato entre rebolo e CP empregando o SM-D, para valores decrescentes de avanço,  $v_{fr2}$ .

Conforme era de se esperar, a redução dos valores de  $v_{fr2}$  conduziu a sinais de  $EA_{RMS}$  com intensidades gradativamente menores, **Figura 5.9**. A redução de  $v_{fr2} = 1,5 \text{ mm/min}$  para  $v_{fr2} = 1,0 \text{ mm/min}$  praticamente não afetou o sinal de  $EA_{RMS}$ . A redução do avanço para  $v_{fr2} = 0,5 \text{ mm/min}$  resultou num decréscimo de quase 50% na intensidade do sinal inicial. A redução do avanço para  $v_{fr2} = 0,1 \text{ mm/min}$ , leva a um sinal que apenas apresenta uma intensidade da ordem de 25% do sinal obtido para o avanço de  $v_{fr2} = 1,5 \text{ mm/min}$ .

A utilização de valores decrescentes para  $v_{fr2}$  com o SM-S também culminou em uma redução nos níveis de intensidade do sinal de  $EA_{RMS}$ , **Figura 5.10**. De forma semelhante ao verificado anteriormente, a redução de  $v_{fr2} = 1,5 \text{ mm/min}$  para  $v_{fr2} = 1,0 \text{ mm/min}$  não proporcionou uma diminuição apreciável na intensidade do sinal de  $EA_{RMS}$ . A redução para  $v_{fr2} = 0,5 \text{ mm/min}$  culminou numa redução de aproximadamente 50% na intensidade do sinal de  $EA_{RMS}$ , a qual se manteve

praticamente constante mesmo com a redução para  $v_{fr2} = 0,3$  mm/min. A redução para um valor de  $v_{fr2} = 0,1$  mm/min demonstrou um sinal com intensidade da ordem de 50% do sinal obtido para o valor inicial de  $v_{fr2} = 1,5$  mm/min.



**Figura 5.10** – Sinais de  $EA_{RMS}$  no contato entre rebolo e CP empregando o SM-S, para valores decrescentes de avanço,  $v_{fr2}$ .

Procedendo-se as mesmas análises e hipóteses descritas anteriormente, foi possível estimar os valores das profundidades das marcas decorrentes do contato entre rebolo-CP através da análise do sinal ( $a_{e,SINAL}$ ), e compará-las com os valores obtidos pelo método de medição, ( $a_{e,m}$ ). A **Tabela 5.4** demonstra os resultados alcançados com a utilização do SM-D.

**Tabela 5.4** – Valores de  $a_{e,SINAL}$  com a utilização do SM-D, para valores de decrescentes de  $v_{fr2}$ .

SM-D								
Ensaio	$v_{fr2}$ (mm/min)	$v_{fr2}$ ( $\mu$ m/s)	$t_0$ (ms)	$t_A$ (ms)	$t_R$ (ms)	$a_{e,SINAL}$ ( $\mu$ m)	$a_{e,m}$ ( $\mu$ m)	$a_{e,SINAL}/a_{e,m}$
D'	1,5	25	11328	11330	11446	1,5	1,77	0,84
D''	1,0	16,667	13400	13404	13632	1,96	1,3	1,52
D'''	0,5	8,33	18366	18368	18652	1,20	0,43	2,79
D <sup>IV</sup>	0,3	5	19270	19272	19494	0,56	0,22	2,57
D <sup>V</sup>	0,1	1,667	17754	17756	17872	0,10	0,09	1,11

A análise do sinal de  $EA_{RMS}$  relativa ao ensaio D'' resultou em um valor inesperado, já que com a redução do valor de  $v_{fr2}$  esperava-se também uma redução do valor da profundidade da marca calculada pelo sinal,  $a_{e,SINAL}$ . Como a variação de  $v_{fr2}$  entre os valores  $v_{fr2}= 1,5$  mm/min e  $v_{fr2}=1,0$  mm/min não apresentou uma diferença considerável na intensidade verificada no sinal de  $EA_{RMS}$  (ver **Figura 5.9**), este valor inesperado de  $a_{e,SINAL}$  pode ser justificado pela própria variabilidade encontrada durante os cálculos de  $a_{e,SINAL}$  com o SM-D.

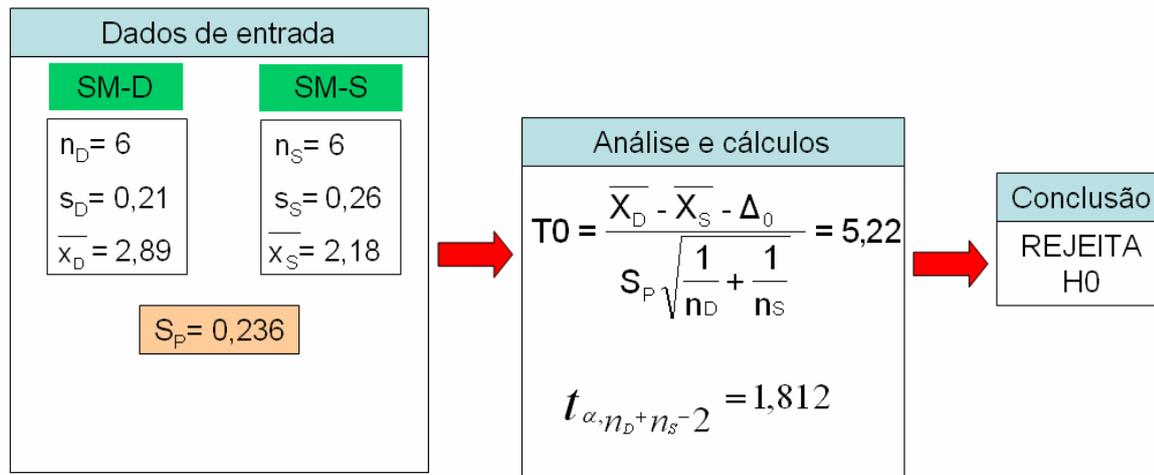
A **Tabela 5.5** ilustra os resultados alcançados ao se utilizar o SM-S. Com a variação do avanço de mergulho entre  $v_{fr2}= 0,5$  mm/min e  $0,3$  mm/min, obteve-se um valor inesperado de  $a_{e,SINAL}$ , o qual se apresentou exageradamente elevado. Este comportamento pode ser considerado como um resultado espúrio, e pode ter sido ocasionado pela variação inesperada do sinal de  $EA_{RMS}$ .

**Tabela 5.5** – Valores de  $a_{e,SINAL}$  com a utilização do SM-S, para valores decrescentes de  $v_{fr2}$ .

SM-S								
Ensaio	$v_{fr2}$ (mm/min)	$v_{fr2}$ ( $\mu$ m/min)	$t_0$ (ms)	$t_A$ (ms)	$t_R$ (ms)	$a_{e,SINAL}$ ( $\mu$ m)	$a_{e,m}$ ( $\mu$ m)	$a_{e,SINAL}/a_{e,m}$
<b>S'</b>	1,5	25	13648	13663	13835	2,53	0,82	3,07
<b>S''</b>	1,0	16,667	17603	17618	17853	2,21	0,52	4,24
<b>S'''</b>	0,5	8,33	29044	29060	29341	1,30	0,21	6,20
<b>S<sup>IV</sup></b>	0,3	5	35919	35935	36607	<b>1,76</b>	0,13	13,53
<b>S<sup>V</sup></b>	0,1	1,667	10427	10443	11178	0,64	0,129	4,96

### 5.2.2 Comparação do desempenho dos SM utilizados com relação ao reconhecimento de contato

Os resultados obtidos na seção 5.2 não indicaram nenhuma diferença evidente com relação à eficiência dos SM no reconhecimento de contato. Em decorrência disto foi necessário proceder um teste de hipóteses (Teste T) que levasse em consideração a diferença entre as médias das marcas obtidas com a utilização de cada SM nas condições otimizadas para o reconhecimento de contato. A **Figura 5.11** destaca os principais parâmetros estatísticos calculados empregados para as conclusões finais a respeito da eficiência apresentada pelos SM em estudo.



**Figura 5.11** - Parâmetros estatísticos utilizados para o Teste de Hipóteses.

Para as 6 repetições com cada um dos SM, obtém-se o desvio-padrão  $s$ , o valor médio  $\bar{x}$ , bem como o desvio-padrão combinado  $S_p$ . Como o valor calculado da estatística de teste  $T_0$ , é maior que o coeficiente de Student para  $\alpha = 0,05$  (nível de significância) e  $v = 10$  graus de liberdade logo, deve-se rejeitar a hipótese que os dois sistemas sejam semelhantes na eficiência do reconhecimento de contato, isto é,  $H_0$  ( $H_0: \mu_D - \mu_S = 0$ ) e considerar como válida a hipótese de que o SM-S é mais adequado que o SM-D ( $H_1: \mu_D - \mu_S > 0$ ) [60]. Desta forma, a diferença notada entre os valores médios das profundidades das marcas ( $\bar{x}_D - \bar{x}_S$ ) representa realmente uma diferença significativa em termos estatísticos. Através deste teste pode-se afirmar com um nível de significância de 0,05 que o SM-S apresenta melhor eficiência no reconhecimento de contato entre rebolo-CP, uma vez que conduz a marcas menos profundas durante o reconhecimento do contato, quando utilizado na condição otimizada proposta anteriormente. Este fato também foi reforçado pelos valores de  $a_{e,SINAL}$  descritos na seção 5.2.1, envolvendo um estudo dos sinais de  $EA_{RMS}$  decorrentes do evento de contato.

### 5.3 Determinação da Posição Centralizada entre Rebolo e CP (ZEROY<sub>MANUAL</sub>)

Nos ensaios de centralização entre rebolo-CP através do procedimento manual (ZEROY<sub>MANUAL</sub>) o operador manteve o procedimento adotado corriqueiramente na fabricação de brochas, conforme descrito no parágrafo 4.4.1. Para posicionamentos relativos entre rebolo-CP de  $\lambda = 18^\circ$ , o operador necessita realizar de 4 a 5 marcas

no CP até conseguir uma marca losangular com boa simetria. Para  $\lambda = -60^\circ$  este resultado é conseguido com aproximadamente 8 marcas no CP, demandando assim uma maior área disponível na superfície do CP, e um maior desgaste de quina no perfil do rebolo. Na produção de uma brocha, após a usinagem de uma estria, a brocha é encaminhada à metrologia e se efetua a verificação da centralização da estria em relação ao eixo da brocha. A posição só então é possível de ser corrigida.

Ao se utilizar um rebolo com perfil de raio côncavo (na parte circunferencial do rebolo) correspondente ao diâmetro do núcleo da brocha, verificou-se que no menor posicionamento angular ( $\lambda = 18^\circ$ ) a qualidade da centralização é melhor que aquela verificada para ângulos maiores ( $\lambda = 60^\circ$ ), uma vez que para  $\lambda = 18^\circ$  a repetibilidade das coordenadas da centralização é da ordem de  $s_{\text{MANUAL}} = 0,06$  mm enquanto para  $\lambda = -60^\circ$  as cotas do posicionamento centralizado variam na ordem de  $s_{\text{MANUAL}} = 0,3$  mm. As inclinações relativas de  $\lambda = 18^\circ$  demandam menos tempo para a determinação de uma posição centralizada entre rebolo-CP. Em média, para  $\lambda = 18^\circ$ , este tempo se situa na faixa de  $t_{\text{MANUAL}} \approx 5$  min. Ao se utilizar um posicionamento relativo de  $\lambda = -60^\circ$ , o tempo necessário aumentou consideravelmente para  $t_{\text{MANUAL}} \approx 20$  min.

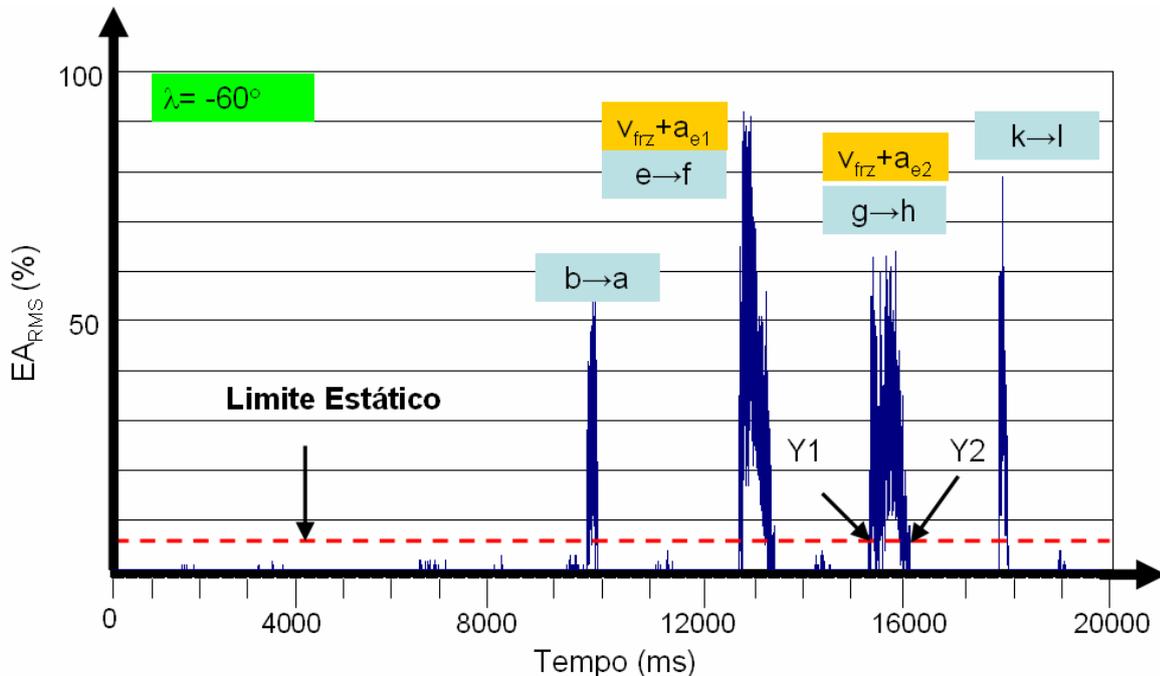
#### 5.4 Determinação da Posição Centralizada entre Rebolo-CP (ZEROY<sub>AUTO</sub>)

Nos ensaios realizados com a estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>, os sinais de  $EA_{\text{RMS}}$  decorrentes das interferências entre rebolo-CP foram adquiridos e armazenados em um computador, para uma análise posterior, depois de serem processados pelo *software* do SM-D. Este procedimento foi adotado nos ensaios envolvendo os rebolos com perfil trapezoidal e com perfil de raio côncavo.

Os sinais de  $EA_{\text{RMS}}$  apresentaram um comportamento característico. A **Figura 5.12** mostra o comportamento dos sinais de  $EA_{\text{RMS}}$  para o ensaio empregando o rebolo com perfil trapezoidal e uma inclinação relativa  $\lambda = -60^\circ$  (antihorário). A figura mostra os sinais de  $EA_{\text{RMS}}$  representativos de cada etapa de movimentação do rebolo com a estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>.

O primeiro pico ( $b \rightarrow a$ ) representa o reconhecimento de contato entre rebolo-CP quando o rebolo se desloca em direção ao CP sobre o eixo-Z. O movimento é parado automaticamente após o reconhecimento do contato pelo SM-D. As

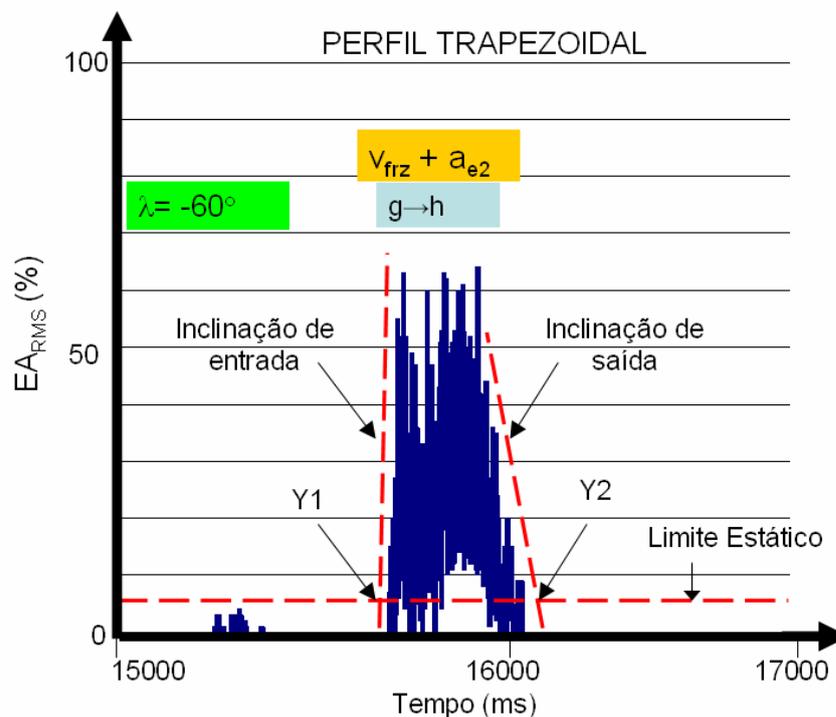
coordenadas desta posição, armazenadas no comando CNC da máquina, servem de referência para os incrementos subsequentes, ( $a_{e1}$  e  $a_{e2}$ ) para os percursos transversais do rebolo na estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>.



**Figura 5.12** – Sinais de EA<sub>RMS</sub> característicos durante utilização da estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>. Rebolo com perfil trapezoidal. Condição Experimental “ac”.

O segundo pico está associado ao movimento de deslocamento transversal do rebolo sobre o CP (movimentação de  $e \rightarrow f$ ), enquanto o terceiro pico representa a interferência do rebolo com o CP no percurso do rebolo no sentido de  $g \rightarrow h$ . Durante este movimento são armazenadas as coordenadas dos pontos de início (Y1) e de fim de contato (Y2) entre rebolo e CP. O pico  $k \rightarrow l$  é obtido pelo mergulho do rebolo contra o CP sobre o eixo-Z na posição centralizada entre as coordenadas dos pontos Y1 e Y2, obtidos na etapa de movimentação anterior.

Ampliando a base de tempo do sinal de EA<sub>RMS</sub> obtido no segundo percurso transversal (movimento  $g \rightarrow h$ ), verifica-se que as derivadas no tempo do sinal de EA<sub>RMS</sub> associado ao início (*spark-in*) e ao fim de contato (*spark-out*) do rebolo apresentam valores diferenciados, conforme destacado pelas linhas tracejadas na **Figura 5.13**.



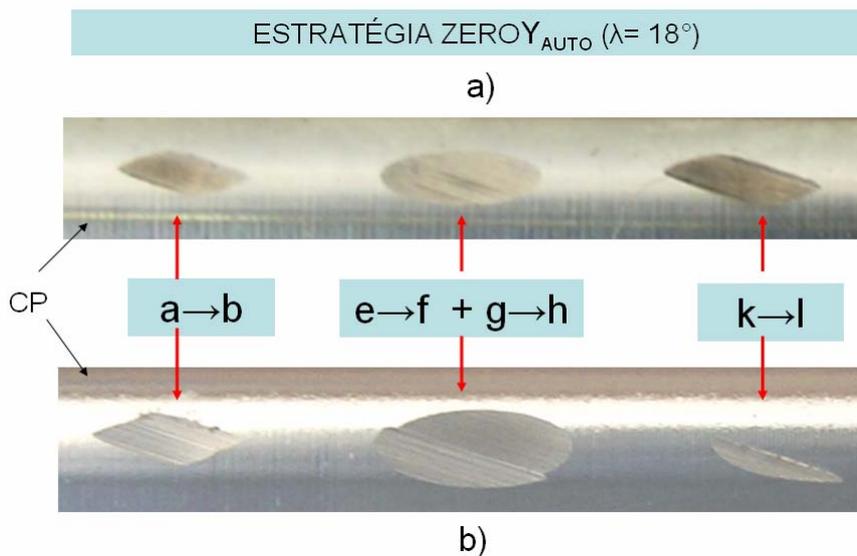
**Figura 5.13** – Sinal de  $EA_{RMS}$  característico durante deslocamento de  $g \rightarrow h$  na estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ . Rebolo com perfil trapezoidal. Condição experimental “ac”.

A diferença verificada no valor das derivadas é explicada pela taxa de retificação de material distinta no início e no final de contato entre rebolo-CP. Durante o movimento transversal do rebolo em relação ao CP ( $g \rightarrow h$ ), a taxa de retificação é crescente e o sinal aumenta bruscamente, atingindo o máximo quando a quina de entrada do rebolo atinge a penetração máxima  $a_{e2}$ . A partir deste instante, a taxa de retificação permanece constante até que a quina de entrada do rebolo atinge a região do CP onde a penetração de trabalho decresce até “0”. A partir deste ponto, o contato da região paralela com 1 mm de largura do rebolo continua gerando um sinal de  $EA_{RMS}$ . O fim do contato do rebolo se dá quando a quina de saída do rebolo atinge o final da marca e todas as deformações elásticas armazenadas no sistema (rebolo, peça, máquina-ferramenta) tiverem sido relaxadas.

Para as condições experimentais (1, a, b, ...,abcd), foi verificada uma correlação entre o sinal de  $EA_{RMS}$  gerado e o valor obtido da posição centralizada entre rebolo-CP. Para as situações experimentais em que se alcançaram os melhores valores de posicionamento (e menores dispersões), a diferença verificada entre as inclinações de entrada e saída (*spark-in* e *spark-out*) foram reduzidas, em comparação com

aquelas associadas a posicionamentos centralizados não adequados (em relação ao valor encontrado por  $ZEROY_{MANUAL}$ ).

O último pico na **Figura 5.12** está associado com o avanço de mergulho do rebolo ao longo do eixo-Z e a paralisação instantânea do movimento de avanço  $v_{fiz}$ . Esta movimentação também gera uma marca na superfície do CP. As marcas impressas neste estágio de movimentação do rebolo puderam ser reconhecidas visualmente e foram comparadas com a marca centralizada obtida com a estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$ , permitindo-se ter uma noção da funcionalidade da estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ . A **Figura 5.14** mostra amplificadamente as marcas impressas após as interferências entre rebolo-CP nos estágios de movimentação com a estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ .

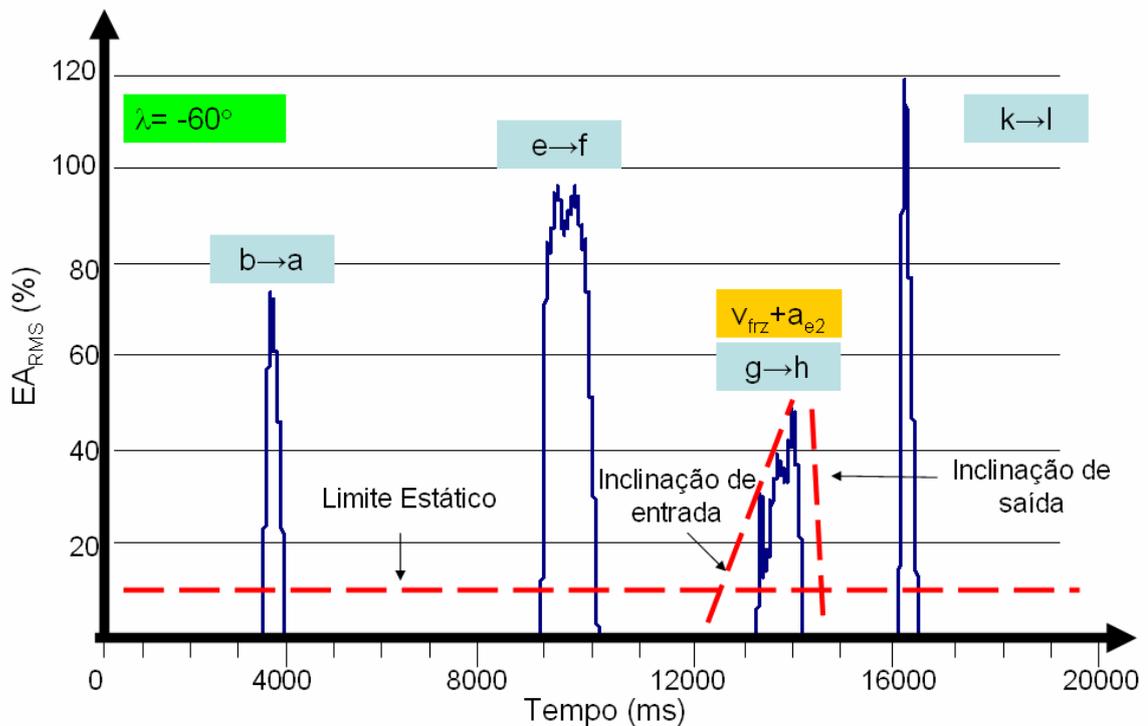


**Figura 5.14** – Marcas impressas com estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ . a) Marca centralizada no eixo-Y, após movimento  $k \rightarrow l$ . b) Marca fora de centro após movimento  $k \rightarrow l$ .

A estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  também foi verificada para o rebolo com perfil de raio côncavo ( $R = 10$  mm) e um posicionamento relativo angular de  $\lambda = -60^\circ$ , **Figura 5.15**.

Os sinais obtidos nestes ensaios foram distintos aos obtidos com o rebolo trapezoidal. A característica menos “áspera” (*smoothing*) do sinal (quando comparado ao sinal de  $EA_{RMS}$  com o rebolo trapezoidal) se deve à utilização de um valor maior da constante de integração,  $\Delta T = 333,33$  ms. Para esta constante obtiveram-se sinais mais regulares a qual apresentou os melhores resultados em

termos da captação dos sinais de  $EA_{RMS}$  durante a movimentação do rebolo sobre o CP.



**Figura 5.15** - Sinais de  $EA_{RMS}$  característicos durante utilização da estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ . Rebolo com perfil módulo.

As condições de contato no deslocamento transversal entre a quina de entrada do rebolo e o CP são semelhantes ao que acontece com o rebolo de perfil trapezoidal. Ao se deslocar sobre o CP, diferentemente do rebolo trapezoidal, para o rebolo com perfil de raio côncavo o contato entre rebolo e CP se restringe à quina. Depois de completar um percurso transversal equivalente à espessura do rebolo, a segunda quina começa a entrar em contato com o CP, gerando um pequeno incremento no sinal de  $EA_{RMS}$ . Quando a primeira quina sai do contato com o CP, o sinal gerado pelo contato entre o CP e a segunda quina pode ser inferior ao limite estático (*threshold*), ajustado no SM-D. O sistema interpreta esta condição como fim do contato e armazena a coordenada deste ponto. Nesta situação a posição centralizada calculada entre as coordenadas do primeiro e último contato apresenta desvios da ordem de grandeza da metade da espessura do rebolo. Para a comparação com os resultados obtidos na estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$  estas discrepâncias foram verificadas sistematicamente. Embora o erro se repita, as

flutuações do resultado sugerem que não é adequado empregar um rebolo com perfil côncavo na periferia.

### 5.5 Otimização da Estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub> (Etapa 1 dos Ensaios na Empresa Parceira)

A estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub> foi avaliada em três ensaios para cada uma das 16 combinações propostas na **Tabela 4.3**. Para a primeira bateria de ensaios o rebolo foi dressado com um perfil trapezoidal. Todos os ensaios desta bateria foram realizados sem dressamentos intermediários. A **Tabela 5.6** apresenta as coordenadas das posições centralizadas obtidas em cada um dos 48 ensaios, bem como os valores médios e os desvios-padrões das coordenadas obtidas com a estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub> no posicionamento relativo  $\lambda = -60^\circ$ .

**Tabela 5.6** – Coordenadas das posições centralizadas para todas as combinações dos fatores com o SM-D para um posicionamento  $\lambda = -60^\circ$ .

Ensaio (Nomenclatura)	Repetições			ZEROY <sub>AUTO</sub>	ZEROY <sub>AUTO</sub>
	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	Média (mm)	Desv. Pad.(mm)
1	180,629	180,806	180,804	180,746	0,083
a	180,395	180,645	180,724	180,588	0,172
b	180,565	180,312	180,423	180,433	0,127
c	181,241	181,37	181,338	181,316	0,067
d	180,833	180,937	180,743	180,837	0,097
ab	180,226	180,245	180,245	180,238	0,011
ac	180,547	180,676	180,93	180,717	0,194
ad	180,607	180,19	180,659	180,485	0,257
bc	180,624	180,978	181,008	180,874	0,214
bd	180,659	180,358	180,451	180,489	0,154
cd	181,126	181,541	181,429	181,365	0,215
abc	180,543	180,092	180,143	180,259	0,247
abd	180,496	180,201	180,054	180,250	0,225
bcd	180,541	180,684	180,889	180,704	0,175
Adc	180,694	181,303	181,482	181,159	0,413
Abcd	180,209	180,215	180,139	180,187	0,042
Valor médio de ZEROY <sub>MANUAL</sub> = 180,234 ( $\lambda = -60$ )					

O ensaio designado como “1” representa a condição experimental em que os 4 fatores citados encontram-se nos níveis baixos ( $\downarrow$ ). Na seqüência, as letras

designam a seleção do nível alto dos respectivos fatores, permanecendo os demais em nível baixo. Assim, o ensaio designado por “abcd” representa a condição experimental em que os níveis dos 4 fatores foram selecionados como “alto” ( $\uparrow$ ).

Os resultados médios e desvios-padrões das coordenadas em cada um dos ensaios mostram que em apenas 4 combinações os resultados obtidos automaticamente atingiram posições consideradas adequadas pelo operador da máquina. Foi possível identificar quais combinações (entre os níveis dos fatores envolvidos) conduziram a valores médios de  $ZEROY_{AUTO}$  próximos de  $ZEROY_{MANUAL}$ .

Como forma de comprovar a independência destes resultados em relação ao desgaste inerente do rebolo ao longo da primeira bateria de ensaios, o rebolo foi novamente dressado no formato trapezoidal sob as mesmas condições de dressamento efetuadas antes da primeira bateria de ensaios. As 4 condições experimentais destacadas foram repetidas, obtendo-se valores muito próximos daqueles conseguidos na primeira bateria de ensaios para os valores das coordenadas definidas automaticamente pela estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ . Nas repetições das condições experimentais “abcd” e “abd” foram obtidos os mesmos valores obtidos anteriormente. Estes resultados mostram que o desgaste radial do rebolo, e o desgaste das quinas do rebolo, apesar de influenciarem a amplitude do sinal de  $EA_{RMS}$ , tiveram pouca influência nos valores das coordenadas obtidas por “ $ZEROY_{AUTO}$ ”.

Após a realização dos ensaios para  $\lambda = -60^\circ$ , o rebolo com perfil trapezoidal foi novamente dressado e reposicionado para  $\lambda = 18^\circ$ . O operador determinou as coordenadas da posição centralizada para este novo posicionamento angular obtendo um valor médio referencial  $ZEROY_{MANUAL}$ . Para este posicionamento angular foram repetidos os ensaios de centralização automática para a condição experimental “ab”, considerada a mais adequada. O ensaio foi repetido 6 vezes para exprimir maior confiabilidade no resultado, **Tabela 5.7**.

**Tabela 5.7** – Resultados obtidos usando condição “ab” para  $\lambda = 18^\circ$ .

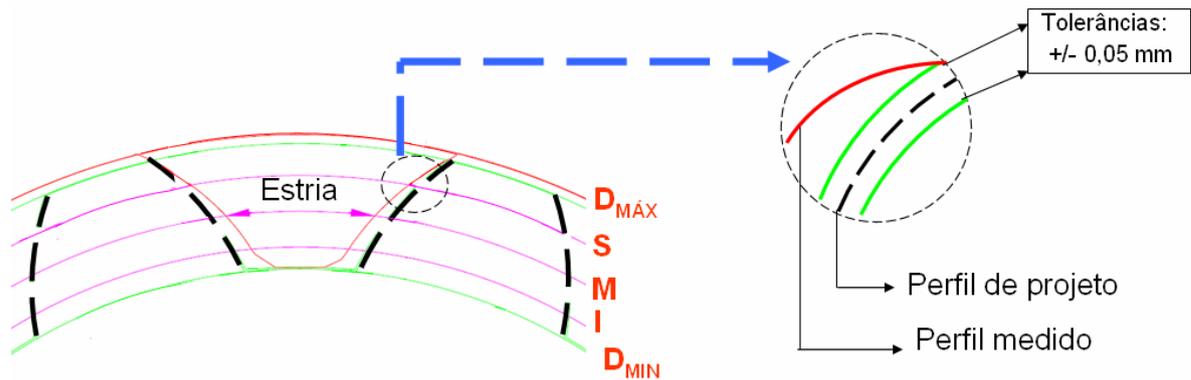
REPETIÇÃO	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)	R6 (mm)	MÉDIA (mm)	$S_{AUTO}$ (mm)
$ZEROY_{AUTO}$	47,949	47,952	48,067	48,066	47,903	47,901	47,973	0,069
$ZEROY_{MANUAL}$	48,122							

Estes resultados mostram que a condição experimental escolhida foi adequada também para a posição relativa de  $\lambda=18^\circ$ , permitindo obter valores de coordenadas com  $ZEROY_{AUTO}$  muito próximos daquele alcançado pela estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$ . A boa repetibilidade dos valores das cotas de centralização obtidas pela estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  mostram a viabilidade de implementação da estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ , para a centralização automática do rebolo em relação ao CP. Para certificar que tanto a estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  como a estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$  garantem uma boa centralização na fabricação de uma estria em uma brocha, foi necessário efetuar-se uma comparação entre os métodos manual e automático através da análise da geometria obtida em uma estria usinada, empregando ambos os métodos de centralização.

### 5.6 Validação das Estratégias $ZEROY_{MANUAL}$ e $ZEROY_{AUTO}$ (Etapa 2 dos Ensaios na Empresa Parceira)

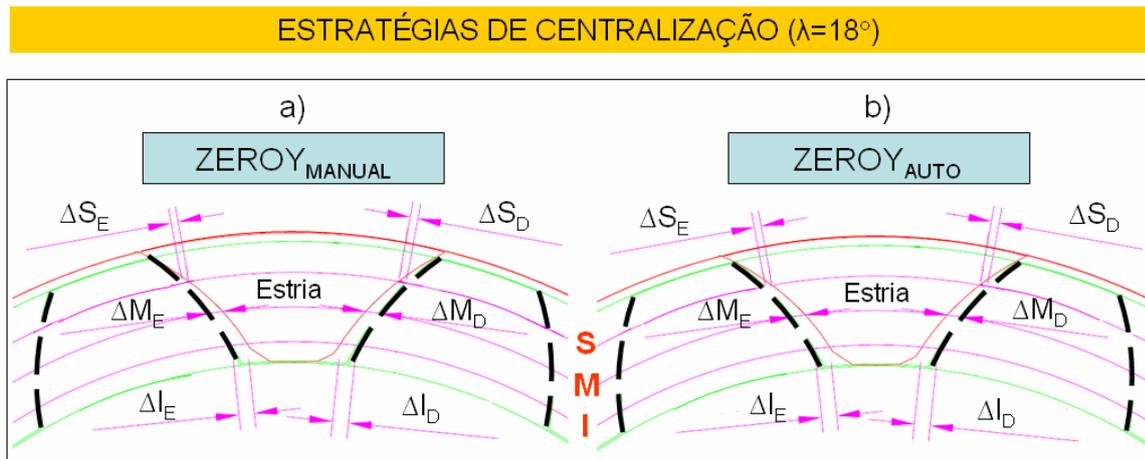
A validação das estratégias utilizadas seguiu um procedimento padrão empregado na empresa parceira para se verificar os desvios existentes entre o perfil de projeto e o perfil medido da estria. Para a estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$  o operador realizou 6 posicionamentos centralizados e empregou o valor médio das cotas verificadas para a usinagem de uma estria. Para a estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ , utilizou-se a condição experimental “ab”, mais adequada, realizando 6 repetições, obtendo-se um valor médio representativo para a usinagem de uma estria. A diferença média entre as cotas da posição centralizada determinada com a estratégia manual ( $ZEROY_{MANUAL} = 54,834$ ) e com a estratégia automatizada ( $ZEROY_{AUTO} = 54,846$ ) é de 0,012 mm, e seus desvios-padrões apresentam-se como sendo  $s_{MANUAL} = 0,06$  mm e  $s_{AUTO} = 0,05$  mm, respectivamente.

O CP com as estrias retificadas foi levado ao laboratório de metrologia e as formas das estrias foram verificadas (medição por *scanning*). Com auxílio de um programa computacional o perfil medido é sobreposto ao perfil de projeto, **Figura 5.16**.



**Figura 5.16** – Perfil medido sobreposto ao perfil de projeto.

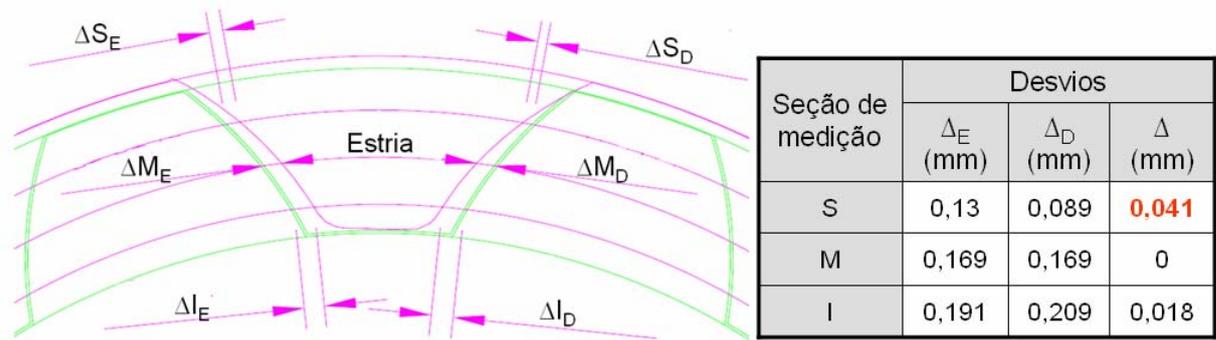
Este programa permite girar um perfil em relação ao outro, possibilitando um posicionamento simétrico do perfil medido em relação ao perfil de projeto. Para um sobreposicionamento simétrico na linha média M, são efetuadas as medições dos afastamentos (desvios) entre o perfil de projeto e o perfil medido nas posições sobre as circunferências inferior (I) e superior (S). Embora o perfil medido esteja distante das tolerâncias do perfil de projeto, o objetivo do presente ensaio é voltado para a verificação da posição centralizada entre rebolo e CP. Conseqüentemente, não foram efetuadas correções no perfil do rebolo que permitissem atingir um perfil dentro das tolerâncias especificadas. A sobreposição do perfil medido e de projeto permite avaliar a centralização entre rebolo-CP a partir da medição dos desvios relativos nas seções superior (S), intermediária (M), e inferior (I). Os desvios correspondem à distância entre o perfil médio de projeto (tracejado) e o perfil medido. A **Figura 5.17** detalha as posições de medição dos perfis de projeto e perfil medido.



**Figura 5.17** – Posições de medição dos desvios entre o perfil de projeto e o perfil medido obtido com a utilização das estratégias.

Observando a **Figura 5.17**, verifica-se que a centralização obtida com a utilização de ambas as estratégias (manual e automática) apresentou bons resultados em termos do posicionamento relativo entre o perfil medido e o perfil designado por projeto.

Para melhor entender o procedimento da comparação entre o perfil de projeto e o perfil medido foi confeccionada uma estria com um desvio proposital de aproximadamente 0,2 mm em relação ao posicionamento centralizado obtido com a estratégia  $ZEROY_{AUTO}$ . A sobreposição do perfil medido ao perfil de projeto, mostra que um deslocamento desta magnitude leva a um desvio relativo significativo entre os dois perfis. Na posição média (M), os desvios à direita ( $\Delta M_D$ ) e à esquerda ( $\Delta M_E$ ) apresentam valores idênticos, pois esta posição foi utilizada como referência para o ajuste dos perfis medido e projetado. Na posição de medição inferior (I) o desvio à esquerda ( $\Delta I_E = 0,191$  mm) e à direita ( $\Delta I_D = 0,209$  mm) representam um deslocamento da linha média de  $\Delta I = 0,018$  mm. Na posição de medição superior (S) os desvios à esquerda ( $\Delta S_E = 0,13$  mm) e à direita ( $\Delta S_D = 0,089$  mm) representam um deslocamento da linha média de ( $\Delta S = 0,041$  mm), **Figura 5.18**. Como observado, o desvio se torna mais significativo a medida que nos afastamos da posição de medição intermediária (M) para a superior (S).



**Figura 5.18** – Desvios relativos entre perfil teórico e perfil medido para estria usinada com valor de centro deslocado de 0,2 mm em relação ao ZEROY<sub>AUTO</sub>.

A **Figura 5.19** compara os valores medidos nas seções, S, M, e I. Os resultados mostram que a usinagem da estria confeccionada com posicionamento centralizado definido pela estratégia ZEROY<sub>MANUAL</sub> resultou em um desvio absoluto da linha média de  $\Delta_{MANUAL} = 0,01$  mm, na seção superior de medição, na mesma ordem de grandeza das tolerâncias exigidas no projeto do referido perfil. Ao se observar o desvio absoluto obtido com a utilização da estratégia ZEROY<sub>AUTO</sub>, verifica-se que esta apresentou um desvio médio de  $\Delta_{AUTO} = 0,003$  mm.

ESTRATÉGIAS DE CENTRALIZAÇÃO ( $\lambda = 18^\circ$ )							
ZEROY <sub>MANUAL</sub>				ZEROY <sub>AUTO</sub>			
Seção de medição	Desvios			Seção de medição	Desvios		
	$\Delta_E$ (mm)	$\Delta_D$ (mm)	$\Delta$ (mm)		$\Delta_E$ (mm)	$\Delta_D$ (mm)	$\Delta$ (mm)
S	0,091	0,101	0,01	S	0,088	0,085	0,003
M	0,168	0,168	0	M	0,162	0,162	0
I	0,201	0,208	0,007	I	0,197	0,204	0,007

**Figura 5.19** – Desvios absolutos  $\Delta$ , para os perfis usinados com ambas as estratégias de centralização.  $\Delta = |\Delta_E - \Delta_D|$



## 6. CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

O monitoramento do processo de retificação através da utilização da tecnologia de emissão acústica (EA) tem sido utilizado recentemente com sucesso em aplicações distintas tanto no ambiente acadêmico como no industrial.

Os estudos realizados no presente trabalho permitem concluir que os sistemas de monitoramento (SM) por EA empregados são adequados para o reconhecimento do primeiro contato entre rebolo-peça. Nos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP)-UFSC as profundidades das marcas obtidas ao longo de todos os ensaios situaram-se em valores médios de 6  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$ , para os SM utilizados. Através de uma estimativa da profundidade das marcas baseada nos sinais de  $EA_{RMS}$  ( $a_{e,SINAL}$ ), percebeu-se que o sistema SM-S foi mais adequado para o reconhecimento de contato, conduzindo a menores valores das marcas impressas sobre a peça e proporcionando um valor de desvio-padrão em torno de  $s_{SINAL,S} = 0,88$   $\mu\text{m}$  contra  $s_{SINAL,D} = 1,08$   $\mu\text{m}$  alcançado com o uso do SM-D. Para próximos trabalhos relacionados a detecção de contato entre rebolo-peça, sugere-se um estudo adicional sobre a influência da constante de integração na característica do sinal e no tempo de resposta dos SM.

Nos trabalhos realizados numa retificadora de ferramentaria o emprego de um SM por EA demonstrou-se adequado para auxiliar no posicionamento relativo do rebolo em relação à peça. Utilizando uma estratégia adequada para a determinação automatizada do posicionamento centralizado entre rebolo-peça ( $ZEROY_{AUTO}$ ) os resultados são satisfatórios na faixa de posicionamento angular nos valores limites verificados ( $\lambda = 18^\circ$  e  $\lambda = -60^\circ$ ). A estratégia de posicionamento demonstrou um potencial promissor para a implantação na empresa, visando auxiliar efetivamente nos trabalhos de preparação da máquina-ferramenta e conduzir à menores erros durante a fabricação de brochas.

Com o posicionamento assistido por EA foram obtidos desvios de centralização reduzidos em relação ao perfil de projeto para um posicionamento do rebolo de  $\lambda = 18^\circ$ . A repetibilidade dos valores de centro entre rebolo-peça encontrados por esta estratégia ( $s_{AUTO} \approx 0,05$  mm) apresentou menor dispersão quando comparada à estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$  ( $s_{MANUAL} \approx 0,07$  mm). Além disso, o tempo necessário para o posicionamento centralizado automático foi muito menor que o tempo despendido

pelo método manual ( $ZEROY_{AUTO} = 18s$  e  $ZEROY_{MANUAL} \approx 5$  min). A variabilidade verificada nos posicionamentos centralizados através de ambas as estratégias não apresentou-se como sendo crítica quando comparada a um desvio de centro proposital de 0,2 mm em relação a um valor conhecido e teoricamente adequado.

Nos estudos envolvendo um posicionamento relativo de  $\lambda = -60^\circ$ , para um perfil de rebolo módulo, bons resultados foram obtidos em termos da repetibilidade alcançada com a estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  ( $s_{AUTO} \approx 0,07$  mm), a qual se caracterizou por apresentar uma dispersão consideravelmente menor em relação ao valor obtido pela estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$  ( $s_{MANUAL} \approx 0,3$  mm). Para este perfil de rebolo, no entanto, esta estratégia apresentou um erro sistemático atrelado aos valores de centro obtidos, (comparado ao valor médio obtido com a estratégia  $ZEROY_{MANUAL}$ ) os quais puderam ser comprovados pela observação dos sinais de  $EA_{RMS}$  durante a travessia do rebolo sobre a peça.

Para a obtenção de um sinal uniforme durante a passagem do rebolo sobre a peça é necessário que o rebolo apresente um perfil reto. Eventuais formas geométricas côncavas ou convexas necessárias no perfil externo do rebolo devem ser perfiladas após a centralização assistida por EA.

Propõem-se que para uma implantação definitiva da estratégia  $ZEROY_{AUTO}$  na empresa ZEN S.A, a determinação do valor centralizado entre rebolo-peça seja realizada através da obtenção de valores médios das coordenadas em mais que uma passagem sobre o componente para reduzir os erros causados pela diferença verificada nos sinais de *spark in* e *spark out*.

Nos próximos trabalhos, sugere-se que o mesmo estudo comparativo entre as estratégias  $ZEROY_{AUTO}$  e  $ZEROY_{MANUAL}$  (realizado para  $\lambda = 18^\circ$  neste trabalho) seja procedido para o rebolo de perfil módulo, sob o posicionamento relativo de  $\lambda = -60^\circ$ , verificando-se os desvios existentes entre o perfil de projeto e o perfil medido com a utilização de ambas as estratégias de centralização.

A aplicação da técnica de reconhecimento de contato para o monitoramento do primeiro contato no processo de dressamento, também se apresenta como outra sugestão a ser implementada na empresa parceira. Esta atividade é realizada atualmente sem nenhuma instrumentação, e exige extrema atenção por parte do operador da máquina-ferramenta, acarretando invariavelmente em quebras das pontas diamantadas, e influenciando na simetria do perfil do rebolo.

**7. REFERÊNCIAS**

- [1] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen**. 2. ed. Düsseldorf. 1989.
- [2] MARINESCU, D. L. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. London. 2007.
- [3] BERTALAN, C. **Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas ferramentas convencionais**. Florianópolis, UFSC. Dissertação POSMEC. 1997.
- [4] SPUR, G.; STÖFERLE, T. **Handbuch der Fertigungstechnik Band 3/2 Spanen**. München.1980.
- [5] DALLAS, D. B. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**. 3. ed. Estados Unidos. 1976.
- [6] ROWE, B. W. **Tribology of Abrasive Machining Process**. United States of America. 2004.
- [7] WEGNER, N. et. al. **Fertigungstechnik: Die technik und ihre sprachliche Darstellung**“. Disponível:<http://books.google.com.br/books> (acesso em: 20 julho 2009)
- [8] FINGERLE, M. **Comparison of First Contact Tests during the Grinding on Two Different Machine Tools with the Aid of Acoustic Emission**. Studienarbeit, UFSC, Florianópolis. 2008.
- [9] KLOCKE, F; KÖNIG, W. **Appropriate conditioning strategies increase the performance capabilities of vitrified-bond CBN grinding wheels**. Annals of the CIRP, v. 44, p. 305-310, Jan. 1995.
- [10] ODEBRECHT, O. **Dressamento de rebolos de Óxido de Alumínio Microcristalino com Dressadores Fixos**. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.
- [11] HELLMEISTER, C. F. L. P. **Monitoramento da Dressagem na Retificação através do Sinal Puro de Emissão Acústica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) Bauru, Julho 2004.

- [12] MARINELLI, N. C, et. al. **Emissão Acústica no Monitoramento da Dressagem de Rebolos de Alumina**. Revista Máquinas e Metais, Maio/1998, pp. 56-73
- [13] TABORGA, M. R. A. **Análise e monitoramento da retificação do ferro fundido nodular com rebolos convencionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, maio de 2002.
- [14] LINKE S. B. **Wirkmechanismen beim Abrichten keramisch gebundener Schleifscheiben**. Linnich, Alemanha. Junho 2007.
- [15] PAUCKSCH, E. **Zerspantechnik** p.310-314, Germany, 1996.
- [16] AARON, T. E. et al. **ASM Handbook-Machining**. 9. ed. Vol. 16. 1995.
- [17] WALTER, W. **Apostila do Curso de Retificação para a Renault**. Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP). Universidade Federal de Santa Catarina.
- [18] WEINGÄRTNER, E. **Influência do sistema de alimentação de fluido lubri-refrigerante na retificação com rebolos de CBN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) 173 p. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.
- [19] BYRNE, G. et. al. **Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application**. Annals of the CIRP. Vol.4. p.541-567. 1995
- [20] XIAOQI, C. **In-Process Tool Monitoring through Acoustic Emission Sensing**. Singapore Institute of Manufacturing Technology. 2001
- [21] MEYEN, H. P. **AE in Grinding and Dressing: Accuracy and Process Reliability**. Society of Manufacturing Engineers. 4<sup>th</sup> International Grinding Conference. October, 1990.
- [22] WEBSTER, J.; DONG, P. W.; LINDSAY, R. **Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process**. Center for Grinding Research and Development. University of Connecticut. USA. Annals of the CIRP Vol. 45. p. 335- 340. Janeiro de 1996.
- [23] BENDAT, S. J.; PIERSOL G. A. **Random Data: Analysis and Measurement Procedures**. California, U.S.A. 1971.

- [24] GERGES, Y. N. S. **Processamento e Análise de Sinais de Acústica e Vibrações**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2006.
- [25] INASAKI, I. **Application of Acoustic Emission Sensor for Monitoring Machining Process**. Keio University. Japan. p.273-281. 1998.
- [26] KARPUSCHEWSKI, B. **Sensoren zur Prozessüberwachung beim Spanen**. WZL, Habilitationsschrift, RWTH-Aachen, 2001
- [27] TÖNSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; BECKER J. C. **Process Monitoring in Grinding**. Institute of Production Engineering and Machine Tools. University of Hannover, Germany.
- [28] **EMPRESA MOVOMATIC**. Disponível em: [http://www.etamic.com/animations/etamic/anglais/technologie\\_animation\\_appairage.htm](http://www.etamic.com/animations/etamic/anglais/technologie_animation_appairage.htm) . Acesso em: 17 julho 2009.
- [29] **EMPRESA MARPOSS**. Disponível em: <http://www.marposs.com/family.php/eng/grinders> . Acesso em: 17 julho 2009.
- [30] SOUZA, A. J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Usinagem**. Qualificação (Doutorado), POSMEC-UFSC, 62p. 2001.
- [31] TREIS, S. M. C. **Verbesserung einer Schleifmaschine durch Acoustic Emission**. Bachelorarbeit, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, July (2007)
- [32] TÖNSHOFF, H. K. **Using Acoustic Emission Signals for Monitoring of Production Processes**. Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover. June 1999.
- [33] GOMES, J. J. F. **Identificação em Processo de Mecanismos de Desgaste de Rebolos**. Tese de Mestrado, São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.
- [34] DORNFELD, D.; LEE D.E. **Precision Manufacturing**. University of California at Berkeley. August 2007.
- [35] Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Transdutor> . Acesso em 15 agosto 2009.
- [36] KLEIN, T. **Verificação da Aplicabilidade dos Sinais de Emissão Acústica para o Monitoramento da Retificação Cilíndrica Interna de Bicos Injetores**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis. Maio de 2007.

- [37] BRINKSMEIER E.; HEINZEL C.; MEYER L. **Development and Application of a Wheel Based Process Monitoring System in Grinding**. Faculty of Production Engineering, University of Bremen, Germany.
- [38] Sensis Ind. Com. Equipamentos Eletrônicos Ltda. **Manual de Operação do Sistema de Monitoramento MSM**. São Carlos-SP. 2002.
- [39] Walter Dittel GmbH. **Installation and Operation Manual for AE 6000**. January 2007.
- [40] BIFANO, T. G., YI, Y., **Acoustic Emission as an Indicator of Material-Removal Regime in Grass Micro-Machining**. Journal of the American Society for Precision Engineering. Vol. 14, p.219-228. October, 1992
- [41] SENA, L. **Avaliação do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo numa retificadora CNC FLEXA 600-L com o auxílio de sinais de emissão acústica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Agosto de 2007.
- [42] MARGOT, Y. D. R. **Strategische Signalerfassung mit Piezoelektrischen Sensoren für die Prozessüberwachung in der Zerspaltung**. ETH, Zürich. 2005.
- [43] HASSUI, A. et al. **Experimental Evaluation on Grinding Wheel Wear through Vibration and Acoustic Emission**. Escola de Engenharia de São Carlos-USP, Fevereiro 1998.
- [44] DIMLA, E. **Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations - A review of methods**. International Journal of Machine Tools and Manufacture , p.1073-1078. 2000.
- [45] HASSUI, A. et. al. **Experimental Evaluation on Grinding Wheel Wear through Vibration and Acoustic Emission**. Unicamp–SP. p.7-14.1998.
- [46] KLUFT, W. **A monitoração dos processos reduz custos e desperdícios**. Máquinas e Metais. Vol. 10. pp- 60-80. Outubro 1994.
- [47] RAVINDRA H. V.; SRINIVASA Y. G.; KRISHNAMURTHY R. **Acoustic Emission for Tool Condition Monitoring in Metal Cutting**. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, India. June, 1997.
- [48] KÖNIG, W., ALTINTAS, Y., MEMIS, F. **Direct Adaptive Control of Plunge Grinding Process Using Acoustic Emission (AE) Sensor**. Institute of Machine Tools and Production Engineering (WZL), Aachen, July, 1994.

- [49] HWANG, T. et. al. **Acoustic Emission Monitoring of High Speed Grinding of Silicon Nitride**. National Institute of Standards and Technology, Manufacturing Engineering Laboratory. P.614-619. Gaithersburg, USA. 2000.
- [50] OLIVEIRA, G. F. J.; DORNFELD, D. A. **Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring**. University of California, Laboratory for Manufacturing Automation, Berkeley USA
- [51] ASHER, R. C. **Ultrasonic Sensors for Chemical and Process Plant**. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia. 1997.
- [52] AKBARI, J. et. al. **Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics**“, Journal of Materials Processing Technology, p.403-407. 1996.
- [53] KLUFT, W. **“Process Monitor GD 200, G200 und D200”**, Aachen, Germany 1989.
- [54] LEME, P. L. S. **Dressamento por Toque de Rebolos de CBN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Florianópolis-SC, 1999.
- [55] **Empresa Mahr MMQ40 Formtester**, <[www.html.ornl.gov/mituc/formtest.htm](http://www.html.ornl.gov/mituc/formtest.htm)> Acesso em 20 agosto 2009.
- [56] STEMMER, E. C. **Ferramentas de Corte II**. Florianópolis. 1992.
- [57] DOYLE, L. **Manufacturing Process and Materials for Engineers**. 1961
- [58] Zen S.A. **Apostila de treinamento interno sobre Brochamento**. Brusque-SC. Novembro de 2008.
- [59] AGOSTINHO, L. O.; RODRIGUES S. C. A.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. São Paulo-SP. 1998.
- [60] MONTGOMERY, C. D. **Design and Analysis of Experiments**. Arizona State University-USA. 5<sup>th</sup> edition. 2001.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)