

Implementação de Sistema Automático de  
Calibração Dimensional em Retificadoras  
CNC utilizando Emissão Acústica

DEDALUS - Acervo - EESC



31100013460

JOÃO JORGE DE FARIA GOMES

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando G. Oliveira

São Carlos  
1997



Class.	T55C-EEESC
Curr.	2489
Tombo	T105/92

Área: Engenharia Mecânica

ST 0747774

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

G633i .Gomes, João Jorge de Faria  
Implementação de sistema automático de  
calibração dimensional em retificadoras CNC  
utilizando emissão acústica / João Jorge de Faria  
Gomes. - São Carlos, 1997.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.


Área: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. João Fernando G.  
Oliveira

1. Emissão acústica. 2. Monitoramento.
3. Retificação. I. Título.


**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Dissertação defendida e aprovada em 09-5-1997  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **RÉGINALDO TEIXEIRA COELHO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)




---

Prof. Doutor **ADILSON GONZAGA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Titular **JOÃO LIRANI**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



---

**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

À minha mãe Lucilia, minha esposa Rosa Lidia e meu filho Jorginho.

## Agradecimentos

Ao Professor João Fernando Gomes de Oliveira, por sua amizade, confiança, atenção e disposição para orientar o andamento do presente trabalho;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao CNPq pela bolsa de estudo concedida;

À minha esposa Rosa Lúcia e ao meu filho Jorginho pela paciência durante os períodos em que não sobrava tempo para dar atenção à família;

Ao amigo Juarez por seu auxílio nas dúvidas com softwares e na realização dos experimentos;

Aos amigos do Grupo de Retificação, Bicudo, Juarez, Nelson e Reginaldo pela convivência e amizade;

Ao Professor Eduardo Anselmo Diniz da FEM/UNICAMP pelo fornecimento dos corpos de prova;

Às empresas Sensis São Carlos, Zema Zselics e Carborundum pelo apoio, equipamentos e informações fornecidos;

Aos técnicos do LAMAFE, Bruno, Botelho, “Seu” Adão e Zé Carlos pela colaboração na fabricação de componentes necessários ao andamento da pesquisa;

Às funcionárias da secretaria do SEM por sua atenção.

# SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	IV
Resumo.....	VII
Abstract.....	VIII
1. Introdução .....	1
1.1 Conceito da Calibração do Rebolo.....	3
1.2 Objetivos.....	4
2. Revisão Bibliográfica .....	6
2.1 Monitoramento do Processo de Retificação por EA .....	7
2.2 Geração de EA .....	8
2.3 Sensores de EA.....	10
2.3.1 Requisitos para o projeto de sensor de EA .....	10
2.3.2 Cuidados necessários na instalação de sensores de EA.....	11
2.3.3 Resposta em frequência .....	13
2.4 Processamento do Sinal de EA.....	17
2.5 Aplicação de Monitoramento por EA em Detecção de Contato.....	18
2.6 Problemas Dimensionais em Retificação .....	22
2.6.1 Compensação do Erro Global.....	25
3. Proposta de Método para Melhoria da Capabilidade Dimensional em Retificadoras Cilíndricas CNC.....	33
3.1 O que é o método.....	34
3.1.1 Diamante de calibração .....	36
3.1.2 Rotina de Calibração .....	39

3.1.3 Cuidados na Calibração .....	41
3.2 Resultados Esperados .....	42
3.2.1 Compensação dos Erros de Posição do Rebolo .....	42
3.2.2 Aumento da Faixa de Tolerância de Sobremetal.....	42
3.2.3 Melhoria da Repetibilidade Dimensional .....	43
3.2.4 Redução do Tempo de Setup Dimensional .....	44
3.2.5 Marcas no Rebolo.....	44
3.2.6 Redução do Tempo de Dressagem .....	44
3.2.7 Redução do Tempo de Produção .....	45
4. Desenvolvimento experimental .....	46
4.1 Introdução.....	46
4.2 Banco de ensaios .....	48
4.3 Condições de Usinagem, Aquisição e Medição Utilizadas.....	50
4.3.1 Condições de Usinagem.....	50
4.3.2 Condições de Aquisição e Medição.....	52
4.4 Procedimento Experimental.....	53
4.4.1 Instalação dos sensores .....	55
4.4.2 Descrição dos programas CNC .....	56
4.4.3 Descrição do programa LabView.....	59
4.4.4 Calibração do Rebolo .....	60
5. Resultados e Discussão.....	61
5.1 Ciclos de Retificação com Avanço F50 .....	62
5.2 Ciclos de Retificação com Avanço F70 .....	69
5.3 Ciclos de Retificação com Avanço F100 .....	70

5.4 Avaliação da utilização do Sistema de Calibração do Rebolo .....	70
6. Conclusões .....	73
7. Bibliografia .....	75
7.1 Bibliografia citada .....	75
7.2 Bibliografia Consultada .....	79



## Lista de Figuras

Figura 2.1 Principais fontes de EA na retificação de metais, König & Meyen (1990).....	9
Figura 2.2 Estrutura de um sensor de EA( fonte Bosh), König & Meyen (1990).	11
Figura 2.3 Estrutura de um sensor de acoplamento fluidico (fonte: Sensis São Carlos).....	13
Figura 2.4 Sensor de EA de transmissão sem contato, König & Meyen (1990).	13
Figura 2.5 Resposta em frequência de sensores de EA, Dong & Webster (1996).....	14
Figura 2.6 Sinais brutos de EA gerados pelas duas máquinas, Dong & Webster (1996).....	15
Figura 2.7 Espectros de potência dos sinais de EA, gerados utilizando as duas retificadoras e obtidos a partir dos dois sensores, Dong & Webster (1996).....	16
Figura 2.8 Processamento de sinal no amplificador de EA, Klufft (1994).....	18
Figura 2.9 Detecção de contato rebolo/peça, Inasaki (1985).....	19
Figura 2.10 Diferença entre o tempo gasto para detecção de contato por EA e pela potência, Inasaki (1985). ....	20
Figura 2.11 Variação do nível do sinal de EA com a distância H, Dornfeld & Cai (1984).....	21
Figura 2.12 Erro de posição entre a aresta de corte e a peça, Donmez et al. (1988).....	23

Figura 2.13 Desvio dimensional em retificadora cilíndrica, Oliveira, Dornfeld & Schneider (1994).	24
Figura 2.14 $EA_{RMS}$ na interação entre o dressador e o rebolo, Oliveira et al (1994).	29
Figura 2.15 Marca deixada no rebolo pela calibração, Felipe (1996)	31
Figura 2.16 Marca provocada pelo dressador durante calibração, Felipe (1996).	32
Figura 3.1 Esquema de interligação do sistema de calibração do rebolo.	35
Figura 3.2 Diamante para calibração, medidas em [ mm ]	37
Figura 3.3 Partes do suporte de fixação do diamante, material VC 131	38
Figura 3.4 Esquema do cabeçote do contra-ponto com as distâncias: linha de centro x topo do diamante de calibração e linha de centro x topo do dressador.	39
Figura 3.5 Gráfico dos deslocamentos do rebolo nas respectivas etapas.	40
Figura 4.1 Esquema do banco de ensaios	48
Figura 4.2 Condições de usinagem utilizadas nos ensaios.	51
Figura 4.3 Condições utilizadas para aquisição e medição.	53
Figura 4.4 Peça utilizada nos ensaios, material: aço 4340 temperado	54
Figura 4.5 Placa para fixação de sensores	56
Figura 4.6 Esquema das movimentações do rebolo e posições de partida para os ciclos.	57
Figura 5.1 Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza R e avanço F50.	62

Figura 5.2	Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza G e avanço F50. -----	63
Figura 5.3	Circuito do sistema de calibração do rebolo. -----	64
Figura 5.4	Relação entre o dano na superfície do rebolo e a tendência negativa na dispersão dimensional após várias calibrações.-----	66
Figura 5.5	Aplicação de uma faixa de tolerância de 19 $\mu\text{m}$ ao ciclo com calibração executado com rebolo R e F50.-----	68
Figura 5.6	Aplicação de uma faixa de tolerância de 19 $\mu\text{m}$ ao ciclo sem calibração executado com rebolo R e F50.-----	68
Figura 5.7	Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza G e avanço F70. -----	69
Figura 5.8	Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza G e avanço F100.-----	70
Figura 5.9	Comparação entre os desvios padrões dos ciclos de retificação utilizando rebolos de dureza R e G, avanços F50, F70 e F100, com e sem calibração.-----	71

## Resumo

O processo de retificação é um dos mais utilizados na fabricação de componentes de precisão como operação de acabamento. Devido à necessidade de redução de custos, aumento de confiabilidade e melhoria de qualidade, sistemas de automação estão sendo cada vez mais aplicados a este processo. Utilizam-se sistemas de monitoramento na implantação da automação para substituir a perícia humana nas correções necessárias durante a usinagem. Um dos principais parâmetros para controle e compensação em uma operação de retificação é a dimensão da peça.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver e implementar um sistema de calibração, cuja função é melhorar a exatidão dimensional de uma retificadora, ou seja, diminuir a dispersão e o erro sistemático dimensional das peças produzidas em lotes. Este sistema utiliza a detecção de contato entre o rebolo e um diamante de calibração para localizar a posição real da superfície de trabalho do rebolo. Em seguida, atualiza automaticamente esta posição no CNC.

O meio físico considerado mais adequado para este sistema, que monitora a detecção de contato, é a emissão acústica gerada na interação entre o diamante e o rebolo. Os resultados obtidos mostram que o sistema é capaz de reduzir a dispersão dimensional da retificadora em até 80%. O melhor desempenho do sistema é obtido quando as condições de usinagem são menos severas, o que reduz a deformação imposta pela força de retificação, responsável por erros que não podem ser compensados pelo sistema.

## Abstract

The grinding process is one of the most used in precision manufacturing as a finishing operation. Due to the need of cost reduction, quality and reliability improvements, automation systems have been increasingly applied to the grinding process. Monitoring systems have been used in the implementation of automation to substitute the human skills in the necessary corrections during the operation. One of the main parameters for process control and compensation in a grinding operation is the workpiece size.

The goal of this work is to develop and implement a calibration system in order to improve the dimensional accuracy of a grinding machine, i.e. to reduce the systematic and random errors in the pieces produced in a batch. This system is based on a contact detection between the grinding wheel and a calibration diamond in order to measure the real position of the working surface of the grinding wheel. After the detection, the system automatically compensates for the dimensional error in the CNC.

The most suitable physical media for this system is the acoustic emission generated in the interaction between the grinding wheel and the calibration diamond. Through the acoustic emission is possible to detect the position of the grinding wheel. The results show that the system is able to reduce 80% of the dimensional dispersion of the grinding machine. The best performance of the system is obtained when slower infeed rates are used. These conditions lead to a reduction in the deformation induced by force which cannot be compensated by this system.

## 1. Introdução

Na busca por formas de produção mais flexíveis, confiáveis e a custos relativamente mais baixos, as indústrias tem reduzido a dependência da mão de obra ao mesmo tempo que tentam melhorar a qualidade e reduzir o tempo de produção. Para atingir este objetivo, a solução encontrada, tem sido a busca de um nível crescente de automação.

Atualmente, a automação do processo utiliza sistemas de monitoramento que, baseados em princípios físicos, permitem suprir a perícia humana nas correções necessárias durante a usinagem de lotes de peças em máquinas CNC. A automação também está sendo aplicada ao processo de retificação, que é um dos processos de acabamento mais utilizados para a produção de grandes lotes de peças de alta precisão. A utilização da retificação é crescente, principalmente na indústria automotiva.

Os sistemas de monitoramento foram inicialmente desenvolvidos e aplicados em outros processos, como furação e torneamento. Estes processos que utilizam ferramentas de geometria definida são mais conhecidos e a implementação de sistemas de monitoramento é relativamente simples e apresenta bons resultados.

Porém, a ferramenta utilizada na retificação possui múltiplas arestas e a geometria de cada aresta é aleatória. Além disso as arestas que estão efetivamente trabalhando mudam em número, geometria e distribuição sobre a superfície do rebolo, o que faz o processo ter um comportamento pouco estável.

Adicionalmente o processo de retificação é influenciado por outros fatores como: características do rebolo, condições de dressagem, variação da dureza da peça-obra e condições de usinagem. Ainda não existe um procedimento bem definido para controlar todas as variáveis envolvidas neste processo, o que o torna dependente de um operador experiente para corrigir os erros que surgem durante a usinagem.

As correções realizadas pelo operador normalmente implicam em interrupções da retificação e os resultados destas correções dependem da habilidade e disposição de cada operador. Isto dificulta o estabelecimento de padrões de tempo e qualidade estáveis.

Os sistemas de monitoramento para retificação que existem atualmente ainda não conseguem suprir todas as correções realizadas pelo operador, mas a sua utilização permite estabilizar parâmetros significativos para o processo, nivelando o desempenho de diferentes operadores.

A instalação de sistema de monitoramento em retificadoras deve ser criteriosa para que sua utilização pelos operadores seja efetiva. Muitos sistemas são desativados ou simplesmente esquecidos pelos operadores por interferir prejudicialmente no controle da máquina ou por não funcionar adequadamente.

Um sistema que apresente confiabilidade de operação, instalado e regulado por um técnico que entenda os princípios físicos envolvidos certamente aumenta o domínio sobre o processo. Facilitando a tarefa do operador e melhorando o desempenho da máquina.

## 1.1 Conceito da Calibração do Rebolo

Um dos requisitos exigidos de peças resultantes do processo de retificação é a exatidão dimensional. Normalmente, nas indústrias, a dispersão das dimensões é controlada dentro de uma faixa pelo operador, o que implica em interrupções quando é necessário realizar compensações.

Um sistema de monitoramento que localize a superfície de trabalho do rebolo em processo e atualize sua posição automaticamente, além de eliminar estas interrupções, pode estreitar a faixa de dispersão dimensional das peças produzidas em retificadoras, aumentando a capacidade dimensional da máquina.

Adicionalmente, um sistema que execute as ações descritas acima pode ser utilizado na otimização de outras operações como: setup e dressagem. A localização automática da posição real da superfície de trabalho do rebolo e a utilização da linha de centro do contra-ponto como referência para o zero do eixo X, do sistema de coordenadas do CNC, permite que se realize o setup da máquina rapidamente. Na realização da operação de dressagem o conhecimento da posição real da superfície do rebolo evita que se dresse em vazio no início, devido ao desgaste excessivo do rebolo ou da deformação térmica da estrutura da máquina.

Neste trabalho, este tipo de sistema é chamado de sistema de calibração do rebolo. A emissão acústica, aqui chamada de EA, é utilizada por ser um meio físico excelente para este tipo de sistema que utiliza detecção de



contato entre um diamante com posição conhecida e a superfície de trabalho do rebolo, Dornfeld & Cai (1984).

A idéia de se desenvolver um sistema automático de calibração do rebolo surgiu em 1994. Oliveira e Dornfeld propõem estudar o sistema, mas não o testam em regime de produção. Felipe, em 1996, avalia a repetibilidade do sistema, mas não o implementa para testar o seu impacto na produção de peças.

## 1.2 Objetivos

A necessidade de implementação de sistema de monitoramento para calibração do rebolo, visando melhorar a exatidão dimensional conduz este trabalho aos seguintes objetivos:

- Propor um método para implementação prática do sistema de calibração do rebolo proposto por Oliveira e Dornfeld em 1994 em uma retificadora cilíndrica CNC;
- Implementar o sistema de calibração na retificadora CNC, para testar o método e armazenar dados sobre os resultados;
- Analisar o desempenho do sistema na produção de peças no que se refere a sua capacidade de reduzir a dispersão dimensional do processo.

Para alcançar os objetivos citados, este trabalho é estruturado em capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: neste capítulo são levantadas pesquisas e estudos que demonstram a validade do monitoramento por EA na

retificação, princípios da geração da EA, requisitos de projeto para construção de sensor de EA e seu comportamento no domínio da frequência, processamento do sinal e aplicação do monitoramento por EA na detecção de contato. Também são abordados os problemas dimensionais de retificadoras, as soluções existentes, o método proposto por Oliveira e Dornfeld em 1994 e o desenvolvimento do mesmo realizado por Felipe em 1996.

- Capítulo 3 - Proposta de Método para Melhoria da Capabilidade Dimensional em Retificadoras Cilíndricas CNC: aqui explica-se como é o método, o que é um diamante especial para calibração, qual a proposta prática para executar uma calibração e quais são os cuidados que devem ser tomados na sua execução. São também descritos os resultados esperados com a utilização do método;
- Capítulo 4 - Desenvolvimento Experimental: Descrição básica do experimento, apresentação do banco de ensaios utilizado, condições utilizadas para usinagem, monitoramento e medição. Detalhamentos sobre o corpo de prova, aquisição de dados, instalação de sensor e programa CNC;
- Capítulo 5 - Resultados e Discussão: aqui são apresentados os resultados obtidos na forma de gráficos comparativos e a discussão dos mesmos.
- Capítulo 6 - Conclusão: aqui faz-se as considerações finais e a avaliação dos resultados obtidos;
- Capítulo 7 - Bibliografia: referências citadas ou consultadas neste trabalho.

## 2. Revisão Bibliográfica

Segundo Konig & Klumpen (1993) vários meios físicos podem ser utilizados para monitorar o processo de retificação. Porém, a EA, é um meio particularmente adequado para o monitoramento da retificação e da dressagem, principalmente no ambiente hostil de chão de fábrica. A EA é altamente sensível em operações com baixa taxa de remoção de material, não apresenta variações devido à temperatura ( "temperature drift") como a medição de força e o crescimento do nível do sinal, em resposta a uma excitação, é muito rápido se comparado com outras variáveis, como por exemplo: variações da corrente do motor ou medição da força. Segundo Byrne et al. (1995) os sistemas óticos podem fazer o monitoramento em tempo real, porém, geralmente são muito sensíveis à sujeira e cavacos, necessitando que se façam adaptações relativamente complexas na máquina, por isso sua aceitação pela indústria tem sido lenta.

O presente trabalho visa a implementação do sistema proposto em ambiente de chão de fábrica, de forma relativamente simples, que não necessite de maiores adaptações na máquina, logo, a EA é considerada o meio físico mais adequado para este sistema.

Assim, neste capítulo é apresentado um levantamento bibliográfico de pesquisas sobre a utilização do monitoramento por EA em retificação, com ênfase em detecção de contato.

## 2.1 Monitoramento do Processo de Retificação por EA

A medição e análise da emissão acústica produzida pelo processo é uma técnica adequada para o propósito de otimização e controle do processo de retificação, como descrito por diversos pesquisadores. A hipótese básica é que a EA contém informação de interesse sobre o micro-fenômeno mecânico do processo de retificação, do desgaste do rebolo e da operação de dressagem.

Dornfeld & Cai (1984) são os pioneiros a investigar o potencial da utilização da análise do sinal de EA para o monitoramento do processo de retificação visando a automação do mesmo e como uma ferramenta para investigar os seus fenômenos. Nesta investigação é utilizado o sinal de EA gerado durante uma operação de retificação plana para medir o empastamento do rebolo, o momento do contato peça/rebolo na aproximação e a perda de contato peça/rebolo no final do centelhamento. O centelhamento é o estágio final de um ciclo de retificação, onde as deformações elásticas do sistema máquina/peça/rebolo provocadas pela força de retificação são aliviadas, este estágio é também chamado aqui de “sparkout”.

Quanto à detecção de contato peça/rebolo Dornfeld & Cai chegam a seguinte conclusão:

- O sinal de EA detecta acuradamente o momento do contato peça/rebolo na aproximação e a perda de contato no final do sparkout. Nos dois casos a sensibilidade do sinal de EA excede a da medição de força.

A grande sensibilidade inerente ao monitoramento por emissão acústica e as técnicas investigadas requerem que sejam tomadas precauções quando se utiliza monitoramento por EA para controle em processo. Deve-se verificar se as mudanças relativas no nível do sinal de EA com o avanço do rebolo (avanço de aproximação) estão adequadas à configuração rebolo/peça/refrigerante/máquina empregada. Este é um complicador para a aplicação de monitoramento por EA em retificação, uma vez que pequenas variações no estado de afiação do rebolo podem provocar mudanças significativas no nível do sinal.

Segundo Dornfeld (1992) as altas velocidades relativas entre rebolo e peça garantem uma fonte significativa de EA. Em muitos casos as outras técnicas empregadas, como realimentação por nível de força ou torque são insensíveis ao comportamento do processo de retificação por causa de sua baixa taxa de remoção de material.

Segundo Dornfeld (1992) os objetivos principais no monitoramento do processo por EA são: detecção do momento de contato na aproximação, controle do tempo de sparkout, da dressagem e do desgaste do rebolo. Pode ser utilizado também para detectar vibração tipo "chatter" ou a deterioração do acabamento superficial.

## 2.2 Geração de EA

Segundo König & Meyen (1990) vários autores concordam que os fenômenos relacionados com a formação do cavaco na retificação podem ser sub-divididos em duas fases.

Inicialmente ocorre somente o escorregamento do grão abrasivo sobre o material, esta fase é chamada de elástica. Na segunda fase começam a ocorrer as deformações plásticas e a formação de cavaco. O processo de atrito, deformação plástica e remoção de cavaco que ocorrem na peça durante a retificação são acompanhadas por fenômenos relacionados ao rebolo como desgaste do grão abrasivo e fratura da liga. A intensidade destes fenômenos é diretamente proporcional ao sinal de EA mensurável. A Figura 2.1 mostra as principais fontes de EA na retificação de metais.

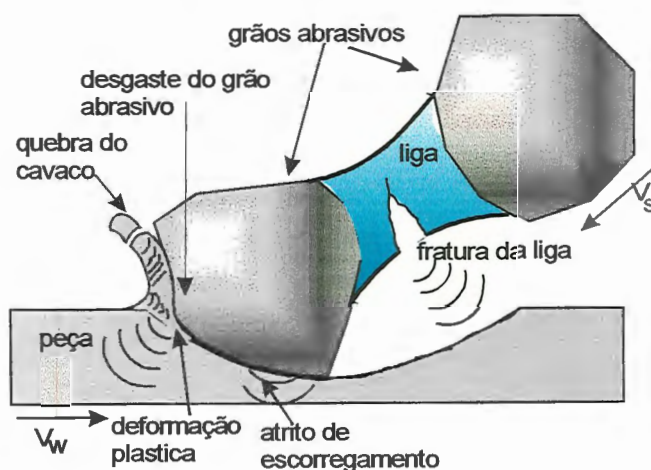


Figura 2.1 Principais fontes de EA na retificação de metais, König & Meyen (1990)

Segundo König & Meyen (1990) a EA gerada durante a operação de dressagem está associada às fraturas frágeis que ocorrem nos grãos abrasivos quando se chocam com o diamante dressador. A ruptura de grãos abrasivos gera um sinal de EA com uma banda de frequência extremamente larga. A energia deste sinal pode ser medida através do valor RMS ("root mean square") do nível do sinal detectado e é proporcional à velocidade de avanço e à profundidade do dressagem.

## 2.3 Sensores de EA

Segundo Konig & Meyen (1990) as ondas de ultra-som produzidas na usinagem são refletidas, modificadas e amortecidas por várias juntas e interfaces. Finalmente são detectadas pelo sensor como ondas Rayleigh com amplitudes na faixa sub-micrométrica. Onda Rayleigh é um tipo particular de onda mecânica em materiais que apresenta amplitudes mais significativas junto à superfície. Estas ondas tem suas amplitudes atenuadas exponencialmente no sentido de profundidades crescentes dentro do material, Bedford & Drumheller (1994).

Dependendo do seu projeto, os sensores convertem ou a velocidade ou a aceleração do sinal em uma voltagem proporcional. A maioria dos sensores utilizados no monitoramento do processo, dentro do espaço de trabalho da máquina, são os que exploram a relação entre a deformação elástica e a voltagem elétrica induzida em certos materiais, ou seja o efeito piezoelétrico.

### 2.3.1 Requisitos para o projeto de sensor de EA

Segundo Konig & Klumpen (1993) a agressividade do ambiente dentro da máquina é freqüentemente uma grande restrição para outros tipos de sensores. Altas temperaturas, grandes quantidades de óleo refrigerante, desgaste abrasivo através de cavacos ou partículas demandam por um sensor de projeto robusto. Logo, na seleção de sensores para aplicações industriais são de fundamental importância a resistência da cápsula do sensor à óleos

lubrificantes agressivos, o tipo de fixação requerido, a forma adequada de sua montagem e o custo do mesmo. Utilizando este critério para a seleção, somente uma pequena fração do grande número de sensores comerciais pode ser aceito como adequado.

Segundo Byrne et al (1995) atualmente sensores de EA especialmente projetados para propósitos de monitoramento estão disponíveis no mercado, preenchendo os severos requisitos quanto à robustez. A Figura 2.2 mostra a estrutura de um sensor de EA, com acoplamento mecânico por pressão de parafuso. As vantagens deste sensor são sua robustez e a facilidade de fixação.

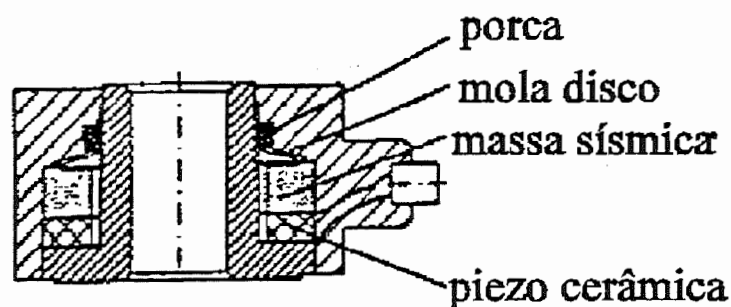


Figura 2.2 Estrutura de um sensor de EA( fonte Bosh), Konig & Meyen (1990).

### 2.3.2 Cuidados necessários na instalação de sensores de EA

Konig & Meyen (1990) afirmam que para o sensor de acoplamento mecânico, seja por pressão de parafuso ou magnético, além de uma superfície que assegure um contato efetivo entre sensor/máquina, a posição de fixação deve estar próxima do fenômeno gerador de EA que se quer monitorar, ou seja da dressagem ou da usinagem, para assegurar uma alta taxa sinal/ruído. O



ruído menor nestes casos é devido a uma menor interferência de outras fontes de EA, como por exemplo rolamentos, avanço do carro porta rebolo, etc, que mascaram o sinal detectado pelo sensor.

Webster, Marinescu & Bennett (1994) realizam testes que mostram que um sensor de acoplamento mecânico pode não detectar o sinal de EA de interesse se colocado a uma distância maior que 150 mm a partir da região onde ocorre o fenômeno.

Segundo Byrne et al (1995) a maioria dos transdutores devem ser fixados na superfície da máquina, mas um novo conceito é utilizar um jato de fluido para transmitir as ondas de EA da peça ou da ferramenta para o sensor. A sua principal vantagem é que a distância entre a área de corte e o sensor pode ser maior. Como o jato é dirigido diretamente sobre o fenômeno há uma minimização do efeito de interferência no sinal. Os problemas incluem a necessidade de um fluxo livre de bolhas e a eliminação de cavacos interrompendo o mesmo.

Webster, Marinescu & Bennett (1994) afirmam que a detecção de contato rebolo/peça quando se utiliza o sensor de acoplamento fluídico é somente 200 microsegundos mais lenta do que com acoplamento mecânico. Estes pesquisadores obtêm bons resultados, na detecção de contato, utilizando um sensor de acoplamento fluídico fixado à distância de 750mm da região de contato. A Figura 2.3 apresenta a estrutura de um sensor de acoplamento fluidico, fabricado pela empresa Sensis São Carlos.

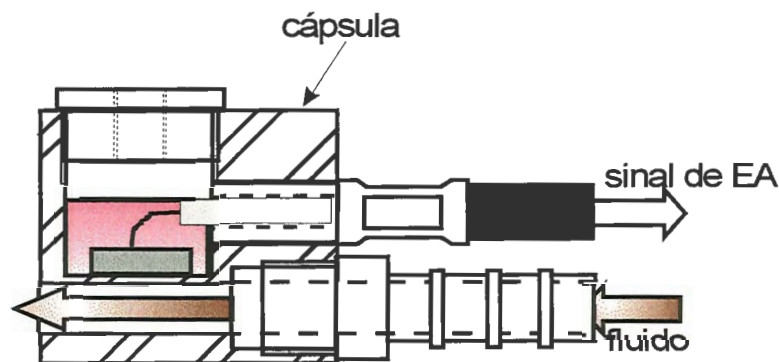


Figura 2.3 Estrutura de um sensor de acoplamento fluido (fonte: Sensis São Carlos).

Outra alternativa é a utilização de sensores que detectam o sinal de EA diretamente do rebolo ou da peça em rotação. A Figura 2.4 mostra um tipo de sensor que é montado diretamente na ponta do eixo árvore. Abaixo de uma rotação limite de 60000 rpm, o sinal de EA detectado é transferido sem contato para um receptor fixo que está conectado à unidade de análise.

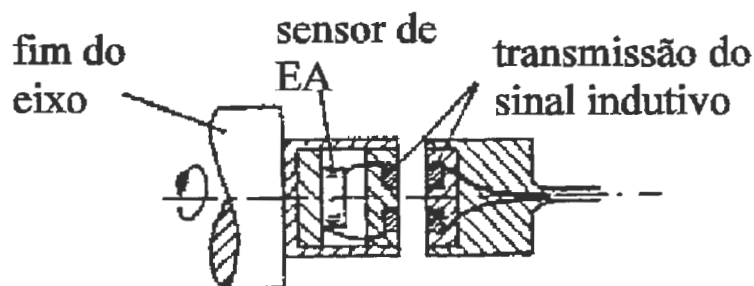


Figura 2.4 Sensor de EA de transmissão sem contato, König & Meyen (1990).

### 2.3.3 Resposta em frequência

Segundo König & Klumpen (1993) sensores de ultra-som que detectam o som emitido pelo processo de retificação são sistemas oscilantes cujas frequências de ressonância são determinadas pelo seu projeto. O sensor

representa, portanto, o primeiro filtro do sinal detectado na cadeia de medição, com amortecimento ou amplificação dependentes da faixa em que se encontra sua frequência natural.

Assim, o comportamento da frequência do sensor de EA tem um efeito decisivo no espectro de frequência utilizável para diagnóstico. O projetista de sistemas de monitoramento para retificação deve considerar as propriedades específicas do sensor dentro das faixas de frequência selecionadas para análise.

Dong & Webster (1996) realizam experimentos utilizando duas máquinas: uma retificadora cilíndrica externa e uma retificadora "centerless" e dois sensores de EA de acoplamento fluidico cujas características de resposta em frequência estão apresentadas na Figura 2.5.

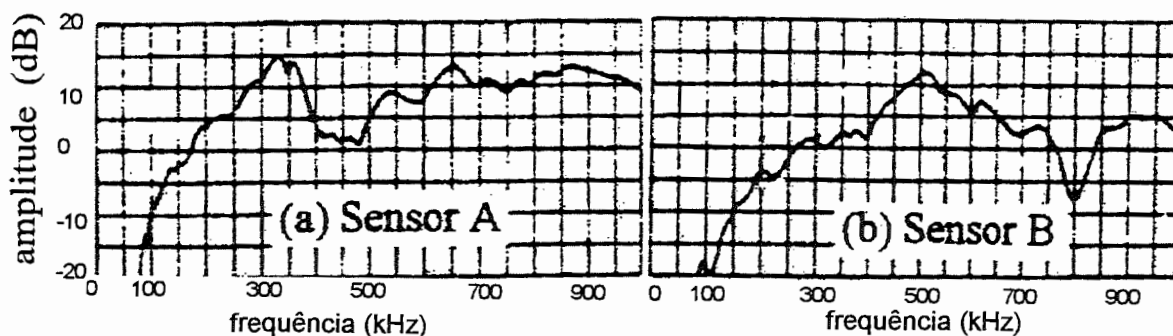


Figura 2.5 Resposta em frequência de sensores de EA, Dong & Webster (1996).

A frequência natural principal do sensor A é 325 KHz e uma das secundárias é 650 KHz, a frequência natural principal do sensor B é 515 KHz e uma de suas secundárias é 200 KHz. A faixa de frequência investigada vai de 100 - 1000 KHz e é selecionada através de um filtro passa - banda.

A Figura 2.6 mostra os sinais brutos de EA adquiridos nos momentos dos contatos rebolo/peça para as duas máquinas utilizando o sensor A.

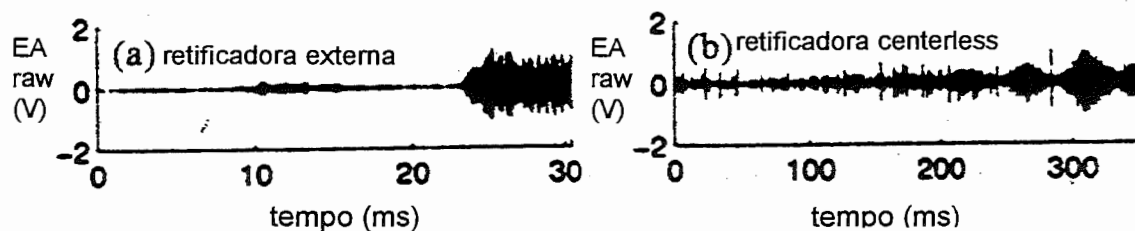
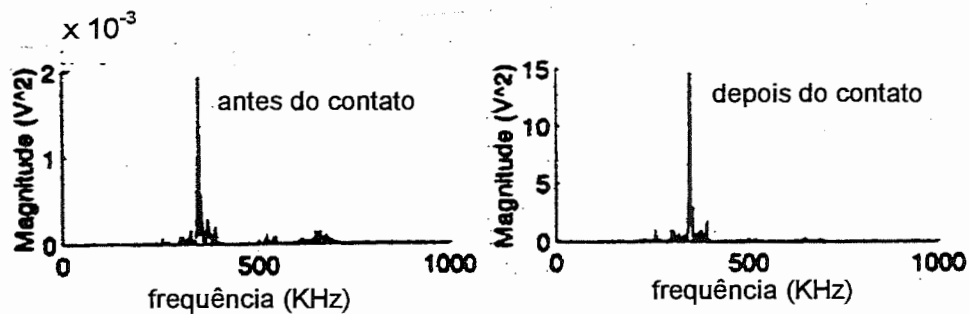
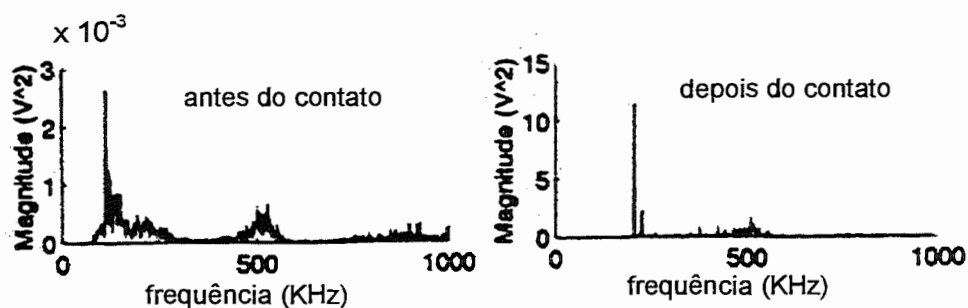


Figura 2.6 Sinais brutos de EA gerados pelas duas máquinas, Dong & Webster (1996).

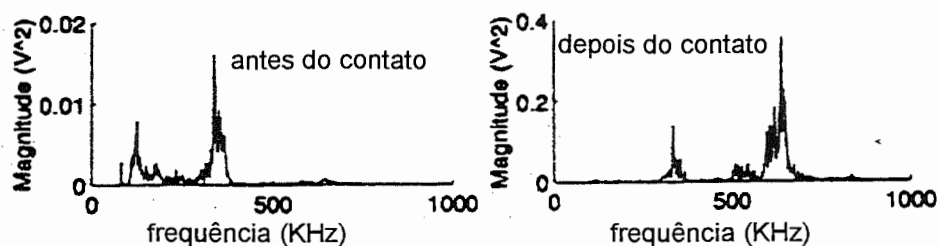
A Figura 2.7 mostra espectros de potência de sinais de EA antes e depois dos contatos rebolo/peça, obtidos utilizando as duas máquinas e os dois sensores.



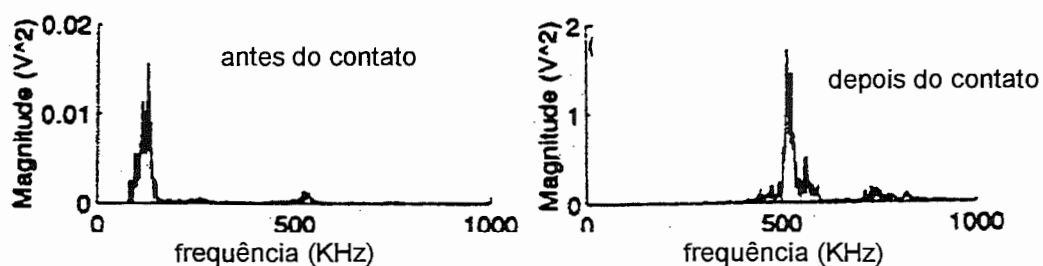
a) Espectro de potência da EA obtido utilizando: a retif. cil. ext. e o sensor A.



b) Espectro de potência da EA obtido utilizando: a retif. cil. ext. e o sensor B.



c) Espectro de potência da EA obtido utilizando: a retif. centerless e o sensor A.



d) Espectro de potência da EA obtido utilizando: a retif. centerless e o sensor B.

Figura 2.7 Espectros de potência dos sinais de EA, gerados utilizando as duas retificadoras e obtidos a partir dos dois sensores, Dong & Webster (1996).

Pode-se observar que o maior pico do espectro de energia depois do contato rebolo/peça está localizado ou na frequência natural principal (325 KHz para figura 2.10a; 515 KHz para figura 2.10d), ou em uma frequência natural secundária (200 KHz para figura 2.10b, 650 KHz para figura 2.10c) de cada sensor.

Segundo Dong & Webster (1996) estes fenômenos implicam que provavelmente a EA original é uma onda que possui componentes de banda estreita de frequência amplamente distribuídos e que possuem várias intensidades em diferentes bandas. Os fenômenos mostram também a grande influência das características de frequência do sensor sobre a frequência de saída, que não é igual à frequência real da EA original. Observa-se também que a proporção do aumento no valor do espectro de potência antes e depois

do contato é diferente para cada combinação máquina /rebolo. Esta proporção pode ser maior ou menor e depende da influência da frequência natural do sensor mais próxima. Assim, tanto a frequência natural principal como as secundárias de um sensor são importantes para o monitoramento do processo, pois, muitas vezes, a frequência mais representativa do fenômeno de interesse está próxima de uma frequência natural secundária do sensor utilizado.

## 2.4 Processamento do Sinal de EA

Segundo König & Meyen (1990) dependendo de seu projeto estrutural os sensores convertem as ondas Rayleigh emitidas na usinagem em um sinal elétrico alternado proporcional ou à velocidade ou à aceleração do sinal de EA. Este sinal de alta frequência( cerca de 1 MHz ) requer um processamento analógico para extrair as características significativas, pois, a análise direta do sinal alternado não condicionado, pode ser improdutivo, uma vez que para trabalhar com o sinal bruto são necessários equipamentos sofisticados e caros para aquisição de dados.

Kluft (1994) descreve um sistema de processamento de sinal utilizado no pré-amplificador de EA fabricado pela empresa Prometec, a Figura 2.8 apresenta um esquema do sistema. Inicialmente o sinal do sensor de EA é amplificado em um amplificador ajustável. O sinal amplificado passa por um filtro passa-banda para eliminar a interferência de acionamentos de avanço, caixas de redução e outros componentes, garantindo uma razão sinal-ruído ótima. A esta altura, praticamente só o sinal referente à usinagem continua no

sistema. O sinal de EA já filtrado é então demodulado por meio de um retificador e depois passa por um filtro passa-baixa.

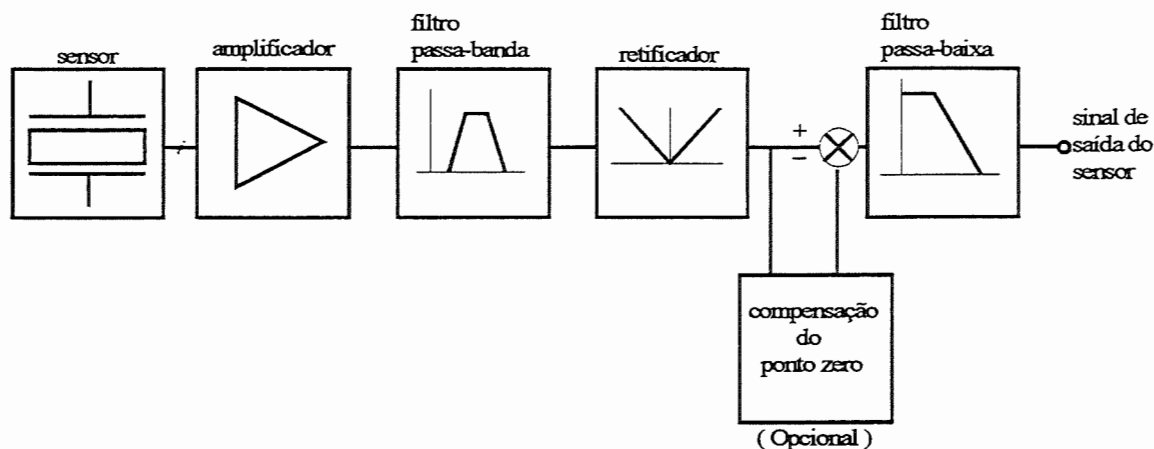


Figura 2.8 Processamento de sinal no amplificador de EA, Klufft (1994).

O nível de saída resultante é indicativo do estado do processo. Um sinal condicionado desta maneira, pode ser transmitido sem interferência por distâncias que podem alcançar dezenas de metros no sistema de controle, uma vez que não contem altas frequências como no sinal bruto de EA.

O tratamento de sinal de EA descrito acima oferece um meio altamente sensível de monitorar processos de retificação, como a cilíndrica externa, a centerless, a de superfície e a dressagem com ferramenta fixa.

## 2.5 Aplicação de Monitoramento por EA em Detecção de Contato

Segundo Oliveira, Perez & Mendizabal (1991) a minimização do tempo de corte no ar durante a aproximação do rebolo até tocar na peça em um

processo de retificação pode ser alcançada através da técnica de EA, que pode atuar como um eliminador de folga entre o rebolo e a peça.

Inasaki (1985) afirma que, em uma máquina equipada com um sistema de detecção de contato rebolo/peça que apresente um alto nível de confiabilidade, pode-se aumentar a velocidade de avanço do rebolo contra a peça, reduzindo consideravelmente o tempo gasto sem usinagem durante o processo. Os “eliminadores de folga” estão sendo desenvolvidos para este propósito e um dos métodos mais aplicado é o de detectar o crescimento da potência de retificação. Entretanto estes métodos apresentam um nível de confiabilidade que pode ser aquém do necessário.

A Figura 2.9 mostra uma comparação realizada por Inasaki (1985) entre os crescimentos dos níveis dos sinais de EA e de potência elétrica, no momento do contato rebolo/peça.

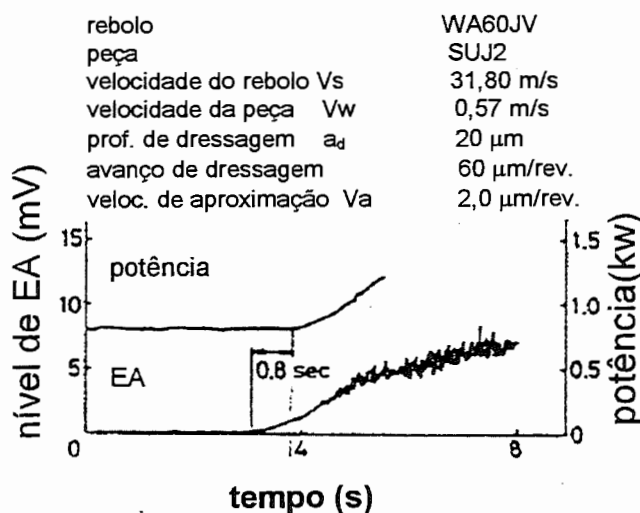


Figura 2.9 Detecção de contato rebolo/peça, Inasaki (1985)



O contato rebolo/peça é detectado mais rapidamente pelo monitor de EA do que pelo monitor de potência elétrica. Pois o monitoramento por EA é capaz de detectar o contato das arestas de corte com a peça, enquanto que o monitor de potência elétrica recebe um sinal atrasado pelo amortecimento imposto pela inércia das massas em movimento, como por exemplo: rebolo, flange, polias, eixo do motor, etc.

A Figura 2.10 mostra a diferença entre o tempo gasto pela detecção de contato por EA e pela potência elétrica.

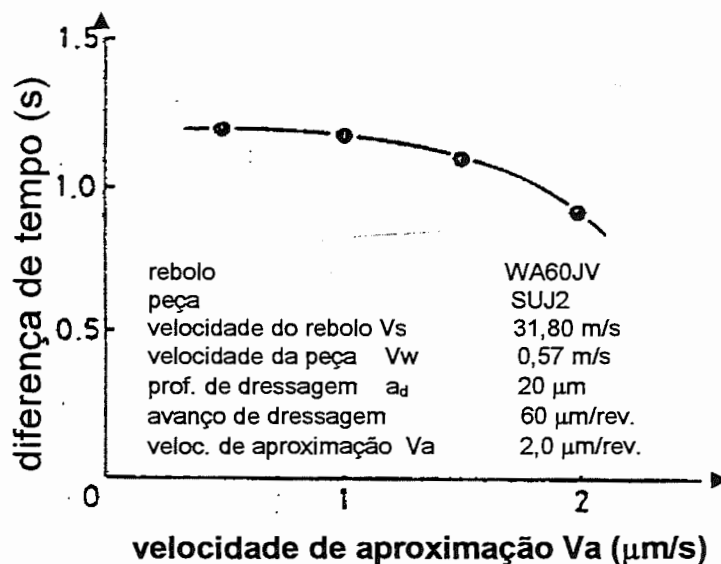


Figura 2.10 Diferença entre o tempo gasto para detecção de contato por EA e pela potência, Inasaki (1985).

Em todos os casos testados o atraso na resposta do monitor de potência elétrica em relação à resposta do monitor de EA está em torno de 1 segundo.

Dornfeld & Cai (1984) realizam uma pesquisa onde medem a variação do nível do sinal de EA durante a aproximação rebolo/peça em uma máquina

retificadora plana. A Figura 2.11 mostra a variação do nível do sinal de EA com o valor da distância rebolo/peça (H).

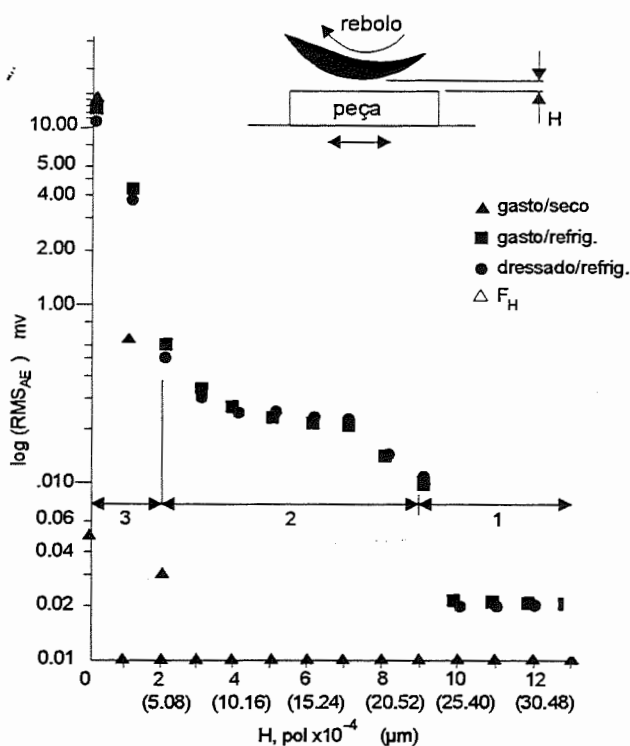


Figura 2.11 Variação do nível do sinal de EA com a distância H, Domfeld & Cai (1984).

Nesta pesquisa são determinadas três regiões distintas. Na primeira não há variações significativas no nível do sinal de EA, nesta região H é maior que 22,9μm. Na segunda, a mudança no nível do sinal é crescente, a partir do nível de "ruído" do sistema, aqui está havendo interação entre o rebolo e o fluido de corte e H diminui de 22,9μm para 5,1μm. Na terceira, inicialmente ocorre a interação rebolo/fluido/peça e em seguida o contato rebolo/peça, nesta região H vai de 5,1μm a zero, ou seja o toque na superfície.

No caso da detecção de contato o valor RMS do sinal de EA apresenta uma grande diferença entre o nível anterior e posterior à ocorrência do evento. Logo, as desvantagens do sinal de EA, como por exemplo: saturação ou variações no nível do sinal devido à configurações máquina/peça/rebolo, não interferem significativamente no caso da detecção de contato.

## 2.6 Problemas Dimensionais em Retificação

Em máquinas de usinagem, o erro de posição da aresta de corte de uma ferramenta em relação a peça-obra afeta diretamente a acuracidade do elemento sendo usinado. Este erro é composto por erros geométricos dos elementos estruturais da máquina, erros induzidos térmicamente, deformações devido a forças estáticas, desgaste da ferramenta e erros de fixação.

Pesquisas para melhorar a acuracidade da peça-obra pela compensação dos erros da máquina são realizadas em larga escala por laboratórios de pesquisa e em aplicações comerciais. Mas, a maioria tenta compensar apenas um ou alguns componentes do erro total de uma máquina, como retilidade das guias, histerese do fuso de esferas, etc.

Máquinas ferramenta são estruturas com múltiplos graus de liberdade compostas por corpos rígidos interligados. Cada elemento que se move segundo um eixo de direção dentro do sistema peça-estrutura-ferramenta possui seis graus de liberdade, três rotações e três translações em relação a este eixo. Além disso, o efeito do erro em um elemento deslizante pode ser amplificado pelo movimento de outro elemento deslizante.

Por outro lado, o efeito final da somatória de todos componentes individuais do erro é uma translação e uma rotação em torno de um eixo arbitrário no espaço. Assim, para uma operação com ferramenta de ponta única uma simples translação é o bastante para compensar os erros e conseguir uma grande acuracidade na usinagem, Donmez, Liu & Barash (1988), vide Figura 2.12.

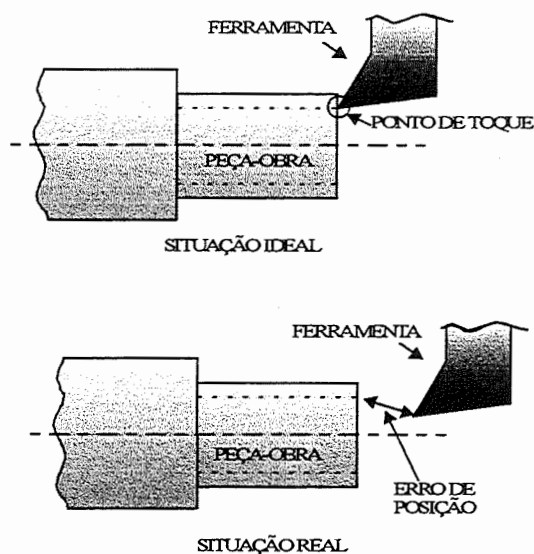


Figura 2.12 Erro de posição entre a aresta de corte e a peça, Donmez et al. (1988)

As retificadoras modernas de precisão, dotadas de CNC, usam elementos estruturais de alto desempenho e fusos de esferas cuja precisão é alta o suficiente para trabalhar com tolerâncias de peças da ordem de microns. Normalmente, os erros causados por deformações elásticas devido à força de retificação diminuem durante o spark-out. O spark-out ou centelhamento ocorre durante um período no final do ciclo de retificação, onde as deformações do sistema máquina/peça/rebolo são aliviadas.

Por outro lado, os erros por deformação térmica e desgaste do rebolo são de difícil compensação por causa da dificuldade em conhecer suas magnitudes. A Figura 2.13 mostra uma representação gráfica dos erros térmico e desgaste do rebolo em retificadoras. A distância  $D_x$  representa o valor armazenado na memória do CNC como o valor real da posição da superfície do rebolo. Este valor tem um erro  $d_g$  que é a soma das contribuições do desgaste do rebolo,  $d_s$ , e da deformação térmica da estrutura,  $d_t$ , Oliveira, Dornfeld & Schneider (1994).

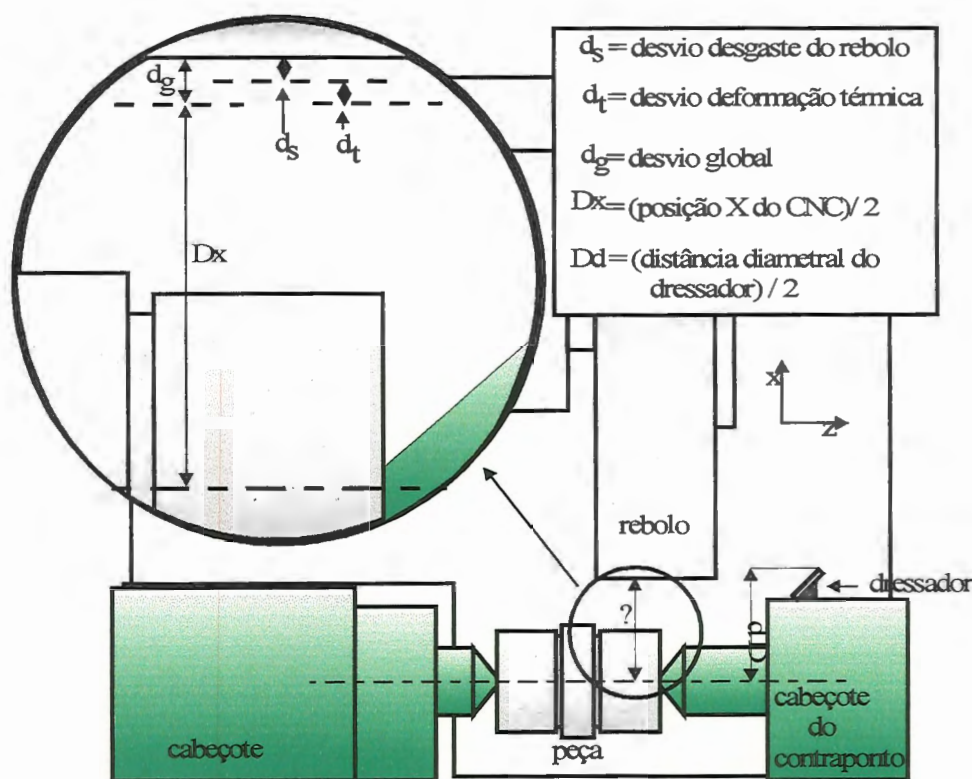


Figura 2.13 Desvio dimensional em retificadora cilíndrica, Oliveira, Dornfeld & Schneider (1994).

Segundo Oliveira, Dornfeld & Winter (1994) o perfil do rebolo é modificado durante o processo de retificação por um desgaste irregular. Esta

irregularidade é causada por diferenças nos volumes específicos removidos ao longo do eixo da peça-obra ou por variações na razão G causada por não homogeneidades do rebolo e peça-obra.

### 2.6.1 Compensação do Erro Global

Segundo Bicudo (1997) muitas das modernas retificadoras de precisão são dotadas de CNC. Se o valor do erro ao longo de um eixo específico estiver disponível no momento necessário o controlador é capaz de compensar esta deformação, colocando o rebolo muito próximo da posição desejada.

Os dados da deformação devem derivar da informação sobre as temperaturas coletadas na estrutura da máquina e posteriormente processadas numericamente para produzir informação sobre a sua deformação da estrutura. Redes Neurais tem demonstrado ter capacidade de estimar a deformação térmica em centros de usinagem. Neste caso as redes neurais são usadas para relacionar os valores de temperatura fornecidos pelos sensores fixados na estrutura da máquina com a deformação resultante.

A complexidade da distribuição térmica em retificadoras torna difícil obter uma solução analítica que deve ser ao mesmo tempo simples o bastante para ser implementada e abrangente o suficiente para produzir resultados úteis. Redes neurais são bastante adequadas para este tipo de aplicação. Depois de um treinamento apropriado, elas são capazes de fornecer uma saída totalmente compatível com uma entrada relacionada com os dados de treinamento. Este procedimento pode não ser capaz de fornecer a acuracidade

extrema requerida por algumas aplicações, mas quando combinado com métodos tradicionais pode-se obter melhores resultados.

Considerando que os erros geométricos e cinemáticos dos elementos que constituem uma retificadora são menos significativos, o erro total de posição é dado pela soma do erro de desgaste do rebolo mais o erro da deformação térmica. Existem três métodos que fazem este tipo de compensação.

- Medição da peça ao longo do processo - Em algumas retificadoras CNC os erros de posicionamento podem ser compensados medindo-se o diâmetro da peça. Neste caso, dispositivos de medição em processo podem determinar o diâmetro da peça com precisão de 5 microns.

Medindo-se o diâmetro real da peça durante a retificação, o CNC atualiza sua coordenada X com o valor do diâmetro da peça. As principais desvantagens desse método são os custos de aquisição dos instrumentos de medição em processo, a sua dificuldade de uso para peças longas ou de vários diâmetros e o fato de que estes sistemas não considerem as deformações estruturais da máquina causadas pela força de retificação.

Neste sistema de compensação não é possível saber onde é a posição do rebolo, independente da deformação estrutural. Assim, durante a operação de avanço para retificação o operador precisa determinar algum valor de deflexão para parar antes da posição final. Caso contrário, no tempo de spark-out o diâmetro da peça ficaria menor que o valor desejado. Para resolver este problema, são usados ciclos de retificação com vários tempos intermediários de spark-out, para minimizar as deformações estruturais da retificadora. Essa solução aumenta o tempo de retificação, Diniz et al (1995).

- Dressagem do rebolo - Nas retificadoras CNC o dressador costuma ser posicionado no contra-ponto e a distância entre a ponta do dressador e o eixo da peça praticamente não muda entre duas dressagens. Depois da dressagem o valor da distância entre a superfície do rebolo e o centro da peça é presumido como sendo igual à posição da ponta do dressador em relação ao centro da peça.

Portanto, o CNC substitui o valor da posição atual da superfície do rebolo durante a dressagem de modo a compensar os desvios térmicos e de desgaste do rebolo. Nesse caso, os erros a serem compensados afetam apenas o valor da profundidade de corte da dressagem. Tal profundidade precisa ser, portanto, maior que os erros globais.

A desvantagem desse método está nos custos adicionais de ferramenta, devido às repetidas afiações para compensação. Na retificação de precisão, onde as tolerâncias são muito pequenas, a frequência das operações de dressagem usualmente aumenta, aumentando, portanto, os custos e o tempo de produção, Diniz et al (1995).

- Medição pós-processo - O valor dimensional correto pode ser alcançado medindo-se a peça após a operação e, se necessário, corrigindo-se o valor para uma nova usinagem sempre dentro das tolerâncias desejadas. A medição pós-processo também tem custos altos e problemas de repetibilidade, quando realizada em regime de produção.

Oliveira, Dornfeld & Winter (1994) propõe um sistema para determinar a posição do rebolo utilizando o dressador como sonda e a detecção da EA para determinar o momento do contato. O sistema experimental proposto é



composto de um dressador de ponta única utilizado como sonda, um sistema de medição de deslocamento para o dressador e um sistema de monitoramento por EA. O sistema é proposto, mas não é testado para avaliar os seus ganhos.

É utilizada uma retificadora cilíndrica externa nos experimentos e para analisar a transição entre não-contato/contato elástico/contato frágil, a interação entre o dressador e o rebolo é realizada em ciclos de mergulho.

Cada avanço do dressador é executado até produzir uma marca no rebolo, o que garante que o contato frágil é alcançado. Para medir as profundidades das marcas, o perfil do rebolo é cuidadosamente copiado em uma pequena peça por retificação de mergulho e o perfil da peça é medido em um perfilmetro, que fornece o valor da máxima profundidade de corte.

A partir dos dados de máxima profundidade de corte e do valor da posição fornecido pelo sistema de medição de deslocamento é possível relacionar a posição com o nível de EA durante a transição entre a interação elástica para frágil. Esta posição, que representa o limite onde os danos no rebolo começam, é chamada aqui de posição virtual da superfície do rebolo.

A Figura 2.14 ilustra os resultados experimentais observados. Assim que a ponta do dressador penetra na borda formada pela camada de ar e refrigerante que circunda o rebolo, o nível de  $EA_{RMS}$  aumenta, o valor RMS do nível do sinal de EA detectado é chamado aqui de  $EA_{RMS}$ , por causa das ondas de choque devido à interação entre o fluxo turbulento e a ponta do dressador (área A). Quando o dressador se aproxima da superfície do rebolo, começam

as interações com as partes mais altas (o maior diâmetro aqui) dos grãos abrasivos.

No início somente deformações elásticas ocorrem (área B), como escorregamento ou atrito. Se o dressador for afastado a partir deste ponto, não haverá danos mensuráveis na superfície do rebolo.

O ponto onde começa a fratura dos grãos (área C) e portanto o desgaste volumétrico, é exatamente além da posição virtual. Este é a máxima profundidade que pode ser utilizada para a medição do rebolo.

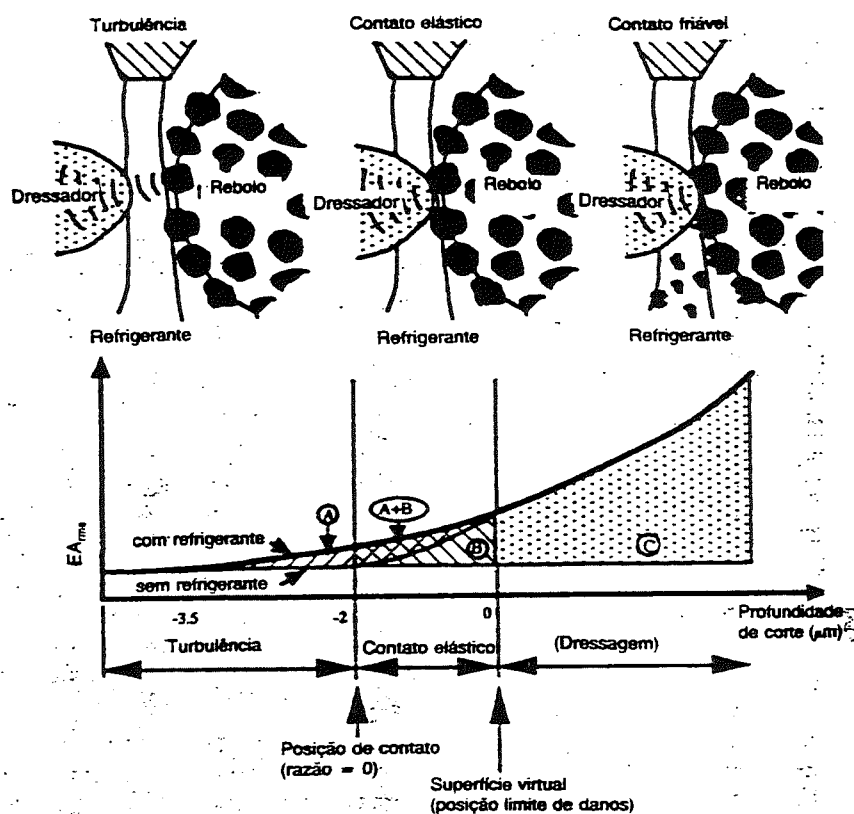


Figura 2.14  $EA_{RMS}$  na interação entre o dressador e o rebolo, Oliveira et al (1994).

São realizadas oito séries de testes para avaliar a influência de diferentes fatores na área elástica: grau de dureza do rebolo ( L,M ), raio da ponta do dressador ( 0.3 e 0.1 mm ) e diversas velocidades de mergulho.

As conclusões deste experimento de maior interesse para o presente trabalho são as seguintes:

- A medição da interação entre dressador e rebolo e a determinação da posição da superfície do rebolo é possível usando a tecnologia de sensoramento por EA e um dressador de diamante ponta única atuando como uma sonda de medição. Um sensor de EA fixado no dressador detecta o contato entre as superfícies do dressador/rebolo. Este contato pode ser utilizado como gatilho ( "trigger" ) para aquisição da posição do rebolo.
- O monitoramento por EA pode ser utilizado para distinguir as condições de contato entre rebolo/dressador que podem ser: não contato, contato elástico e contato frágil. O sinal  $EA_{RMS}$  na faixa de contato elástico pode ser utilizado pelo sistema de monitoramento, pois nesta faixa não ocorrem danos na superfície do rebolo.
- A geração de EA na área de contato elástico depende da dureza do rebolo e do perfil do dressador. Não sendo influenciada pela velocidade de mergulho contra o dressador. O sinal de  $EA_{RMS}$  cresce mais rápido para rebolos duros e para um dressador gasto, com o raio de ponta grande.

Felipe (1996) desenvolve um método chamado em seu trabalho de calibração do rebolo, onde é verificada a capacidade de um sistema de monitoramento por EA para detectar o contato entre um dressador de diamante ponta única e o rebolo. Esta sistema é implementado em uma retificadora cilíndrica externa CNC.

O rebolo é movimentado até próximo do dressador e avança até que o contato seja detectado pelo monitor de EA. A posição do dressador é

conhecida, logo, a posição da superfície do rebolo também, esta posição pode então ser atualizada no CNC para compensar desgastes e deformações térmicas.

Para investigar a possibilidade de produção de marcas no rebolo, através deste sistema, que possam prejudicar a operação de retificação a calibração é realizada com diversas velocidades de avanço. Para cada velocidade, a calibração é realizada quatro vezes, no mesmo ponto do rebolo.

Após cada detecção, o valor da coordenada X na qual o rebolo é detectado é anotada, obtendo-se então quatro valores. As diferenças entre estes valores indicam quanto o dressador penetrou no rebolo, desgastando-o em cada mergulho. Fazendo uma média dos três valores obtidos nas diferenças, obtêm-se o gráfico mostrado na Figura 2.15.

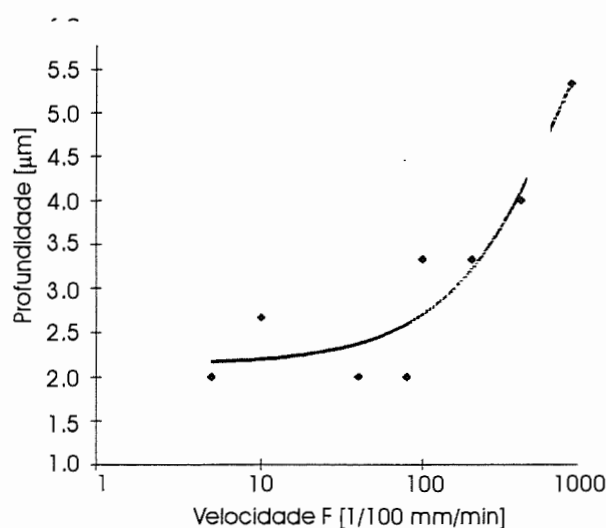


Figura 2.15 Marca deixada no rebolo pela calibração, Felipe (1996)

Retifica-se então uma peça com este rebolo, em baixa velocidade de avanço e em seguida mede-se o perfil desta peça. Do gráfico da Figura 2.15 pode-se notar que utilizando velocidades baixas para a calibração, a marca deixada é da ordem de 2  $\mu\text{m}$ . Na Figura 2.16 o mesmo valor é encontrado.

Segundo Felipe (1996) é preciso observar ainda que estas marcas são feitas por um diamante dressador. Um diamante de calibração, com área de contato maior e sem ponta, com certeza possibilitaria a obtenção de valores inferiores para estas marcas, da ordem de  $1\ \mu\text{m}$  ou menos.

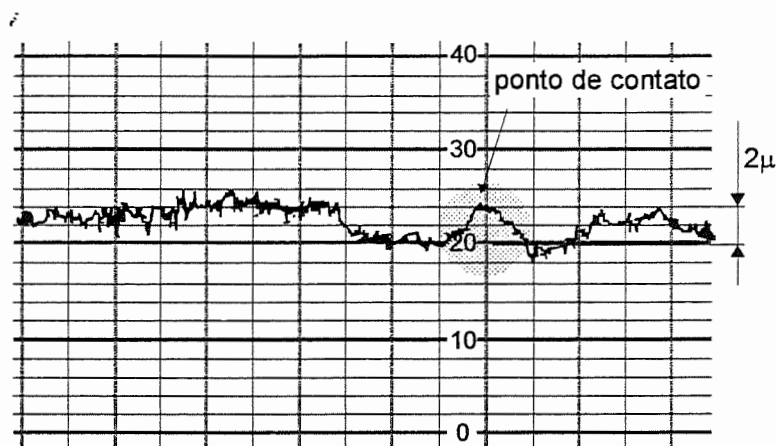


Figura 2.16 Marca provocada pelo dressador durante calibração, Felipe (1996).

A resolução do sistema coincide com a resolução e repetibilidade da máquina, uma vez que os sistemas de medição e controle da máquina estão sendo utilizados. Conclui-se então que é possível realizar uma medição do rebolo para efetuar a sua calibração, compensar o desgaste radial ou detectar a necessidade de uma dressagem, sem causar marcas neste que provoquem danos à peça sendo retificada.

### 3. Proposta de Método para Melhoria da Capabilidade Dimensional em Retificadoras Cilíndricas CNC

A proposta deste trabalho é implementar um método para determinar a posição real da superfície de trabalho do rebolo e atualizar automaticamente esta posição no CNC. Este método chamado aqui de calibração do rebolo é baseado no estudo proposto por Oliveira, Dornfeld & Schneider (1994), cujo objetivo é determinar a relação entre o nível de EA, gerada durante a aproximação do rebolo contra um diamante de dressagem, e a posição da superfície do rebolo em relação ao mesmo diamante.

Felipe(1996) pesquisou e testou o método, conseguindo bons resultados. A partir destes resultados propôs detalhes para a implementação do método em ambientes de manufatura. Com o conhecimento da posição da superfície de trabalho do rebolo em relação a um referencial fixo, como por exemplo: a linha de centro do contra-ponto, aqui chamada de posição real da superfície do rebolo, os erros devido ao desgaste radial e às deformações térmicas da máquina podem ser compensados automaticamente, melhorando a capacidade dimensional.

Normalmente esta compensação é executada pelo operador após a medição de uma peça recém - produzida, se a peça estiver fora ou tendendo a sair da faixa de tolerância dimensional o operador realiza um procedimento manual ou automático.

### 3.1 O que é o método

A calibração do rebolo é executada através de uma operação de detecção de contato com um diamante de calibração. Esta detecção é realizada por um monitor de EA capaz de se comunicar com o CNC, que por sua vez é programado para receber entradas externas.

O monitor de EA utilizado neste trabalho é um BM 12, este equipamento é apresentado, juntamente com alguns outros similares, no apêndice I. Este equipamento possui saídas para comunicação com o CNC. A saída utilizada é uma das saídas controladas por relês. A comunicação se dá através de um pulso de tensão elétrica, utilizando uma fonte de tensão do próprio CNC. No contato comum do relê é conectada a tensão de alimentação do CNC e o contato normalmente aberto é conectado a uma entrada do CNC que está programada para receber este pulso.

O relê é comandado por um circuito comparador de nível que trabalha com um nível estático, que é ajustável no painel frontal do monitor de EA. Para que o relê atue quando o nível limite(threshold) for ultrapassado, ou seja, quando houver contato, é selecionada esta opção de acionamento do relê em um "strap" interno do monitor de EA. Assim, havendo contato, o nível de EA produzido ultrapassa o limite ajustado, fazendo com que o circuito comparador feche o respectivo relê, conectando a posição comum à normalmente aberta, colocando, desta forma, tensão na entrada programada do CNC.

O comando implementado no software do CNC pelo fabricante da retificadora e batizado pelo mesmo de G23, manda o CNC ficar lendo esta entrada. No momento em que há tensão, este comando manda o CNC executar o próximo passo do programa. O próximo passo manda recuar o rebolo alguns décimos de milímetro. A posição onde o rebolo pára após o recuo é, portanto, a do topo do diamante mais a distância recuada.

Utiliza-se então o comando G10 no passo seguinte. Este comando atribui à posição onde o rebolo está o valor declarado no comando, atualizando a posição do rebolo. O valor declarado representa a posição real do diamante de calibração adicionada do recuo adotado. A Figura 3.1 mostra o esquema de interligação do sistema de calibração do rebolo, simulando o momento do contato rebolo/diamante.

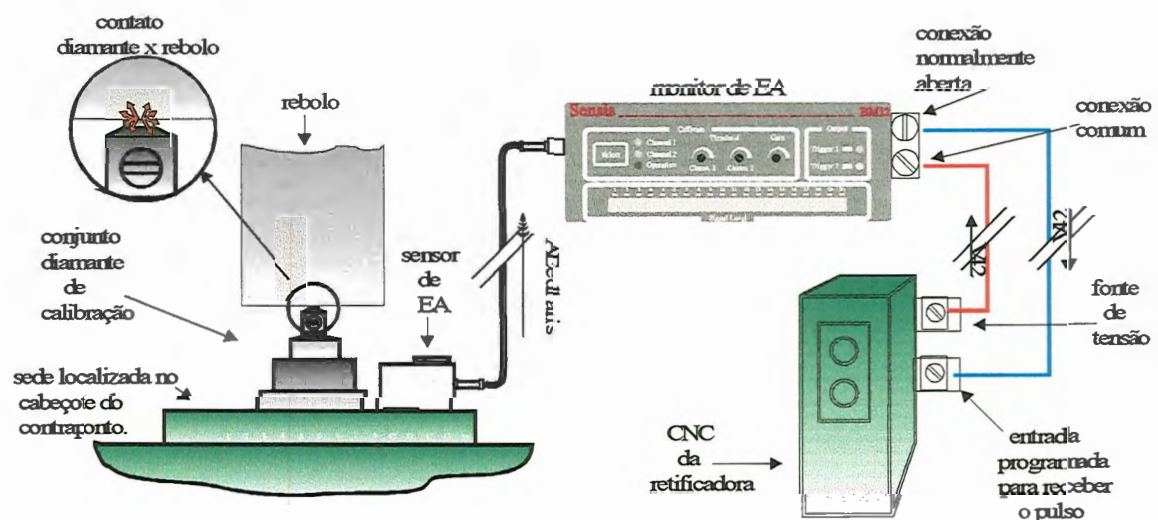


Figura 3.1 Esquema de interligação do sistema de calibração do rebolo.



### 3.1.1 Diamante de calibração

O conjunto formado pelo diamante e pelo suporte de fixação é chamado aqui de diamante de calibração. O diamante utilizado para compor este conjunto deve possuir um formato específico, que é diferente daqueles utilizados na construção de dressadores.

O tempo de interação rebolo/diamante no contato é diretamente proporcional ao desgaste do diamante. Para diminuir este tempo é necessário aumentar o volume de EA produzido no choque do diamante com a camada mais superficial possível do rebolo. Desta forma com uma interação mínima o monitor de EA pode detectar o toque.

Por isto, a área de contato do diamante para calibração deve ser maior para aumentar o volume de EA produzido com a mínima interação. Como as marcas produzidas no rebolo também dependem do tempo de interação, um menor tempo contribui para diminuí-las.

Assim, devido ao seu formato e à utilização do diamante de calibração exclusivamente para medição presume-se que o seu desgaste seja praticamente zero, mantendo a posição do topo do diamante conhecida por mais tempo.

Para este trabalho foi adquirido junto à empresa DeBeers um diamante sintético com a forma de um paralelepípedo. A Figura 3.2 mostra as dimensões e a forma do diamante.

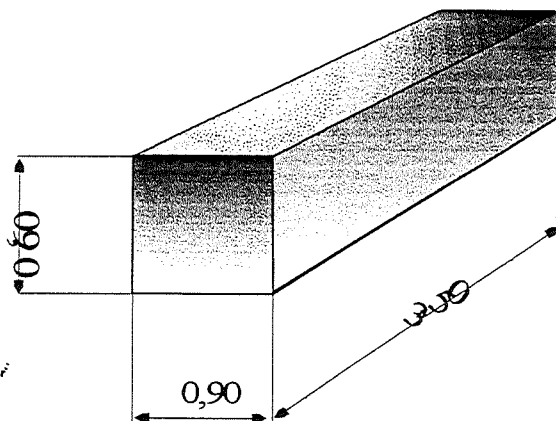


Figura 3.2 Diamante para calibração, medidas em [ mm ]

O suporte de fixação deste diamante deve ser rígido o bastante para que sua deformação, devido às forças envolvidas, seja desprezível. Em vista disso utiliza-se para construção do suporte o material VC 131, que após a usinagem, passa pelo processo de tempera em óleo. Este suporte é construído de forma a se ajustar em uma sede existente no cabeçote do contra-ponto da retificadora, que tem a forma circular.

O suporte é construído em duas partes, uma delas fica embutida na sede existente, que por sua vez está embutida no cabeçote do contra-ponto. A outra pode ser facilmente removida, para facilitar a manutenção. A cabeça em forma de pinça da parte removível do suporte permite que o diamante utilizado fique rigidamente acoplado com a pressão de um parafuso M2.

A Figura 3.3 mostra as formas das partes do suporte. O projeto com as dimensões, tolerâncias e detalhes construtivos é apresentado no apêndice IV.

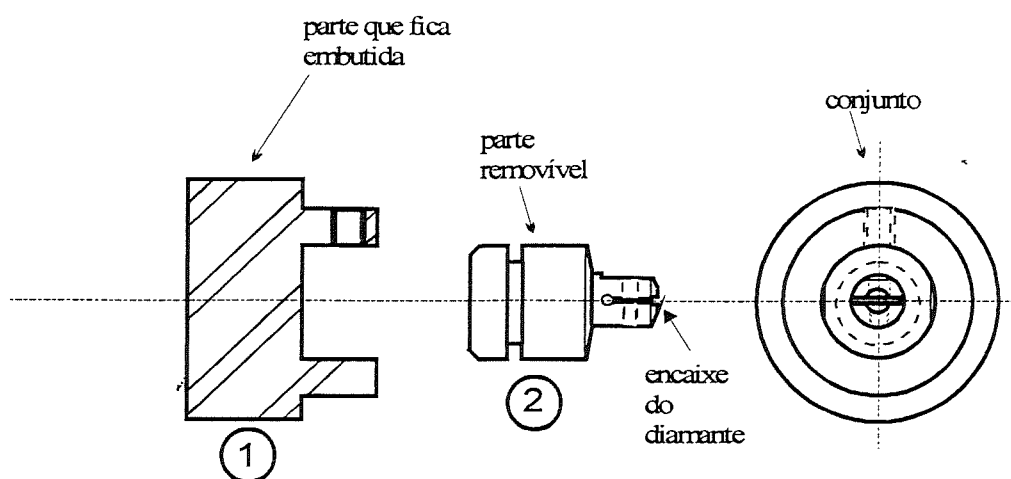


Figura 3.3 Partes do suporte de fixação do diamante, material VC 131 temperado em óleo.

Os ajustes da parte ① do diamante de calibração com a sede e entre as partes 1 e ② do mesmo são deslizantes e possuem parafusos que as fixam e eliminam as folgas. Assim, presume-se que a fixação do diamante de calibração na sede é rígida, condição necessária para garantir que o valor da distância do topo do diamante à linha de centro do contra-ponto seja fixa.

Para que o método em questão tenha um bom desempenho é necessário ainda que a influência das deformações térmicas da máquina sobre a distância entre a linha de centro do contra-ponto e topo do diamante de calibração seja desprezível.

A sede existente no cabeçote do contra-ponto fica próxima ao dressador. Na operação de dressagem a posição do rebolo é atualizada descontando a profundidade dressada. Por isso, as considerações a respeito da influência das deformações térmicas também são válidas para a distância entre a linha de centro do contra-ponto e o topo do dressador. A Figura 3.4 mostra um esquema do cabeçote do contra-ponto desta máquina, com a

localização do diamante de calibração e do dressador. A linha de centro do contra-ponto mostrada na figura coincide com a da peça.

Pode-se portanto, considerar que todas as condições necessárias para garantir que se conheça a posição do topo do diamante de calibração estão satisfeitas.

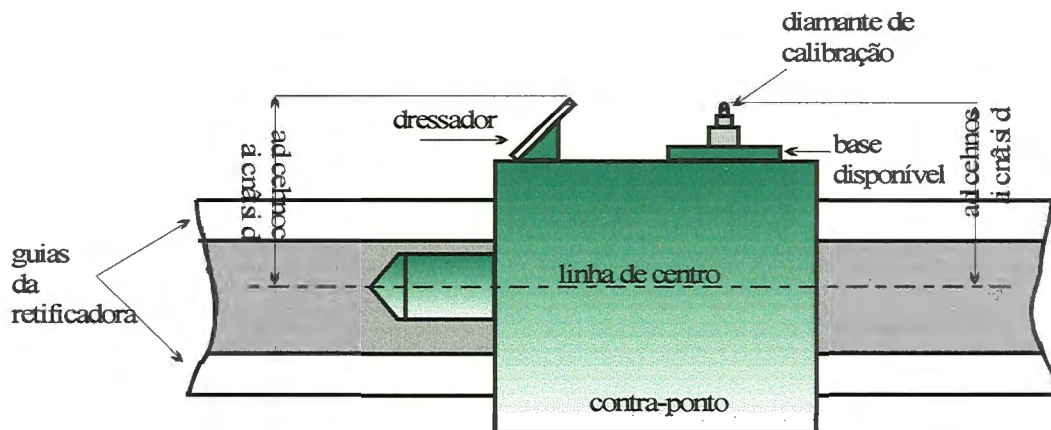


Figura 3.4 Esquema do cabeçote do contra-ponto com as distâncias: linha de centro x topo do diamante de calibração e linha de centro x topo do dressador.

### 3.1.2 Rotina de Calibração

Neste item é apresentada a rotina da calibração proposta neste trabalho. Esta rotina deve ser implementada no CNC já modificado para receber entradas externas. A rotina possui cinco etapas, descritas a seguir:

- Na primeira etapa é executada uma aproximação rápida do rebolo, até próximo do topo do diamante de calibração.

- Na segunda etapa é utilizada uma velocidade intermediária para avançar até alguns décimos de milímetro de distância do diamante. Esta é uma etapa de segurança contra colisões.
- Na terceira etapa o avanço contra o diamante é lento, visando a operação de detecção de contato por EA.
- A quarta etapa começa quando o monitor de EA detecta o contato e ordena ao CNC que recue rapidamente alguns décimos de milímetro.
- Na quinta etapa, após recuar o CNC atualiza a posição do rebolo com a posição do topo do diamante mais a distância recuada.

Para que a posição do rebolo seja atualizada sempre com a mesma cota esta rotina deve ser executada durante a operação de retificação e também na operação de dressagem. Na operação de dressagem a rotina de calibração deve ser executada pelo menos no final. Pois, como já foi mencionado, durante esta operação é executada uma atualização com a posição do topo do dressador. A Figura 3.5 apresenta um gráfico que representa o deslocamento do rebolo em cada etapa, numeradas de 1 a 5.

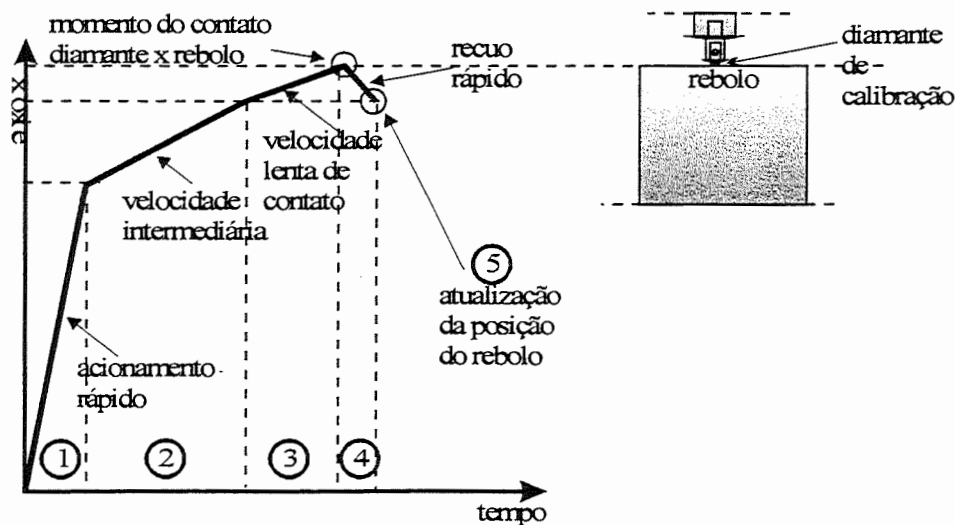


Figura 3.5 Gráfico dos deslocamentos do rebolo nas respectivas etapas.

### 3.1.3 Cuidados na Calibração

Para que se possa obter bons resultados com este método alguns cuidados devem ser observados. A execução da rotina de calibração durante a retificação consome tempo e pode produzir marcas no rebolo. Implica também em desgaste do diamante, por menor que seja. Logo, deve-se determinar um intervalo entre calibrações que seja eficiente quanto a manter as dimensões, mas que não implique em um aumento significativo do tempo total de usinagem. Além disso as marcas produzidas na superfície do rebolo não podem aparecer na próxima peça usinada.

O sensor de EA deve ser instalado o mais próximo possível do diamante de calibração evitando atenuações do sinal na sua propagação pela estrutura da máquina. Como pretende-se detectar o contato rebolo/diamante o mais rapidamente possível a sensibilidade do monitor de EA tem que ser grande. Uma sensibilidade alta pode trazer problemas quanto à realização da calibração com refrigeração.

Durante a execução da rotina de calibração é importante que o recuo realizado na quarta etapa seja realizado o mais rapidamente possível para evitar sobreaquecimento e desgaste do diamante. E também para evitar a formação de marcas no rebolo.

Na programação do CNC a linha de centro do contra-ponto pode ser tomada como referência para  $X = 0$ . A utilização desta referência facilita a programação evitando a adição de um off-set às posições programadas.

## 3.2 Resultados Esperados

São testadas nos ensaios várias possibilidades de utilização do método proposto. Estas possibilidades estão relacionadas com o conhecimento da posição do rebolo em processo e sua atualização automática no CNC. Os resultados esperados são:

### 3.2.1 Compensação dos Erros de Posição do Rebolo

Os erros de posição da superfície de trabalho do rebolo produzidos pela deformação térmica da retificadora e/ou pelo desgaste radial do rebolo afetam significativamente as dimensões das peças usinadas. Tanto a deformação térmica como o desgaste radial tornam a posição real da superfície de trabalho do rebolo desconhecida.

A atualização automática da posição do rebolo proposta neste método torna a posição real do rebolo novamente conhecida, compensando automaticamente os erros que a tornaram desconhecida.

### 3.2.2 Aumento da Faixa de Tolerância de Sobremetal

A quantidade de sobremetal que vem da operação anterior é normalmente controlada dentro de uma faixa. Este fator tem grande influência no desgaste radial do rebolo. Com a utilização deste método o limite superior desta faixa pode ser aumentado, pois um desgaste maior causado no rebolo

devido a um pequeno aumento de sobremetal será compensado automaticamente na próxima calibração.

Este resultado é interessante para a execução da operação anterior, que poderá ser mais rápida, devido às tolerâncias alvo serem mais abertas.

### 3.2.3 Melhoria da Repetibilidade Dimensional

Quando se executa uma operação de usinagem espera-se que as dimensões das peças resultantes estejam dentro de uma faixa de tolerância, próximas da dimensão média requerida.

A melhoria da repetibilidade dimensional de uma máquina diminui a dispersão das dimensões das peças fabricadas. A largura da faixa de dispersão define a qualidade dimensional do lote de peças.

O método proposto pode melhorar a repetibilidade compensando os erros consequentes da deformação térmica da máquina, do desgaste radial do rebolo e de outros que contribuam para que a posição real do rebolo seja diferente daquela presumida pelo CNC.

Com a calibração do rebolo a sua posição real torna-se novamente conhecida, compensando os erros que implicavam em peças produzidas com uma dispersão de dimensões muito grande.

A atualização de posição em processo, proposta neste método, possibilita que se conheça a posição real do rebolo sempre que se execute a calibração do rebolo.



### 3.2.4 Redução do Tempo de Setup Dimensional

O tempo de setup dimensional será bastante reduzido com a utilização deste método e também será bastante simplificado se a referência para  $X = 0$  for programada para coincidir com a linha de centro do contra-ponto. Desta forma para realizar o setup dimensional basta executar a rotina de calibração e utilizar o valor real do diâmetro da peça a ser retificada para calcular os valores que entrarão no programa CNC de retificação.

### 3.2.5 Marcas no Rebolo

Espera-se que as marcas produzidas no rebolo pela utilização deste método tenham dimensões insignificantes para que não sejam transferidas para peça. Marcas na peça podem comprometer sua funcionalidade no caso de peças de alta precisão, pois geralmente a retificação é o última etapa de um processo de fabricação.

### 3.2.6 Redução do Tempo de Dressagem

Realizando a calibração do rebolo antes da operação de dressagem a posição do rebolo será atualizada, evitando que se faça um passe de dressagem em vazio, ou dressando pouco devido a um desgaste do rebolo maior que a profundidade de dressagem( $a_d$ ) programada. Este procedimento

poupa tempo pois a dressagem é sempre realizada com a mesma profundidade.

### 3.2.7 Redução do Tempo de Produção

Normalmente o procedimento utilizado pelo operador em um ciclo de produção é medir algumas peças produzidas em intervalos regulares. Quando há peças fora das tolerâncias ele tem que ajustar a máquina manualmente ou automaticamente, o que implica em interrupções e tempo perdido. Eliminando a necessidade de medições e interrupções ao longo do processo poupa-se tempo.

## 4. Desenvolvimento experimental

### 4.1 Introdução

O objetivo da parte experimental é testar o desempenho do sistema de calibração, na melhoria da capacidade dimensional de uma retificadora cilíndrica CNC ZEMA modelo G800.

Com este sistema pretende-se manter as peças usinadas dentro de uma faixa de tolerância dimensional mais estreita, respeitando outras especificações tecnológicas normalmente requeridas em uma operação de retificação .

O experimento consiste na usinagem de peças em operação de retificação cilíndrica de mergulho, em várias condições de usinagem, sem e com a utilização do sistema de calibração. Cada condição de usinagem utilizada produz um lote de peças, cuja tamanho é limitado pela vida do rebolo. O parâmetro adotado para determinar o fim de vida do rebolo é a rugosidade superficial da peça. Que é avaliada através do valor do desvio médio aritmético - Ra - CLA( Center Line Average ).

Nos ensaios sem calibração são utilizados programas CNC para retificação e dressagem. Para os ensaios com calibração, é utilizado também um programa CNC para calibração. Considerando a faixa de tolerância dimensional adotada para as peças resultantes, os possíveis danos causados no rebolo pela interação com o diamante de calibração e o tempo gasto por ciclo de calibração adota-se o procedimento de executar um ciclo de calibração a cada cinco peças produzidas.

O software do CNC da retificadora foi modificado de forma a se comunicar com equipamentos externos. Um monitor de EA é conectado às entradas do CNC da máquina com a função de sinalizar o momento do contato rebolo/peça na retificação, contato rebolo/diamante na calibração e descontinuidade no sinal na dressagem.

Os ensaios são realizados conjuntamente com um aluno de mestrado do curso de engenharia de fabricação mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp. Cujo objetivo é pesquisar a relação entre o desgaste do rebolo e os seguintes parâmetros: EA, vibração e potência do motor rebolo, para futuras aplicações, por exemplo, em previsão de fim de vida do rebolo.

Como o banco de ensaios fornece dados para os dois experimentos são utilizados mais equipamentos do que os necessários para alcançar o objetivo proposto no início deste capítulo. Alguns resultados referentes ao outro projeto de mestrado foram aproveitados, pois fornecem informações complementares para análise dos resultados. Por isso o banco de ensaios descrito no próximo item apresenta todos os equipamentos utilizados para ambos os ensaios.

Os objetivos dos ensaios realizados são:

- analisar o comportamento do sistema de calibração,
- analisar possíveis falhas do sistema e propor soluções,
- analisar a dispersão de medidas das peças resultantes,
- apresentar metodologia para aplicação do sistema em sistemas produtivos.

## 4.2 Banco de ensaios

Os ensaios são realizados em uma retificadora cilíndrica externa CNC Zema modelo G800. São utilizados dois tipos de rebolo: AA80G6V e AA80R6V, observa-se que a única especificação diferente entre eles é a dureza da liga. A Figura 4.1 mostra o esquema de montagem do banco de ensaios.

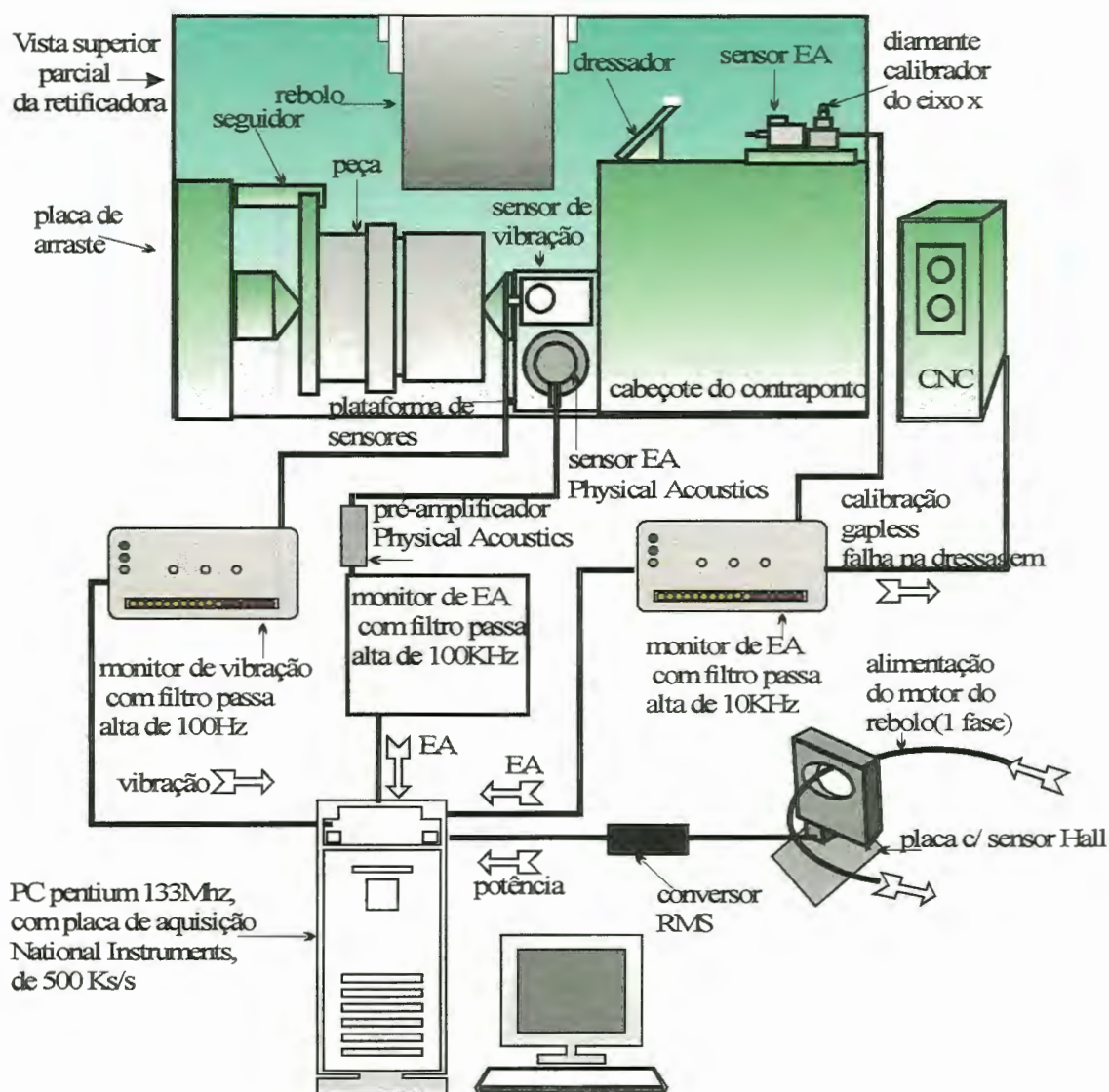


Figura 4.1 Esquema do banco de ensaios

O diamante calibrador está fixado no contra-ponto, em uma sede existente na máquina, destinada a um segundo dressador. Para monitorar os sinais de EA, é utilizado um monitor de EA marca Sensis modelo BM 12 com um filtro passa-alta de 10kHz e um monitor de EA construído pelo grupo de usinagem da FEM da UNICAMP, com um filtro passa-alta de 100kHz, este monitor é composto de dois módulos: um pré-amplificador Physical Acoustics e um módulo de amplificação e análise. Para monitorar vibração é utilizado um monitor de vibração marca Sensis, com um filtro passa-alta de 100Hz.

O sensor de EA conectado ao monitor BM 12 com filtro de 10kHz, é utilizado para detectar contato do rebolo com a peça, do rebolo com o diamante e para monitorar a dressagem. Está fixado na mesma base onde está instalado o diamante calibrador.

O sensor utilizado para adquirir os sinais de vibração e o sensor utilizado pelo monitor de EA da FEM/Unicamp estão fixados em uma placa de aço, fixada rigidamente ao contra-ponto.

Para o sinal de potência é utilizada uma placa com sensor de efeito Hall, marca Newtronics, cujo sinal de saída é convertido para o RMS por um circuito construído no grupo de retificação do LAMAFE.

As saídas dos equipamentos citados acima estão conectados à 4 canais de uma placa de aquisição de dados National Instruments ATMO16- E2. Esta placa está instalada em um microcomputador pentium 133Mhz. A placa possui 16 canais para aquisição de sinais "singulares", que é o tipo de sinal utilizado neste experimento. A máxima velocidade de aquisição é de 500Ks/s ( $5 \times 10^5$ )

pontos por segundo ), possui resolução de 12 bits e faixa de ganho detectável por software.

O software LabView é utilizado para comunicação com a placa. Através de programa, escrito em linguagem Labview, pode-se visualizar os sinais de EA, vibração e potência em tempo real e se necessário armazenar os dados em disco.

Para medição dimensional é utilizado um micrômetro mecânico marca Tesa, com resolução de 0,001mm. Para medição da rugosidade superficial utiliza-se um rugosímetro marca Taylor-Hobson modelo Surtronic 3P. A circularidade é medida em um sistema Taly-Round 250.

### 4.3 Condições de Usinagem, Aquisição e Medição Utilizadas

Inicialmente mede-se a largura ( $b_d$ ) do dressador, informação utilizada para se determinar o grau de recobrimento ( $u_d$ ). Após a dressagem executa-se a limpeza da camada descarbonizada da tempera para uniformizar as dimensões e a forma das peças. Realiza-se então um ensaio preliminar para ajustar os equipamentos de controle e aquisição de dados.

#### 4.3.1 Condições de Usinagem

Parte-se então de condições de usinagem consideradas normais para retificação de semi acabamento. Estas condições foram levantadas junto à operadores experientes em visitas à indústrias metal-mecânicas. Porém nestas condições a taxa de desgaste do rebolo por peça é muito pequena, o que

implica em muito tempo de ensaio. A Figura 4.2 apresenta as condições de usinagem utilizadas nos ensaios.

data	dureza do rebolo	avanço (mm/min)	tempo de sparkout (s)	Ud	rotação da peça (rpm)	rotação do rebolo (rpm)	ciclo de calibração	peças por ensaio	sobremetal usinado(mm)
28/10/96	R	0,50	10	5	70	1750	sem	50	0,5
29/10/96	G	0,50	4	5	70	1750	sem	23	0,5
	G	0,50	4	5	70	1750	sem	34	0,5
30/10/96	G	0,70	4	5	210	1750	sem	24	0,8
	G	1,00	4	5	210	1750	sem	7	0,8
6/11/96	G	0,70	4	5	210	1750	com	11	0,8
	G	1,00	4	5	210	1750	com	5	0,8
12/11/96	R	0,50	4	5	70	1750	com	70	0,5

Figura 4.2 Condições de usinagem utilizadas nos ensaios.

Para acelerar o mecanismo de desgaste do rebolo passa-se a utilizar condições mais severas, como por exemplo utilizar o grau de recobrimento de dressagem,  $U_d = 5$ , indicado para retificação de acabamento (Oliveira, 88) juntamente com velocidades de avanço e profundidades de corte indicadas, normalmente, para semi-acabamento ou desbaste. O aumento da severidade da operação possibilita atingir o fim de vida do rebolo em um tempo menor. Apesar da utilização de condições de usinagem diferentes das usuais, parâmetros que influem na produtividade como tempo do ciclo de retificação são mantidos dentro da faixa normal para fabricação de grandes lotes. As faixas de tempo também foram levantadas em visitas à indústrias. Procura-se com isso obter resultados que possam ser utilizados em ambientes normais de produção.



#### 4.3.2 Condições de Aquisição e Medição

Os sinais analógicos de EA, vibração, e potência são adquiridos pela placa ATMIO-E2, que os digitaliza. Estes sinais são convertidos para RMS ( Root Mean Square ) antes da aquisição. Esta conversão é realizada tomando-se um valor dentro de um intervalo de tempo constante. O valor tomado corresponde à raiz quadrada da média da somatória dos quadrados dos pontos adquiridos dentro desta janela. Portanto, a conversão diminui o número de pontos que descrevem o perfil do gráfico do sinal.

Um parâmetro a ser ajustado no programa é a taxa de aquisição. Esta taxa determina o número de pontos adquiridos por segundo. Devido à conversão para o RMS ser relativamente lenta esta taxa pode ser pequena, sem prejuízo para resolução do gráfico obtido. A taxa de aquisição utilizada nos experimentos é de 30 pontos/segundo que é suficiente para a identificação dos fenômenos em questão. Além disso, por ser relativamente pequena o tamanho do arquivo de armazenamento necessário em cada ensaio é reduzido.

Os pontos adquiridos são inicialmente armazenados em um “buffer” de memória, para depois serem plotados na tela do monitor. Este programa também permite ajustar o número de pontos adquiridos por “buffer”. Para assegurar que o gráfico do sinal adquirido seja plotado em tempo real é utilizado o número mínimo de pontos por “buffer” aceito pela placa, que são 3, em todos os ensaios. Pode-se também controlar o salvamento dos dados

adquiridos, especificando diretórios e arquivos a serem utilizados se a opção for salvar os dados.

O sistema Taly-Round utilizado para medir a circularidade possui um parâmetro chamado filtro que deve ser ajustado. Trata-se de um filtro passa-baixa, que é medido em upr (undulations per revolution) e utilizado para descartar o efeito da rugosidade. A Figura 4.3 apresenta as condições utilizadas para aquisição e também as utilizadas na medição da rugosidade e circularidade.

data	pontos p/ seg.	cut off rugosidade( $\mu\text{m}$ )	filtro circularidade(upr)
28/10/96	30	0,25	50
29/10/96	30	0,8	500
	30	0,8	-
30/10/96	30	0,8	500
	30	0,8	500
6/11/96	30	0,8	-
	30	0,8	-
12/11/96	30	0,8	500

Figura 4.3 Condições utilizadas para aquisição e medição.

#### 4.4 Procedimento Experimental

A retificadora é ligada no início de cada bateria de ensaios e permanece neste estado até o fim destes ensaios. O tempo utilizado para execução de cada bateria de ensaios é variável, pois o tempo de vida do rebolo depende das condições de usinagem utilizadas.

O fluxo de refrigerante também é ligado desde o início e permanece neste estado durante todo período de ensaio, no caso de experimentos sem

calibração do rebolo. Nos ensaios com calibração o refrigerante é desligado apenas durante a execução do programa CNC de calibração.

Nos ensaios são utilizadas 50 peças usinadas de uma mesma barra, de aço 4340 que após a tempera atingiram a dureza de 48 Hrc no diâmetro de 57,00 mm e 49 Hrc no diâmetro de 58,00 mm. A Figura 4.4 mostra o formato da peça e suas dimensões em [mm].

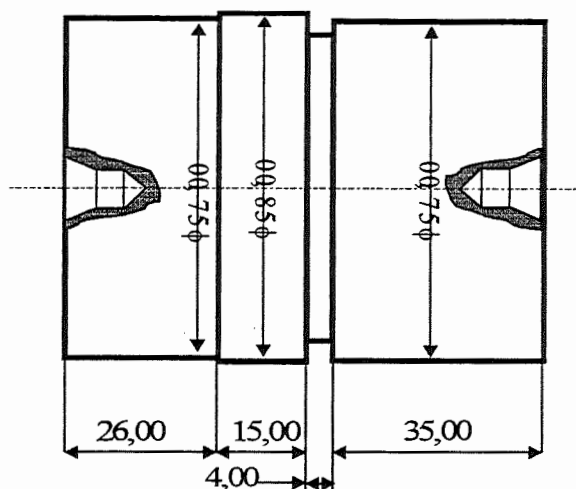


Figura 4.4 Peça utilizada nos ensaios, material: aço 4340 temperado

As peças que compõe cada lote são retificadas em seguida até que a rugosidade superficial alcance o valor adotado como limitante para a vida do rebolo. Este é então dressado para produzir um outro lote.

As dimensões e a rugosidade das peças usinadas são medidas no local, à medida que são produzidas. Esta medição é realizada em todas as peças, possibilitando o acompanhamento da dispersão das dimensões e a identificação do fim de vida do rebolo. Como parâmetro para fim de vida do

rebolo é adotado um limite para o valor de Ra. Este limite é  $Ra=0,85\mu$ , valor normalmente utilizado como limitante, para este tipo de operação.

Após a produção de um lote de peças, cerca de 20% são tomadas ao acaso e levadas a um sistema Taly-Round 250 para medir a circularidade.

#### 4.4.1 Instalação dos sensores

A placa Newtronics que possui o sensor de efeito Hall é instalada diretamente no armário elétrico da retificadora e necessita apenas que um cabo conduzindo uma das fases de alimentação do motor do rebolo passe por dentro da bobina do sensor.

A instalação dos sensores de EA e de vibração requer alguns cuidados, devido à necessidade de áreas de contato efetivo sensor/estrutura. São utilizados dois sensores de EA, para um deles já existia na retificadora um área apropriada ao lado do diamante calibrador, pois a função principal deste sensor é detectar o contato rebolo/diamante. Para o outro sensor de EA e o de vibração o melhor local para fixação é o contra-ponto, pois a função principal destes sensores é o monitoramento da retificação. Como o contra-ponto possui uma área fresada e retificada para fixação de apenas um sensor é necessária a usinagem e adaptação de uma placa de aço com área suficiente para os dois sensores.

A placa deve ser grossa para evitar vibrações que possam distorcer a EA e suas faces retificadas para garantir o contato efetivo entre: contra-ponto/placa/sensores. A Figura 4.5 mostra a forma e dimensões da placa.

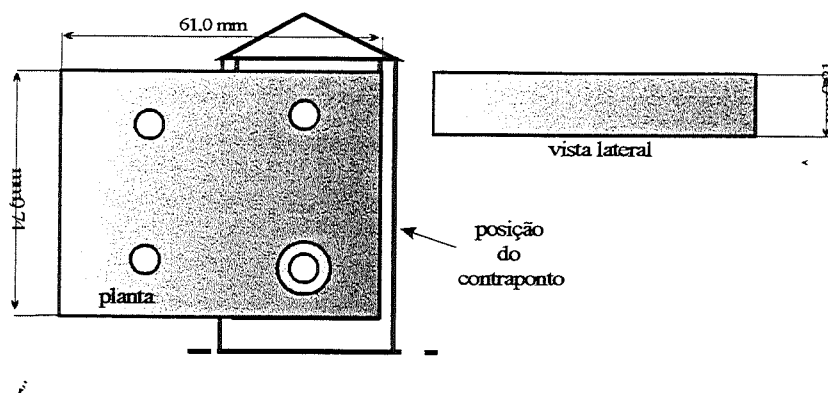


Figura 4.5 Placa para fixação de sensores

#### 4.4.2 Descrição dos programas CNC

Nos experimentos são utilizados três programas CNC que executam as seguintes operações: retificação, dressagem e calibração. O programa de calibração é utilizado também como subrotina dentro do programa de dressagem. A única diferença entre um programa e uma subrotina na programação do CNC desta máquina retificadora é a última linha da listagem, que quando trata-se de um programa, esta linha deve conter o comando de fim de programa.

Todos os programas utilizam uma cota X de segurança para movimentação no eixo Z, realizada em velocidade máxima G0. Esta cota é chamada de Xs. As cotas Z se referem ao canto esquerdo do rebolo. Sendo que a coordenada (Xs,Zs) é a posição de partida e retorno para os três programas.

A Figura 4.6 mostra uma vista superior parcial da retificadora com o esquema das movimentações do rebolo e as posições citadas acima.

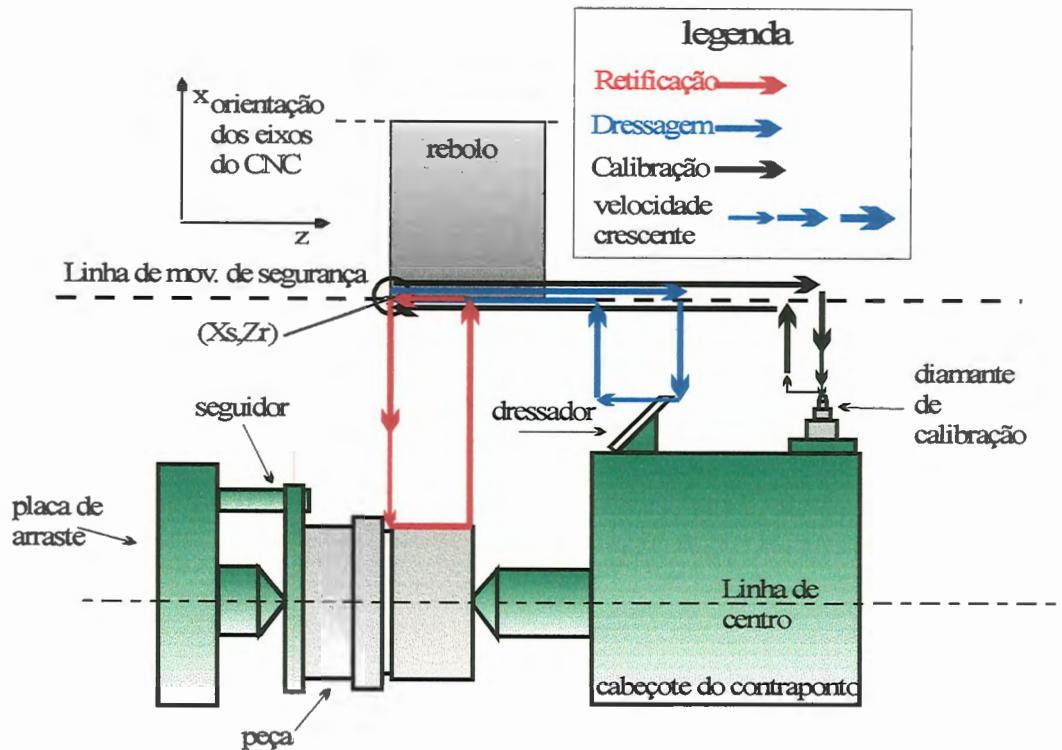


Figura 4.6 Esquema das movimentações do rebolo e posições de partida para os ciclos.

A descrição dos passos de execução para cada programa é a seguinte:

- Programa para retificação: O rebolo parte da coordenada  $(X_s, Z_s)$  e se movimenta em G0 até próximo da peça. Comuta então para uma velocidade intermediária e prossegue até que haja o contato com a peça. No momento do toque a EA produzida é detectada pelo monitor, que ordena ao CNC que comute para velocidade de corte. A peça é então retificada até uma cota em X determinada. Após o tempo de sparkout o rebolo retorna em G0 para  $(X_s, Z_s)$ .
- Programa de dressagem: o rebolo parte de  $(X_s, Z_s)$  e se movimenta até uma cota z próxima da cota do dressador em G0. Então o rebolo se aproxima do dressador em G0. Avança até a cota x do dressador mais a profundidade

programada para dressagem. Esta cota é utilizada para atualizar a posição do dressador. A partir daí começa literalmente o processo de dressagem. O rebolo avança em z, contra o dressador.

Durante o tempo da dressagem o nível da EA produzida é monitorado, se houver uma descontinuidade neste nível o monitor ordena ao CNC que repita a dressagem. Uma descontinuidade no nível de EA pode significar um buraco, se houver uma queda no sinal. Ou uma elevação se ocorrer o inverso.

Depois de concluída a dressagem que efetivamente limpou a superfície do rebolo de todas as marcas, é executado um último passe com a velocidade calculada para obter um certo grau de recobrimento. Então este retorna à coordenada (Xs,Zs).

Para os ensaios com calibração é adicionado a este programa uma subrotina que faz a calibração do rebolo, no início e no fim do programa.

- Programa de calibração: este programa é usado também como subrotina no de dressagem, o rebolo parte também da coordenada (Xs,Zs), se movimenta em G0 até atingir a posição z do diamante calibrador. Se aproxima então do calibrador em G0. Quando está a 3,0 mm de distância comuta para uma velocidade intermediária e prossegue até 0,1 mm de distância do diamante. A velocidade é então comutada para uma velocidade baixa. No momento do toque o monitor de EA ordena ao CNC que recue o rebolo 0,1 mm. Nesta posição a coordenada x é sempre atualizada com uma cota fixa. A cota fixa é a distância entre o topo do diamante e a linha imaginária que passa pelo centro da peça mais 0,1 mm. Após a calibração o rebolo retorna à coordenada (Xs,Zs).

As listagens dos programas CNC são apresentadas no apêndice III.

#### 4.4.3 Descrição do programa LabView

O programa que faz monitoramento dos sinais adquiridos pela placa de aquisição é desenvolvido utilizando-se o software LabView. Este programa é bastante flexível permitindo o controle das seguintes variáveis: seleção dos canais adquiridos, taxa de aquisição, tamanho do buffer, armazenamento de dados, escalas dos gráficos apresentados e ferramentas para visualização detalhada dos espectros plotados.

A tela do programa mostrada no monitor do PC apresenta um painel com controles e dois gráficos. Em um dos gráficos são mostrados duas curvas que representam os sinais de EA e uma curva que representa o sinal de vibração. No outro é mostrado a curva do sinal da potência. Esta divisão é necessária para melhorar a visualização, pois os valores da curva do sinal de potência são muito menores que os outros e em uma mesma escala as variações deste espectro são de difícil visualização.

Somente os dados referentes ao tempo de corte e “sparkout” são adquiridos, pois os dados referentes ao tempo de movimentação dos carros da retificadora não tem interesse para este experimento. Os dados adquiridos são armazenados em caracteres ASCII e os arquivos correspondentes podem ser manipulados por outros softwares, como por exemplo: a planilha eletrônica EXCEL da Microsoft, para análise e apresentação de resultados.



No apêndice II é apresentado uma explicação básica da estrutura do programa Labview.

#### 4.4.4 Calibração do Rebolo

A calibração do rebolo é executada sem refrigeração, uma vez que nos testes preliminares constatou-se que o fluxo de refrigerante induzia a erros na detecção do contato rebolo/calibrador. Estes erros são atribuídos à grande sensibilidade utilizada pelo monitor de EA para detectar o contato com a superfície de trabalho do rebolo com a resolução de  $1,0 \mu\text{m}$ . Isto é necessário para tentar evitar que o diamante calibrador produza marcas no rebolo. Com este mesmo propósito utiliza-se uma velocidade final de aproximação mínima, igual a  $0,30 \text{ mm/min}$ .

Este programa é executado como subrotina dentro do programa de dressagem. A calibração executada no início do programa de dressagem compensa o desgaste do rebolo e evita um possível passe em vazio no caso de desgaste radial grande.

## 5. Resultados e Discussão

Os ensaios são efetuados com a retificação de peças em sequência. Cada condição é testada até que o rebolo chegue ao fim de vida, ou seja, passa a retificar peças fora da especificação de rugosidade, uma vez que a dimensão é o parâmetro de análise do presente trabalho. O parâmetro adotado para determinar o fim de vida do rebolo é a rugosidade superficial da peça, cujo limite para o valor do desvio médio aritmético é  $Ra < 0,8$ .

A severidade das condições de usinagem determinam o número de peças obtidas até que se alcance o fim de vida do rebolo. Assim, o número de peças retificadas por ensaio diminui com o aumento da severidade das condições de usinagem. A partir dos diâmetros das peças de cada lote são construídos gráficos onde é plotado o número de peças X dispersão dimensional.

Cada gráfico apresenta os resultados de dois ciclos de retificação com e sem calibração e as linhas de tendência para cada caso. As condições de usinagem, dressagem e aquisição de dados, dureza do rebolo e quantidade de sobremetal usinado são os mesmos para os dois testes no mesmo gráfico. Estas condições estão apresentadas nas figuras 4.2 e 4.3 no capítulo 4. Os gráficos apresentados tem a mesma escala, para que se possa visualizar melhor a comparação entre tendências resultantes de ensaios com e sem calibração.

## 5.1 Ciclos de Retificação com Avanço F50

Na retificadora cilíndrica CNC utilizada a velocidade de avanço pode ser parametrizada com um valor que acompanha a letra F. O valor representa a velocidade em centésimos de milímetro por minuto, portanto, F50 = 0,5 mm / min.. O número de peças produzidos em cada ciclo utilizando esta velocidade de avanço é suficiente para que se possa fazer uma avaliação do comportamento do sistema de calibração do rebolo para estas condições.

A condição F50 é adotada no presente trabalho pois é muito utilizada industrialmente em ciclos de semi-acabamento ou acabamento onde necessitam-se produzir superfícies com valores de rugosidades Ra da ordem de 0,5 a 0,8  $\mu\text{m}$ . A Figura 5.1 mostra o gráfico do número de peças resultantes X dispersão de medidas, com avanço F50 e rebolo de dureza R, com e sem calibração. Os desvios padrões obtidos nos testes estão assinalados ao lado de cada curva correspondente.

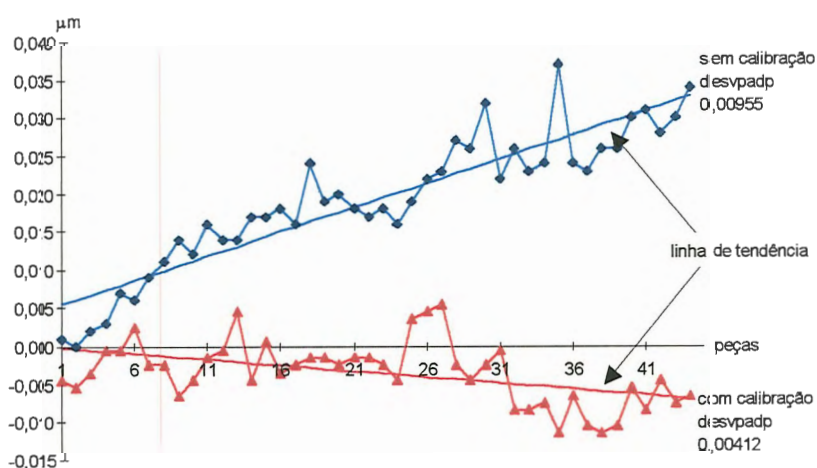


Figura 5.1 Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza R e avanço F50.

A Figura 5.2 mostra o gráfico do número de peças resultantes X dispersão de medidas, com avanço F50 e rebolo de dureza G, com e sem calibração.

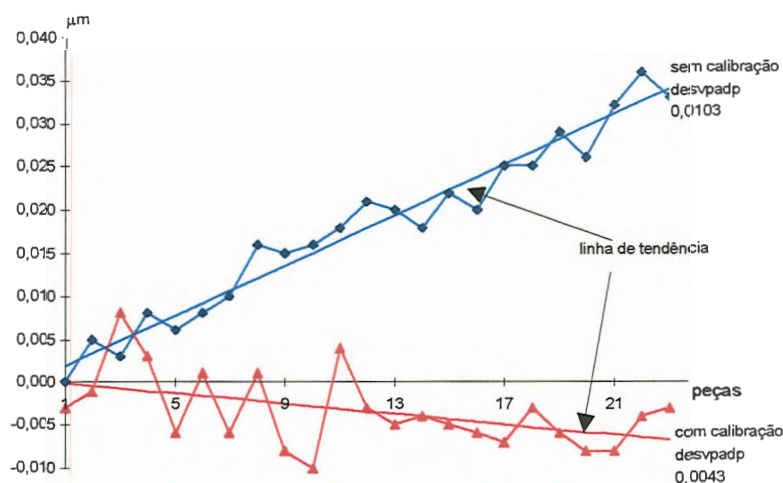


Figura 5.2 Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza G e avanço F50.

Pode-se notar que o valor do desvio padrão da dispersão de medidas diminuiu mais de 50% para ambos os rebolos, porém nota-se também que existe uma tendência negativa no ciclo de retificação com calibração.

Esta tendência negativa é devida aos danos produzidos na superfície do rebolo durante a interação com o diamante de calibração. Quando o diamante de calibração avança além da *posição virtual*, Oliveira et al (1994), vide figura 2.7, há uma pequena remoção de material.

Logo, o diamante de calibração passa a desempenhar o papel de um dressador que usina um "canal" com a sua largura e profundidade micrométrica ao longo do perímetro do rebolo.

Estes danos são chamados aqui de marcas no rebolo. Estas marcas são produzidas devido à baixa velocidade de processamento do CNC da retificadora que impõe uma variação no tempo de resposta do sistema ao sinal de EA emitido no momento do contato. A Figura 5.3 mostra uma representação do circuito do sistema de calibração, destacando suas partes principais.

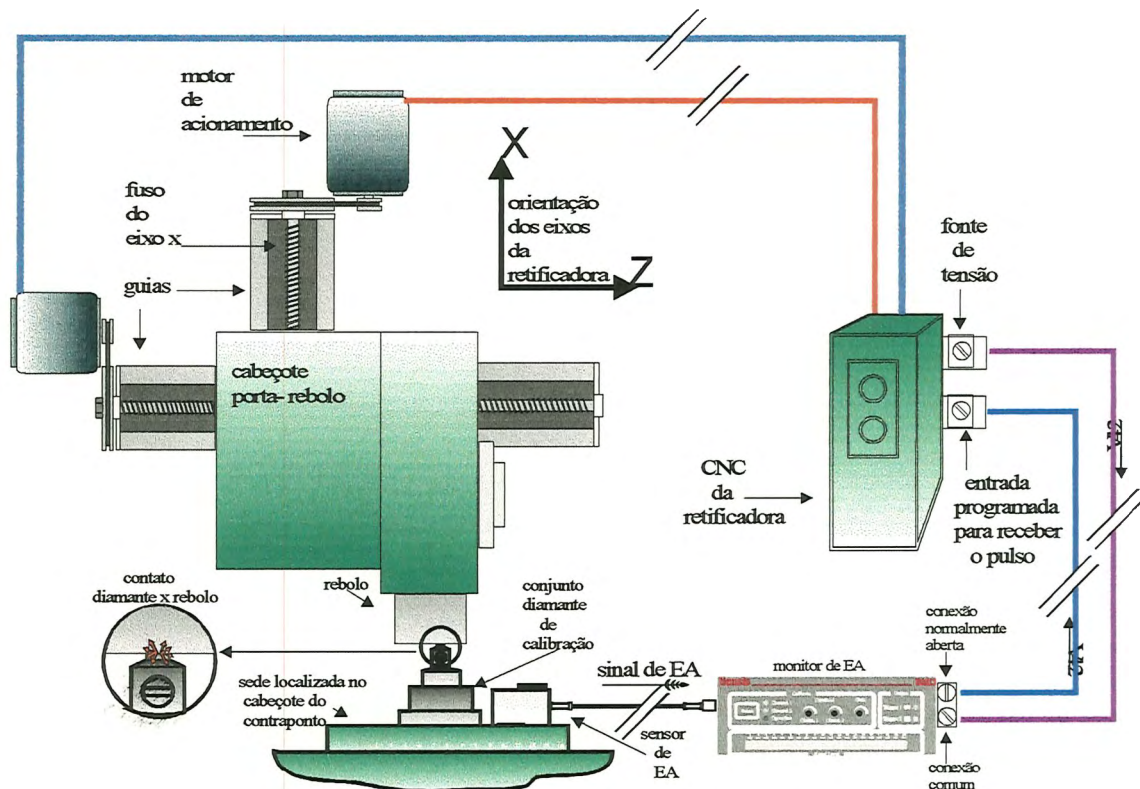


Figura 5.3 Circuito do sistema de calibração do rebolo.

Quando o monitor de EA detecta o contato rebolo/diamante um pulso de tensão avisa o CNC que ocorreu o contato, porém o tempo gasto pelo CNC para acionar o motor que movimenta o rebolo para trás (linha laranja) é relativamente longo. Assim a baixa velocidade de processamento do CNC

torna-se um gargalo no sistema, pois a detecção do contato pelo monitor de EA é bastante rápida, da ordem do tempo do fechamento do relê de comunicação, aproximadamente 5 ms .

Estas marcas tendem a crescer com as calibrações ao longo do processo, pois a marca se mantém durante o processo de usinagem e cresce na próxima calibração. Um dos problemas causados por estas marcas é que quando o CNC atualiza a posição da superfície do rebolo as novas coordenadas estão alguns microns abaixo da posição real. Consequentemente o CNC considera que diâmetro do rebolo é menor e avançar mais no momento da usinagem. Além disso, as marcas podem ser impressas na peça, caso a calibração esteja sendo feita em uma posição da superfície do rebolo que é utilizada na retificação, que é o caso do presente trabalho cujo objetivo é a compensação do erro total de posição.

Entretanto, realizar a calibração em uma posição que esteja fora da superfície do rebolo que está usinando, vai compensar apenas os erros devido à deformação térmica da estrutura da máquina. Esta técnica pode ser aplicada a rebolos duros que apresentam uma taxa de desgaste pequena.

Como se pode observar na figura 5.2 as inclinações das retas de tendências das dispersões dimensionais para os ciclos utilizando rebolo mole (G) são muito maiores do que as inclinações obtidas nos ciclos que utilizam rebolo duro (R), mostrados na figura 5.1. Portanto, presume-se que além da alta taxa de desgaste do rebolo que ocorre durante a usinagem o desgaste causado pela calibração também é grande, o que leva a um agravamento do

problema de redução do diâmetro das peças produzidas, aumentando negativamente a inclinação de reta de tendência.

A Figura 5.4 apresenta uma representação do crescimento da marca no rebolo e sua relação com o crescimento da tendência negativa na dispersão dimensional das peças produzidas.

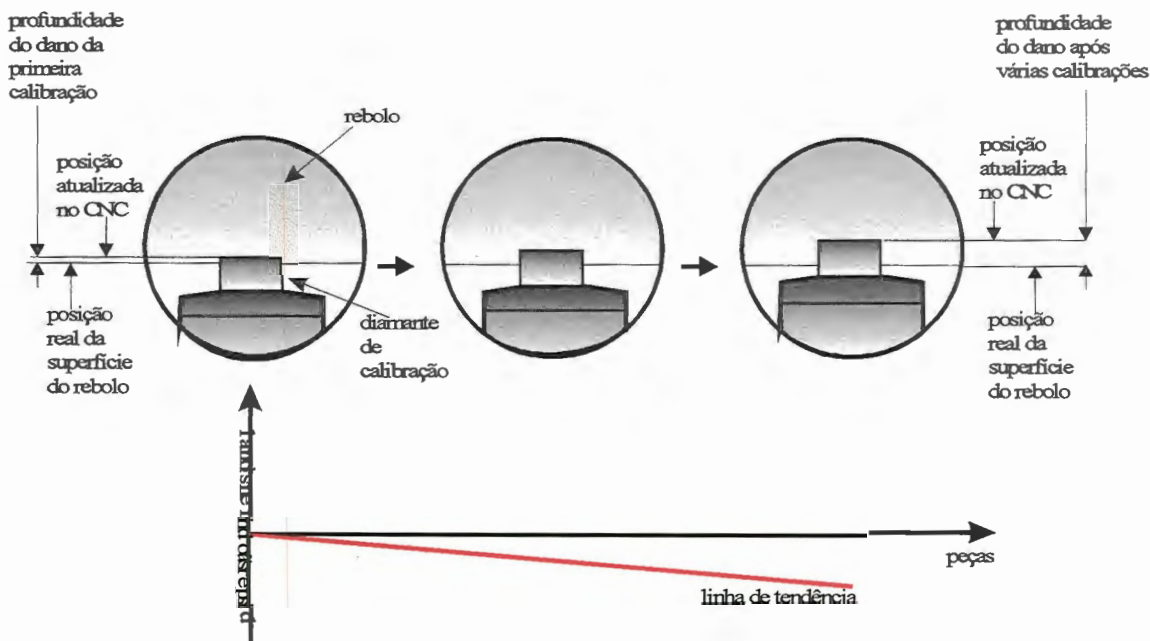


Figura 5.4 Relação entre o dano na superfície do rebolo e a tendência negativa na dispersão dimensional após várias calibrações.

Os defeitos provocados nas peças pelas marcas no rebolo podem ser também eliminados com um movimento lateral do rebolo no final do ciclo de retificação, mas este movimento não deve alterar a tendência negativa. Apesar de ser um problema esta tendência apresenta uma taxa de crescimento pequena em relação ao ciclo sem calibração.

Tomando como exemplo os resultados obtidos com o rebolo de dureza R, vide figura 5.1, o desvio da linha de tendência após a produção de 45 peças é de aproximadamente 6 microns. Como a calibração é executada a cada

cinco peças e em três posições diferentes, em cada uma das posições são realizadas três calibrações.

Portanto, presume-se que o valor da profundidade de penetração do diamante no rebolo por calibração está em torno de  $2,0 \mu\text{m}$ . Felipe (1996) utilizando um diamante dressador para detectar o contato com o rebolo, nesta mesma retificadora, obteve o mesmo valor de profundidade de penetração em torno de  $2,0 \mu\text{m}$ , vide figuras 2.8 e 2.9.

Este fato reforça a hipótese de que o limitante do sistema é o CNC, pois o comprimento de contato do diamante de calibração é muito maior que o do dressador, cerca de dez vezes maior. Portanto, presume-se que o nível do sinal de EA gerado no contato do rebolo com o diamante de calibração também é muito maior. Em consequência disso a resposta do sistema deveria ser mais rápida, pois, a partir do início do contato o crescimento do nível de EA é muito maior.

Porém esta tendência negativa pode ser controlada dentro de uma faixa de tolerância apertada com uma produção de peças por dressagem bastante maior que a do processo sem calibração. A Figura 5.6 apresenta um exemplo da aplicação de uma faixa de tolerância de  $19 \mu\text{m}$  ao gráfico da figura 5.1, o que representa uma qualidade IT6 para os diâmetros dos componentes usinados.

O procedimento normal adotado pelos operadores, nas empresas, quando se depara com peças cujas dimensões vão começar a sair da faixa de tolerância é realizar uma nova dressagem. Na Figura 5.6 o degrau que aparece na linha de tendência do processo sem calibração representa a



dressagem necessária para manter as dimensões dentro da faixa de tolerância, para produzir um lote do mesmo tamanho do produzido com calibração. Isto significa, que no caso do sistema sem calibração, o rebolo deve ser dressado, a partir da condição inicial, mais uma vez para produzir um lote de 45 peças com qualidade IT6. Já com a calibração não é necessária outra dressagem ao longo do processo, o que pode reduzir significativamente o consumo de rebolo.

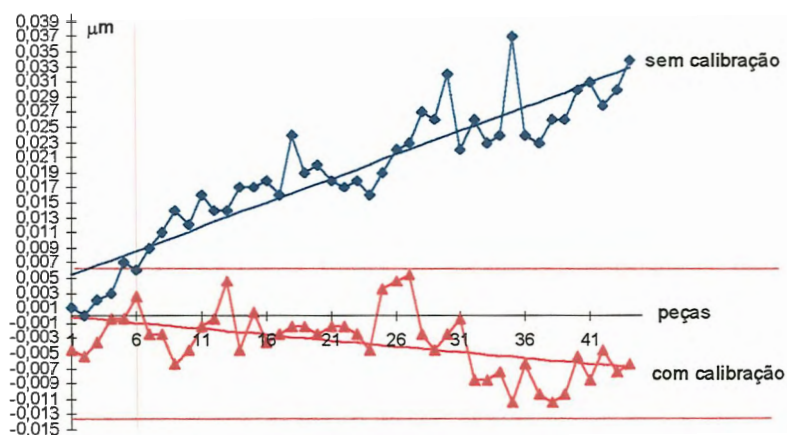


Figura 5.5 Aplicação de uma faixa de tolerância de 19  $\mu\text{m}$  ao ciclo com calibração executado com rebolo R e F50.

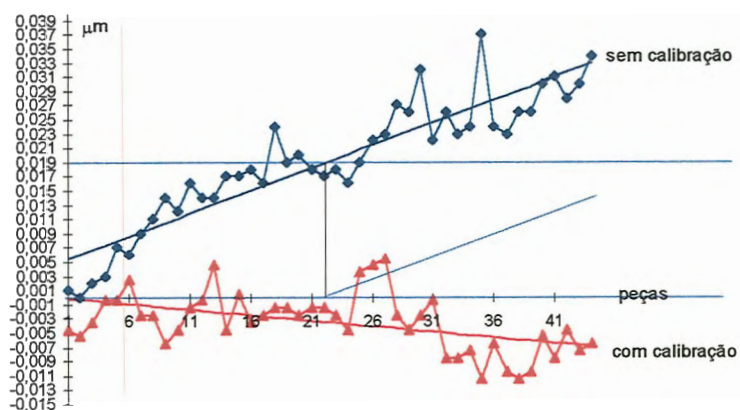


Figura 5.6 Aplicação de uma faixa de tolerância de 19  $\mu\text{m}$  ao ciclo sem calibração executado com rebolo R e F50.

## 5.2 Ciclos de Retificação com Avanço F70

Com esta velocidade de avanço o número de peças obtidas é muito pequeno para que se possa avaliar com detalhes as melhorias obtidas com a utilização do sistema de calibração do rebolo. A severidade das condições de usinagem utilizadas fazem com que o desgaste do rebolo seja irregular, o que leva a uma rápida deterioração da qualidade superficial das peças produzidas.

Logo, o número de peças produzidas por dressagem e dentro das tolerâncias adotadas é pequeno. Entretanto pode-se observar uma melhoria no desvio padrão da dispersão dimensional das peças produzidas utilizando o sistema de calibração.

A Figura 5.7 mostra os resultados obtidos com rebolo de dureza G e avanço F70 com e sem calibração.

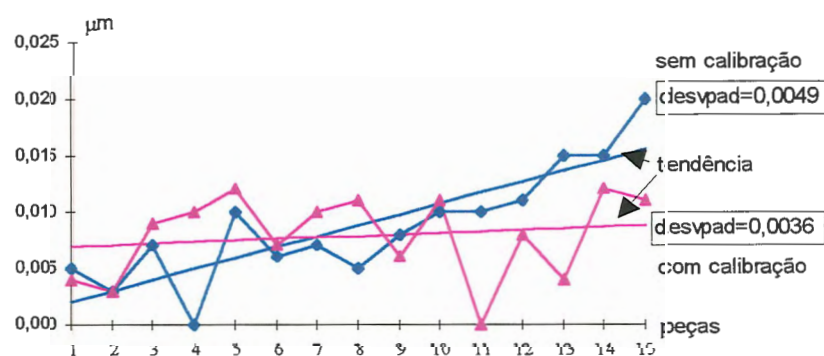


Figura 5.7 Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza G e avanço F70.

### 5.3 Ciclos de Retificação com Avanço F100

Com esta velocidade de avanço as condições de usinagem tornaram-se ainda mais severas, agravando o desgaste irregular da superfície do rebolo. Portanto, menos peças aceitáveis são produzidas por dressagem.

Neste ensaio também pode-se observar uma pequena melhoria no desvio padrão. A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos com rebolo de dureza G e avanço F100. Mesmo com calibração o desvio padrão é maior pois o processo, devido ao maior esforço de corte, é menos repetitivo.

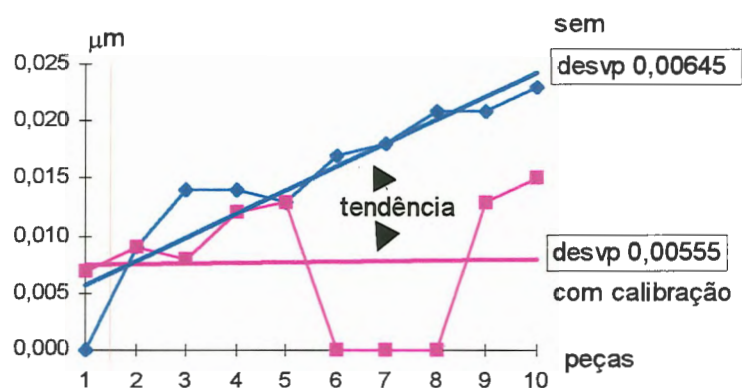


Figura 5.8 Dispersão dimensional das peças resultantes de dois ciclos de retificação utilizando rebolo de dureza G e avanço F100.

### 5.4 Avaliação da utilização do Sistema de Calibração do Rebolo

A utilização do sistema de calibração pode trazer vantagens, principalmente quando o desgaste da superfície do rebolo tenha um comportamento mais regular e seja possível de se fazer mais peças por

dressagem. A Figura 5.9 mostra um gráfico que compara os desvios padrões de 8 ciclos de retificação.

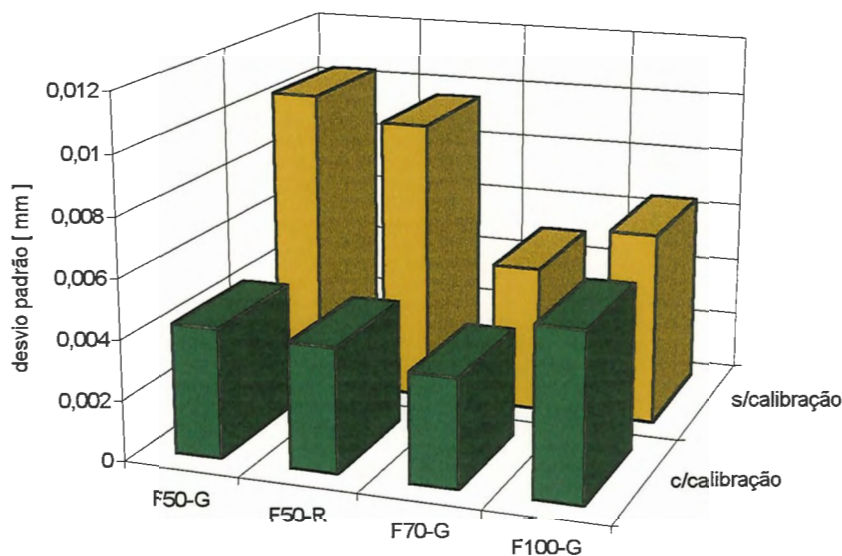


Figura 5.9 Comparação entre os desvios padrões dos ciclos de retificação utilizando rebolos de dureza R e G, avanços F50, F70 e F100, com e sem calibração.

Pode-se observar na figura acima que para os ciclos com avanço F50 há uma melhoria de mais de 50% nos desvios padrões dos ciclos com calibração em relação aos ciclos sem calibração.

Para os ciclos com avanço F70 e F100 há uma pequena melhoria nos desvios padrões dos ciclos com calibração, porém o número de peças produzidas com estes avanços não é suficiente para que se possa visualizar a tendência do processo. Porém nota-se na figura uma maior uniformidade nos resultados de todos os ciclos.

Além disso, com a utilização deste sistema o tempo de setup pode ser reduzido significativamente, pois, para que o operador conheça a posição real

da superfície de trabalho do rebolo basta executar um ciclo de calibração. O tempo despendido para execução de um ciclo de calibração é cerca de 20 segundos e pode ser otimizado utilizando velocidades de aproximação maiores em alguns passos. Uma vez que se conheça esta posição real, pode-se programar as cotas de aproximação e usinagem das peças com base nas suas dimensões reais, utilizando a linha de centro do contraponto como referência para o zero do eixo X.

Porém, para comparar as vantagens em termos de redução de tempo de fabricação deve-se considerar o tempo gasto para executar cada ciclo de calibração e multiplicar pelo número de calibrações necessárias para manter as dimensões das peças dentro da faixa de tolerância desejada, até se atingir o fim de vida do rebolo.

Além disso, na aplicação deste método deve-se levar em consideração também os danos produzidos na superfície do rebolo em cada calibração. Assim, quanto maior o número de peças produzidas entre duas calibrações consecutivas, dentro da faixa de tolerância dimensional, menos tempo se perde e menos danos ocorrem na superfície do rebolo.

## 6. Conclusões

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões quanto à utilização do sistema de calibração desenvolvido em operações de retificação:

- É possível localizar a superfície do rebolo em processo e atualizar sua posição automaticamente no CNC com a utilização do método proposto para implementação do sistema de calibração;
- A implementação do método é viável e como resultados, obteve-se uma redução na dispersão dimensional da máquina;
- A execução de um ciclo de calibração a cada cinco peças torna a máquina capaz de executar operações de retificação com qualidade IT6 mesmo partindo com a máquina fria, enquanto que em um ciclo sem calibração a qualidade seria IT8 para o diâmetro de 57 mm;
- A utilização do sistema é mais vantajosa em situações onde o número de peças por dressagem é grande, isto ocorre em condições de usinagem menos severas;
- Em condições mais severas a dispersão dimensional das medidas causada pela maior força de retificação e maior deformação térmica da estrutura da máquina mascara a melhoria que poderia ser obtida com a utilização do sistema de calibração;
- Com a aplicação adequada pode-se obter redução de custos de rebolo, principalmente em ambientes onde a máquina é desligada com frequência;

- O sistema de calibração permite que se reduza o tempo de set-up, principalmente trabalhando com as dimensões reais das peças em relação à linha de centro do contra-ponto;
- Com a utilização do sistema de calibração, as marcas produzidas no rebolo podem ser impressas na peça retificada, caso a posição de calibração faça parte da superfície do rebolo que está usinando.
- O tempo gasto para a execução do ciclo de calibração deve ser levado em conta quando se estima a redução do tempo total de usinagem. O tempo gasto para execução de um ciclo de calibração é da ordem de 20 segundos, mas pode ser otimizado;
- A tendência dimensional negativa, apesar de pequena, não pode ser desprezada, pois corre-se o risco de produzir peças menores que a tolerância (peças mortas). Para se evitar isso, deve-se distribuir as calibrações em várias posições na superfície do rebolo ou melhorar a velocidade de resposta do sistema.

Este trabalho contribui para um melhor entendimento da dispersão dimensional que ocorre no processo de retificação e para que se tenha um maior controle sobre esta variável deste processo. Como sugestão para futuros trabalhos propõe-se o seguinte:

- Testar o sistema em ambientes de produção;
- Melhorar a velocidade de resposta do sistema, utilizando um CNC mais rápido ou construindo um circuito dedicado mais rápido e interligado com o CNC que assuma o comando no momento da detecção, armazene a posição e retorne o comando ao CNC.

## 7. Bibliografia

### 7.1 Bibliografia citada

ALMEIDA, S.L.R. et al., (1996). Aplicação de lógica fuzzy e redes neurais para a otimização de condições de usinagem. Máquinas e Metais, jun, p96-106.

BEDFORD, A.; DRUMHELER, D.S., (1994). Rayleigh Waves. Introduction to Elastic Wave Propagation. ed. John Wiley e Sons, Chichester. p106-109.

BICUDO, L.A.M.C. et al., (1994). Compensation of Thermal Deformation on Cylindrical Grinding Machines Using Neural Networks. Proc. Japan - U.S.A. Symposium on Flexible Automation. Japan, p877-884.

BICUDO, L.A.M.C., (1997). Sistema de Compensação de Erros Térmicos Dimensionais para Retificadoras Cilíndricas Utilizando Redes Neurais. Tese de doutorado. USP/EESC/SEM.

BYRNE et al., (1995). Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of Research and Industrial Application. Annals of the CIRP, p1-27.



CHANG, Y.P.; DINIZ, A.E.; DORNFELD, D.A., (1992) Monitoring the Grinding Process Through Acoustic Emission Using a Squirter. Proc. Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, ASME, San Francisco, p335-340.

DINIZ, A.E. et al., (1995). Um Método Adequado Para a Retificação de Precisão com Pequena Remoção de Cavaco. Máquinas e Metais, v.3, p78-101.

DONG, W.P.; WEBSTER, J.A., (1996) Assessment of Frequency Characteristics of Acoustic Emission in Grinding. In: IMEC - Manufacturing Engineering: 2000 and Beyond. p34-37.

DONMEZ, M.A.; LIU, C.R.; BARASH, M.M., (1988). A Generalized Mathematical Model for Machine Tool Errors. ASME Winter Annual Meeting. DSC v.4, p231-243.

DORNFELD, D.A., (1992). Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing. NDT & E International, v.25, n.6, p259-269.

DORNFELD, D.A.; CAI, H.G., (1984). An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. Transactions of the ASME, J.Eng.Ind., v.106, p28-33.

FELIPE, J., (1996). Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (RI) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica. USP/EESC/SEM.

HUNDT, W. et al., (1994) An Approach to Monitoring of the Grinding Process Using Acoustic Emission (AE) Technique. Annals of the CIRP, v.43, n.1, p295-298.

INASAKI, I., (1985). Monitoring Of Dressing And Grinding Processes With Acoustic Emission Signals. Annals of the CIRP, v.34, n.1.

KLUFT, W., (1994) A Monitoração dos Processos Reduz Custos e Desperdícios. Máquinas e Metais, v.10, p60-80.

KONIG, W.; KLUMPEN, T., (1993a) Process Monitoring In Grinding, Dressing And Sharpening Processes. Production Engineering, v.1, n.1, p27-30.

KONIG, W.; KLUMPEN, T., (1993b) Monitoring And Sensor Concepts For Higher Process Reliability. In: 5TH INTERNATIONAL GRINDING, Cincinnati, Ohio, 1993. Annals.

KONIG, W.; MEYEN, H. P., (1990) AE In Grinding And Dressing: Accuracy And Process Reliability. In: 4TH INTERNATIONAL GRINDING CONFERENCE, Dearborn, Michigan, 1990. Annals. p526/1-526/20.

OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D.; SCHNEIDER, C., (1994) A Otimização Da Dressagem e a Redução do Custo de Rebolos. Máquinas e Metais, v.5, p32-40.

OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A.; WINTER, B., (1994) Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface Through Acoustic Emission. Annals of the CIRP, v.43, n.1, p291-304.

OLIVEIRA, J.F.G. et al., (1994) Uma nova tendência de monitoramento do processo de retificação. In: Congresso Anual da Sobracon, 2. São Paulo.

OLIVEIRA, J.F.G.; PERES, A.E.; MENDIZABAL, R.A., (1991) Utilização de Técnicas Acústicas para o Monitoramento do Processo de Retificação. In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP. Anais. São Paulo, p353-356.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNETT, R., (1994) Acoustic Emission For Process Control And Monitoring Of Surface Integrity During Grinding. Annals of the CIRP, v.43, n.1, p299-304.

## 7.2 Bibliografia Consultada

- BLUM, T.; SUZUKI, I.; INASAKI, I., (1988). Development of a Condition Monitoring System for Cutting Tools Using an Acoustic Emission Sensor. Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., v.22, n.4, dec..
- BRINKSMEIER, E., (1991) A Selftuning Adaptive Control System for Grinding Process. Annals of the CIRP, v.40, p355-358.
- DORNFELD, D.A.. Intelligent Sensors for Monitoring Machining Processes.  
s.n.t..
- INASAKI, I., (1991) Monitoring And Optimization Of Internal Grinding Process. Annals of the CIRP, v.40, n.1, p359-362.
- KONIG, W., (1988) Continuous Dressing - Dressing Conditions Determine Material Removal Rates and Workpiece Quality. Annals of the CIRP, v.57, p303- 307.
- LEZANSKI, P.; RAFALOWICZ, J., (1993) An Intelligent Monitoring System For Cylindrical Grinding. Annals of the CIRP, v.42, n.1, p393-396.

MATSUO, T.; TOUGE, M.; IWASAKI, K., (1993). In - Process Measurements of Progressive Variation of Grinding Characteristics in Constant - Load Heavy Grinding. Annals of the CIRP.

TONSHOFF, H.K.; WULFSBERG, J.P., (1988). Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes. Annals of the CIRP, v.37/2, p611-621.

YONEDA, T. ET AL., (1992). Development of Grinding System with Learning Functions. Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., v.26, n.2, p96-101.

WAKUDA, M; INASAKI, I., (1991) Detection Of Malfunctions In Grinding Processes. In: 4TH World Meeting on Acoustic Emission and 1ST International Conference on Acoustic Emission in Manufacturing, Boston, Massachusetts, 1991. Annals. p 494-501.

## Apêndice I Sistemas de Monitoramento Comerciais

Atualmente, encontra-se no mercado diversos sistemas de monitoramento utilizando EA, desenvolvidos para implementação em ambientes de chão de fábrica. Neste item são apresentados os sistemas mais conhecidos e utilizados pelas empresas de usinagem e fabricantes de retificadoras brasileiras.

### A. Sistemas com Controle por Limites Estáticos

A Figura I.1 apresenta alguns dos sistemas de monitoramento mais conhecidos. Estes sistemas utilizam limites estáticos, são os mais comuns e sua utilização é relativamente simples.

	Fabricante	Principais Características	Custo Aprox. US\$
	Prometec Alemanha	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste de Ganho</li> <li>• Ajuste nível do limite</li> <li>• Vários canais de limite</li> <li>• Janela de tempo.</li> </ul>	-
	Marposs Itália	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste de Ganho</li> <li>• Ajuste off-set</li> <li>• Limite fixo</li> </ul>	2.850,00
	Montronix USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste de Ganho</li> <li>• Ajuste nível do limite</li> <li>• Microprocessado</li> </ul>	7.500,00
	BM-12 SENSIS BRASIL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste de Ganho</li> <li>• Ajuste nível do limite</li> <li>• 2 canais de níveis de limite</li> <li>• Filtros intercambiáveis</li> </ul>	2.150,00

Figura I.1 Sistemas de monitoramento com limites estáticos, Felipe (1996)

Todos os sistemas apresentados anteriormente possuem controle de ganho do sinal e apenas o sistema da Marposs não possui ajuste do nível do limite estático. Os controles de ganho e nível do limite são muito importantes para aumentar a flexibilidade do sistema. O sistema da Promotec possui vários limites estáticos e um recurso adicional de janelas de tempo. Este sistema tem a capacidade de monitorar mais de uma situação ao mesmo tempo. O sistema Montronix executa a análise do sinal digitalizado utilizando um microprocessador. O sistema Sensis pode monitorar duas situações ao mesmo tempo, pois possui dois canais de entrada e dois limites ajustáveis independentes, a frequência mais representativa do fenômeno de interesse pode ser selecionada através do recurso de troca de filtros passa-alta.

## B. Sistemas com Controle por Limites Dinâmicos

A Figura I.2 apresenta dois sistemas de monitoramento que atuam com limites dinâmicos ajustados em janelas de tempo móveis.



	Fabricante	Características
	<p><b>Artis</b>  Alemanha</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste de banda de frequência.</li> <li>• Visualização de RMS por banda.</li> <li>• Visualização no monitor do CNC ou no monitor incorporado.</li> <li>• Análise simultânea multisensores</li> <li>• Sistema Modular.</li> </ul>
	<p><b>Nordmann</b>  Alemanha</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprendizagem automática da forma da janela.</li> <li>• Tratamento estatístico do Sinal</li> <li>• Visualização gráfica da janela e do sinal.</li> </ul>

Figura I.2 Sistemas de monitoramento com janelas dinâmicas, Felipe (1996).

Estes sistemas permitem que se ajuste duas curvas limites, superior e inferior a uma curva de sinal satisfatório característico, se a curva do sinal adquirido não se encaixar dentro dessas curvas é indício de alguma falha. O sistema Nordman possui a capacidade de aprendizado automático da forma da janela. O sistema Artis apresenta uma melhor visualização da curva do sinal e dos limites.

### C. Sistemas de Monitoramento Multisensores

A Figura I.3 mostra um sistema de monitoramento que utiliza diversos tipos de sensores para monitorar diversos parâmetros através de vários meios físicos.

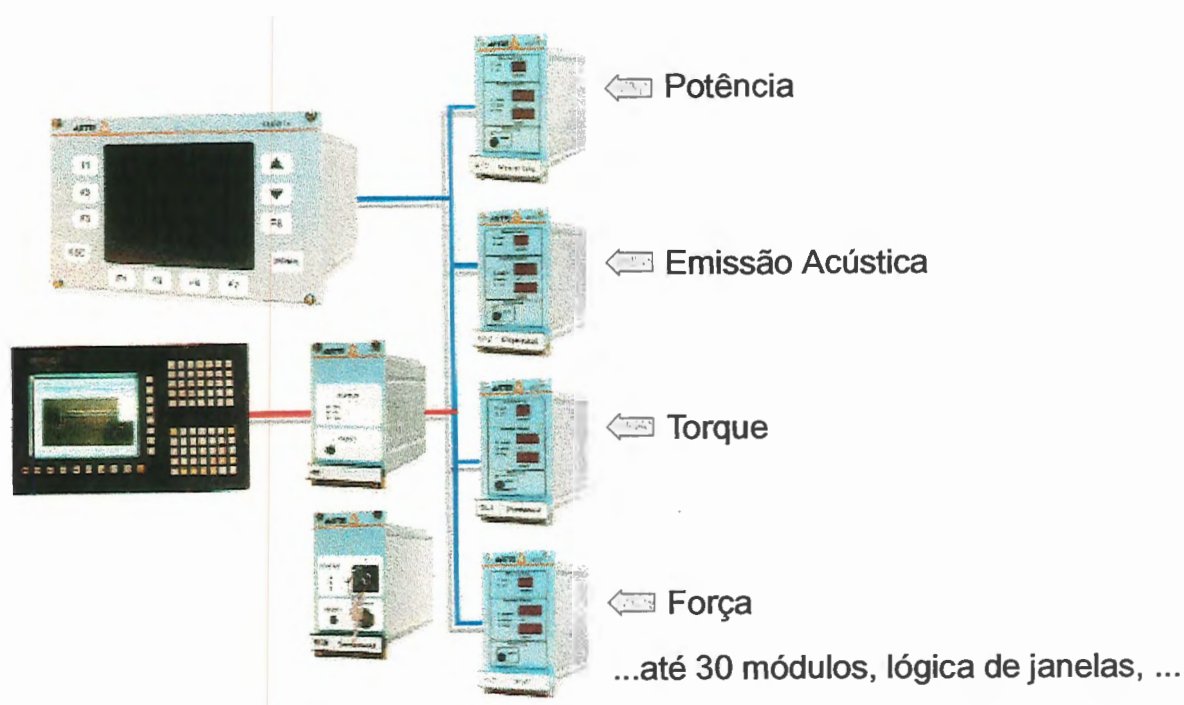


Figura I.3 Sistema de monitoramento que adquire sinais de diversos sensores,  
Felipe (1996)



## Apêndice II Programa para aquisição de dados em linguagem Labview

Um programa em linguagem Labview possui duas telas principais de interface com o usuário. Uma delas apresenta ferramentas para compor um painel de controle, onde se pode visualizar as curvas do sinal adquirido e dispor de controles acionados pelo mouse que desempenham funções específicas. Na outra é montado o diagrama lógico do programa. As duas telas são interligadas, porém cada uma delas possui recursos exclusivos.

Na Figura II.1 é apresentado a tela chamada painel do programa TESE5.VI

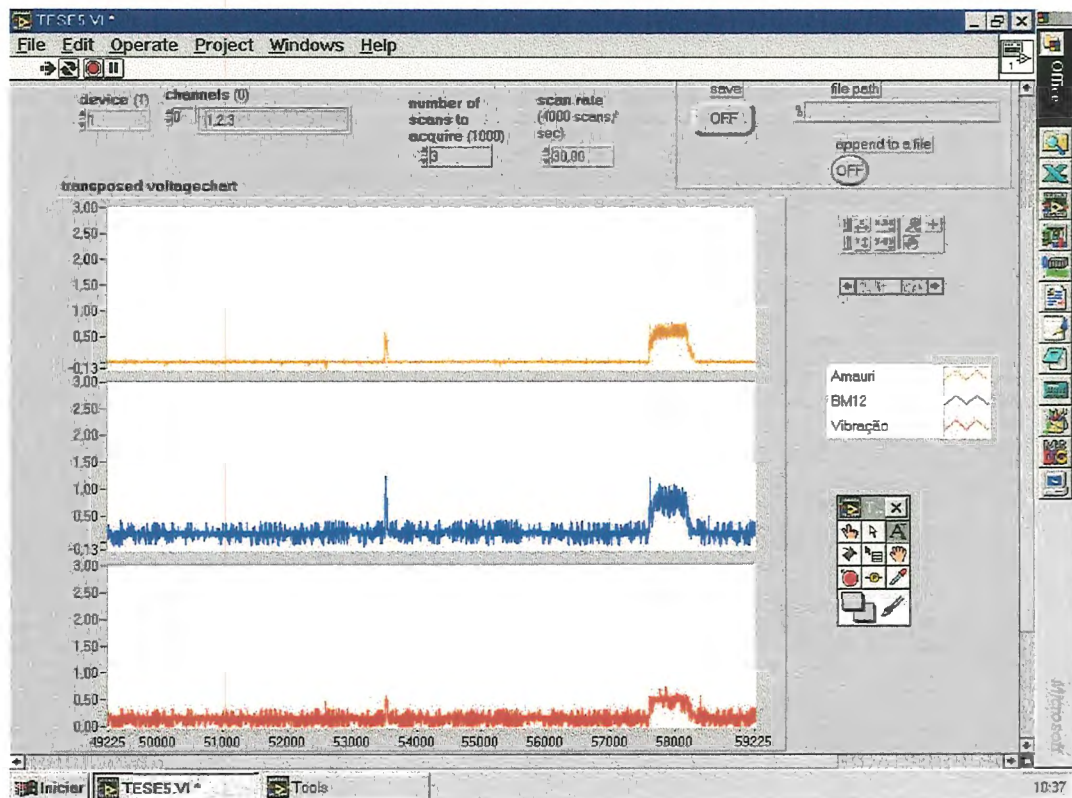


Figura II.1 painel do programa TESE5.VI

Esta linguagem é do tipo orientada a objeto, ou seja a programação é estruturada através de ícones, que neste ambiente são chamados de V.I.s. Por sua vez um programa composto por V.I.s também é chamado de V.I.. No “painel” mostrado anteriormente pode - se observar os controles:

- device - classificação da placa de aquisição, configurada anteriormente;
- channels - canais de aquisição utilizados;
- number of scans to acquire - nro. de amostras adquiridos por “buffer”;
- scan rate - taxa de aquisição de amostras por segundo;
- save, file path e append to a file - formas de salvamento dos dados em arquivo;
- os outros dois controles são associados com os três “monitores de sinal” e possuem recursos como “zoom”, manipulação das curvas entre outros.

Cada um dos “monitores de sinal” mostra a curva de um dos sinais adquiridos e suas escalas são ajustáveis individualmente.

A Figura II.2 apresenta a outra tela principal do TESE5.VI, esta tela pode ser composta por várias camadas quando o programa é muito complexo. O diagrama deste programa é composto por cinco VIs de aquisição chamadas Vis intermediárias neste ambiente e uma estrutura para salvamento dos dados em disco. As VIs intermediárias são compostas por VIs básicas e fornecidas prontas no pacote Labview. Os seus recursos são suficientes para executar a tarefa de aquisição do presente trabalho. A ligação entre parâmetros de cada VI e entre Vis são linhas coloridas, as cores das linhas representam tipos de variáveis e a conexão só é completada quando o tipo de variável é compatível com as duas partes que se quer ligar.

Observa - se que os controles do painel também estão representados por ícones no diagrama, estes ícones fazem a conexão entre as duas telas principais e fornecem parâmetros necessários à execução do programa.

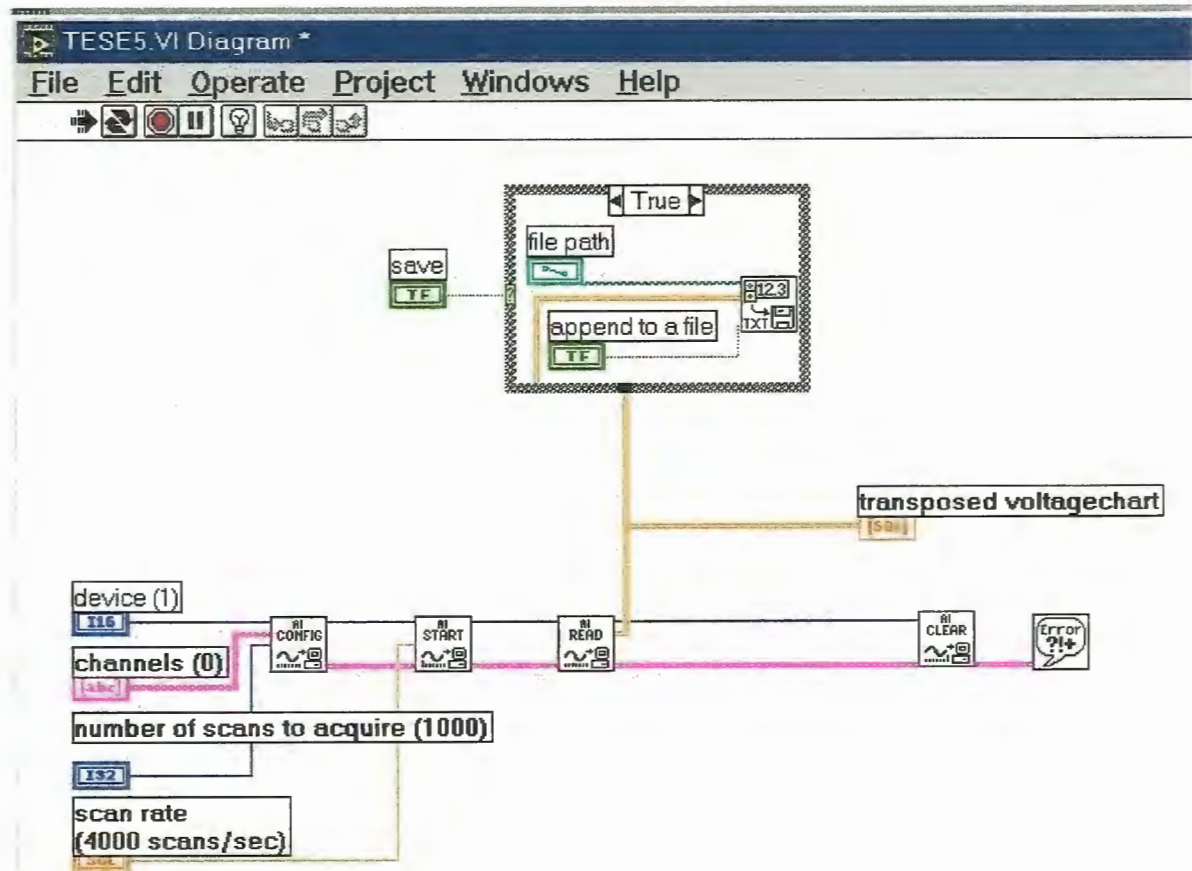


Figura II.2 Diagrama do programa TESE5.VI

## Apêndice III Programas CNC

Neste apêndice são apresentadas as listagens dos três programas CNC utilizados no experimentos, juntamente com comentários explicativos de cada linha de comando. Os parâmetros “D” utilizados são apresentados em uma legenda no final.

### A. Calibração do rebolo

#### Programa 54

Comando	Comentário
N05 G00 X165.	avança em velocidade máxima até a coordenada x = 165.mm.
N10 G00 ZD18	avança em velocidade máxima até a coordenada z = D18.
N15 G01 F60000 XD23 I0.1	avança com velocidade 600 mm/min. até (D23 + 0.1mm)
N20 G01 F1000 XD23 I0.04	avança com velocidade 10 mm/min. até (D23 + 0.04mm)
N25 G23 X156. F10	avança com velocidade 0.1 mm/min. em detecção de contato até a coordenada x = 156.mm
N30 G01 F60000 I0.1	recua 0.1 mm da posição de contato com velocidade 600 mm/min..
N35 M0	pausa, reinicia com “start”.
N40 G10 XD24	atualiza a coordenada X com o valor de D24.
N45 M30	fim de programa (esta linha é retirada para este programa funcionar como subrotina)

## B. Dressagem

### Programa 9

Comando	Comentário
N01 E54	chama a subrotina 54 para calibrar o rebolo
N05 G00 X165.	avança em velocidade máxima até x=165.
N10 G00 ZD45 K5.	avança em velocidade máxima até z=(D45 + 5.mm)
N15 P1=-40 P2=-40 P3=12250	estabelece valores para os parâmetros P
N20 G37 IP1	compensa profundidade de dressagem P1 no diâmetro do rebolo.
N25 G01 F60000 XD44 IP1	avança com velocidade 600 mm/min. até x=(D44 + P1)
N30 G01 F25000 K-D49	recua em Z com velocidade 250 mm/min. na distância de D49
N35 G10 XD44	atualiza a coordenada X pelo valor D44
N40 G01 F60000 I0.1	recua em X com velocidade 600 mm/min.
N45 G01 F60000 X161.	recua até x=161. com velocidade 600 mm/min.
N50 G00 165.	recua em velocidade máxima até x=165.
N55 ZD45 K5.	avança em velocidade máxima até z=(D45 + 5. mm)
N60 G37 IP2	compensa profundidade de dressagem P2 no diâmetro do rebolo
N65 G01 F60000 XD44 IP2	avança até x=(D44+ P2) com velocidade 600 mm/min.
N70 G01 FP3 K-D49	recua dressando em Z com velocidade P3 pela distância D49
N75 G10 XD44	atualiza a coordenada X pelo valor D44
N80 G01 F60000 X161.	recua até x=161. com velocidade 600 mm/min.
N85 E54	chama subrotina 54
N90 G00 X165. Z430668	avança em velocidade máxima até as coordenadas (165., 430668)
N95 M30	fim de programa

## C. Retificação

### Programa 53

N05 G00 165.	avança em velocidade máxima até $x = 165$ .
N10 Z430668	avança em velocidade máxima até $z = 430668$
N15 M3 S210	liga rotação da peça com 210rpm
N20 G01 F60000 XD21 I0.1	avança com velocidade 600 mm/min. até $x = (D21 + 0.1 \text{ mm})$
N25 G23 F300 XD21 I-5.	avança com velocidade 3 mm/min. em detecção de contato até $x = (D21 - 5. \text{ mm})$
N30 G01 FD20 XD22	avança usinando com velocidade D20 até $x = D22$
N35 G04 HD19	pausa de D19 segundos
N40 G01 F60000 XD21 I0.2	recua em X com velocidade 600 mm/min. até $x = (D21 + 0.2 \text{ mm})$
N45 G00 X165.	recua em velocidade máxima até $x = 165$ .
N50 M5	desliga rotação da peça
N55 M30	fim de programa

### Legenda:

Os parâmetros D armazenam valores que podem ser alterados sem necessidade de editar o programa em que estão inseridos.

D18 - coordenada Z do diamante de calibração;

D19 - valor do tempo de pausa;

D20 - valor da velocidade de corte;

D21 - diâmetro máximo da peça;

D22 - diâmetro final da peça;

D23 - coordenada X do topo do diamante de calibração;

D24 - coordenada X do topo do diamante de calibração mais 0.1 mm;

D44 - coordenada X do topo do diamante dressador;

D45 - coordenada Z do dressador;

D49 - largura do rebolo.

## Apêndice IV Projeto do suporte do diamante de calibração

