

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENSOR DE PROXIMIDADE PARA MONITORAMENTO DE FERRAMENTAS NO FRESAMENTO DE RANHURAS DE GRANDE PROFUNDIDADE

Oswaldo Alves Sobrinho



DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENSÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

São Carlos

1999

Class.	TESE
Cutt.	0264
Tombo	0099/99

S/S 1030419

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

A474a Alves Sobrinho, Osvaldo
Avaliação experimental de sensor de proximidade
para monitoramento de ferramentas no fresamento de
ranhuras de grande profundidade / Osvaldo Alves
Sobrinho. -- São Carlos, 1999.

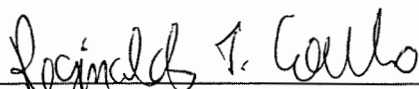
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho.

1. Sensor. 2. Aquisição de sinal. 3. Fresamento.
4. Quebra de ferramenta. I. Título.

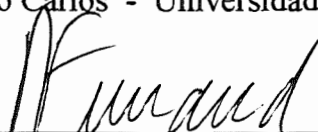
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **OSVALDO ALVES SOBRINHO**

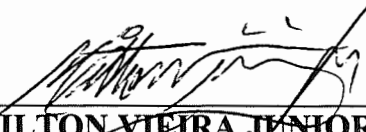
Dissertação defendida e aprovada em 26-03-1999
pela Comissão Julgadora:



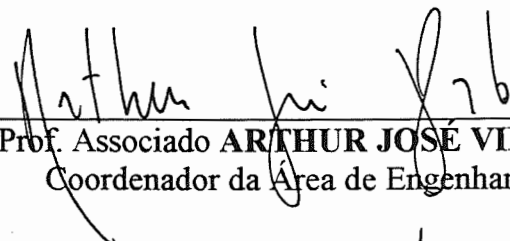
Prof. Doutor **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **ODILSON COIMBRA FERNANDES**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **MILTON VIEIRA JUNIOR**
(Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



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

Aos meus pais José e Carmen,
à minha esposa Maria Elisa,
aos meus filhos Estevam, Priscilla e Guilherme,
pelo estímulo ao estudo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Reginaldo Teixeira Coelho pela participação e orientação;
Aos professores Rosalvo, Pinotti, Villa, Colenci, Sacomano pelos ensinamentos transmitidos, que contribuíram de forma efetiva para a execução deste trabalho;

Ao amigo Eng^o João Luiz Bavaresco Cristovão que me levou de volta ao banco da escola;

Ao parceiro de trabalho Eng^o Jorge Gonçalves Kanno consultor e ouvidor;

À Villares, Sade Vigesa, Inepar de Araraquara pelo incentivo ao desenvolvimento intelectual dos funcionários;

Ao Eng^o Ubirajara Antonio Georgetti diretor industrial das empresas citadas acima, pela permissão de uso de parte de minhas horas trabalhadas para a busca do conhecimento;

Aos técnicos da CESP de Bauru pelo empréstimo dos equipamentos usados nos ensaios;

Ao Nicolau Nebel da COFECORT -distribuidor SANDVIK- pelo empréstimo de insertos especiais usados em seminários durante este o curso.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	II
SUMÁRIO.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	X
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	17
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 PESQUISAS NO AMBIENTE DE MANUFATURA.....	25
2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE SISTEMAS DE MONITORAMENTO.....	30
2.3 RESTROPECTRO DOS SISTEMAS DE TCM (TOOL CONDITION MONITORING).....	31
2.4 SENSORES PARA SISTEMAS TCM (TOOL CONDITION MONITORING).....	32
2.4.1 <i>Princípios de funcionamento</i>	32
2.4.2 <i>Sistema de medição direta</i>	33
2.4.3 <i>Sistema de medição indireta</i>	34
2.5 SISTEMA DE SENSORES DISPONÍVEIS - APLICAÇÃO PRÁTICA.....	35
2.5.1 <i>Sensores para monitoramento baseados na medição da força de corte</i>	35
2.5.2 <i>Medição da corrente e da potência efetiva do motor</i>	39
2.5.3 <i>Vibrações nos processos de corte</i>	39
2.5.4 <i>Emissão Acústica (EA) nos processos de usinagem</i>	40
2.6 TCM (TOOL CONDITION MONITORING) PARA OTIMIZAÇÃO E CONTROLE.....	41
2.6.1 <i>Usinagem</i>	41
2.6.2 <i>Sistemas inteligentes para retificação</i>	41
2.7 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DISPONÍVEIS NO MERCADO.....	44
2.7.1 <i>Sistema de monitoramento por laser</i>	44
2.7.2 <i>Sistema para monitoramento de múltiplas ferramentas</i>	45
2.7.3 <i>Sistema de monitoramento para rosqueamento</i>	46
2.7.4 <i>Sistema de monitoramento PROMESS</i>	47
2.8 NOVOS DESENVOLVIMENTOS EM TCM (TOOL CONDITION MONITORING).....	48
2.8.1 <i>Introdução</i>	48
2.8.2 <i>Sensores inteligentes</i>	50
2.8.3 <i>Estratégias de implementação</i>	52
2.8.4 <i>Determinação do limite (Threshold)</i>	53
2.8.5 <i>Abordagem sobre multisensores</i>	55
2.9 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	56
3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE USINAGEM.....	59

3.1	FRESAMENTO.....	59
3.1.1	<i>Introdução</i>	59
3.1.2	<i>Tipos fundamentais de fresamento</i>	59
3.1.3	<i>Formação de cavacos</i>	61
3.1.4	<i>Importância do controle do cavaco</i>	62
3.1.5	<i>Sumário da pesquisa sobre controle do cavaco</i>	63
3.1.6	<i>Relação geométrica entre ferramenta e peça no processo de fresamento</i>	67
3.1.7	<i>Geometria de corte</i>	69
4	PROCESSO DE ESCOLHA DO SENSOR EMPREGADO NESTE TRABALHO.....	72
4.1	TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO.....	72
4.1.1	<i>Princípio de funcionamento</i>	72
4.1.2	<i>Justificativa da escolha</i>	74
4.1.3	<i>Sensor de proximidade</i>	75
4.1.4	<i>Condicionador/demulador</i>	77
4.1.5	<i>Cabo de extensão</i>	79
5	TRABALHO EXPERIMENTAL.....	80
5.1	ENSAIOS PRELIMINARES.....	81
5.1.1	<i>Ensaio em laboratório da CESP - BAURU</i>	81
5.1.2	<i>Ensaio em laboratório de metrologia</i>	87
5.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM FRESAMENTO.....	96
5.2.1	<i>Material fresado</i>	96
5.2.2	<i>Máquina</i>	99
5.2.3	<i>Acessórios</i>	101
5.2.4	<i>Ferramentas de corte</i>	103
5.2.5	<i>Preparação dos Insertos</i>	103
5.2.6	<i>Condições de corte usadas nos ensaios</i>	105
5.2.7	<i>Forças de corte no fresamento</i>	111
5.2.8	<i>Cálculo das forças de corte</i>	113
5.2.9	<i>Instrumentação</i>	114
5.2.10	<i>Softwares</i>	116
5.2.11	<i>Descrição dos experimentos</i>	117
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	120
7	CONCLUSÕES.....	130
7.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
8	BIBLIOGRAFIA.....	132
	APÊNDICE.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.0 - Fluxo de informação no monitoramento (Kluft, 1997).....	16
Figura 1.1 - Vista em corte de um gerador (Brown Boveri).....	17
Figura 1.2 - Vista em corte de um turbogerador de 360 Mw (Toshiba).....	18
Figura 1.3 - Eixo de turbogerador em usinagem.....	19
Figura 1.4 - Detalhe de fresamento de uma ranhura de grande profundidade.....	19
Figura 1.5 - Fresa diâmetro 900mm para fresamento de ranhuras.....	20
Figura 1.6 - Desenho ilustrativo do objetivo básico do trabalho.....	21
Figura 1.7 - Estrutura do trabalho.....	22
Figura.2.0 - Sensores no Ambiente de Manufatura.....	26
Figura 2.1 - Pesquisa entre usuários no Japão (Inasaki, 1994).....	27
Figura 2.2 - Avaliação nas Indústrias (Dornfeld, 1993).....	28
Figura 2.3 - Sistema de sensores (Weis, 1994).....	28
Figura 2.4 - Área de aplicação (Weis, 1994).....	29
Figura 2.5 - Performance de TCM (Diel, 1993).....	29
Figura 2.6 - Sistema de Monitoramento à Laser.....	45
Figura 2.7 - Sistema de Monitoramento em Furação.....	46
Figura 2.8 - Cabeçote rosqueador com sensor de torque.....	47
Figura 2.9 - Sistema de monitoramento Promess (a) e (b).....	48
Figura 2.10 - Nível de utilização de sensores.....	49
Figura 2.11 - Diagrama do monitoramento em um processo de manufatura.....	52
Figura 2.12 - Definição de Linhas limítrofes (Threshold).....	54
Figura 3.0 - Sentido de corte no fresamento.....	60
Figura 3.1 - Sistema de controle total do cavaco (Luttervelt, 1993).....	66
Figura 3.2 - Disposição geométrica do inserto.....	68
Figura 3.3 - Relação geométrica de uma ferramenta duplo-positiva.....	69
Figura 3.4 - Relação geométrica de uma ferramenta positivo-negativa.....	70
Figura 3.5 - Relação geométrica de uma ferramenta duplo-negativa.....	71
Figura 4.0 - Disposição dos sensores de proximidade em um conjunto Turbina-Gerador.....	73
Figura 4.1 - Diagrama de montagem de um transdutor de deslocamento.....	74

Figura 4.2 - Sensor de proximidade.....	76
Figura 4.3 - Condicionador/demulador.....	78
Figura 4.4 - Cabos de Extensão.....	79
Figura 5.0 - Bancada com instrumentos para calibração (CESP).....	82
Figura 5.1 - Dispositivo para calibração do sensor.....	82
Figura 5.2 - Tela do computador Software Mecatester.....	83
Figura 5.3 - Relatório final emitido para calibração.....	84
Figura 5.4 - Laboratório de ensaio em sala de metrologia.....	89
Figura 5.5 - Curva para resposta de deslocamento entre 1,00mm ~ 1,01mm.....	94
Figura 5.6 - Gráficos dos resultados obtidos em laboratório.....	95
Figura 5.7 - Dimensões do material utilizado nos ensaios.....	97
Figura 5.8 - Curva de alívio de tensões.....	98
Figura 5.9 - Desenho de usinagem do corpo de prova.....	99
Figura 5.10 - Máquina utilizada no ensaio de fresamento.....	100
Figura 5.11 - Dimensões principais da máquina.....	101
Figura 5.12 - Dispositivo modular de fixação.....	102
Figura 5.13 - Desenho do inserto modificado.....	104
Figura 5.14 - Detalhe da máquina afiadora de perfil.....	104
Figura 5.15 - Terminologia de corte.....	105
Figura 5.16 - Terminologia de fresamento.....	106
Figura 5.17 - Disposição de h_{ex} na região de corte.....	107
Figura 5.18 - Disposição de h_m na região de corte.....	109
Figura 5.19 - Gráfico para a obtenção de h_m	110
Figura 5.20 - Diagrama das forças de corte.....	111
Figura 5.21-A - Bancada de ensaios- Docking Station.....	115
Figura 5.21-B - Bancada de ensaios para fresamento.....	115
Figura 5.22 - Disposição de montagem para ensaio dos sensores de proximidade.....	117
Figura 5.23 - Preparação da máquina para o ensaio.....	118
Figura 5.24 - Detalhe da disposição dos sensores.....	118
Figura 6.0 - Curva do ensaio em vazio sem a ferramenta.....	120
Figura 6.1 - Curva do ensaio com inserto original cortando.....	121
Figura 6.2 - Curva do ensaio com desgaste simulado de 0,1 mm.....	121
Figura 6.3 - Curva do ensaio com desgaste simulado de 0,3 mm.....	122

Figura 6.4 - Curva do ensaio com desgaste simulado de 0,4 mm.....	122
Figura 6.5 - Curva do ensaio com a fresa em vazio.....	123
Figura 6.6 - Curva do ensaio para simulação de quebra com insertos originais.....	123
Figura 6.7 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,1 mm.....	124
Figura 6.8 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,3 mm.....	124
Figura 6.9 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,4 mm.....	125
Figura 6.10 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,5 mm.....	125
Figura 6.11 - Gráfico comparativo entre o sensor A e B.....	126
Figura 6.12 - Gráfico da simulação da quebra de um inserto.....	127
Figura 6.13 - Gráfico comparativo do deslocamento - sentido horizontal e transversal.....	128
Figura 6.14 - Proposta de Linhas limítrofes(Threshold).....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.0 - Ensaio e faixas de deslocamento.....	91
Tabela 5.1 Ensaio com deslocamento entre 1,00mm e 1,01mm.....	93
Tabela 5.2 - Relação entre as forças de corte e o sentido de fresamento.....	113
Tabela 5.3 – Deslocamento do eixo-árvore em função das condições de corte.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D - Analógico/ Digital

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AE - Acoustic Emission

AISI - American Iron and Steel Institute

API - American Petroleum Institute

AqDados - Programa de computador

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

CAPP - Computer Aided Process Planning

CIRP - International Institution for Production Engineering Research

CNC - Command Numeric Control

DAS - Dynamic Analyzer Signal

DRAM - Memória de Computador

FMS - Flexible Manufacturing Systems

ISO - International Standards Organization

RMS - Root Mean Square

SAE - Society of Automotive Engineers

SisDin - Programa de computador

TCM - Tool Condition Monitoring

LISTA DE SÍMBOLOS

Kw - Kilowatts

Kg - Kilograma

k Ω - Kiloohm

Kh_z - Kilohertz

Hz - Hertz

μ m - Micrometro

V/mm - Volts/milímetro

m/min - Metro/minuto

mV/ μ m - Milivolts/micrometro

mA - Miliampére

mV - Milivolts

HB - Dureza Brinell

Rpm - Rotação por minuto

°C - grau Celsius

V_p - Tensão no ponto correspondente em Volts

p - Posição do ponto em mm

V_o - Volts na leitura (x)

S_p - Sensibilidade no ponto (p)

d_p - Desvios de linearidade

q_i - Dados de entrada (deslocamento mm)

q_o - Dados de saída (tensão volts)

m - inclinação da reta

b - Interseção da reta com o eixo vertical

Sq_o - desvio padrão dos dados de saída

Sq_i - desvio padrão dos de entrada

Sm - desvio padrão da inclinação da reta

V_C - Velocidade de Corte

D_c - Diâmetro da fresa

v_f - Velocidade de avanço da mesa

a_e - Profundidade de corte

f_z - Avanço de corte por dente

h_m - Espessura média do cavaco

h_{ex} - Espessura máxima do cavaco

V_c = Velocidade de corte

a_e - Profundidade de corte

a_p - Largura de corte

f_z - Avanço por dente

V_{c0} - Constante para velocidade de corte

C_{vc} - Fator de correção para a velocidade de corte

k_{c1} - Coeficiente tabelado em função do material e da dureza

m_c - Coeficiente tabelado em função do material e da dureza

k_c - Força específica de corte

N_c - Potência necessária

P_c - Força de corte tangencial

P_a - Força de avanço (componente longitudinal F_y)

P_{ap} - Força de profundidade (componente transversal F_x)

P_c - Força de corte tangencial

P_r - Força de corte radial

P_t - Força Resultante

ψ - Ângulo de contato dos insertos

RESUMO

Para processos especiais de manufatura em empresas de bens de capital com produtos sob encomenda, o monitoramento em tempo real da quebra e do desgaste da ferramenta nos processos de usinagem adquire fundamental importância, considerando o alto valor das ferramentas especiais usadas nesses processos, bem como a qualidade final requerida para o produto.

Este trabalho trata da avaliação da sensibilidade de um sensor de proximidade, sem contato, para que possa ser usado futuramente como acessório para a detecção de quebras e desgaste de ferramentas de fresamento em máquinas convencionais destinadas à usinagem de ranhuras de grande profundidade em eixos de turbogeradores, tendo, como objetivo principal, prevenir possíveis danos às ferramentas, máquinas e nas peças que serão usinadas.

Os resultados mostram uma tendência bastante acentuada de aumento na amplitude do sinal com a simulação gradativa do desgaste. Com a simulação de quebra da ferramenta o sinal apresenta picos bruscos facilmente detectáveis.

Palavras Chave: fresamento, sensor, quebra de ferramenta, aquisição de sinal

ABSTRACT

In companies working on special process for manufacturing capital goods, which are subjected to orders, the real time tool monitoring gain fundamental importance, because of the high value of special tools and the final quality required in this machining processes.

This work shows the evaluation of a proximity measuring probe intended to be used in the future as a sensor to detect tool wear and failure in convencional milling operation, machining large grooves in shafts of turbogenerators.

The initial results show that as soon as a tool start to wear, the amplitude of the signal become higher. For the tool failure simulation, the signal sudden creates a peak, which are relatively easier to be detected.

Keywords: Milling, Sensor, Tool fracture, Signal acquisition

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento em tempo real das condições de corte e quebra de ferramentas, é muito importante para o aumento da produtividade e também para assegurar a qualidade do produto. O alto nível da complexidade técnica em um ambiente de manufatura, significa inevitavelmente um risco maior em tempos ociosos. Portanto, o uso de um sistema de monitoramento das condições de corte em tempo real é de fundamental importância, ou mesmo um pré-requisito, para assegurar o sucesso da operação para processos de usinagem (Kluft, 1997). Na ausência de técnicas de monitoramento em tempo real, as condições das ferramentas são avaliadas com a máquina parada, provocando acentuada redução na eficiência da operação, e diminuindo substancialmente os índices de produtividade. Se as ferramentas se desgastarem excessivamente entre as paradas previstas, pode ocasionar danos às peças trabalhadas, às máquinas e até mesmo às próprias ferramentas (Tam et al. (1989).

Em máquinas operatrizes convencionais, as ferramentas de corte são trocadas tendo como parâmetro a experiência do operador, baseados no tempo desempenhando a função (Ramamurthi et al., 1993). Com a aplicação dos sistemas flexíveis de manufatura (FMS) em operações não assistidas, essa dependência diminui, pois o operador tem participação apenas na preparação da máquina.

O uso de sistemas de monitoramento tem-se tornado muito importante na detecção do desgaste e quebra das ferramentas em tempo real e proporcionado também tomadas de ações emergenciais, interrompendo a operação da máquina, evitando com essas medidas, danos generalizados em máquinas, ferramentas e peças (Tamng, 1993).

Uma ampla variedade de técnicas de monitoramento tem sido desenvolvida através dos anos, tais como: análise dos sinais de emissão acústica, forças de corte, corrente do motor, vibração, som, etc., para a predição de desgaste e quebra de ferramentas durante as operações de usinagem.

Um dos primeiros sistemas de monitoração para quebra de ferramentas foi usado na fábrica de motores da Mercedes-Benz de Mannheim (Alemanha) e propiciou vantagens substanciais de custo (Kluft, 1997). Além disso, a observação contínua do processo revela potenciais de racionalização, onde um único operador pode atender inúmeras máquinas operando simultaneamente, o que contribui significativamente para um aumento da produtividade.

A identificação da quebra de ferramenta no processo de fresamento é muito mais complexo que em operações de torneamento, visto existir múltiplas arestas cortantes; por essa razão o desenvolvimento de um eficiente sistema de detecção e diagnóstico se faz necessário. Recentemente a aplicação de monitoramento em tempo real foi estendido para esse tipo de ferramenta, mas devido à natureza complexa desse processo, como; variação da profundidade de corte, cortes interrompidos, desgastes variados nos insertos, e muitos outros fatores que afetam o processo de corte, e que não podem ser previstos com facilidade, tem-se tornado um desafio para os pesquisadores da área (Abdou et Al., 1995).

Em geral, duas necessidades devem ser atendidas para obter-se uma medida confiável na detecção e quebra de ferramentas: primeiro a confiabilidade no sinal sob diversas condições de corte, e a segunda é que o sinal medido deve ser distinto entre as irregularidades do processo - não confundir aderência de cavaco com quebra de ferramenta por exemplo (Colgan, 1994).

A primeira providência essencial para o monitoramento efetivo, é a seleção e o posicionamento adequado dos sensores no ambiente de manufatura. Esses sensores devem converter variáveis físicas em sinais elétricos que possam ser detectáveis.

Num estágio preliminar os sinais elétricos são condicionados, minimizando os ruídos ou extraindo características do sinal que são significativas para o processo que está sendo executado. Esses sinais podem ser visualizados em tempo real em um monitor anexo à máquina.

Baseados nessas informações, torna-se fundamental nos dias atuais a utilização de sensores como uma ferramenta de auxílio nas tomadas de decisão dentro de um ambiente produtivo. Acredita-se que num futuro próximo, sistemas de monitoramento em tempo real da quebra e do desgaste de ferramentas farão parte efetiva de qualquer processo convencional de usinagem, como acessório básico.

Como não existem ainda no mercado sistemas de monitoramento capazes de atender a todas as necessidades em um ambiente de manufatura, cabe ao usuário pesquisar e desenvolver sistemas de monitoramento específicos para cada necessidade.

A figura 1.0, mostra o fluxo da informação durante o monitoramento de um processo de usinagem, onde a origem é o sinal captado pelos sensores, terminando numa resposta, que é a tomada de decisão, a qual, por sua vez, realimenta o processo para essas novas condições obtidas.

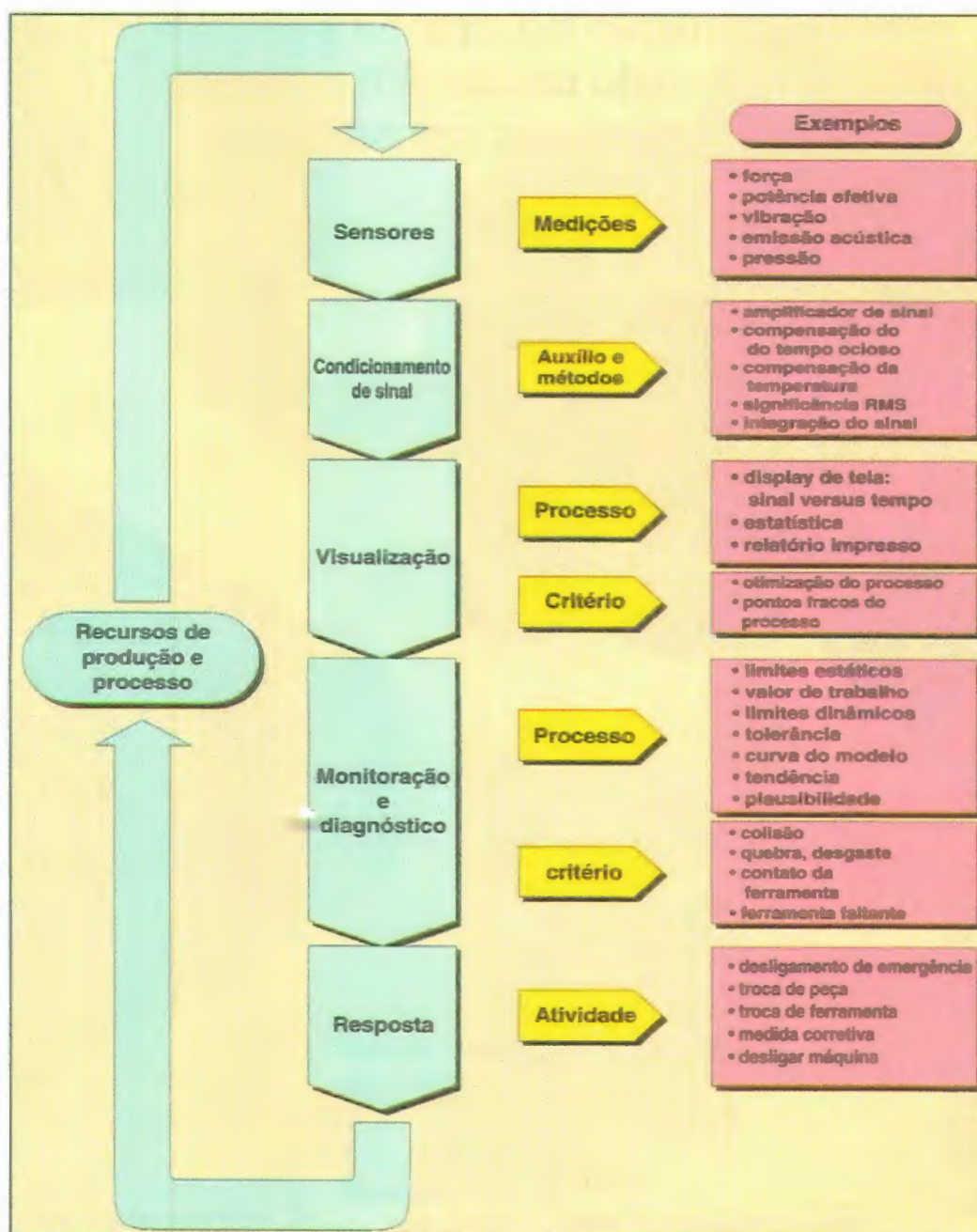


Figura 1.0 - Fluxo de informação no monitoramento (Kluft, 1997)

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Em uma Indústria de Bens de Capital para produtos não seriados na área de Geração de Energia Elétrica, depara-se com a fabricação de produtos complexos de grande valor unitário, tais como; geradores, figura 1.1 e turbogeradores, figura 1.2.

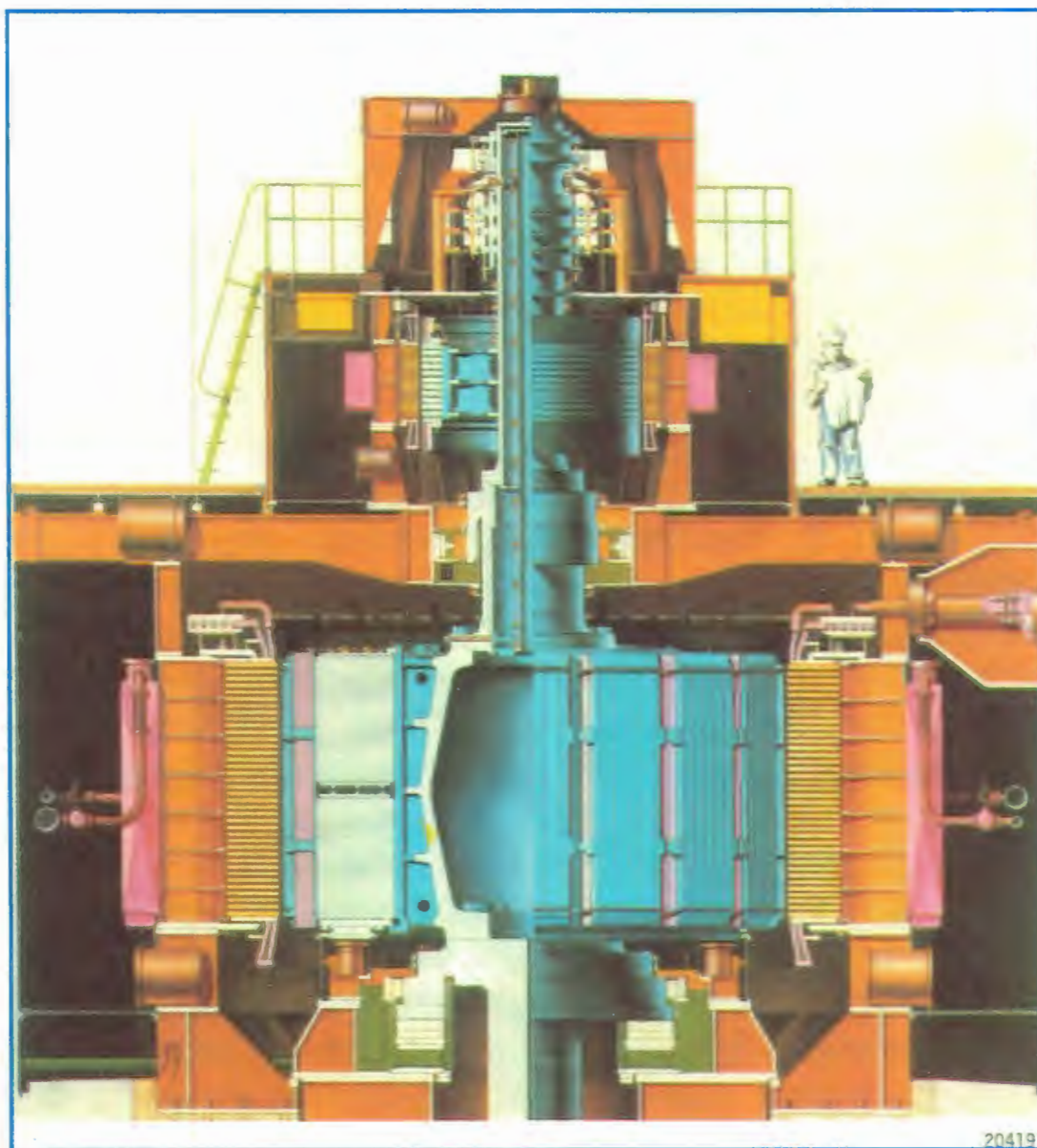


Figura 1.1 - Vista em corte de um gerador (Brown Boveri)

Para que seja executada a usinagem de alguns de seus componentes, eixos por exemplo, são necessários grandes investimentos em máquinas, dispositivos e principalmente ferramentas. Por se tratar de peça única, exige-se requisitos específicos de qualidade,

tornando-se necessário o uso de processos exclusivos de fabricação para que se assegure a qualidade final do produto conforme estabelecido por normas.

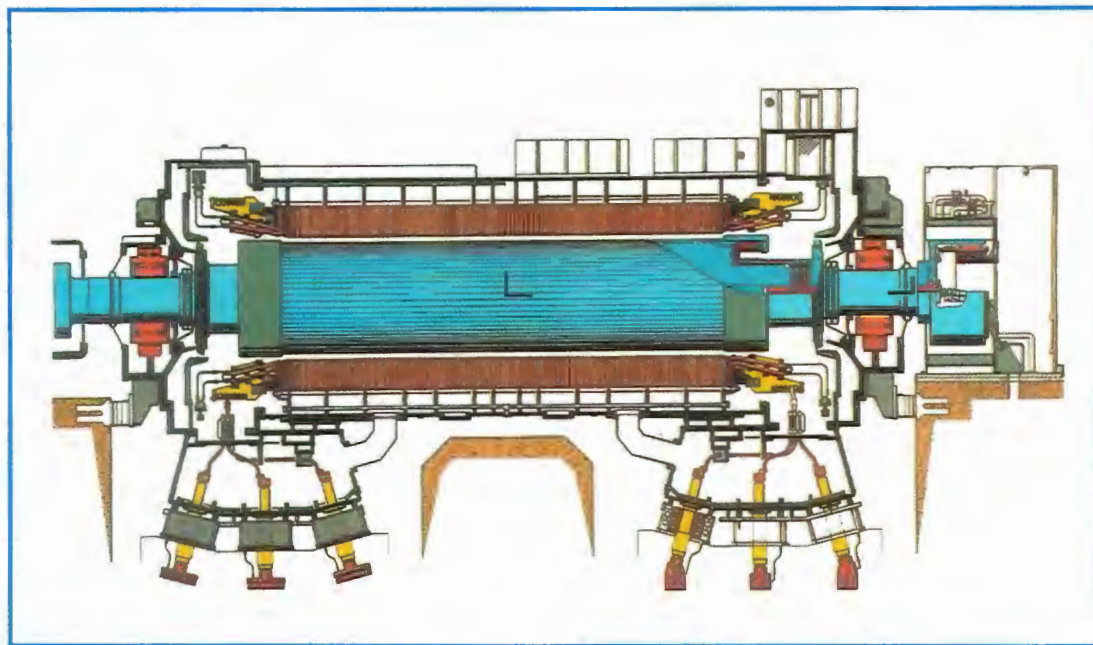


Figura 1.2 - Vista em corte de um turbogerador de 360 Mw (Toshiba)

Na fabricação de turbogeradores, a usinagem dos eixos, figura 1.3, é uma das operações que mais necessita de atenção especial, pois os requisitos de qualidade exigidos para o produto acabado, obriga a um trabalho minucioso de acompanhamento por parte da engenharia de fábrica em tempo integral, para que se minimizem os riscos de danos localizados à peça, à máquina ou à ferramenta, durante o processo de usinagem. Uma pequena anomalia no processo de usinagem compromete o cumprimento do prazo de entrega do produto final, devido ao longo tempo necessário para a recuperação desse dano.

Uma das causas que mais contribui para a ocorrência de anomalias durante o processo de fresamento de ranhuras de grande profundidade, figura 1.4, é a quebra dos insertos intercambiáveis (*Pastilhas*) em cadeia. Se não for percebida a tempo pelo operador da máquina, pode ocorrer a destruição completa do corpo da fresa e provocar danos que comprometem a rugosidade superficial exigida para as laterais das ranhuras. Essa ocorrência advém da sobrecarga sofrida pelo inserto subsequente devido à quebra de um primeiro, quer por desgaste natural ou por choque contra os cavacos que ficam aderidos ao inserto.

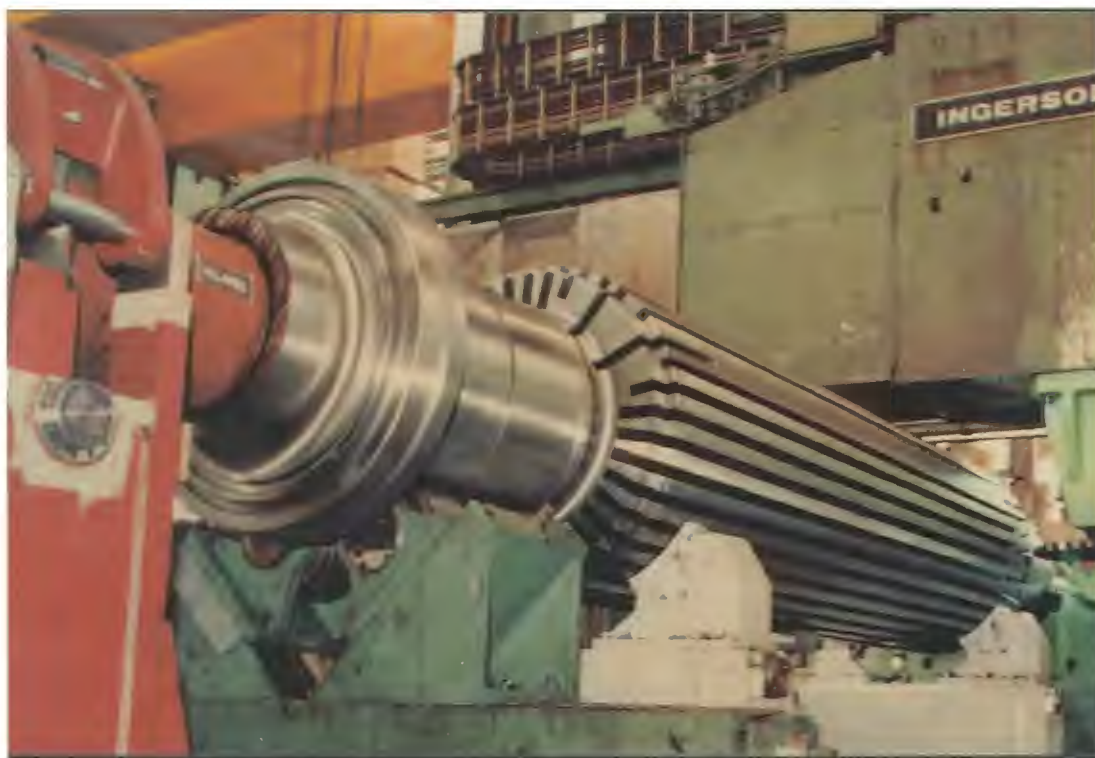


Figura 1.3 - Eixo de turbogerador em usinagem



Figura 1.4 Detalhe de fresamento de uma ranhura de grande profundidade

Outra ocorrência que afeta substancialmente a qualidade superficial das ranhuras é a quebra parcial dos insertos. Essas quebras dão origem a rebarbas nos cassetes, (suporte que prende o inserto ao corpo da fresa, figura 1.5), que provocam pequenos riscos na superfície lateral das ranhuras. Esses riscos devem ser eliminados pois a vibração natural de funcionamento do equipamento (turbogerador), pode provocar o início de fissuras nas aletas que podem romper-se, provocando a destruição do equipamento. Devido à geometria complexa e o difícil acesso à parte interna dessas ranhuras, a recuperação da região afetada torna-se crítica, criando a necessidade de equipamentos manuais especiais, e de muitas horas trabalhadas para a realização do reparo. Outro inconveniente da correção localizada de um dano oriundo da quebra de ferramenta é o desbalanceamento provocado pela necessidade de retirada de material na zona afetada. A massa retirada deve ser obrigatoriamente adicionada em outra região previamente estabelecida, durante o balanceamento do eixo acabado.



Figura 1.5 - Fresa diâmetro 900mm para fresamento de ranhuras

As dificuldades expostas acima, serviram como motivação para que um trabalho acadêmico de busca de uma solução prática para esse problema, fosse iniciado.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo básico deste trabalho é avaliar a sensibilidade de sensores de proximidade, para que sejam capazes de detectar o deslocamento do eixo árvore de uma máquina operatriz, durante um processo de usinagem, figura 1.6. O deslocamento do eixo árvore será provocado pelas duas componentes da força principal de corte, atuantes na ferramenta, que serão variáveis em função dos vários ensaios que serão feitos com simulações de quebra e desgaste dos insertos. Os sensores serão instalados estrategicamente no cabeçote da máquina através de suportes especiais, com a finalidade de captar esses sinais.

Os resultados dos ensaios são mostrados em capítulos posteriores, junto com comentários e conclusões.

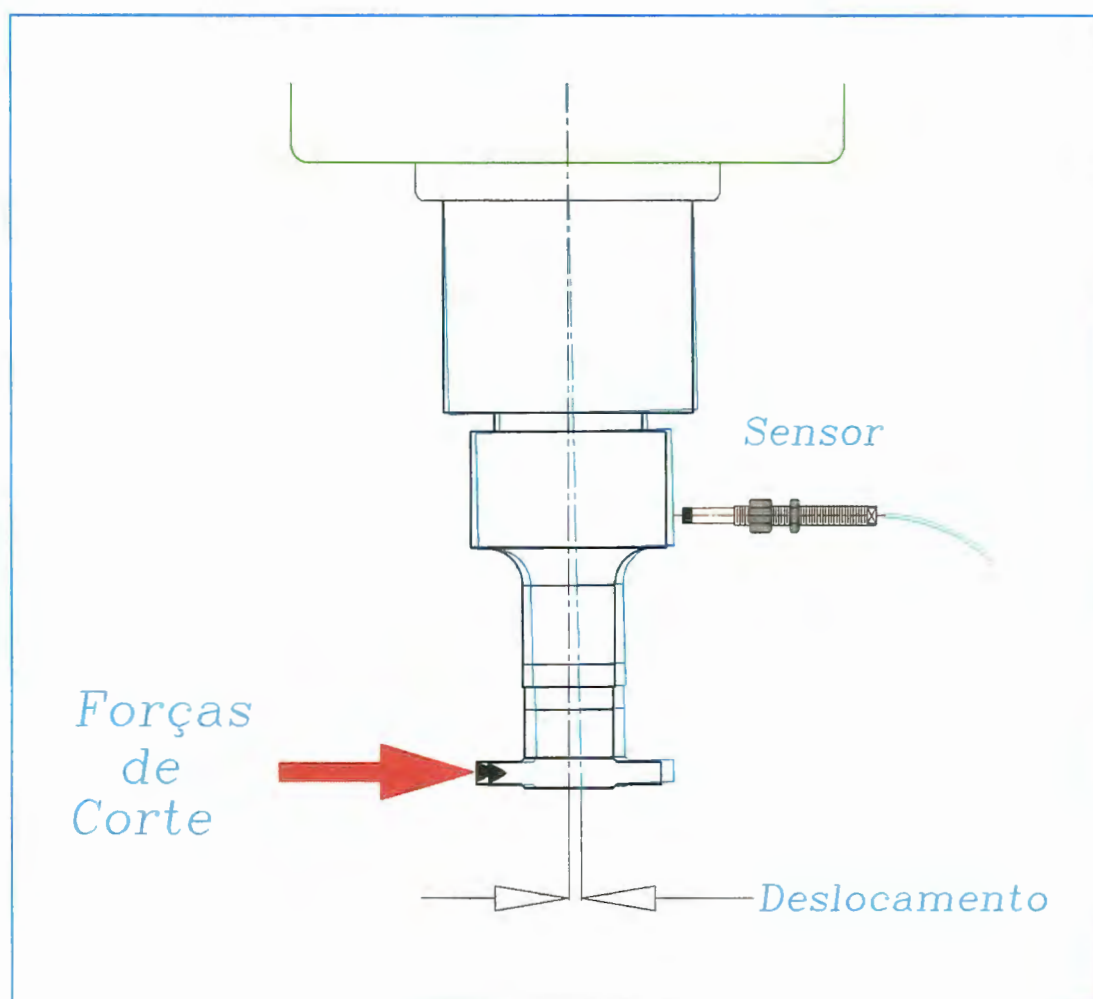


Figura 1.6 - Desenho ilustrativo do objetivo básico do trabalho

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho figura 1.7, é dividida em duas partes, a primeira parte trata do assunto apresentado na monografia e a segunda parte é uma proposta a ser desenvolvida como um trabalho futuro.

A estrutura mostrada não reflete exatamente os capítulos apresentados no trabalho, mais sim uma seqüência lógica do desenvolvimento do trabalho.



Figura 1.7 - Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos. No capítulo 1 está uma introdução ao assunto monitoramento, estendendo-se até aos objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 foi dedicado exclusivamente à revisão bibliográfica, mostrando o atual estágio de desenvolvimento de sistemas de monitoramento dedicados ao ambiente de manufatura. A revisão aborda desde sistemas de sensores inteligentes, até os sistemas disponíveis comercialmente para aplicações específicas no monitoramento de diversos

processos de manufatura. Esse capítulo é de vital importância para a definição e desenvolvimento do trabalho, norteando todas as atividades aplicadas.

O capítulo 3 trata do assunto *Conceitos Básicos sobre Usinagem*. O conceito de fresamento foi tratado nesse capítulo, visto ser o processo que serviu de base para os ensaios de avaliação dos sensores. Foi dado destaque também à formação do cavaco, para permitir o entendimento da atuação da ferramenta durante o processo de corte do material.

O capítulo 4 trata dos critérios para escolha do sensor empregado neste trabalho.

O capítulo 5 mostra o trabalho experimental. Os ensaios preliminares mostrados foram dedicados à aferição e calibração dos sensores de proximidade e também ao aprendizado dos princípios de utilização do equipamento. Na primeira fase foi dado ênfase ao aprendizado, fazendo a calibração dos sensores, conforme as necessidade de uso em um sistema de monitoramento de mancais de filme de óleo, e que teve como objetivo, conhecer o instrumento.

A segunda parte dos ensaios foi dedicada à aferição dos sensores em um laboratório de metrologia, para se conhecer a resolução mínima capaz de ser detectada pelos sensores, antes de levá-los para o ensaio em uma máquina operatriz.

O item 5.2 mostra a preparação para os ensaios em fresamento e os cálculos das condições ideais de corte. Nesse capítulo são mostrados também toda a instrumentação utilizada nos ensaios e os programas de computador usados para fazer a aquisição dos dados e o processamento dos sinais.

O capítulo 6 foi dedicado exclusivamente à apresentação dos resultados e discussões dos gráficos obtidos nos ensaios efetuados em fresamento, para as diversas simulações aplicadas.

O capítulo 7 foi dedicado às conclusões tiradas dos resultados dos ensaios e às propostas que podem ser desenvolvidas no futuro como continuação desse trabalho.

Finalizando, o capítulo 8 mostra a bibliografia consultada para o desenvolvimento desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de sistemas de sensores para **Monitoramento das Condições da Ferramenta** TCM (Tool Condition Monitoring) em máquinas de usinagem e retificadoras está se tornando cada vez mais comum para melhorar a produtividade e reduzir os custos de manufatura. Muitas abordagens têm sido feitas para concretizar o TCM como uma ferramenta indispensável de controle na área fabril, onde um certo número já é aplicado com sucesso. Os sensores usados nesses sistemas de monitoramento, incluem aplicação industrial, novos desenvolvimentos em processamento de sinais e informação, sensores baseados em melhoramento de processos e controle e outros direcionados para futuros desenvolvimentos. Os principais desenvolvimentos notados nessas abordagens incluem o uso de múltiplos sensores, com o objetivo de aumentar a fidelidade do sistema, sensores inteligentes com processamento de sinal e capacidade para tomar decisões e a implementação de sistemas de sensores em controladores de arquitetura aberta para controle de máquinas ferramentas.

Nos últimos anos o ambiente de manufatura tem sofrido dramáticas mudanças, e uma das mais significantes é o desenvolvimento na direção da redução de custos da produção, por exemplo, a redução do número dos trabalhadores, e ao mesmo tempo visando melhorar a qualidade, e em paralelo reduzindo o tempo de fabricação dos produtos. Novos desafios têm sido propostos em relação à fidelidade e aplicabilidade dos sistemas de sensores para monitoramento das condições da ferramenta, com o intuito de elevar o nível de sofisticação dos sistemas de produção disponíveis. É de vasta aceitação que sistemas de manufatura baseados em sensores são de vital importância para alcançar esses propósitos. Avançados projetos de sensores, integrados com a tecnologia de processamento de sinais, permitem melhorar a informação sobre as condições dos processos, capacitando, controlando e otimizando os mesmos. Não é adequado obter somente informações relativas às condições da ferramenta, capacidades adicionais tais como: controle de qualidade durante o processo de fabricação e o diagnóstico do ferramental da máquina, são também requisitos necessários para

o futuro da manufatura. Como exemplo, a mudança do monitoramento da condição de ferramenta para o monitoramento da condição do processo, propiciará um ganho efetivo na qualidade final do produto manufaturado (Byrne et al., 1995).

Em Janeiro de 1993 foi estabelecido pelo CIRP, dentro do grupo de trabalho, uma estrutura para investigar o estado internacional da arte, desafios tecnológicos e desenvolvimentos direcionados ao TCM no ambiente de manufatura, tanto do ponto de vista acadêmico como industrial. O grupo de trabalho nos processos de usinagem incluía: monitoramento nos processos de fresamento, torneamento, furação e retificação/abrasivos, com ênfase em colapso, colisão, desgaste progressivo e quebra da ferramenta, além de quebra do cavaco.

2.1 PESQUISAS NO AMBIENTE DE MANUFATURA

Novos requisitos têm sido exigidos dos sistemas de controle no ambiente de manufatura como por exemplo, os recentes desenvolvimentos de projeto de máquinas de alta velocidade e as tendências da tecnologia para o uso de materiais de difícil torneamento. Extraordinários progressos têm sido feitos para melhorar as velocidades de corte desde o começo deste século e essa tendência é ainda uma evidência nos dias de hoje, tanto para o corte de material quanto para processos abrasivos. A tendência de aumentar a precisão das peças manufaturadas está ligada aos requisitos para processos limpos de usinagem, como mínima emissão de poluentes e desperdício. Vários tipos diferentes de sensores estão disponíveis para monitorar características de controle do ambiente de usinagem figura 2.0, como ilustrado por (Moriwaki, 1993).

Os mais recentes resultados alcançados pelos novos processos de produção e novas ferramentas de corte, não são as bases das mudanças em monitoramento das condições da ferramenta, existe ainda alguma incerteza por parte do usuário, considerando o que deve ser medido e qual o sistema de monitoramento mais adequado. De forma secundária, as razões para performances inadequadas ou inesperadas no sistema de monitoramento das condições da ferramenta não devem ser creditadas à tecnologia de monitoramento, mas sim a outras dificuldades, tais como: defeitos nas interfaces das máquinas ou erro de operação durante a instalação do sistema operacional de controle. Finalmente, depende de como pretende-se construir o sistema, se dentro da máquina ferramenta como um sistema de controle, ou adicionado à máquina como um acessório, ou conforme requerido pelo usuário.

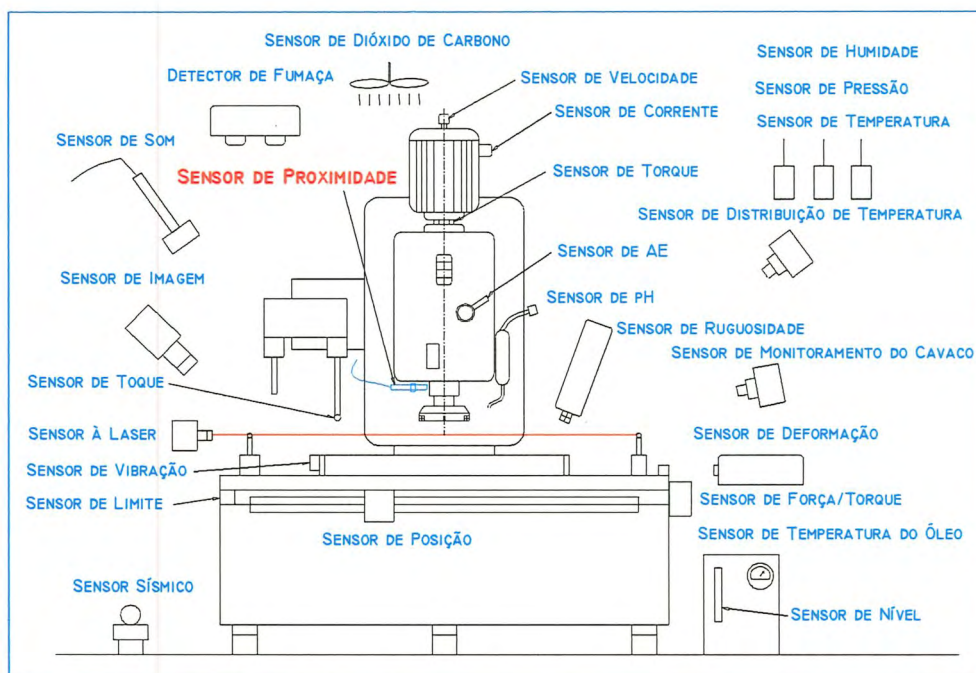


Figura.2.0 - Sensores no Ambiente de Manufatura (Moriwaki, 1993)

Construtores de máquinas ferramentas, frequentemente preferem ver estes sistemas de sensoriamento como protetores da máquinas-ferramentas ou do eixo árvore, de inesperados eventos ou falhas (Kegg, 1994). Pesquisas recentes sobre sistema de monitoramento usados no Japão, Alemanha e Estados Unidos, mostram as necessidades e expectativas, do ponto de vista dos usuários de sensores.

No relato feito por (Inasaki, 1994), baseado numa pesquisa com 31 usuários no Japão, figura 2.1, mostra que a aplicação de sistemas de monitoramento é distribuída entre quatro segmentos da indústrias: fabricante de máquinas ferramentas (30%), componentes automobilísticos (17%), de ferramentas (13%), produtos elétricos e mecânicos (25%), outros (15%). Confiabilidade no sistema e na transmissão de informação, foi classificada como a de maior importância por 80% dos usuários pesquisados, relativamente à tecnologia de monitoramento. Confiabilidade foi o fator mais importante para os usuários do que a taxa custo-benefício, avaliando o sucesso na operação com sensores. A maioria relatou que o monitoramento da quebra e desgaste da ferramenta foi considerado menos importante. Os usuários pesquisados sentiram que para futuros sistemas de monitoramento, a aplicação mais importante poderia ser a confiabilidade no processo, com a qualidade do monitoramento sendo menos importante. Os usuários pesquisados também sentiram que o sistema poderia ter a capacidade de incorporar uma função de auto-análise e teste.

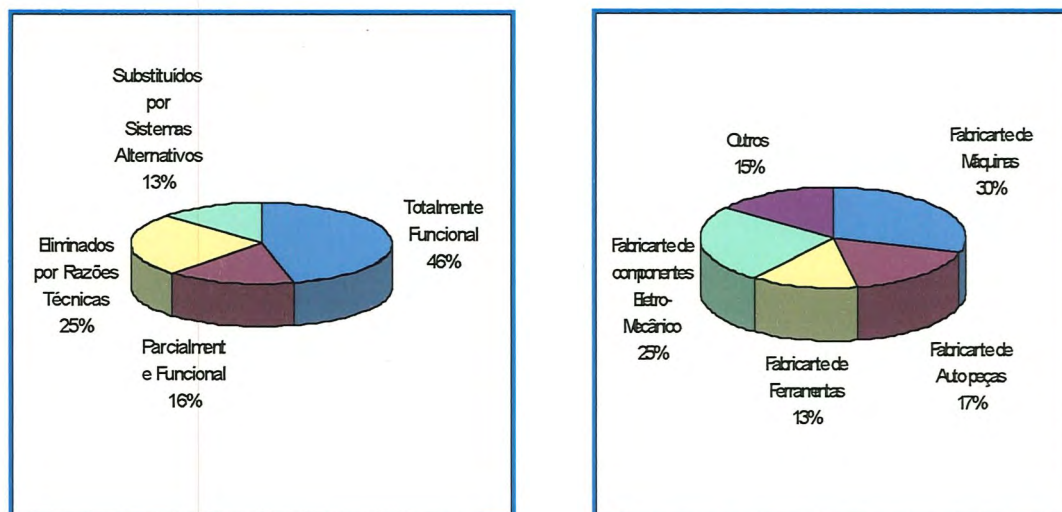


Figura 2.1 - Pesquisa entre usuários no Japão (Inasaki, 1994)

Alguns importantes trabalhos em relação a sistemas de monitoramento das condições da ferramenta, também têm sido aplicados nos últimos anos na indústria automobilística germânica. A Mercedes Bens AG passou por uma avaliação no sistema implementado na linha de produção. Dos sistemas de monitoramento avaliados, 57% foram usado para torneamento e 42% para furação, e somente uma pequena fração foi aplicada para fresamento. Na avaliação do sistemas instalados nas indústrias, figura 2.2, detectou-se que somente 46% eram totalmente funcionais, 16% tinham função limitada, 25% dos sistemas não eram funcionais devido à limitações técnicas e 13% foram substituídos por sistemas alternativos (Domfeld, 1993). Deve-se salientar que esta pesquisa foi realizada em 1993 e que após esse período houve grande desenvolvimento tecnológico em hardware e software. Análises adicionais e discussão entre o grupo de usuários pesquisados tem mostrado que a interação incorreta entre os operadores e o sistema é uma das maiores causas do desligamento do sistema no meio produtivo. O treinamento dos operadores, portanto, é um elemento de vital importância para a implementação com sucesso de sistemas de monitoramento das condições da ferramenta(TCM).

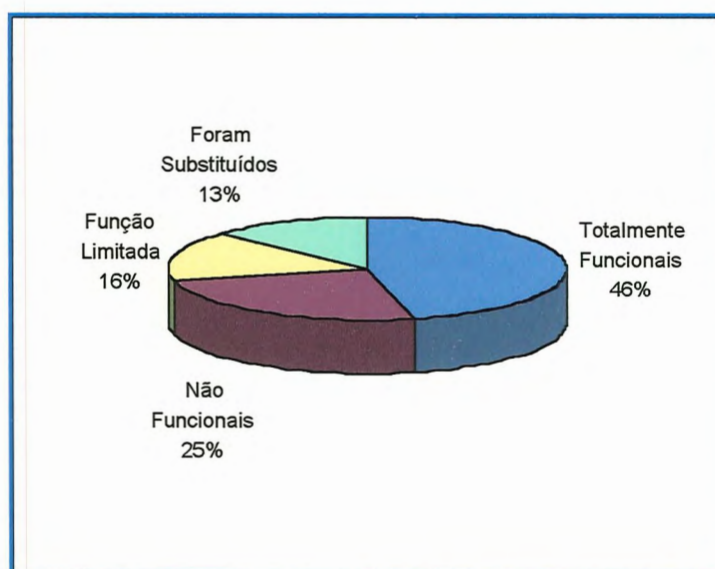


Figura 2.2 - Avaliação nas Indústrias (Domfeld, 1993)

Recentemente, (Weis, 1994), pesquisou 26 fabricantes e 20 usuários de sistemas de TCM - num total de 1161 sistemas instalados em uma série de indústrias, com grande ênfase na área automobilística. Esses sistemas de monitoramento, figura 2.3, compreendiam: sensores acústicos (27%), extensômetros (22%), sensores de força (17%), sensores de corrente (17%), outros (17%). Esses sistemas foram implementados para a monitoramento de desgaste da ferramenta (28%), colisão (22%) e quebra (50%), mostrando resultados similares aos obtidos por Inasaki.

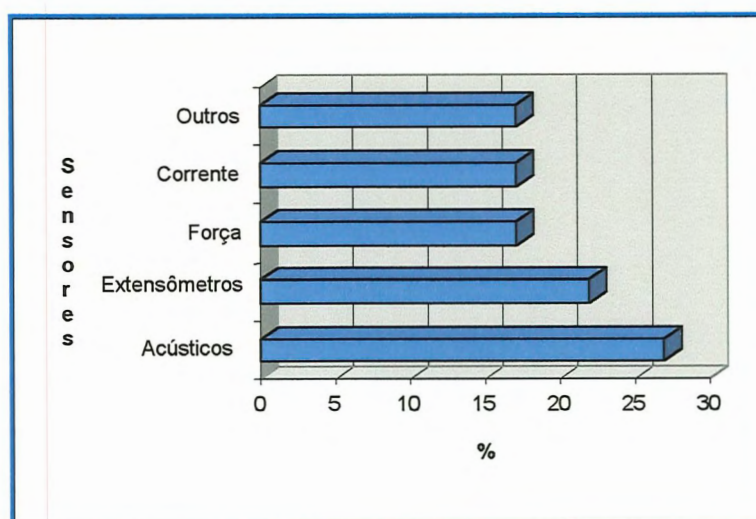


Figura 2.3 - Sistemas de monitoramento (Weis, 1994)

O monitoramento com o objetivo de tentar prevenir colisões é feito em adição à simulação feita por CAD e sistemas de manufatura CAM. A figura 2.4, mostra a distribuição dos sistemas de monitoramento por área de aplicação, com predominância daqueles aplicados à furação e ao torneamento.

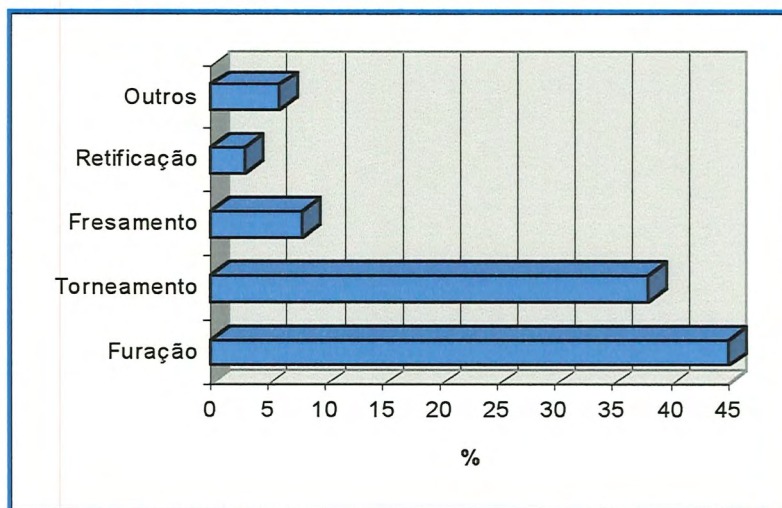


Figura 2.4 - Área de aplicação (Weis, 1994)

A percepção do usuário relativa ao sucesso ou falha de uma tecnologia de sensoriamento específico, pode depender da expectativa do comportamento do sistema. (Diel, 1993) ilustrou diferenças substanciais, com respeito ao monitoramento da colisão isolado versus monitoramento do desgaste da ferramenta, quebra e colisão, entre o interesse inicial dos consumidores, investigando monitoramento de ferramenta comparado a sistemas eventualmente instalados.

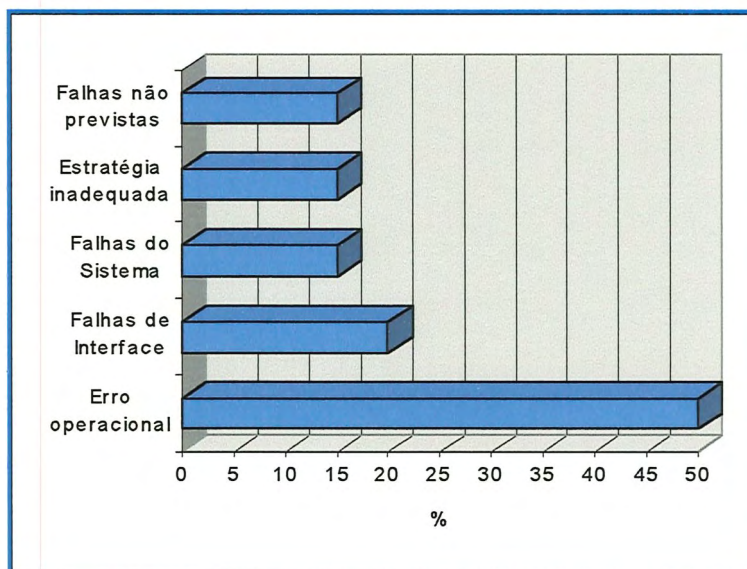


Figura 2.5 - Performance de TCM (Diel, 1993)

Certa semelhança encontrou também quando da avaliação da performance de TCM, figura 2.5. Somente 15% das falhas era devido ao próprio sistema de monitoramento, comparado com erro operacional (50%), dificuldades com a interface da máquina (20%), erros na seleção inadequada da estratégia de controle (15%) e falhas não previstas (15%). O ultimo número sugere que nenhum sistema deveria ter expectativa de operar com 100% de confiabilidade.

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE SISTEMAS DE MONITORAMENTO

A transformação de sensores usados inicialmente como equipamento de diagnose nos processos de usinagem, para um sistema de monitoramento inteligente de ferramentas e monitoramento de processos e controle, ocorreu mais ativamente durante a última década. (Kegg, 1993), relatou a história da aplicação dos sensores em máquinas operatrizes, no período compreendido entre 1950 e 1980. Esses sensores; termopares, piezocristais, acelerômetros, extensômetros e emissão acústica por exemplo, foram caracterizados pela aplicação em monitoramento de fenômenos físicos específicos, ou para uma característica específica do processo: desgaste da ferramenta, torque no eixo árvore e vibração da ferramenta. No final dos anos 80 e começo dos anos 90, avançadas técnicas em processamento de sinais e inteligência artificial, influenciaram de forma efetiva o desenvolvimento e a aplicação de sensores e sistemas de monitoramento. Esses sensores inteligentes incluíam como parte do escopo, habilidades de auto-calibração e diagnóstico automático, condicionamento de sinais e tomadas de decisões. Um novo foco de muita pesquisa sobre sensores estava na fusão do sistema de monitoramento com a integração da informação de vários sensores, com o intuito de efetivamente caracterizar melhor, e com mais eficiência, as características de um processo ou máquina. Isto configurou também um trabalho de base na aplicação de aprendizado em novos programas, tais como rede neurais, que propiciam o entendimento do processo, quando este é suficientemente complexo para desafiar modelos matemáticos (Dornfeld, 1992).

O monitoramento se faz necessário para assegurar que uma ótima performance do sistema de fabricação seja obtida. O foco em monitoramento é tanto do lado dos equipamentos, diagnósticos e monitoramento de performance, quanto das ferramentas ou do trabalho feito com ferramentas tais como: nível de desgaste, lubrificação, alinhamento, ou ainda, peça trabalhada, por exemplo: geometria e dimensões, falhas de superfície e

rugosidade, tolerância e defeitos metalúrgicos. Pode ser monitorado o próprio processo, através da formação do cavaco, temperatura e consumo de energia. Todas as 4 áreas focadas pelo monitoramento podem ser objeto de necessidades de monitoramento freqüente, com exigências em tempo de resposta ou situação dos sensores. Portanto, os sistemas de monitoramento para processos de fabricação devem balancear um número de opções se eles forem eficazes (Dornfeld, 1993).

Sensores para TCM devem preencher vários requisitos. Os sinais emitidos por esses sensores, devem possibilitar a detecção de desgastes e rupturas nas ferramentas em tempo real, bem como a trepidação e as vibrações nos processos de usinagem e retificação. Para que isto seja possível, o mecanismo de monitoramento das ferramentas deve funcionar intrínseco ao processo na maioria dos casos. Além disso, é desejado que os requisitos de qualidade da peça trabalhada sejam alcançados. Requisitos adicionais são necessários, devido ao fato de que as condições do meio produtivo onde se faz monitoramento da ferramenta são muito agressivas. Sensores para o monitoramento do processo devem satisfazer às seguintes exigências (Tönshoff et al., 1988):

- ❑ As medições devem feitas, se possível em tempo real;
- ❑ Independente de rigidez estática e dinâmica da máquina;
- ❑ Não deve haver restrição no espaço de trabalho e nos parâmetros de corte;
- ❑ Resistentes ao desgaste, livres de manutenção, serem trocados facilmente;
- ❑ Resistência a sujeira, cavacos e influências mecânica, eletromagnética e térmica;
- ❑ Função independente da ferramenta ou da peça trabalhada;
- ❑ Características metrológicas adequadas;
- ❑ Fidelidade na transmissão dos sinais;
- ❑ Baixo custo.

Conseqüentemente, apenas uma pequena fração dos sensores que estão disponíveis no mercado são apropriados para TCM por atenderem apenas uma parte dessas exigências.

2.3 RESTROPECTRO DOS SISTEMAS DE TCM (Tool Condition Monitoring)

Existe uma substancial quantidade de informações associadas ao controle ou monitoramento de máquinas ferramentas inteligentes. As últimas pesquisas publicadas pelo

CIRP com esse tópico foram realizado por (Tönshoff et al, 1988), cobrindo monitoramento e controle, e por (Tlusty et al, 1983) sobre sensores em máquinas não assistidas. Anteriormente a esta retrospectiva, uma das mais completas revisões foi feita como parte do Estudo da Força de Trabalho da Máquina Ferramenta em 1980 por Birla. Outras revisões detalhadas foram publicadas sobre os vários aspectos da usinagem e monitoramento da ferramenta/peça. (Shiraishi, 1988) mostrou inúmeros exemplos de aplicações e especificações sobre performance de sensores para máquinas, ferramentas, peças e principalmente para monitoramento de processos em usinagem. (Dornfeld et al.,1993) revisou recentemente as técnicas de monitoramento concernente às exigências futuras e sensores inteligentes. Na década de oitenta foram publicadas várias pesquisas no Japão, focando a difusão do uso de sistemas de monitoramento entre os construtores japoneses de máquinas operatrizes, onde foram mostradas as exigências e as preferências em monitoramento de máquinas ferramentas, atualizando inclusive, algumas informações apresentadas anteriormente sobre essas mesmas exigências. Existe também literatura focando furação e roscamento, sendo possível também nos dias de hoje, encontrar no mercado fabricantes de sensores para monitoramento automático de falhas dessas ferramentas em ambientes de manufatura.

A mais recente compilação sobre TCM foi feita pôr (Teti, 1995), onde lista 520 citações publicadas nos últimos anos. Muitos outros artigos foram publicados nos últimos tempos enfocando a supervisão automática em processos de manufatura como parte de um conceito de máquinas inteligentes, incluindo revisões sobre trabalhos apresentados anteriormente ou propondo novas alternativas, ou mesmo uma ampla revisão sobre sensores, processamento de sinais, controle, modelamento de processos e integração com o projeto do produto.

2.4 SENSORES PARA SISTEMAS TCM (Tool Condition Monitoring)

2.4.1 Princípios de funcionamento

Analisando sensores para sistemas de monitoramento de processos, uma distinção deve ser feita. De um lado, sensores para medição contínua e intermitente, e por outro lado, sensores para de medição direta e indireta (Micheletti et al., 1976). No caso dos sistemas de sensores para medição contínua, a variável medida é totalmente acessível durante todo o curso do processo de usinagem. Sensores para medições intermitentes, registram a variável medida somente durante os intervalos dos processos de usinagem. Sensores para medição direta,

empregam toda a quantidade atual de variáveis de medidas disponíveis, por exemplo, desgaste da ferramenta, enquanto que sensores para medida indireta, medem somente a quantidade de variáveis auxiliares disponíveis, tais como: os componentes da força de corte, deduzindo o valor real obtido na medição, com dados previamente estabelecidos, via correlação empiricamente determinada. Os sensores para medição direta possuem um maior grau de exatidão, enquanto métodos indiretos são menos complexos e mais disponíveis a aplicação prática. Medições contínuas capacitam a detecção de todas as mudanças ocorridas na medição dos sinais e asseguram que distúrbios inesperados nos processos, tais como: quebras de ferramenta, tenham resposta em tempo hábil. Medidas intermitentes dependem de interrupções nos processos de usinagem ou medidas em intervalos especiais previamente estipulados, o que acarreta desperdício de tempo, e conseqüentemente um aumento indesejado nos custos. Além disso, quando usamos esses sistemas intermitentes, a quebra de ferramenta não pode ser identificada até o término completo do ciclo de usinagem, o que significa que essas falhas não podem ser prevenidas. Todavia, a medição intermitente do desgaste tem o seu uso prático, provando que isto não resulta em adicional tempo perdido. Isso seria concebível, por exemplo, quando as medições são executadas na esteira de ferramentas da máquina, enquanto se processa a usinagem com outra ferramenta. Métodos de medição intermitente de desgaste da ferramenta podem ser implementados através de sistemas mecânicos, sensores indutivo-capacitivos, sistemas hidráulico-pneumáticos, óptico-eletrônicos, medidores de proximidade ou outros sistemas de sensoriamento, com vasta literatura disponível (Byrne et al., 1995)

2.4.2 Sistema de medição direta

A medição contínua direta com sensores é uma ótima combinação, de exatidão com tempo de resposta. Para medição direta da extensão do desgaste de uma ferramenta, por exemplo, existe um sistema óptico-eletrônico, o qual avalia a luz em formato de cunha, que é formada pela abertura abaixo da aresta de corte da ferramenta, e que muda proporcionalmente de acordo com a extensão do desgaste da superfície de folga da ferramenta. A extensão do desgaste também pode ser medida diretamente através de lâminas de corte especialmente preparadas, onde os flancos da ferramenta são providos de uma fita condutora que age como resistores elétricos, proporcionando a análise do desgaste. Inúmeros processos de medição foram desenvolvidos para monitoramento do processo de torneamento e fresamento, de maneira a detectar o “offset” da aresta de corte. A mudança ocorrida a cada instante, entre o sensor e aresta de corte ou do sensor até a peça, é definido como o “offset” da aresta de corte.

Como o “offset” da aresta de corte sozinho é insuficiente para descrever o desgaste ferramenta, outros métodos de medição foram estabelecidos, incluindo-se aqueles para medir a extensão do desgaste da superfície de saída da ferramenta, que permanecem indisponíveis na prática, e que podem ser considerados atualmente, somente como métodos de laboratório.

Uma outra abordagem usa um sistema de processamento de imagem baseado numa câmera linear para determinação em tempo real do desgaste de um inserto de uma fresa em rotação. O tempo improdutivo devido à medição é evitado, e o sistema reage rapidamente à quebra de ferramenta. Existem, por outro lado, problemas devido a curta distância entre a ferramenta e a câmera, que é montada em um local da máquina próximo à ferramenta, e que está sujeita a interferências, devido a cavacos e a sujeira acumulados sobre os insertos durante o processo de usinagem (Byrne et al., 1995).

2.4.3 Sistema de medição indireta

Os processos contínuos de medida indireta, que também são capazes de determinar perturbações relevantes, exemplo desgaste de ferramenta, medindo uma quantidade auxiliar de variáveis e suas mudanças, são geralmente menos exatos do que métodos diretos. Uma variável valiosa que pode ser medida indiretamente para determinação do desgaste, é a temperatura de corte, que geralmente se eleva com o aumento do desgaste da ferramentas, devido ao aumento do atrito. Por outro lado, todos os processos de medida conhecidos são exclusivamente métodos de laboratório, exclusivos para torneamento, e que são impraticáveis para fresamento e furação, devido ao fato das ferramentas serem rotativas (Byrne et al., 1995). Medidas contínuas da resistência elétrica entre a ferramenta e a peça também são inapropriadas para aplicações práticas, por conta das exigências requeridas, tais como; isolamento das peças em processo e ferramentas, e devido a curto-circuitos resultantes de cavacos ou fluidos de refrigeração (Uehara et al., 1989). Sistemas de monitoramento baseados em som usando microfones, também não têm alcançado aplicação industrial devido aos problemas causados pelo barulho que são gerados pelos processos de usinagem (Takata et al., 1986). Muitas outras variáveis podem ser medidas usando-se sensores apropriados, que já estão disponíveis para aplicação industrial, tais como: forças de corte, extensômetros, corrente do motor, vibração e emissão acústica.

2.5 SISTEMAS DE SENSORES DISPONÍVEIS - APLICAÇÃO PRÁTICA

Os mais desenvolvidos sistemas de sensores para monitoramento para medição indireta e contínua, são os que avaliam as forças cortantes ou da medida de variáveis derivadas dos componentes da máquina; potência dos motores, deslocamento das ferramentas, como uma característica variável do processo. Todos os sistemas de monitoramento baseados nestes princípios, utilizam o fato de que o desgaste causa um aumento nos componentes da força cortante (Abdou et al., 1995). No caso do torneamento e fresamento, esse aumento da força é substancialmente menor na força primária de corte ou torque, do que nos componentes ortogonais para a força de avanço e força de recuo. No caso de furação, o aumento das forças é substancialmente baixo e algumas vezes totalmente ausente (Altintas, 1992).

Essencialmente, quebras de ferramenta se manifestam em forma de descontinuidade ou em mudanças de pulsação em uma ou várias componentes da força (Altintas et al., 1988). Essas características, típicas de interrupção da força são, naturalmente, dependentes dos processos de usinagem, da combinação do material da peça trabalhada com a ferramenta de corte, das condições de corte com as características do quebra do cavaco. Como sabemos que as quebras das ferramentas acarretam picos na emissão de sinais acústicos, eles então podem ser detectados usando sensores de emissão acústica (Carolan et al., 1996).

2.5.1 Sensores para monitoramento baseados na medição da força de corte

2.5.1.1 Dinamômetros para medição direta

Dinamômetros comerciais, como os fornecidos pela empresas (BRANKAMP, KISTLER E PROMETEC), fornecem medidas exatas da força de corte. Eles consistem de transdutores para três componentes de força, montados com uma pré-carga, entre as placas de base e superior do dispositivo de fixação. Como esses transdutores são extremamente rígidos, permitem uma ampla variação de medições. Eles são baseados no efeito piezoelétrico. Diferentes tipos de dinamômetros estão disponíveis no mercado permitindo a aplicação sob ferramentas de torno, sob peças trabalhadas ou em suportes que fixam fresas e brocas. Os dinamômetros são amplamente usados em estudos fundamentais de processos de usinagem e em monitoramento baseados em força de corte, mas são inviáveis para monitoramento de processos devido à ausência de proteção de sobrecarga e seus altos custos.

O uso da torre de ferramentas de um torno é outro método para a medição de força. Isso envolve a aplicação dos princípios de medição com dinamômetros padrão. O sistema de medição de força baseados em elementos piezoelétricos para três componentes de força, é instalado entre o carro transversal e a torre de ferramentas, permitindo ótima determinação dos componentes de força cortante. Alguns aspectos desvantajosos são: alto custo e o fato de não serem protegidos contra sobrecarga durante uma colisão e nem contra danos causados no sistema elétrico pelo fluido de refrigeração, muito embora isto agora seja possível tecnicamente, usando retentores especialmente desenvolvidos para essa função. Por alguma razão específica, este sistema de medição tem sido produzido somente em alguns poucos casos isolados. Sistemas similares foram desenvolvidos incorporando medições com extensômetros capacitando somente a medição da força principal de corte.

2.5.1.2 Placas e anéis para processos de monitoramento

Placas para medida de força, fornecidas também pelas empresas citadas acima, consistem de algumas finas placas intermediárias no qual elementos de medida de força piezoelétrica são embutidos. Os elementos de medição são sujeitos somente a uma pequena parcela do total da força aplicada e são, conseqüentemente, protegidas contra sobrecarga. Extensômetros aplicados às placas para medição de força têm sido apresentados como alternativa, apesar de terem baixa rigidez quando comparados com as placas de medição de forças piezoelétrica. Esses sistemas de monitoramento são comparativamente fáceis de se ajustarem e são instalados nos tornos entre a carcaça da torre de ferramentas e o carro transversal ou entre o disco da torre e a carcaça da torre de ferramentas. Nos centros de usinagem, os anéis de medição de força, são posicionados atrás do flange do eixo árvore, primeiramente para permitir a medição da força axial (na direção do eixo). Com esse método também é possível medir as forças transversais, desde que se façam as conexões necessárias. Até agora, esse sistema de medição de forças tem falhado em produzir resultados satisfatórios em centros de usinagem, porque os anéis de medição de força posicionados nesse lugar estão sujeitos a uma série de fatores adversos e distúrbios tais como: mudança na temperatura do óleo lubrificante do eixo, expansão térmica do eixo, flutuações na temperatura do fluido refrigerante, no caso do refrigerante interno aplicado ao sistema, e deslocamento térmico do cabeçote fixo.

2.5.1.3 Pinos e Sensores de Extensão

Esses tipos de sensores detectam a força de corte indiretamente, através de sensores de extensão que detectam a força através dos elementos estruturais das máquinas operatrizes. A manutenção desse sistema é fácil, mas a posição correta para montagem desses sensores na estrutura das máquinas somente pode ser determinada através de experimentação, o que significa que esse é um processo que consome tempo para ajuste e operação do sistema de monitoramento. Tendo em vista as inevitáveis interferências e pelo fato de que esses sensores geralmente possuem um baixo nível de sensibilidade, eles são normalmente aplicáveis para a identificação de quebras de ferramentas durante as operações de desbaste.

2.5.1.4 Medição de Deslocamento

Sistemas de medições para detectar o deslocamento ou a flexão das ferramentas já são conhecidos por longo tempo e são implementados usando sensores de deslocamento sem contato, que são montados diretamente sobre a ferramenta, sobre o flange do eixo árvore ou sobre o contra ponto das retificadoras. Na teoria, este método de medição, que se dá nas proximidades da zona de corte, representa uma boa base para o sistema de monitoramento das ferramentas, mas o risco de distúrbios, na forma de cavacos, sujeira e fluido refrigerante, é muito grande. Portanto o uso desses sistemas de sensores, é conveniente somente para uso em casos especiais e isolados. Esse sistema de monitoramento apresenta também dificuldades consideráveis em máquinas com troca automática de ferramentas. Sistemas de medidas de deslocamento em torres de ferramentas ainda devem ser melhorados e devem ser considerados somente como sistema de identificação de colisão, além disso, eles são incapazes de detectar medições individuais dos componentes da força de corte, livres de interferência

2.5.1.5 Rolamentos e Buchas para medição de forças

Os rolamentos para medição de forças da empresa (Prometec), são rolamentos de rolo de contato, usados no eixo árvore das máquinas ferramentas, e são especialmente preparados para aplicação em medidas de forças, onde extensômetros são montados dentro dos canais circunferências das capas dos rolamentos. Buchas para medição de forças são componentes

adicionais que são montadas entre o rolamento de rolo de contato e a carcaça do cabeçote da máquina. A medição é realizada com extensômetros, os quais são encaixados dentro de cavidades longitudinais especialmente preparadas em certos pontos das buchas, essas cavidades propiciam o enfraquecimento da parede da bucha de forma a acentuar a sensibilidade. Rolamentos para medidas de forças não permitem medições livres de interferência e requerem um filtro para cortar altas frequências a fim de eliminar as frequências provenientes do contato das esferas do rolamento. Como resultado, sinais de alta frequência não são detectáveis. Buchas para medição de força reduzem a rigidez do eixo árvore e são apenas aceitáveis em casos especiais.

2.5.1.6 Força e Torque nos eixos árvores

Tendo em vista as necessidades de fazer a medição das forças de corte o mais próximo quanto possível da zona de corte, é necessário ou até mesmo conveniente, conforme prospecto da empresa (Brankamp), posicionar os sensores diretamente no eixo árvore das máquinas ferramentas ou no porta-ferramentas. Para tanto, é necessário um sistema de monitoramento altamente complexo de modo a obter o torque com a resolução requerida, através de toda a gama de potência envolvida. Isto se aplica às medidas da força de corte durante a operação de torneamento, através de sensores de torque integrado a um eixo-árvore de um centro de usinagem. Outro sistema de monitoramento consiste de extensômetros montados nas 3 castanhas da placa. São usados em processos de medição em tempo real das forças de corte. Qualquer mudança nas forças de corte é refletida no sinal do sensor permitindo interferências no processo que estiver sendo executado pela máquina. Um segundo tipo de sensor de torque consiste em 2 transdutores piezoelétrico de força. Esse sensor mede a torção do eixo-árvore principal, na região localizada entre os 2 anéis, fornecendo um sinal de torque proporcional, que pode ser usado também em sistemas de monitoramento de furação e fresamento. Como alternativa, sistemas de monitoramento também tem sido estabelecidos no qual se pode avaliar a torção de acoplamentos elásticos, acoplamento de disco dentados ou polias. Em muitas máquinas ferramentas, no entanto, a instalação de um sistema de monitoramento para medição de torque do eixo-árvore é difícil, por falta de espaço. Enquanto sensores integrados aos eixos-árvore ainda estão em desenvolvimento, sensores integrados em suporte de ferramentas, já estão disponíveis no mercado. Existe também um sistema de monitoramento baseado em extensômetro que permite a medição de torque, forças axial e

radial. Outra abordagem baseada nas mudanças da permeabilidade do material ferromagnético sob tensão ainda está em desenvolvimento. Isto também se aplica ao sensor de torque baseado em extensômetro integrado na chaveta de arraste de um suporte de ferramentas.

2.5.2 Medição da corrente e da potência efetiva do motor

Sensores para medidas de corrente ou potência efetiva do fuso de acionamento ou do eixo-árvore principal representam a mais simples alternativa em termos técnicos e são também muito mais simples para manutenção. Dependendo do tipo do motor, existe uma série de opções para o uso de sensores apropriados disponíveis em variadas versões. Contudo, este princípio traz algumas desvantagens. No caso da medição da corrente, ou da potência de avanço do fuso, os problemas ocorrem devido ao atrito entre as peças que compõem o barramento da máquina onde está sendo tomada a medição dos sinais. Os sinais medidos nessas condições, são substancialmente maiores do que os componentes dos sinais que são relevantes para o monitoramento do processo e podem oscilar de acordo com o nível de lubrificação e o avanço da ferramenta. Devido a este fato, as quebras de ferramentas não são detectadas diretamente, mas somente após o dano ter ocorrido. A medição da força no eixo-árvore principal frequentemente falha em produzir melhores resultados, visto que o processo de corte consome somente uma fração da força medida. Além do mais, a força no eixo-árvore principal, é proporcional à força cortante na direção do movimento principal, que contém o menor parâmetro sensível para detectar o desgaste da ferramenta. Isso torna o monitoramento muito difícil. Apesar desses problemas, alguns desses dispositivos podem ser usados para detectar colisão, quebra ou desgaste de ferramentas.

2.5.3 Vibrações nos processos de corte

As oscilações das forças cortantes geram vibrações nas estruturas das máquinas, como mostrado por (Sousa et al.,1997) em um ensaio sobre a vibração mecânica no monitoramento de fresamento. Essas vibrações variam de acordo com o desgaste da ferramenta, ou no caso de quebra, pode ocorrer um pico no sinal RMS (Root Mean Square). Essas vibrações podem ser medidas usando-se acelerômetros piezoelétricos. Algumas providências são necessárias, devido às difíceis condições no ambiente da máquina-ferramenta, em termos de proteção física, tais como: impermeabilização contra sujeiras e

fluido refrigerante e a agressividade proveniente de cavacos oriundos da operação de corte. Devido ao seu baixo custo, esse tipo de sensor, ou outros similares são freqüentemente usados para monitoramento das condições da quebra de ferramentas.

2.5.4 Emissão Acústica (EA) nos processos de usinagem

O termo emissão acústica (EA) refere-se, principalmente, a ondas de tensões elásticas geradas como resultado de uma rápida liberação da energia de deformação dentro do material. Isso ocorre devido ao rearranjo da estrutura interna do material (Braghini Junior, A, 1998). Os processos de corte produzem ondas de tensão elástica que se propagam através da estrutura da máquina. As mais significantes fontes de EA em usinagem de metais são: atrito do material sobre a superfície de folga e saída da ferramenta, deformação plástica na zona de corte, ruptura do material e quebra do cavaco, impacto do cavaco no quebra-cavacos e na peça. Visto ser EA gerada pela ruptura do material, um sinal de alta amplitude ocorre devido a quebra da ferramenta. Isto faz da EA uma ferramenta muito útil para detecção de quebra de ferramentas. Apesar de diferentes sensores estarem disponíveis para a medição desse sinal, somente poucos sensores podem ser usados em máquinas-ferramentas, devido às condições agressivas do meio. A maioria dos transdutores foram projetados para inspeção não-destrutiva ou trabalho de pesquisa, significando que eles não podem suportar altas temperaturas, grandes volumes de fluido refrigerante ou desgaste abrasivo proveniente do contato com os cavacos.

Nos últimos anos, novos sensores de EA foram especialmente elaborados e colocados no mercado com o propósito de monitoramento das condições da ferramenta, evitando a maioria das desvantagens mencionadas anteriormente. Muitos dos sensores foram projetados para serem fixados em qualquer ponto na estrutura da máquina. Um conceito mais recente de sensor foi desenvolvido, que consiste em utilizar o escoamento do fluido refrigerante como transmissor das ondas EA, da peça ou ferramenta até esses sensores. A principal vantagem desse método é que a distância entre a área de corte e o sensor é pequena, logo minimizando os efeitos de amortecimento. Um das exigências desse processo é a necessidade do fluido refrigerante não conter bolhas a fim de evitar a interrupção do processo de monitoramento quando os cavacos passam pelo fluido refrigerante. Outro sistema é a transmissão indutiva sem contato dos sinais dos sensores de EA para o receptor. O sensor, pode por exemplo, ser fixado no eixo árvore principal da máquina-ferramenta, permitindo medições próximas à região trabalhada. Este sistema tem-se mostrado especialmente eficaz para processos de monitoramento e controle em operações de retificação. Um método alternativo de transferência

de sinais a partir de eixos rotativos em furadeiras ou fresadoras é transmiti-los via fluido, mas não o fluido refrigerante citado anteriormente. O princípio das duas novas abordagens apresentadas consiste, na primeira versão, de se fixar o sensor no cabeçote onde é alojado o eixo-árvore principal. O espaço dentro do cabeçote é preenchido com um fluido transmissor e retentores são usados como vedação da abertura entre a carcaça e o eixo-árvore. Na segunda versão, que funciona de maneira similar, foi usado um fluido magnetizado ($H_2O + Fe_3O_4$) para transmitir o sinal entre o eixo-árvore principal e o sensor, que é fixado em lugar apropriado na estrutura do cabeçote através de base magnética. Retentores também não são requeridos neste caso (Inasaki et al., 1988).

O principal campo de aplicação dos sensores EA é a detecção de quebra de ferramentas. Esses sensores podem ser fixados na base da torre de ferramentas de um torno, onde pode ser utilizado durante a operação de torneamento.

2.6 TCM (Tool Condition Monitoring) PARA OTIMIZAÇÃO E CONTROLE

2.6.1 Usinagem

Estratégias alternativas para a capacidade de tomar decisões visando a otimização e controle dos processos de usinagem têm sido propostas por inúmeros pesquisadores. (Wu et al., 1995) fez um retrospecto sobre as oportunidades de otimização do processo através de controle de processos baseados em sensores. A maioria dos processos de manufatura utilizam como inibidores de problemas de otimização, alguns números de variáveis projetadas (como por exemplo em usinagem; rotação e avanços). Estes processos inibidores, são funções de variáveis projetadas, parâmetros de processos e tempo. Desde que a maioria dos processos de manufatura não são geralmente estacionários no tempo, a localização desses inibidores dentro dos parâmetros e no espaço projetado para as variáveis, irá variar. Utilizando-se sensores, modelos de processos e controle, as variáveis podem ser manipuladas para assegurar uma ótima operação a qualquer tempo. Para manipular essas variáveis, computadores e programas devem ser compatíveis, para permitir uma fácil integração em todos os níveis do sistema e com todos os elementos a cada nível.

2.6.2 Sistemas inteligentes para retificação

De maneira a estabelecer um processo de retificação não assistida, é necessário monitorar o processo para detectar mal funcionamento com alta fidelidade e sem a presença de operadores humanos. Por outro lado, muito trabalho em pesquisas e desenvolvimento tem sido dispendido para alcançar esses requisitos, mas muito pouco tem realmente sido revertido em trabalho prático. Principalmente porque, como muitas abordagens em monitoramento de usinagem, a maioria dos sistemas propostos não são confiáveis nem flexíveis o bastante para aplicações práticas. Por outro lado, uma deficiência de operadores capacitados nos últimos tempos tem acelerado a necessidade de estabelecer-se sistemas mais autônomos de monitoramento, os quais podem substituir com segurança a função do monitoramento humano.

Uma possível solução para concretizar os sistemas de monitoramento autônomos na prática, é a aplicação das técnicas de inteligência artificial através da combinação de múltiplos sensores. Várias dessas aplicações estão descritas abaixo com mais detalhes (Inasaki, 1985).

2.6.2.1 Características superficiais do rebolo

Se as características superficiais do rebolo forem inadequadas, podem ocorrer problemas típicos de mal funcionamento no processo de retificação tais como: trepidações, queima, e rugosidade superficial da peça fora de especificação. Esses resultados insatisfatórios devem ser, em parte, creditados à topografia da superfície de trabalho do rebolo, assim como, suas configurações geométricas. A superfície de um rebolo é recondicionada (dressada) antes do início da retificação de qualquer peça para assegurar que suas características propiciem a qualidade final exigida, conforme especificação em projeto. Entretanto, essas características iniciais da superfície de trabalho do rebolo mudam durante o processo de retificação e, conseqüentemente, esta deve ser recondicionada a cada espaço de tempo pré-definido. Quando o rebolo se aproxima do fim de sua vida útil é que existe com mais freqüência acontecimentos de mal funcionamento como os mencionados acima. É aconselhável que o recondicionamento do rebolo super abrasivo seja criteriosamente definido, para ser executado quando o rebolo ainda apresenta pouco desgaste, para que o volume de material abrasivo removido da superfície do rebolo seja a mínimo possível, o que proporcionará ao rebolo uma vida útil mais prolongada, evitando com isso desperdício de tempo e dinheiro, visto ser esses rebolos super abrasivos extremamente caros (Wu et al., 1995).

2.6.2.2 Detecção de trepidações através emissão acústica

Após o desgaste excessivo do rebolo as vibrações crescem no processo de retificação, que podem ser consideradas como trepidações auto-excitadas, associadas a ondas geradas na superfície do rebolo. O sensor piezoelétrico de EA aparece como sendo o mais promissor para detectar estas trepidações. Quando o sensor está integrado ao rebolo, é possível detectar a emissão acústica, o mais próximo possível do ponto de retificação, para minimizar ou atenuar os ruídos no sinal. Esse tipo de rebolo foi projetado de maneira que o sinal detectado pelo sensor de emissão acústica possa ser transmitido para fora do rebolo, sem fios. O nível da amplitude do sinal de emissão acústica envolvido varia dependendo da rotação do rebolo. Isto é causado pelo fato de que quanto mais longe o ponto de contato entre o rebolo e a peça estiver do sensor, melhor será a taxa de atenuação desses sinais. Como resultado, quando o processo de retificação é monitorado, filtros de passa alta e passa baixa são utilizados de maneira a eliminar essa influência e obter o sinal em duas maneiras diferentes: a componente estática e a componente dinâmica do sinal. A componente dinâmica é monitorada para detectar a trepidação, (Wakuda et al., 1993).

2.6.2.3 Detecção de queima superficial

O atrito excessivo das aristas de corte dos grãos abrasivos com a superfície da peça trabalhada, gera um aumento excessivo da temperatura, que conseqüentemente pode resultar numa queima da superfície. Este é um importante critério a ser considerado no tempo de vida do rebolo. Estas mudanças no desgaste da aresta de corte dos grãos abrasivos podem ser detectadas através do monitoramento da potência de retificação. Portanto é possível detectar a queima da superfície da peça dentro do processo de retificação, através do monitoramento da potência (Matsumoto et al., 1993).

2.6.2.4 Determinação indireta do grau de rugosidade

A determinação da vida dos rebolos superabrasivos é, na maioria das vezes, realizada através da observação da deterioração da superfície da peça. O processo de medição da rugosidade superficial em tempo real é ainda muito difícil. Diversas abordagens já foram empregadas e os resultados mostram a possibilidade de detecção da mudança na rugosidade

da superficial da peça através do monitoramento do sinal de emissão acústica. De forma a alcançar resultados satisfatórios o uso de redes neurais pode ser aplicado. A desvantagem do sistema atual é que o treinamento da rede neural é necessário para cada combinação das condições de retificação. Esta desvantagem, entretanto, poderá ser solucionada em futuros desenvolvimentos, (Matsumoto et al., 1993).

2.7 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DISPONÍVEIS NO MERCADO

2.7.1 Sistema de monitoramento por laser

O princípio de monitoramento de quebra de ferramenta através de feixe de laser é simples e fiel. Quando a ferramenta, após ter executado a operação de fresamento, é movida para uma posição pré-determinada, ela passa através de um feixe de laser, que detecta a ausência da ferramenta ou parte dela conforme mostrado na figura 2.6. O sistema monitora a quebra ou a falta da ferramenta através de impulsos do feixe de laser, que é processado por um microprocessador. Este é reconhecido pela máquina durante o processo. Mesmo as pequenas arestas de corte quebradas dos insertos, ou ferramentas de pequenas dimensões, 0,3 mm de tamanho, podem ser detectadas.

Esse sistema de monitoramento é produzido pela ARTIS da Alemanha e já está disponível no mercado para uso industrial.

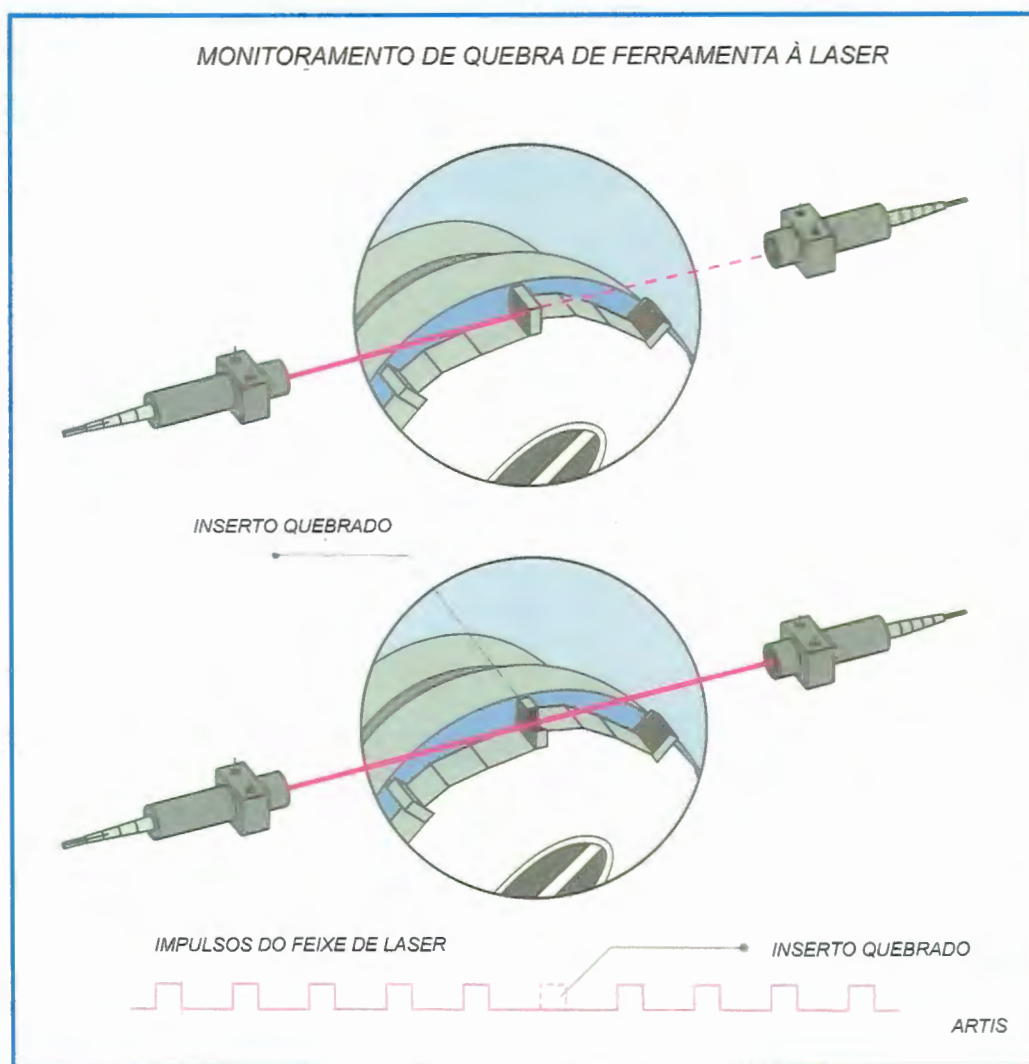


Figura 2.6 - Sistema de Monitoramento à Laser

2.7.2 Sistema para monitoramento de múltiplas ferramentas

A empresa ARTIS da Alemanha desenvolveu um sistema de monitoramento para detecção de quebra de brocas, figura 2.7, para cabeçotes de furação com múltiplas brocas, muito usual em processos de fabricação em massa. A câmara monitora a falta ou a quebra de brocas para casos individuais. Mesmo quando somente a extremidade da ferramenta estiver faltando, o sistema detecta e bloqueia o processo. Essa câmara é extremamente fácil de instalar, visa todas as direções e toma decisões automaticamente através de aparato instalado no lado oposto do foco de luz. O sistema tem auto suficiência em limpeza, permitindo trabalhar em qualquer ambiente fabril. Esse sistema possibilita o monitoramento da quantidade, posição, comprimento e diâmetro das ferramentas.

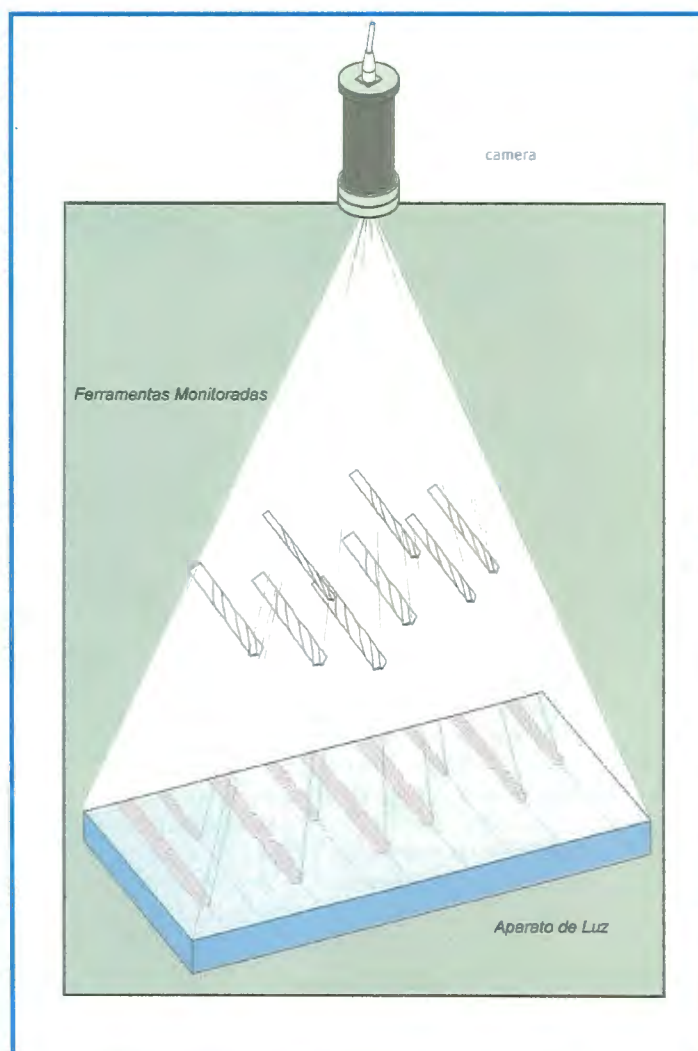


Figura 2.7 - Sistema de Monitoramento em Furação

2.7.3 Sistema de monitoramento para rosqueamento

O sensor para medição de torque modelo TTS da ARTIS, figura 2.8, consiste de um rotor integrado a um suporte de ferramenta e de um estator que fica montado na estrutura da máquina. O rotor forma um anel rígido na parte superior da ferramenta ou é fixado ao mandril porta ferramenta. Contém extensômetros e um sistema eletrônico para conversão e transmissão do sinal medido. O estator é instalado em volta do rotor e serve para suprir a energia necessária ao sistema e receber o sinal medido, que é enviado a um módulo de monitoramento para processamento.

Esse sistema se baseia no controle de ferramentas e foi desenvolvido para flexibilização e racionalização em linhas de produção seqüencial, e possibilitar também o

controle de outras características de processos, tendo módulos de monitoramento adaptáveis às diversas exigências individuais.

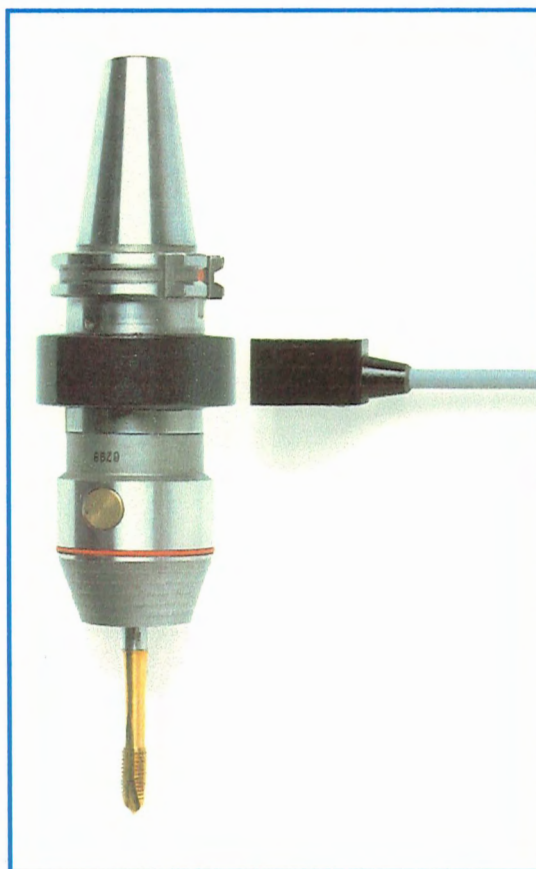


Figura 2.8 - Cabeçote rosqueador com sensor de torque

2.7.4 Sistema de monitoramento PROMESS

A empresa americana PROMESS desenvolve softwares, hardwares e sistemas eletrônicos, especialmente projetados para o monitoramento de processos de fabricação.

Um dos sistemas de monitoramento desenvolvido pela PROMESS, figura 2.9(a) tem como princípio de funcionamento, um sensor que fica alojado em um pequeno canal circunferencial localizado no diâmetro externo do rolamento do eixo árvore da máquina. Este sistema detecta desgaste e quebra de ferramentas, através do esforço sofrido pelo rolamento, prevenindo contra sobrecarga na máquina. O sistema pode ser adaptado em qualquer tipo de máquina, desde que sejam feitas as modificações necessárias no rolamento para instalação do sensor. Dois ou mais rolamentos de um mesmo eixo árvore podem ser modificados.

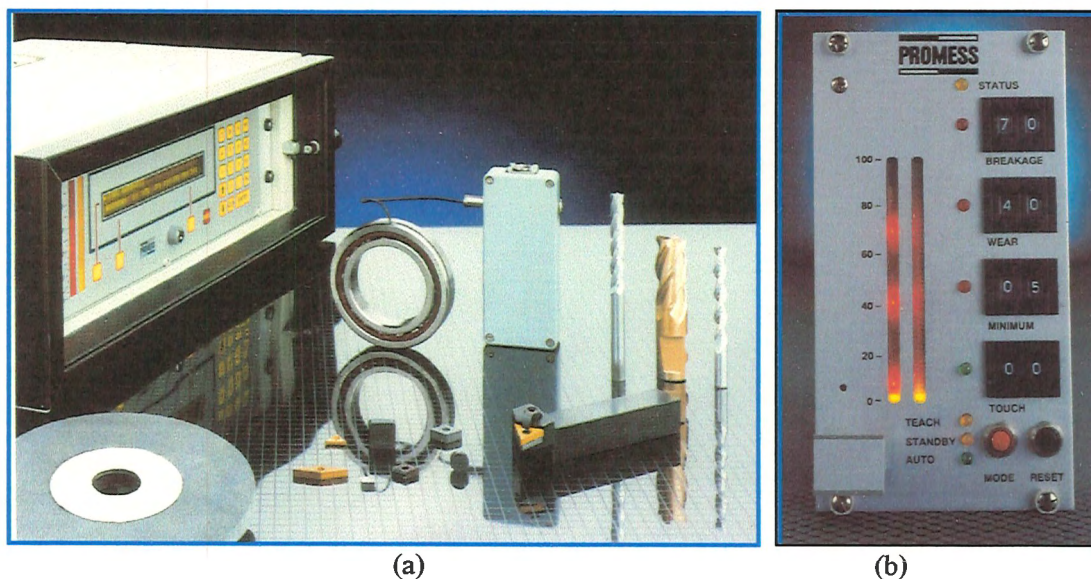


Figura 2.9 - Sistema de monitoramento Promess

O coração do sistema PROMESS de monitoramento está no microprocessador, que foi projetado para um auto aprendizado, onde os limites podem ser definidos automaticamente no instante da execução da operação, ou estabelecidos pelo usuário através de controles existentes no monitor figura 2.9 (b).

Esse sistema pode ser aplicado em torneamento, furação e fresamento, e tem como objetivo a detecção de quebra e desgaste de ferramentas em tempo real.

2.8 RECENTES DESENVOLVIMENTOS EM TCM (Tool Condition Monitoring)

2.8.1 Introdução

Os sensores mais freqüentemente utilizados em pesquisa sobre monitoramento no ambiente de manufatura, e especialmente TCM, são mostradas na tabela da figura 2.10 (Dornfeld, 1995).

Essa tabela mostra o ativo trabalho de pesquisa em termos de sensores, mas não unicamente, o princípio físico de operação do sensor. Esses dados são retrospectos compilados de literatura publicada e o nível da atividade de pesquisa indicada reflete o número de citações observadas. Em várias referências, um sistema multi-sensorial ou sensor inteligente é proposto

2.8.2 Sensores inteligentes

Em sua maioria, os sistemas multi-sensoriais referenciados acima, exibem vários traços de sensores inteligentes. Geralmente sensores inteligentes possuem uma maior funcionalidade do que sensores convencionais, porque eles podem responder a necessidades específicas das máquinas ferramentas ou processos em que estão monitorando. (Moriwaki, 1994) se refere a capacidade desses sensores em sua discussão sobre máquinas-ferramentas inteligentes quando ele difere uma máquina-ferramenta inteligente de outra convencional, baseando-se em “tomadas de decisões”. Os sensores que fazem a retroalimentação do processo de usinagem que Moriwaki classifica como parte de máquinas com controles adaptativos, guiadas por comandos pré-determinados, a máquina inteligente é capaz de utilizar a experiência e saber como acumular conhecimentos provenientes de operações anteriores, acumular conhecimento através de aprendizado e poder acomodar ambíguas entradas de informações. Claramente, um dos elementos críticos no acúmulo de informações, aquisição de conhecimentos e acomodação da informação de ruídos, pelo menos do ponto de vista de processos em máquinas, é o monitoramento dos sistemas usados nos processos, durante as operações de usinagem. Sensores inteligentes preenchem este requisito, portanto, são capazes de fazer algumas ou todas as seguintes etapas:

- auto-calibração;
- processamento de sinais;
- capacidade de tomar decisões;
- capacidade de combinação;
- capacidade de aprendizado.

O processamento de sinais neste caso significa que o sensor tem a capacidade de fazer a extração das características de um vetor até que o fluxo de informação saia do sensor não somente como um sinal, mas com a capacidade de tomar decisões por si só, não confiando no controlador ou outros dispositivos. O sensor de fusão descreve a habilidade de combinar ou adicionar o dados de saída de outros sensores para fornecer uma decisão mais robusta, numa determinada etapa do processo. Um aspecto importante do sensor é que ele deveria ser capaz de “aprender” a partir de informações anteriores usando redes neurais ou outro esquema de representação do conhecimento de maneira a aumentar continuamente sua confiança e robustez. Um "sensor inteligente", é até agora, mais ou menos a combinação de sensores



convencionais, processadores de sinais e métodos característicos de extração, bem como a implementação de estratégias que são integradas nos sensores ou sistema de sensoriamento.

O desenvolvimento em sinais e processamento de informação para TCM incluem a aplicação avançada de análise de sinais de maneira a fazer a extração das características úteis desses sinais, utilizando inteligência artificial baseados em padrões de reconhecimento de processos. Usando diferentes abordagens, pesquisadores tentam caracterizar o sinal de um sensor através de um limitado número de parâmetros (características do vetor). A determinação das características e a extração é particularmente importante, no caso de sinais de emissão acústica, onde o sensor irá gerar dados com taxa de transferência entre 10^6 e 10^7 por segundo durante o monitoramento. A análise das informações nesta taxa para aplicação em tempo real, não pode ser executada usando-se computadores convencionais disponíveis no mercado sem um nível adequado de sofisticação. A aplicação varia de diagnósticos de máquina para controle do acabamento superficial, apesar de que a classificação dos objetivos usados está restrita ao monitoramento da ferramenta, controle de processo, e otimização. Alguns autores propõem uma metodologia para o projeto de usinagem com monitoramento de ferramentas e sistemas de diagnose incluindo um sensor com melhor identificação de sinal, e com características de ligação entre as condições do processo e as ações de controle.

Alguns dos mais recentes trabalhos associados com "aprendizagem" de processos usando sensores foi feito por (Sata et al., 1973) e mais recentemente, (Rangwala et al., 1989). Enquanto o trabalho de Sata está fundamentalmente concentrado nos processos de monitoramento e confiado nas funções discriminante lineares, Rangwala estudou as habilidades de retorno do trabalho de propagação das redes neurais em operações de torneamento. A rede neural "aprendeu" observando o efeito das variações de entrada da operação (avanço, profundidade e velocidade de corte da ferramenta) nas variações de saída (força de corte, potência, temperatura, e acabamento superficial da peça). Essas variáveis de saída são monitoradas por sensores ou podem ser estimadas através de modelos de processo, se suficientemente exatos. A fase de aprendizagem é seguida por uma fase de síntese, onde a rede neural prevê uma taxa de remoção de material apropriada às restrições da operação. Em simulação, os resultados demonstraram que as redes neurais podem aprender e podem sintetizar o conhecimento efetivamente, permitindo maior "auto-direcionamento" na tomada de decisões.

O processamento do sinal e a tomada de decisões no monitoramento podem ser considerados como uma entidade integrada, que pode eventualmente ser chamada de método de monitoramento. (DU, et al., 1995) ilustra, na figura 2.11, como é composto este sistema

dentro de um processo automático de manufatura, especialmente num ambiente de usinagem. Eles são compostos de três etapas principais;

- ❑ Obtenção do sinal;
- ❑ Processamento do sinal;
- ❑ Tomada de decisão.

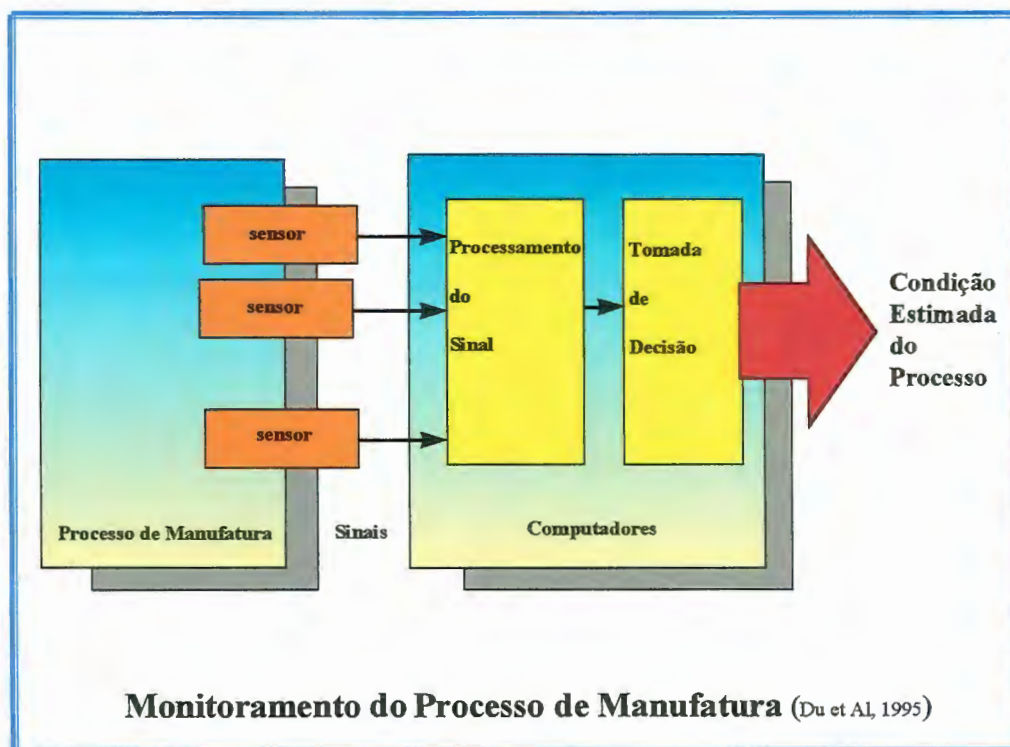


Figura 2.11 - Diagrama do monitoramento em um processo de manufatura

Os problemas com ruídos ou informações contraditórias dos sensores em máquinas operatrizes têm estimulado pesquisadores por décadas. A mais bem sucedida estratégia para tomada de decisões estará limitada se as informações de entrada não forem suficientemente consistentes. As maiores aplicações em sistema de sensoriamento são aquelas em ferramentas de ponta única (ex. torneamento) no qual a instalação do sensor e coleta de informações é o principal direcionamento.

2.8.3 Estratégias de implementação

A filosofia da implementação de qualquer metodologia de sensoriamento para diagnósticos ou monitoramento de processos, pode ser dividida em duas categorias simples; na primeira categoria, aborda-se o uso de técnicas de monitoramento onde os dados de saída (“*outputs*”) mostram alguma relação com as características do processo. Após a determinação desses dados do sensor e procedendo como num processo ou uma máquina de operação “normal”, pode-se observar o comportamento do sinal, até que ele se desvie do comportamento normal, indicando um problema. Na segunda categoria tenta-se determinar um modelo unindo-se os dados de saída do sensor com os processos mecânicos, e então, com a informação do sensor, usa-se um modelo para prognosticar o comportamento do processo. Os dois métodos são úteis em circunstâncias diferentes. O primeiro, talvez, seja o mais indicado, mas ainda está sujeito a falhas de interpretação, se ocorrer alguma mudança não prevista no processo. Portanto, faz-se necessário uma estratégia para o processamento desse sinal.

2.8.4 Determinação das linhas limítrofes (*Threshold*)

Threshold ou limiar: pode ser definido como a linha limítrofe dentro do qual um sinal pode ser considerado normal.

O sinal emitido por um sensor, deve ser processado para a detecção de distúrbios. O método mais simples é o uso de uma linha limítrofe estático, figura 2.12. Se a linha limítrofe é ultrapassada pelo sinal devido a alguma mudança no processo, como colisão ou quebra de ferramentas, então esses distúrbios podem ser detectados. Considerando-se que esse método só trabalha quando todas as outras variáveis (condições de corte, material trabalhado, etc), permanecem constante, então o uso de uma linha limítrofe dinâmica é o mais apropriado na maioria dos casos.

O sistema de monitoramento pode calcular uma linha limítrofe a partir de um sinal original. Então essa linha limítrofe atua como limite para o sinal original. Pequenas oscilações do sinal pode ocorrer sem violar a linha limítrofe. Ocorrendo um distúrbio, como a quebra de uma ferramenta, a linha limítrofe será ultrapassada pelo sinal, o processo passa por uma avaliação (o sinal deve permanecer acima do limite superior da linha limítrofe por um determinado tempo), para a confirmação da quebra da ferramenta, seguida de uma sinalização. Naturalmente que mudanças no processo não são devidas somente a quebra de ferramentas, cortes interrompidos pôr exemplo, podem afetar o sinal de forma similar a quebra de ferramenta, o que poderá acarretar uma interpretação falsa do sinal.

Outro método é baseado na comparação do sinal em processamento com um sinal previamente armazenado. O sistema de monitoramento calcula o limite superior e o inferior de um sinal característico, e delimita a amplitude do sinal em curso de obtenção. No caso de quebra de ferramenta o limite superior da linha limítrofe é violado. Quando está faltando a peça a ser usinada, por exemplo, o limite inferior da linha limítrofe é consequentemente violado. A desvantagem deste tipo de estratégia de monitoramento é que um "aprendizado em tempo real" se faz necessário. Além do mais, o fato de que sinais devem ser armazenados significa que maior capacidade de memória deve ser alocado. Esses métodos tem encontrado aplicabilidade em estratégias de monitoramento de forças e sinais de emissão acústica (Byrne et al., 1995).

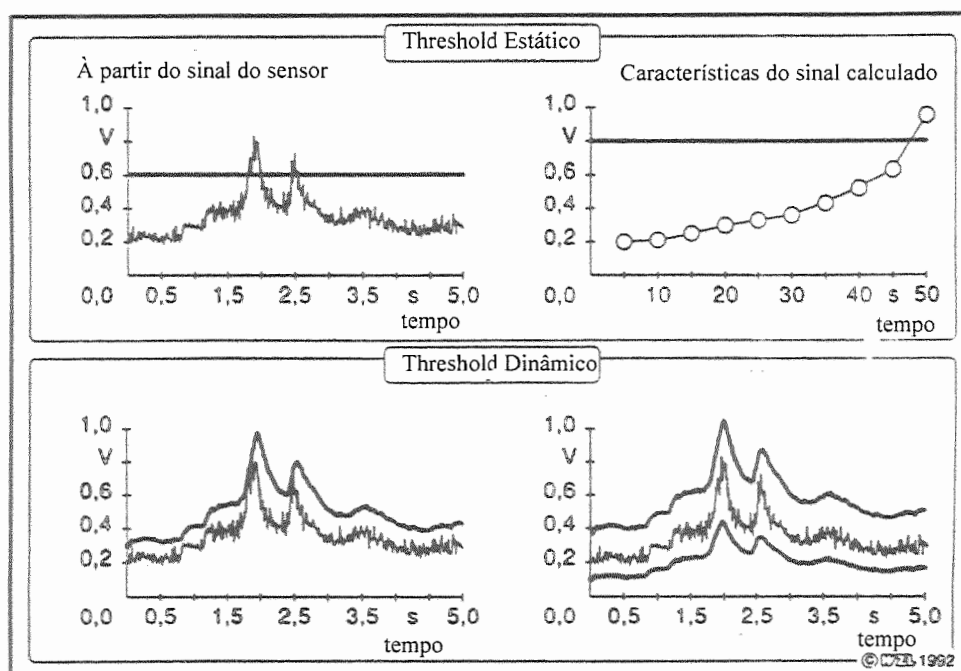


Figura 2.12 - Definição de Linhas limítrofes (*Threshold*) (Byrne, 1995)

Estas estratégias trabalham bem em eventos discretos como quebra de ferramentas, mas são frequentemente mais difíceis de empregar em processos com mudanças contínuas tal como desgaste de ferramentas. As contínuas variações das propriedades dos materiais, condições de corte, etc., podem mascarar as características do sinal ou, pelo menos, limitar o índice de aplicabilidade ou requererem extensivos treinamentos do sistema. A melhor técnica é baseada em rastrear a comportamento dos parâmetros que são extraídos dos sinais. Estes

devem ser filtrados para remover os “ruidos” dos processos, e usados como parâmetros estratégicos para a implementação de um modelo de filtro auto-regressivo de um sinal de emissão acústica para rastrear o desgaste contínuo da ferramenta

2.8.5 Abordagem sobre multisensores

A combinação de diferentes e baratos sensores hoje em dia tem aumentado, superando as deficiências dos sensores individuais. Existem dois caminhos para uma adequada abordagem dos multisensores. Tanto um sensor é usado de forma a permitir a medida de diferentes variáveis ou diferentes sensores aplicados à máquina operatriz para obter diferentes variáveis. Sensores do tipo dupla função permitem medidas simultâneas de emissão acústica e de uma das três componentes ortogonais da força. O elemento de emissão acústica fica montado no centro do sensor de força. A vantagem desse sensor é a obtenção da resposta de medição da força através de outra variável do processo, a emissão acústica, utilizando tão somente um ponto de instalação. Com esse sensor, torna-se possível fiéis detecções da quebra de ferramenta.

A chave do desafio em muitos sistemas de sensoriamento, incluindo aqueles montados num sistema de máquina inteligente, é reduzir o elevado fluxo de dados de vários sensores. Deve ter respostas bem definidas, confiáveis, e com características que podem ser usadas como aprendizado (por exemplo, comparando-se o ensaio com dados padrões e alcançando os resultados). Deve-se ainda buscar a capacidade de tomar decisões em processos de monitoramento e controle. Alguns estudos mostram os métodos de seleção e avaliação de características correlatadas em monitoramento de ferramentas no processo de furação multi-fuso, com o interesse específico em identificar o desgaste e falhas individuais das ferramentas num conjunto de dez brocas da máquina. Para a obtenção dos dados de saída, foram usados vários sensores, um para medir a corrente do motor do eixo árvore principal, outro para medir a corrente do motor de avanço das ferramentas, sensores de vibração foram montados sobre dispositivo de furação e sobre a peça, e sensores de emissão acústica foram montados na máscara de furação e na peça. Como na maioria dos processos complexos, os dados obtidos tiveram uma substancial quantidade de ruído que refletiram nas condições de operação da máquina e das ferramentas. Nesse trabalho um grande volume de estudo foi concentrado na seleção de uma característica apropriada para objetivos definidos, como avaria e desgaste da ferramenta no processo de furação multi-fuso, bem como, para uma variedade de materiais exibindo características diferentes de usinagem. Análises estatísticas e agrupamento,

algoritmos genéticos, e redes neurais foram usados como uma base de seleção e avaliação das características correlatas entre a informação do sensor e o comportamento do processo. O aspecto da extração usando as três alternativas citadas acima, incluindo a técnica de algoritmos genéticos, promoveu uma série de traços característicos, sugerindo combinações para monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de furação. Devido à grande diferença na usinabilidade entre os dois materiais usados no ensaio, ferro fundido e aço carbono, a classificação do desgaste da ferramenta baseado nas características selecionadas a partir da rede neural, mostrou melhor performance do que as derivadas de algoritmos genéticos. Porém, este resultado deu-se pelo fato de que essas características selecionadas foram obtidas usando-se uma rede neural com capacidade de tomar decisões. Logo espera-se que essas características selecionadas apresentem vantagens.

2.9 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As razões para implementação de sistemas de monitoramento das condições das ferramentas a partir das perspectivas dos usuários, e com o intuito de obter melhorias na estabilidade do processo, detecção de quebra de ferramentas, redução de tempos não produtivos, otimização do uso das ferramentas, coloca severas exigências para o futuro desenvolvimento de sistemas de (TCM).

Essas exigências podem ser sumarizadas como:

- redução do tempo de resposta;
- fidelidade operacional máxima;
- capacidade de integração dentro do sistema de manufatura;
- robustez;
- baixos custos de instalação;
- simplicidade para retro-ajustamento;
- operação amigável com mínima calibração;
- pequenos espaços requeridos;
- poucas modificações para instalação nos sistema de manufatura;
- baixo índice de manutenção.

A disponibilidade do sistema deverá ser aprovada economicamente, com o objetivo de reduzir custos, ser favorável à utilização pelos operadores, melhoria na qualidade dos componentes, prevenção de tempos inativos por ferramentas quebradas e prevenção de danos nas máquinas-ferramentas. Além dos melhoramentos listados acima, o futuro dos sistemas de monitoramento deverá ser caracterizado pela alta performance devido à integração com hardwares e softwares mais poderosos.

Com o desenvolvimento de processadores de sinal digital mais rápidos e mais eficientes, miniaturização dos componentes microeletrônicos, desenvolvimento de componentes híbridos (sensores, circuitos analógicos e digitais em um único (chip) e o baixo custo dos componentes de computadores, tais como: memórias, disco rígido, etc., capacitam o emprego de tecnologias que levam ao monitoramento inteligente. Técnicas de informação inteligente tais como: rede neural inteligente, sistemas especialista, lógica fuzzy, modelos de sistema baseados na teoria do caos e algoritmos genéticos irão auxiliar sobremaneira a determinação das relações entre os processos complexos e os sinais dos sensores. Isto irá fazer com que os sistemas sejam verdadeiramente baseados em conhecimento, auto aprendizado e adaptativos.

Sistemas de monitoramento com fidelidade comercial aceitável já estão disponíveis no mercado e tem vasta utilização no uso industrial. Estes sistemas frequentemente tem estreitas faixas de utilização, requerem substancial treinamento ou um longo tempo de preparação para funcionar corretamente. Entretanto, atividades de pesquisa e desenvolvimento prometem melhorar estes sistemas. Significante atenção é dada na direção da melhoria da fidelidade e da flexibilidade para sistemas (TCM), incluindo o uso em sistemas abertos. Os sistemas de monitoramento devem tornar-se parte integrante das máquinas-ferramentas inteligentes. Isto requer portanto, melhoramentos na obtenção de conhecimentos de captação de características dos sinais, a partir de ambíguas e ruidosas fontes, incorporação de capacidades previamente aprendidas ,etc., e servindo como interface entre máquinas e subsistemas com controladores de arquitetura aberta, no nível de hardware e software. Estas exigências vão além da performance de sistemas TCM, mas devem ser considerados no desenvolvimento de futuros sistemas. O resultado será máquinas e ferramentas especialistas, máquinas-ferramentas flexíveis com melhoria na performance, dispositivos e ferramentas flexíveis e retorno das informações para validar modelos de processos, roteiros de produção e aquisição de conhecimento (Teti, 1995).

A divisão de materiais da empresa japonesa Mitsubishi, está desenvolvendo um projeto em parceria com diversas empresas e universidades do Japão, Estados Unidos, Canadá

e Alemanha, chamado “SIMON” - Fusão de Sensores Inteligentes para Sistemas de Monitoramento em Usinagem -. Tem como proposta um sistema de monitoramento composto de vários sub-sistemas tais como: sistema de sensoriamento, sistema de controle da ferramenta, simulador de processo e um sistema para interface de comunicação com o operador da máquina. O sistema proposto consiste de vários sensores que deverão estar embutidos nas ferramentas, dispositivos, na estrutura da máquina, e interligados através de interfaces para transmitir informações até um sistema de processamento de dados, que identifica o processo de corte em tempo real, através da fusão das informações obtidas pelos sensores. O sistema de controle, o qual tem uma arquitetura aberta, modifica as condições de corte de acordo com o processamento dos dados obtidos. O simulador do processo estima as forças de corte baseadas em modelos de processos obtidas através das informações captadas pelos sensores.

As vantagens esperadas pela aplicação dessa proposta são:

- ❑ usinagem de alta precisão;
- ❑ alta produtividade;
- ❑ poucas imperfeições no processo.

3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE USINAGEM

3.1 FRESAMENTO

3.1.1 Introdução

O fresamento é um processo de usinagem, onde o metal é removido por uma ferramenta rotativa de múltiplas arestas de corte, cada uma delas removendo uma pequena parcela do metal a cada revolução do eixo-árvore. Como a peça e a ferramenta podem ser movidas em mais de uma direção ao mesmo tempo, superfícies com múltiplas direções podem ser progressivamente geradas.

As principais diferenças entre os processos de fresamento e outros processos de usinagem são:

- corte intermitente, que ocorre quando uma aresta de corte alternativamente atua e se libera da peça sendo usinada;
- cavacos relativamente curtos e com características específicas, frente a outros processos;
- variação da espessura do cavaco durante o processo individual de corte de cada aresta, em função do avanço da ferramenta e a direção do movimento da mesa.

3.1.2 Tipos fundamentais de fresamento

Em princípio, no fresamento a ferramenta rotaciona enquanto a peça avança. Existe dois diferentes meios nos quais isso pode ser alcançado: *o corte concordante e o corte discordante*, dependendo do sentido de rotação da ferramenta em relação a peça. Essa diferença é fundamental no fresamento, pois afeta consideravelmente o processo. A peça é

alimentada a favor ou contra a direção de rotação da ferramenta, figura 3.0, e isso determina a natureza de iniciar e terminar o processo de corte.

Durante o corte concordante, o avanço da peça é no mesmo sentido da rotação da ferramenta. A espessura do cavaco diminui a partir do início do corte até alcançar zero de espessura no final.

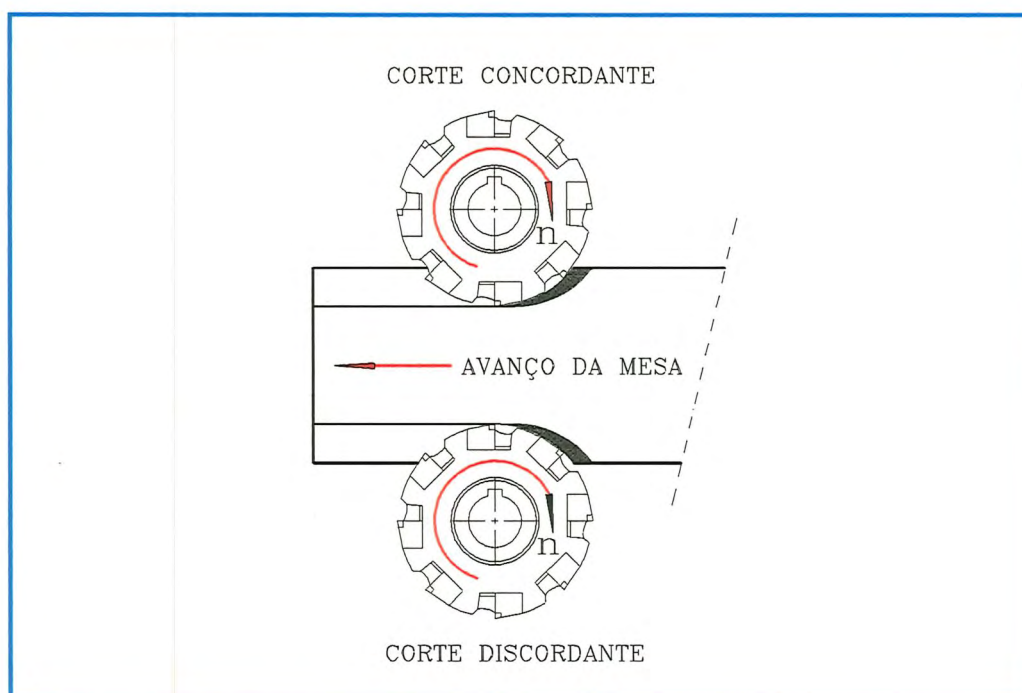


Figura 3.0 - Sentido de corte no fresamento

No corte discordante, a direção de avanço da peça é o oposto ao sentido de rotação da ferramenta. A espessura do cavaco aumenta progressivamente até alcançar o valor máximo no final do corte. Com o inserto começando o corte com zero de espessura do cavaco, somente quando a pressão da aresta de corte atinge um valor capaz de vencer a elasticidade do material, é que se inicia realmente a formação do cavaco, gerando altas forças que tendem a empurrar a ferramenta e a peça para lados opostos. Para iniciar o corte o inserto deve ser forçado para dentro da área de corte, criando um atrito excessivo entre o inserto e a peça, gerando altas temperaturas e como consequência, endurecimento superficial da peça e excessivo desgaste da ferramenta. As forças de corte tendem a levantar a peça da mesa da máquina, o que pode provocar vibrações indesejáveis, necessitando para isso, uma fixação mais rígida.

No corte concordante, o inserto começa o corte com o máximo de espessura do cavaco, gerando menos temperatura e com tendência para um mínimo de endurecimento superficial da peça. Com uma máxima espessura do cavaco do início do corte as forças tendem a empurrar a peça contra a ferramenta, permitindo ao inserto uma melhor aderência à zona de corte.

Durante o fresamento, os cavacos têm a tendência de aderir, ou mesmo se soldar à aresta de corte do inserto, sendo carregado pela fresa até iniciar um novo corte. No corte discordante, o cavaco pode ser facilmente alçado para a região de corte entre o inserto e a peça, causando um esmagamento, podendo resultar em quebra do inserto. No corte concordante, o mesmo cavaco fixado ao inserto pode ser cortado ao meio no choque com a peça, causando menores danos.

Como pode ser concluído pelas informações anteriores, o corte concordante é o mais indicado, não importando o tipo de máquina, mas depende da geometria e do tipo de fixação da peça que está sendo usinada.

3.1.3 Formação de cavacos

O processo de usinagem e formação de cavacos têm sido investigado por diversos pesquisadores notáveis desde o início do século. Os primeiros trabalhos foram feitos por F. W. Taylor em 1907, onde fez uma abordagem empírica para usinagem de metais, considerada ainda hoje como uma significativa pesquisa nessa área. Desde então, um grande número de pesquisadores tem desenvolvido modelos e apresentando teorias sobre a formação de cavacos. Quase todas as principais teorias de corte de metal conhecidas hoje no mundo são baseadas no processo de corte ortogonal, e predição de cavaco contínuo. Embora seja inteiramente reconhecido que essas teorias tiveram no passado um forte fundamento, entende-se que recentes avanços na automação de usinagem requerem modelamentos, predição e monitoramento do processo de quebra de cavaco. Neste ambiente, a tradicional teoria da formação do cavaco necessita incorporar:

- a) A dinâmica do processo de formação do cavaco;
- b) O desenvolvolvimento de modelos tridimensionais de formação de cavacos;
- c) A compreensão da quebra do cavaco.

Para atingir esses objetivos é necessário conhecer o mecanismo de escoamento do cavaco, o mecanismo de curvatura do cavaco e finalmente os vários modos de quebra do mesmo.

3.1.4 Importância do controle do cavaco

O desenvolvimento e o uso de máquinas CNC e o arranjo em células de fabricação tem aumentado consideravelmente a produtividade. Um aspecto que afeta significativamente a eficiência de um ambiente produtivo, é o controle de cavacos. Cavacos podem provocar os seguintes efeitos:

- ❑ Ferimentos ao operador;
- ❑ Péssima qualidade superficial da peça;
- ❑ Danos à ferramenta, peça ou máquina.

Todos esses efeitos podem levar a um custo adicional devido a:

- ❑ Peças rejeitadas;
- ❑ Perda de tempo na usinagem;
- ❑ Atraso no prazo de entrega.

Em geral, um eficiente controle do cavaco na usinagem contribui para:

- ❑ A confiabilidade do processo de usinagem;
- ❑ A boa qualidade de superfícies usinadas;
- ❑ O aumento da produtividade;
- ❑ A segurança da operação incluindo: operadores, máquinas e ferramentas.

Em tempos recentes grande ênfase tendo sido dada ao controle do cavaco, devido à tendência de automatização dos processos de usinagem. A necessidade de pesquisas para a melhoria dos métodos de controle de cavacos emerge de problemas específicos, tais como:

- ❑ A remoção do cavaco é mais difícil em operações que envolvem:

- ❖ Altas taxas de remoção de material;
 - ❖ Ampla variedade de material;
 - ❖ Materiais com elevada resistência mecânica.
- A alta confiabilidade do controle do cavaco é requerida em:
- ❖ Seleção automática de ferramentas e condições de corte através de métodos capp (Computer Aided Process Planning);
 - ❖ Máquinas menos assistidas por operadores.

Espera-se resolver o problema do controle do cavaco somente através de uma melhor repetibilidade e uma melhor previsibilidade das formas de cavaco. Isso significa que existiria menos influência das condições de corte, da variação das propriedades do material dentro dos limites comerciais do material das ferramentas, dos tipos de desgastes das ferramentas e das formas pelas quais o cavaco é formado. Esse é o desafio para pesquisadores em controle do cavaco. Isso significa, de fato, que o tipo e a forma do cavaco, pode em grande parte, depender da geometria do quebra cavaco. O projeto de uma ferramenta de corte não só deve ser objeto de influência no processo de formação de cavaco, como também ser provido de maior interesse na forma do cavaco obtido.

3.1.5 Sumário da pesquisa sobre controle do cavaco

O retrospecto da história da pesquisa no controle do cavaco pode ser sumarizado em 6 fases segundo (Jawair et al., 1993):

Fase I (1900 ~ 1949)

Estágio inicial do projeto e desenvolvimento de ferramentas

Nesse estágio a maior atenção foi dada para a redução do desgaste da ferramenta e forças de corte. Para o escoamento do cavaco não foi dada muita atenção, com poucas exceções.

Fase II (1950 ~ 1959)

Início da análise do escoamento do cavaco, bem como o desenvolvimento de um prático quebra-cavacos, através da utilização de um quebra-cavacos postiço (por obstrução). O quebra-cavacos tornou-se um ponto de atenção na pesquisa de corte de metal. O curvamento do cavaco foi estudado, juntamente com o comprimento de contato do cavaco com a ferramenta e a ação de formadores postiços de cavacos.

Fase III (1960 ~ 1969)

Mecanismos de corte do metal: usinagem com contatos restritos da ferramenta

Esse período mostrou um aumento no interesse em pesquisa básica na formação do cavaco em todo o mundo. Novos conhecimentos da formação de cavaco em usinagem com ferramenta de contato restrito foram publicados em diversos trabalhos.

Fase IV (1970 ~ 1979)

Análise do escoamento, enrolamento e quebra do cavaco

Esse foi o período mais ativo em pesquisa sobre formação de cavaco. Esse foi, aproximadamente, a safra de sementes plantadas durante a década anterior. Em vista do aumento da velocidade de corte e o aumento da automação da produção, o mecanismo básico da formação do cavaco foi exaustivamente estudado e estabelecidos através de trabalhos experimentais e analíticos. Recentemente todos os aspectos relatados sobre geração de cavacos foram estudados: desgastes, forças de corte e integridade das superfícies.

Fase V (1980 ~ 1989)

Projetos inovativos e previsões de novos quebra cavacos

A pesquisa básica em formação e controle de cavacos tomou-se menos intensa. A principal realização desse período pareceu ser mais um refinamento das teorias e situações já existentes do que novas situações. De outra maneira os fabricantes de insertos foram mais ativos no desenvolvimento de novas configurações de quebra-cavacos, e modificações de todo

tipo de face dos insertos intercambiáveis para obter-se melhor controle do cavaco, onde possível, aliado ao aumento da vida útil do inserto e de baixas forças de corte.

Fase VI (1990 ~ 1999)

Necessidade de continuar pesquisando para alcançar o controle “total” do cavaco

Muitos conhecimentos laboriosamente obtidos durante as últimas décadas parecem ter sido perdidos pela mudança de interesse da presente geração de estudantes e pesquisadores. A razão para isso é que os conhecimentos atuais são fragmentados e dispersos. Fatores individuais que influenciam a formação do cavaco levando-o à quebra ainda não foram inteiramente pesquisados. O mais insignificante é a aparente falta de integração entre o conhecimento individual desses fatores a um modelo genérico. Torna-se necessário tentar registrar os conhecimentos atuais sobre formação de cavaco com o intuito de servir de base para futuros desenvolvimentos.

Eficiente quebra de cavaco, e efetiva remoção, são dois elementos funcionais do controle total do cavaco, pois a efetiva quebra do cavaco facilita sua remoção. Assim muitos trabalhos recentes têm sido concentrados em encontrar-se a maneira mais adequada de quebrar o cavaco de forma mais eficiente. A figura 3.1 mostra os vários fatores que afetam o processo de quebra do cavaco, indicando também a natureza complexa da pesquisa em quebra de cavacos.

Como em todo andamento de pesquisa científica, muitos graus de complexidade são acrescidos a cada etapa e podem ser percebidos nas pesquisas de formas de cavacos. Eficiente quebra de cavaco, e efetiva remoção, são dois elementos funcionais do controle “total” do cavaco.

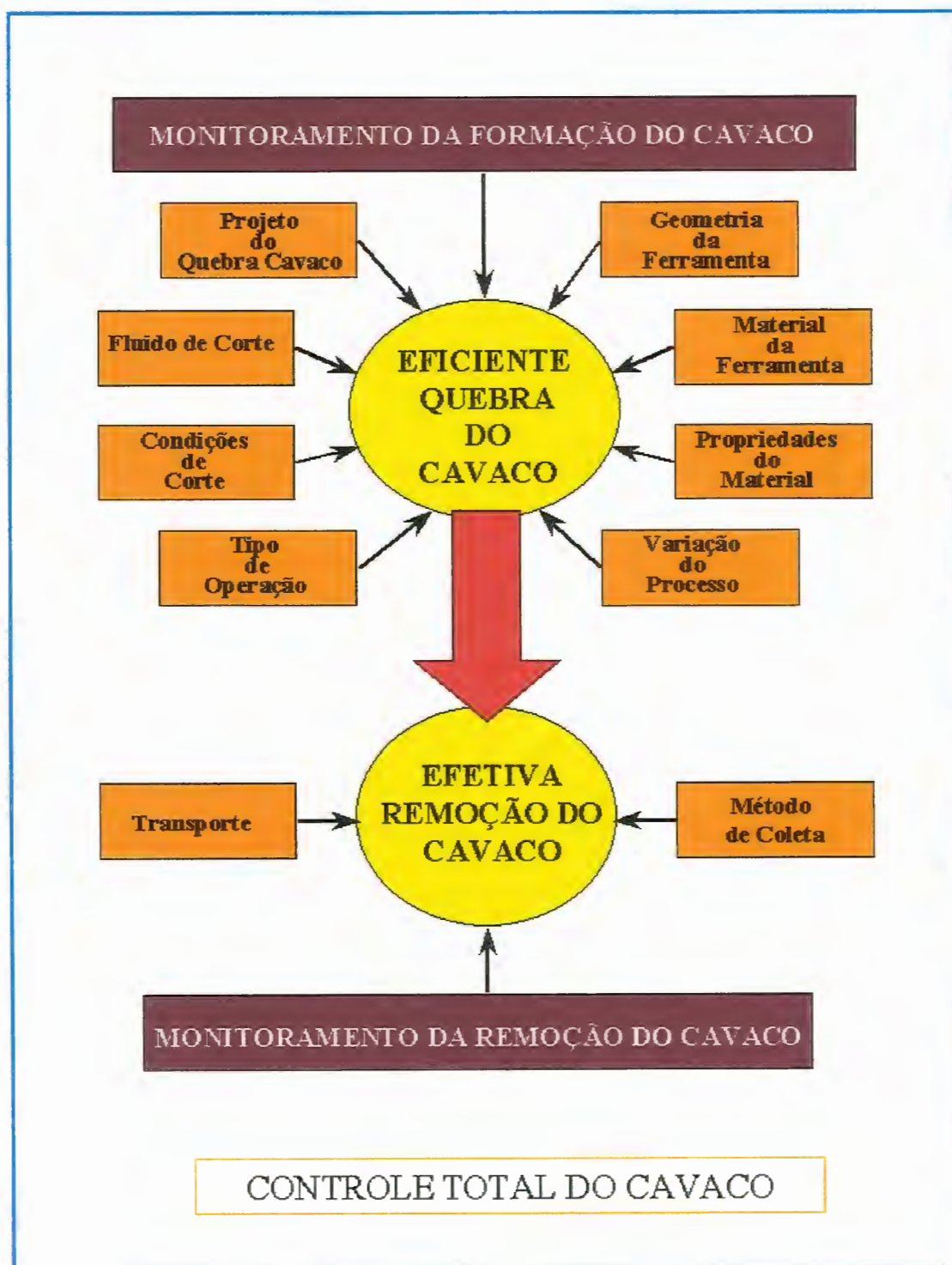


Figura 3.1 - Sistema de controle total do cavaco (Luttervelt, 1993)

Reconhecimento do formato básico do cavaco:

Fluxo de escoamento para o lado	<i>Side - Flow</i>
Escoamento para trás	<i>Back - Flow</i>

Enrolado	<i>Up - Curl</i>
Espiralado	<i>Side – Curl</i>

Pesquisas são ainda necessárias para esclarecimento dos seguintes pontos:

- Determinação dos fatores de influência nesses formatos básicos;
- Modelamento do processo de quebra do cavaco para um formato desejado;
- Síntese - modelamento do cavaco na forma de 3D.

Nos dois últimos tópicos, as seguintes técnicas podem ser usadas:

- experimentação;
- análises;
- modelos matemáticos; e
- conhecimentos de engenharia.

3.1.6 Relação geométrica entre ferramenta e peça no processo de fresamento

O ângulo axial(γ_p), o ângulo radial(γ_r), e o ângulo de inclinação(γ), no fresamento, correspondem ao ângulo de saída, ângulo de posição, ângulo de folga e ângulo de ataque, no torneamento. Existem também outros ângulos que podem ser definidos pela relação entre a aresta de corte e a peça.

O ângulo mais importante nas operações de usinagem é o ângulo real de saída do cavaco(γ_o). O ângulo real influi diretamente no ângulo de cisalhamento durante o processo de formação de cavaco, portanto afeta extremamente as forças de corte, a potência requerida e a temperatura. Quanto maior for o valor positivo do ângulo real, mais baixa será a potência requerida no processo de corte. A grandeza do valor é limitado porém, pela resistência requerida pela ferramenta para uma determinada operação de usinagem.

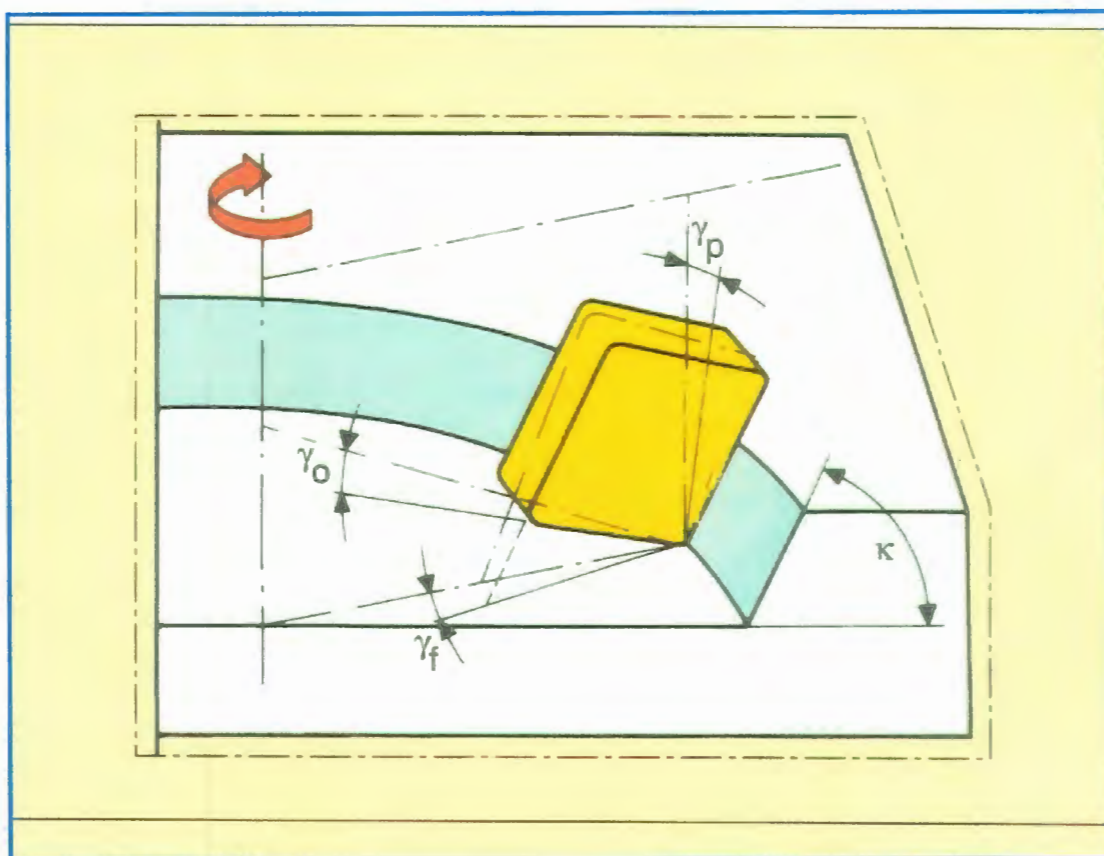


Figura 3.2 - Disposição geométrica do inserto

A figura 3.2 mostra o arranjo geométrico entre os vários ângulos da ferramenta. Cada ângulo é medido considerando um plano de referência, no fresamento esse plano passa pelo eixo de rotação do corpo da fresa e o ponto projetado entre as arestas de corte da ferramenta. O ângulo real, por definição, é medido no plano perpendicular, para a projeção da aresta de corte no plano de referência.

Outro ângulo, também importante em fresamento, é o ângulo de inclinação(κ). Esse ângulo é o que a aresta de corte faz com o plano de referência, que por definição é perpendicular à direção de movimento da ferramenta. O ângulo de inclinação(κ) define a direção de enrolamento (*curling*)* do cavaco. Quando o ângulo de inclinação é zero, o escoamento do cavaco se dá virtualmente no plano do ângulo real.

Muitas combinações podem ser obtidas alterando-se as relações entre os ângulos radial(γ_f), axial(γ_p) e de inclinação(κ), o que tem sido usado na prática com extremo sucesso.

**curling* - processo de enrolamento do cavaco durante sua formação.

3.1.7 Geometria de corte

As ferramentas de corte com insertos intercambiáveis permitem aos insertos serem usados de ambos os lados (insertos neutros), face superior e face interior, sendo portanto, muito mais econômico para os custos de usinagem. Esses insertos são também mais fortes em função das arestas de corte terem 90° entre todas as faces. Em função dessa geometria os insertos são posicionadas no corpo da ferramenta de forma que o ângulo de saída seja negativo.

Existem 3 formas geométricas básicas para escolha da geometria de corte de uma fresa:

- Duplo - positiva
- Duplo - negativa
- Positivo - Negativa

3.1.7.1 Geometria de corte duplo-positiva

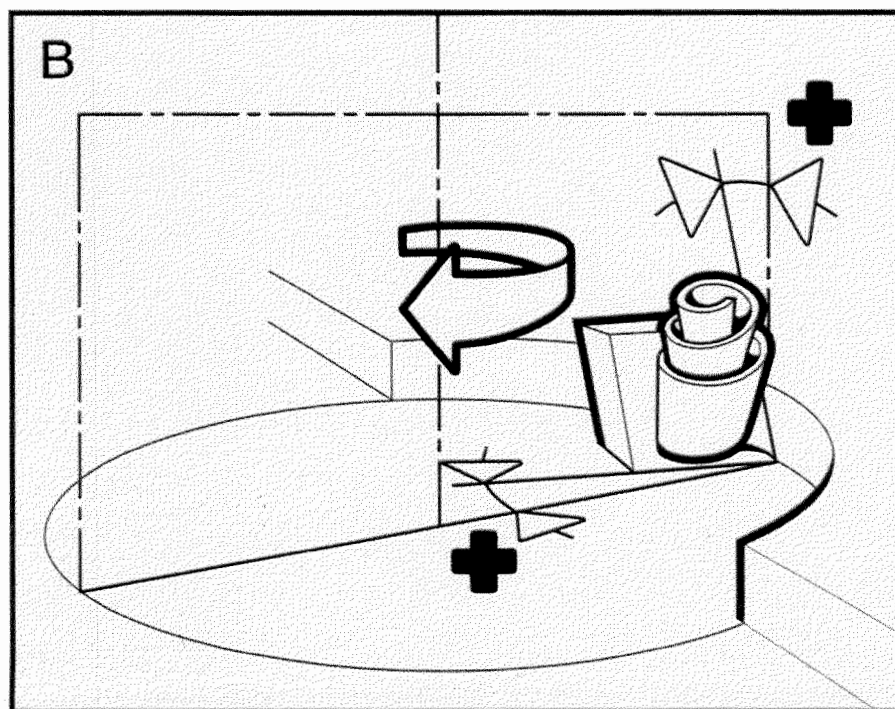


Figura 3.3 - Relação geométrica de uma ferramenta duplo-positiva

Uma fresa é chamada duplo-positiva quando os ângulos radial e axial são positivos, conforme figura 3.3. Para esse tipo de fresa é necessário usar insertos intercambiáveis positivos, com o ângulo de folga no próprio inserto, o que restringe o uso a apenas uma face do inserto. Essa configuração de fresa produz cavacos menos deformados, de formato helicoidal que são eliminados com mais facilidade do “bolsão de armazenamento de cavacos”.

As fresas com a configuração duplo-positivas são destinadas à usinagem de materiais de corte difícil, sujeito ao encruamento, tal como aço inoxidável ou aço ao manganês.

3.1.7.2 Geometria de corte positivo-negativa

Quando uma fresa apresenta o ângulo axial positivo e ângulo radial negativo, conforme figura 3.4, ela é chamada de fresa positivo-negativa. Os insertos intercambiáveis são positivos ou neutros.

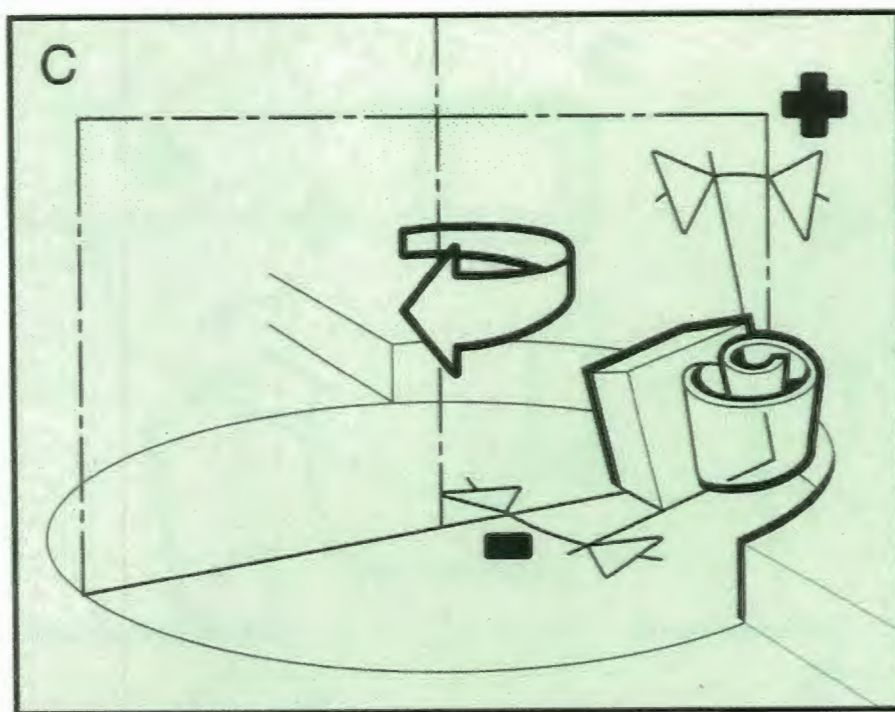


Figura 3.4 - Relação geométrica de uma ferramenta positivo-negativa

Essa combinação de ângulos resulta em cavacos helicoidais, onde pode obter-se vantagens em usinagem de desbaste pesado.

3.1.7.3 Geometria de corte duplo-negativa

Uma fresa é chamada de duplo negativa, quando os ângulos radial e axial são negativos, conforme visto na figura 3.5.

Insertos intercambiáveis neutros podem ser usados nessas fresas, onde o ângulo de folga é obtido pelo ângulo de inclinação do inserto. Isso significa uma boa economia, pois as duas faces do inserto podem ser utilizadas. As arestas de corte são mais reforçadas nessa configuração pois o inserto tem 90° entre as arestas.

Nessa configuração o cavaco sofre uma grande deformação, como resultado de elevadas forças de corte. O cavaco é espesso devido ao tempo prolongado que fica em contato com a superfície de saída do inserto.

No uso dessa configuração de fresa, o cavaco tem dificuldades de deixar o “bolsão”, pelas suas características.

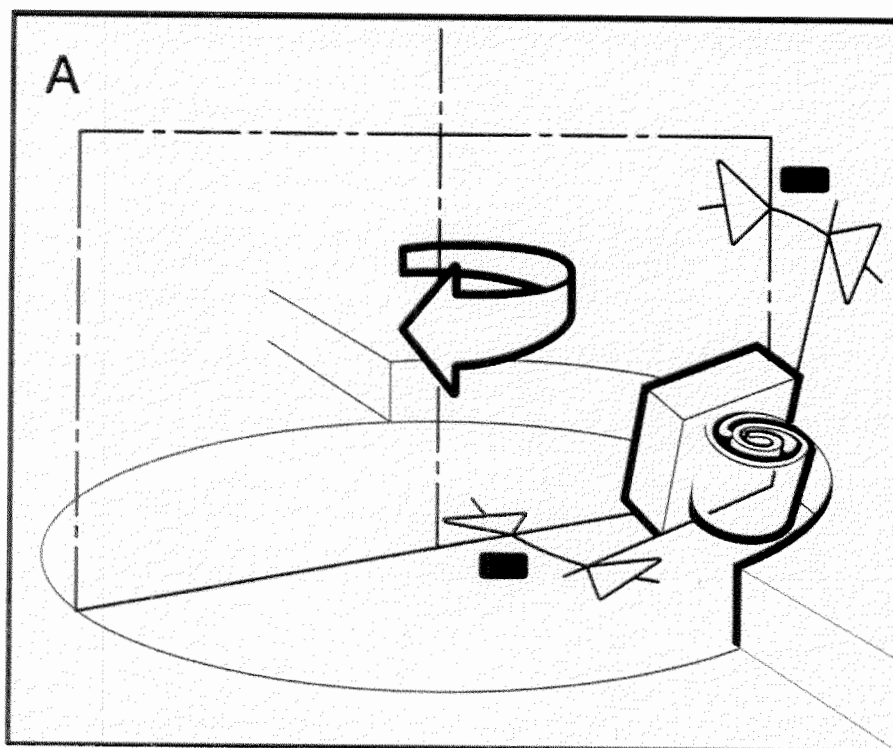


Figura 3.5 - Relação geométrica de uma ferramenta duplo-negativa

4 PROCESSO DE ESCOLHA DO SENSOR EMPREGADO NESTE TRABALHO

A escolha de um transdutor de deslocamento como instrumento para detecção de desgaste e quebra de ferramentas, foi devido ao fato desse sistema, ser de fácil acesso em uma indústria de bens de capital, produtora de equipamentos para geração de energia elétrica, onde sensores ou *probes de proximidade*, são usados como sistema de monitoramento, figura 4.0. Outro fator que influenciou a decisão da escolha desta proposta, foi o fato de que a literatura pesquisada apresenta poucos trabalhos, tendo como base um transdutor de deslocamento, com a finalidade de detecção de desgaste e quebra de ferramentas em processos de fresamento.

4.1 TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO

4.1.1 Princípio de funcionamento

Um de transdutor de deslocamento, é composto de sensor de proximidade, oscilador/demulador e cabo de extensão, conhecido na prática como probe de proximidade, tem como finalidade, medir sem contato, o deslocamento relativo (estático e dinâmico), entre um eixo e um mancal (*orbitação*). A figura 4.1 mostra um diagrama básico da montagem de um transdutor de deslocamento, em monitoramento de rotores em uma planta geradora de energia elétrica.

A oscilação em alta frequência é usada para inserir sem contato, correntes de eddy na superfície dos rotores. Como os rotores se movem - aproximam e se afastam - em relação ao sensor, a energia da corrente parasita (*corrente de eddy*) varia, modulando o oscilador de voltagem, que por sua vez, propicia uma voltagem de saída proporcional ao deslocamento. Na prática é um instrumento utilizado no monitoramento de mancais de filme de óleo, usados em máquinas de grande porte, geralmente turbinas e geradores.

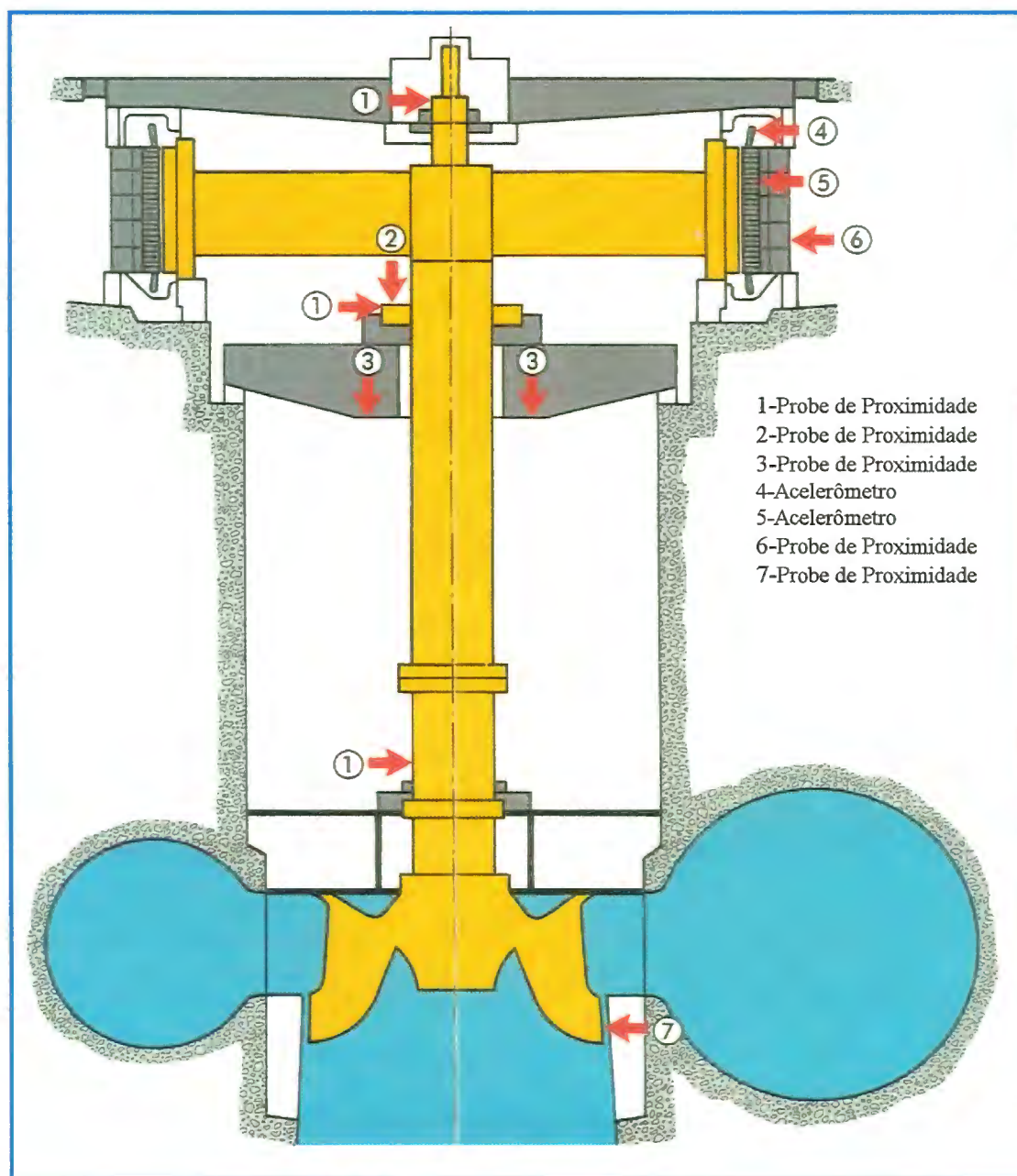


Figura 4.0 - Disposição dos sensores de proximidade em um conjunto Turbina-Gerador

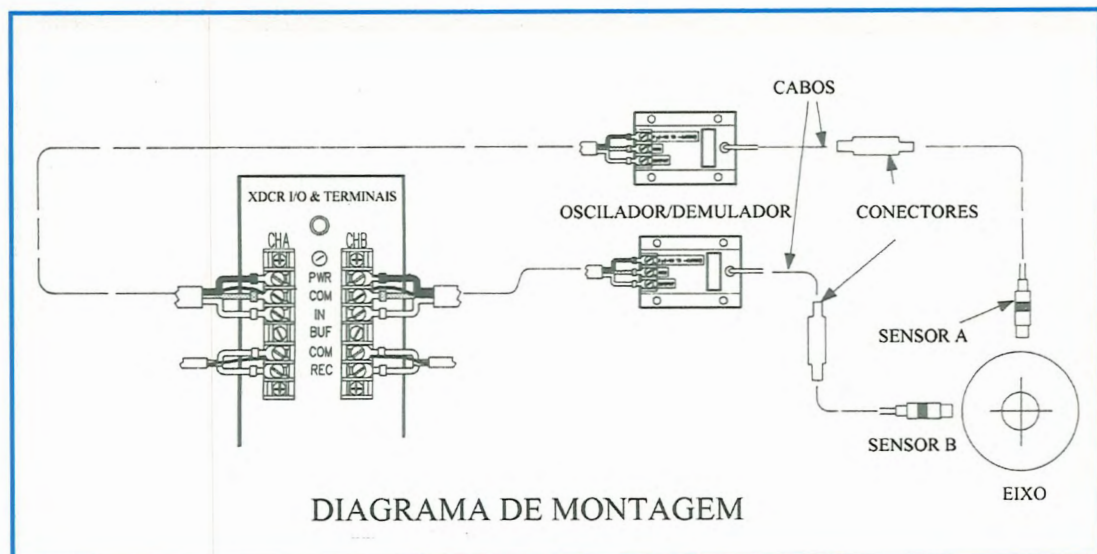


Figura 4.1 - Diagrama de montagem de um transdutor de deslocamento

Os transdutores de deslocamento são destinados especificamente ao monitoramento de rotores. E suas aplicações mais comuns são:

- Detecção de vibração;
- Orbitação (flutuação de eixos dentro de mancais);
- Posição axial;
- Expansão térmica;
- Expansão centrífuga;
- Velocidade de rotação e fase.

4.1.2 Justificativa da escolha

A razão para escolha de um transdutor de deslocamento, *sensor de proximidade*, como um sistema para monitoramento de quebra de ferramentas num processo de fresamento convencional de ranhuras de grande profundidade, se deu pelo fato do deslocamento do eixo árvore de uma máquina-ferramenta, guardar certa similaridade com o deslocamento de um eixo de turbina hidráulica dentro de um mancal-guia. A orbitação desses eixos, exige um sistema de monitoramento convencional, para os quais os sensores de proximidade foram destinados. A expectativa é de que os resultados a serem obtidos na detecção do sinal de deslocamento durante os ensaios de fresamento, atendam aos requerimentos necessários, muito embora a ordem de grandeza para a medição de um sinal de deslocamento de um eixo de

turbina, em condições normais de funcionamento, situe-se por volta de décimos de milímetro. A expectativa para a ordem de grandeza do deslocamento de um eixo árvore de uma máquina-ferramenta é da ordem de centésimos de milímetro, portanto, 10 vezes menos.

Os ensaios previstos irão mostrar a verdadeira grandeza do deslocamento capaz de ser detectado pelo sensor. Essa grandeza será chamada de **sensibilidade do sensor de proximidade**.

4.1.3 Sensor de proximidade

4.1.3.1 Descrição

Os sensores de proximidade, figura 4.2, trabalham sob o princípio de corrente parasita (*corrente de eddy*). O sensor percebe a distância entre a extremidade do sensor (“tip”) e a superfície que está sendo observada.. Possui em uma das extremidades um elemento indutor que, ao ser excitado por uma corrente de alta frequência, emitida por um oscilador/demulador, induz um campo magnético na superfície do material alvo. A corrente parasita variando, muda a impedância do sensor e, por consequência altera a voltagem que passa por ele. Como a grandeza da corrente parasita é dependente da distância entre o sensor e o material observado, a voltagem que passa pelo sensor é proporcional a essa distância (“gap”). A resposta entre voltagem/distância tem relação linear, fornecendo resposta à partir de $25\mu\text{m}$ ($0,001\ \mu\text{inch}$). A mais importante vantagem de um sensor trabalhando pelo princípio da corrente parasita é a imunidade contra óleo e sujeira, sendo portanto apropriado para uso no monitoramento em ambiente de máquinas-ferramentas.



Figura 4.2 - Sensor de proximidade

4.1.3.2 Características principais

- ❑ Sensor indutivo constituído por uma bobina encapsulada em resina de alta resistência à temperatura, com carcaça de aço inoxidável.
- ❑ Grande durabilidade, por não possuir partes móveis sujeitas ao desgaste.
- ❑ Operando sem contato, permite medir vibrações ou deslocamento de peças pequenas.
- ❑ Capaz de medir superfícies em movimento e estruturas leves, sem alterar seu comportamento dinâmico
- ❑ Circuito condicionador encapsulado em epoxi e perfil de alumínio extrudado, para máxima proteção contra umidade, agentes corrosivos e temperatura.
- ❑ Características construtivas e de desempenho inteiramente compatível com a Norma API 670, que regulamenta o uso de instrumentos de monitoramento.

4.1.3.3 Especificações

As especificações foram determinadas com -24 Vdc de potência, carga 10 k Ω e usando um aço AISI 4140 como superfície alvo, em ambiente com temperatura de 22°C.

Fabricante: Bentry Nevada Corporation - USA

Modelo: 3300

Código: 330103-02-10-10-02-00

Série n°. JANW 405204

JANW 405205

Faixa linear de medição	0,25 à 2,25 mm (2,0 mm)
Fator de escala incremental	7,87 V/mm
Sensibilidade média	8 V/mm \pm 3,0%
Linearidade	Máximo desvio em relação à média: \pm 0,025 mm
Curva de resposta	Plana até 10 Khz
Resposta de Frequência	0 à 10 kHz
Temperatura de operação	-22 à 177°C
Alimentação	-24 à -26 Vdc
Consumo máximo	12 mA
Conectores	Coaxial miniatura tipo API
Cabo	Coaxial, segundo Norma MIL-C-17
Características mecânicas	Diâmetro 10x85 mm M10

4.1.4 Condicionador/demulador

4.1.4.1 Descrição

O condicionador/demulador, figura 4.3, é projetado para operar integrado a um sensor de proximidade e a um cabo de extensão, formando o conjunto *transdutor de deslocamento*. O princípio básico de funcionamento é converter o sinal emitido pelo sensor em um nível seguro de voltagem. Operando integrado deve assegurar uma sensibilidade de 0,025mm para 7,87 V/mm, considerando a distância a ser medida. A resposta de saída deve ser linear, sendo permitindo \pm 4% de desvio em relação a uma reta.

4.1.5 Cabo de extensão

4.1.5.1 Descrição

O cabo de extensão, figura 4.4, faz a ligação entre o sensor de proximidade e o condicionador/demulador, formando o conjunto chamado *transdutor de deslocamento*. Como condição básica para um perfeito funcionamento do conjunto, o cabo de extensão deve atender às exigências de comprimento, para que o sinal de resposta emitido pelo transdutor, atenda ao requisito *linearidade*.

4.1.5.2 Especificações

Fabricante: Bentry Nevada Corporation - USA

Modelo: 3300

Código: 330130-080-00-00

Série n°. JANW 200180

JANW 200181

Comprimento

8 metros

Proteção

Cobertura de Teflon



Figura 4.4 – Cabos de Extensão

5 TRABALHO EXPERIMENTAL

NORMA API 670

A norma API 670 regulamenta o uso de instrumentação nas indústrias petroquímicas, petrolíferas, químicas, em estações de geração de energia, ou em indústrias onde se requer monitoramento contínuo, como por exemplo, de vibração, de posição axial de eixos e de temperatura em mancais.

Essa norma é baseada no conhecimento e também na experiência dos fabricantes e dos usuários de sistemas de monitoramento. É destinada a fornecer especificações que servirão como referências para facilitar a fabricação, aquisição, instalação, testes de vibração, posição axial e sistemas de monitoramento de temperaturas em mancais.

O propósito da norma é estabelecer requerimentos eletro-mecânico para os sistemas de monitoramento, propiciando ajuda na aquisição de produtos e materiais padronizados.

Especificações segundo norma API 670

- Temperatura de calibração de um sistema de monitoramento:
 $0^{\circ} \text{C} \sim 45^{\circ} \text{C}$
- Desvio para medição de vibração e posição axial de eixos:
 $\pm 5\%$ de $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$
- Linearidade, desvio máximo em relação à média:
 $\pm 25 \mu\text{m}$
- Inclinação da reta:
 $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$
- Faixa de linearidade operacional
 $2 \text{ mm} (0,50 \sim 2,50 \text{ mm})$

Observação: O material alvo dos ensaios deverá possuir as mesmas características elétricas do material onde será instalado o sistema de monitoramento.

5.1 ENSAIOS PRELIMINARES

5.1.1 Ensaio em laboratório da CESP - BAURU

Os ensaios feitos no laboratório da CESP, tiveram como objetivo básico o aprendizado, onde foram feitos os primeiros contatos com um transdutor de deslocamento, utilizado para a execução desse trabalho.

O transdutor de deslocamento é usado na CESP como instrumento para monitorar o desgaste de mancais de filme de óleo em turbinas e geradores. Devido à existência de uma grande quantidade de instrumentos instalados e a necessidade periódica de calibração, foi desenvolvido para a CESP, por uma empresa especializada fabricante de transdutor de deslocamento, um software específico para auxiliar os técnicos na calibração dos sensores.

Na figura 5.0, pode-se ver a bancada de ensaios destinada à calibração dos sensores. Esta é composta por:

- Dispositivo para aplicar os deslocamento - dados de entrada;
- Osciloscópio usado como fonte de alimentação;
- Multímetro digital;
- Microcomputador portátil;
- Software específico Mecatester;
- Transdutor de deslocamento.

O princípio de calibração consiste em inserir o deslocamento (“*gap*”) no dispositivo apropriado como dados de entrada, fazer a leitura correspondente da “*tensão*” no multímetro digital e entrar com os dados obtidos no computador, figura 5.2, na coluna correspondente. Após o término de entrada dos dados o programa calcula e emite um relatório específico com todas os dados necessários para uma tomada de decisão.



Figura 5.0 Bancada com instrumentos para calibração (CESP)

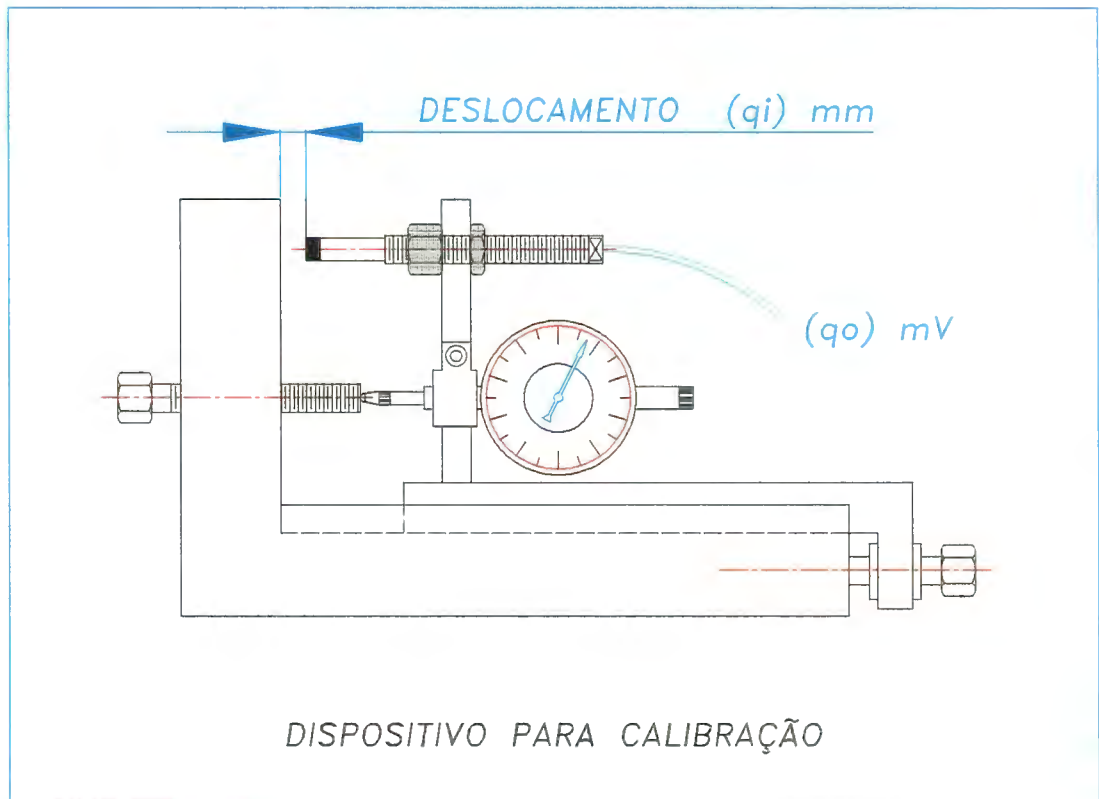


Figura 5.1 - Dispositivo para calibração do sensor

Arquivos Dados

Número de Série:PROBE-A Sensibilidade: 8 V/mm 24-01-1996
Nome da Empresa:ENSAIO-USP Temperatura:20 °C Rcal:10000 Ω
Material Alvo:SAE 4140

	Gap (mm)	Tensão (V)	Dif. Ten. (V)	Sens. (V/mm)	Desv. Gan (%)	Desv. Lin. (mm)
	0.25 ↑	1.87 ↑	1.87 ↑	7.21 ↑	-9.9 ↑	-0.025 ↑
Grafico	0.50	4.10	2.23	8.06	0.8	0.004
	0.75	5.99	1.89	7.90	-1.3	-0.010
Limpa	1.00	7.99	2.00	7.92	-1.0	-0.010
	1.25	10.03	2.04	7.97	-0.4	-0.005
	1.50	12.15	2.12	8.05	0.7	0.010
Impressão	1.75	14.20	2.05	8.08	0.9	0.016
	2.00	16.22	2.02	8.08	0.9	0.018
	2.25	18.10	1.88	8.01	0.2	0.003
	2.50	19.87	1.77	7.92	-1.0	-0.026
Cancela	2.75 ↓	21.45 ↓	1.58 ↓	7.78 ↓	-2.8 ↓	-0.078 ↓

Sensibilidade Média (0.50 a 2.50 mm) :8.00 V/mm Offset:0.07 V BOM
Sensibilidade a 1.25 mm :8.32 V/mm
Desvio da Sensibilidade Média em relação a nominal (8V/mm) :0.03 %
Tensão ideal para o ponto de 2.50 mm :19.91 V

Figura 5.2 - Tela do computador Software Mecatester

O relatório da figura 5.3, fornece três resultados que deverão ser comparados com a norma API 670 para a avaliação final dos resultados. O resultado mais importante para uma tomada de decisão refere-se ao desvio de linearidade, que é o erro dos pontos encontrados em relação à curva padrão.

Como o programa aceita somente os deslocamentos pré-definidos dentro da amplitude de sensibilidade do sensor, outros ensaios deverão ser executados para uma avaliação mais precisa, onde serão usados valores de deslocamento intermediários, mais próximo daqueles esperados para o deslocamento proveniente do ensaio em fresamento, que serão executados posteriormente, para avaliar o deslocamento do eixo árvore de uma máquina-ferramenta.

O item 5.1.1.1, mostra passo-a-passo, como deve ser o procedimento para a calibração de um sensor de proximidade, considerando-se que o sensor permita substituição do resistor de calibração, e o usuário não possua um programa de cálculo automático.

2. *COM FONTE DESLIGADA*, fixar o sensor de modo que sua ponta encoste no alvo, com o micrômetro na posição 0,00 mm.
3. Afastar o alvo, abrindo a folga até 2,00 mm. Ligar a fonte e aguardar 5 min para estabilização térmica do circuito.
4. Medir a tensão na saída do condicionador. Se a leitura estiver entre - 14,80 e - 15,20V, passar para o item 7.
5. Caso a leitura estiver fora dessa faixa, retirar a cobertura plástica, remover o selante de silicone de proteção do resistor de calibração e substituir o resistor por um variável multi-voltas de 50 k Ω .
6. Ajustar o trimpot de modo a obter uma leitura de - 15,00 V.
7. Posicionar o micrômetro em 0,50 mm. Aguardar 5 segundos e anotar a leitura. Calcular a sensibilidade através da seguinte equação:

$$S = \frac{|V_{2,00} - V_{0,50}|}{1,50} (v / mm)$$

Onde: $V_{2,00}$ é a leitura em Volts com folga de 2,00 mm

$V_{0,50}$ é a leitura em Volts com folga de 0,50 mm

Se $7,80 \leq S \leq 8,20$ passe para o item 9

8. Se a sensibilidade estiver fora dessa faixa, instalar o trimpot como indicado no item.5, caso isso ainda não tenha sido feito, e voltar para a posição de folga 2,00 mm. Ajustar o trimpot da seguinte forma:

S baixo - aumentar a leitura

S alto -diminuir a leitura

Repetir a seqüência 7 e 8 até obter-se a sensibilidade especificada.

NOTA: é interessante manter $V_{2,00}$ o mais próximo possível de -15,00 V, pois isso garante uma melhor linearidade.

9. Levantar a curva de resposta do sensor de proximidade entre 0,50 e 2,50 mm, com intervalo de 0,25mm.

10. Calcular o “offset” (V_0) através da seguinte equação:

$$V_0 = \frac{24 \cdot \sum V_p - 13,5(p \cdot V_p)}{33,75} \text{Volts}$$

Onde: p é a posição em mm e

V_p é a tensão correspondente em Volts

11. Calcule a sensibilidade em cada ponto (S_p) através da seguinte fórmula:

$$S_p = \frac{|V_p - V_0|}{p} (V / mm)$$

Em todos os pontos S_p deve estar situada entre os seguintes limites:

$$7,68 \leq S_p \leq 8,32$$

Caso isso não ocorra reajustar o resistor variável de forma a distribuir os erros e repetir o procedimento 9.

12. Cálculo da sensibilidade média (S_m):

A partir dos dados p e V_p , calcular a sensibilidade média através da formula:

$$S_m = \frac{13,5 \sum V_p - 9 \cdot \sum (p \cdot V_p)}{33,75} (V / mm)$$

13. Cálculo dos desvios de linearidade (d_p):

$$d_p = \frac{(V_0 - p) \cdot (S_m - V_p)}{S_m} (mm)$$

Todos os desvios devem estar entre os limites:

$$|d_p| < 0,025mm$$

14. Se algum desvio estiver fora dessa tolerância, recalibrar o sensor de proximidade de modo a obter uma sensibilidade mais uniforme, até obter a tolerância especificada.

15. Uma vez obtida essa tolerância, retirar o resistor variável, medir o valor resistência e substituí-lo por outro resistor de filme metálico de 1% e valor mais próximo possível. É válido associar dois resistores em paralelo, de forma a obter a resistência desejada.

16. Cobrir o resistor com selante de silicone, recolocar a tampa plástica e remover o excesso de silicone usado para vedação.

OBSERVAÇÕES:

Para maior precisão recomenda-se utilizar a sensibilidade média no caso de medidas de posição, enquanto que nas medidas de vibração é recomendável posicionar o sensor com uma folga de 1.25 mm e usar a sensibilidade calculada ao redor desse ponto, através da formula:

$$S_{1,25} = 2 \cdot |V_{1,5} - V_{1,0}|$$

5.1.2 Ensaio em laboratório de metrologia

5.1.2.1 Considerações

Este ensaio em laboratório de metrologia foi realizado para uma avaliação mais criteriosa da resposta do sensor, usando valores de deslocamento como dados de entrada. Os ensaios realizados anteriormente na CESP de Bauru, serviram apenas para fazer a calibração dos sensores, onde foram usados como dados de entrada, o valores de deslocamentos localizados entre os extremos da faixa de utilização do sensor, que varia de 0,5mm à 2,5mm.

A calibração dos sensores se faz necessário para adequar a resposta a um determinado material alvo. O material básico usado para calibração do sensor é um aço SAE 4140.

Os sensores mais modernos já são fornecidos calibrados pelo fabricante, dentro de padrões especificados para cada tipo de aplicação, cabendo ao usuário apenas a adequação do sensor ao meio físico onde será utilizado.

A ordem de grandeza das medições em mancais e em eixos de turbinas e geradores varia entre 0,1mm e 0,5mm, que é a folga básica existente entre o colo do eixo e o diâmetro interno máximo da bucha do mancal de rolamento, que é o deslocamento relativo máximo medido. O monitoramento para essa aplicação é padrão, e os dados de saída obtidos como resposta, são avaliados em tempo real.

Como as exigências de resolução para aplicação em monitoramento de eixos não é tão significativa, a avaliação da resposta do sensor para valores mais restritos se faz necessário, a fim de encontrar o limite mínimo de deslocamento que o sensor é capaz de detectar. Isso assegura uma resposta linear, garantindo a fidelidade dos dados de saída, que vão representar deslocamento do eixo árvore de uma máquina-ferramenta, durante a usinagem para simulação de desgaste e quebra de ferramentas.

Para encontrar-se a resolução deste tipo de sensor, é necessário levá-lo a um laboratório, onde o deslocamento a ser aplicado seja menor que os deslocamentos obtidos em regime de trabalho normal em uma estação de geração de energia elétrica.

5.1.2.2 Equipamentos utilizados nos ensaios

Para a realização dos ensaios foi montado um banco de ensaios dentro de uma sala de metrologia, figura 5.4, a qual funciona como laboratório para aferição de instrumentos de medição. A temperatura e umidade deste ambiente são controladas, conforme normas internacionais vigentes para laboratório de metrologia.

O laboratório foi montado utilizando-se os seguintes instrumentos:

- ❑ Trimus – Instrumento destinado à aferição de instrumentos de medição, e foi utilizado para simular o deslocamento como dados de entrada no sensor (q_i);
- ❑ Sensor de proximidade (transdutor de deslocamento);
- ❑ Fonte de tensão;
- ❑ Mutímetro digital – fornecer os dados de saída (q_o);
- ❑ Microcomputador – fazer as planilhas e os cálculos;
- ❑ Software Excel – programa de computador.

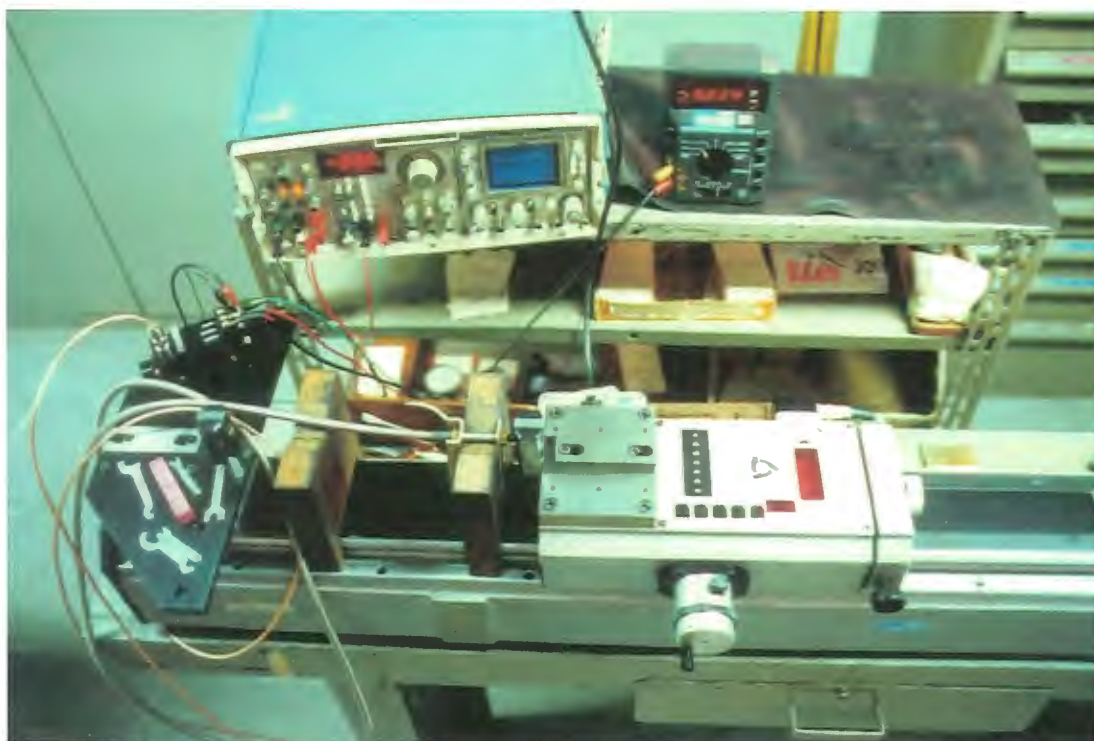


Figura 5.4 - Laboratório de ensaio em sala de metrologia

Trimus – Instrumento de precisão de origem Suíça, originalmente destinado a aferição de instrumentos de medição tipo micrômetros tubulares - medidas de comprimento. O funcionamento do instrumento consiste em cabeçote principal móvel que se desloca sobre um barramento de ferro fundido retificado. Neste é fixado a cremalheira para a aplicação das medidas de deslocamento. Na lateral do cabeçote é fixado um pinhão, que é acionado pela cremalheira, e que transmite a medida do deslocamento a um sistema digital localizado na parte superior do cabeçote móvel principal. Em uma das extremidades do barramento há um outro cabeçote fixo, que serve como ponto referencial para a tomada de medidas. O ponto

zero do instrumento é flutuante e pode ser obtido em qualquer posição do barramento. O instrumento tem fundo de escala de 1500 mm e resolução máxima de 10^{-4} mm. O Trimus é basicamente um instrumento para medição de comprimento, tem acionamento mecânico e leitura digital calibrado periodicamente para atender as exigências da ISO 9000.

Os valores dimensionais de deslocamentos aplicados aos sensores foram chamados de dados de entrada e utilizados nas tabelas de cálculos como (q_i).

Fonte de tensão – Instrumento destinado a ser a fonte de tensão destinada a fornecer uma tensão de 24 volts para a alimentação do condicionador/demulador, que é um dos componentes do transdutor de deslocamento. A fonte utilizada foi a de um osciloscópio, cuja função secundária nos ensaios, foi a de fornecer a tensão de saída, como resposta do deslocamento aplicada ao sensor. Como a resolução do aparelho não contemplava valores desejados, a leitura serviu apenas como referência.

Multímetro digital – Equipamento destinado a testes de equipamentos elétrico-eletrônicos em ambiente de manufatura. A função desse equipamento nos ensaios foi a de fornecer os dados de saída (tensão) obtidos através dos deslocamentos aplicados ao sensor, e que foram utilizados nas tabelas de cálculos como (q_0). As características especiais deste multímetro com resolução de 10^{-3} volts, para a faixa de tensão entre 1~10 volts, permitiram obter respostas bem consistente para valores de deslocamento da ordem de 10^{-4} mm.

5.1.2.3 Descrição do ensaio

O sensor foi montado sobre dois prismas existentes na máquina, os mesmos utilizados para a aferição dos instrumentos de medição, foram fixados com porca e contra-porca, uma de cada lado de um dos prismas com o intuito de obter-se uma boa rigidez na fixação do sensor e não permitir de movimentos durante a execução dos ensaios. Na extremidade de saída do sensor, foi ligado o cabo de extensão. O valor da tensão lida pelo multímetro foi tabelado e posteriormente levado a um computador para processamento e cálculo dos dados. Com os resultados obtidos, foram montados gráficos (tensão/deslocamento) para a verificação da linearidade do sinal de deslocamento.

Foram feitos 7 ensaios para avaliação da sensibilidade do sensor de proximidade, cada um deles avaliando regiões distintas, dentro da faixa de uso do sensor. A tabela 5.0 mostra as faixas exploradas, com dados de entrada (q_i) variando de 0,5 mm até 0,001 mm.

Os dados de saída (q_o) obtidos foram registrados e com o auxílio de um computador, foi construído uma planilha de cálculo, usando o programa Excel. Foram calculados todos os desvios envolvidos, com ênfase no desvio de linearidade em relação à reta padrão.

<i>ENSAIO</i>	<i>FAIXA EXPLORADA (DESLOCAMENTO)</i>
1°	0,25mm ~ 2,75mm
2°	0,50mm ~ 2,50mm
3°	1,00mm ~ 2,00mm
4°	2,00mm ~ 2,10mm
5°	1,00mm ~ 1,10mm
6°	1,25mm ~ 1,30mm
7°	1,00mm ~ 1,01mm

Tabela 5.0 - Ensaio e faixas de deslocamento

Os critérios de cálculo foram extraídos da referência (Doebelin, 1983), onde:

- q_i - Dados de entrada (deslocamento mm)
- q_o - Dados de saída (tensão volts)

Calculado:

- m - inclinação da reta
- b - Interseção da reta com o eixo vertical
- S_{q_o} - desvio padrão dos dados de saída
- S_{q_i} - desvio padrão dos de entrada
- S_m - desvio padrão da inclinação da reta

Como a pesquisa está voltada à resposta de sensibilidade do sensor, foi dada atenção especial aos resultados que representavam o desvio de linearidade para o deslocamento aplicado ao sensor, nas faixas mais restritas.

Para todas as faixas de deslocamento pesquisadas, foram elaboradas planilhas de cálculos (Tabela 5.1) e gráficos de linearidade (figura 5.5), que serão apresentados a seguir.

5.1.2.4 Planilhas, cálculos e gráficos

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (q_i) ENTRE 1,00 mm ~ 1,01 mm

q_i	q_o	q_i^2	$q_i q_o$	m	$m q_i$	b	$b - q_o$	$(m q_i + b - q_o)^2$
1,000	7,994	1,0000	7,9940	9,182	9,1820	-1,189	-9,183	0,000001
1,001	8,002	1,0020	8,0100	9,182	9,1912	-1,189	-9,191	0,000000
1,002	8,011	1,0040	8,0270	9,182	9,2004	-1,189	-9,200	0,000000
1,003	8,021	1,0060	8,0451	9,182	9,2095	-1,189	-9,210	0,000000
1,004	8,028	1,0080	8,0601	9,182	9,2187	-1,189	-9,217	0,000003
1,005	8,040	1,0100	8,0802	9,182	9,2279	-1,189	-9,229	0,000001
1,006	8,049	1,0120	8,0973	9,182	9,2371	-1,189	-9,238	0,000001
1,007	8,057	1,0140	8,1134	9,182	9,2463	-1,189	-9,246	0,000000
1,008	8,065	1,0161	8,1295	9,182	9,2555	-1,189	-9,254	0,000002
1,009	8,077	1,0181	8,1497	9,182	9,2646	-1,189	-9,266	0,000002
1,010	8,085	1,0201	8,1659	9,182	9,2738	-1,189	-9,274	0,000000
11,055	88,429	11,1104	88,8722					0,000010
122,213								
9,045	72,350	9,0903	72,7123					

$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	m 9,18182	$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2$	$S_{q_o}^2$ 0,000001
$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	b -1,1887	$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	S_{q_o} 0,000975
$S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	S_b^2 0,00873	$S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2}$	S_m^2 0,008639
	S_b 0,09341		S_m 0,092944
			$S_{q_i}^2$ 0,000000
			S_{q_i} 0,000106

Tabela 5.1 Ensaio com deslocamento entre 1,00mm e 1,01mm

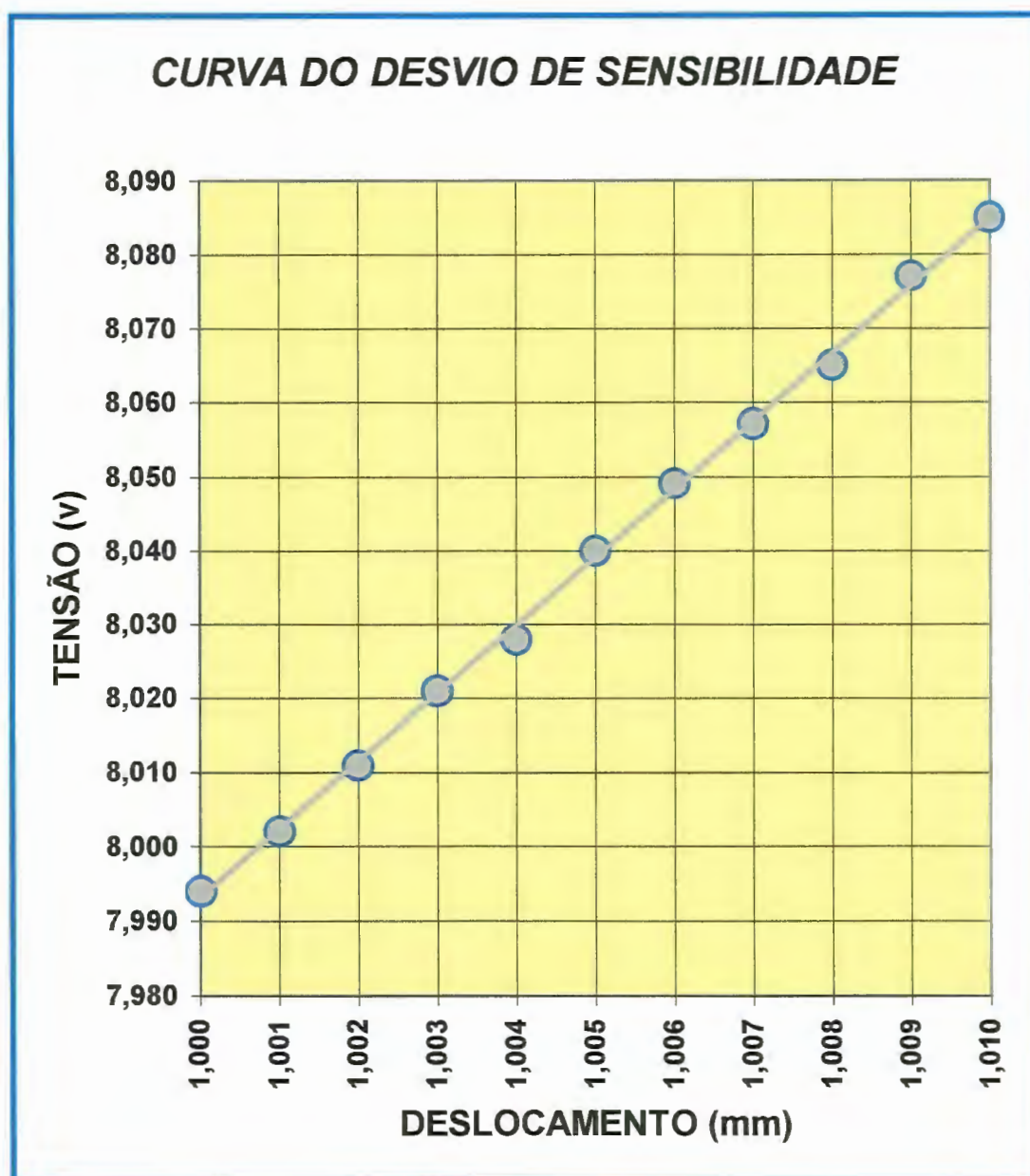


Figura 5.5 - Curva para resposta de deslocamento entre 1,00mm ~ 1,01mm.

Os gráficos da figura 5.6 mostram os resultados dos desvios S_m , os quais definem a resposta do sensor (linearidade) para um determinado deslocamento.

O resultado obtido para a faixa de deslocamento entre 1,00 e 1,01mm, está na ordem de $1,1 \times 10^{-4}$ mm, portanto, satisfatório, o que permitiu a continuidade dos ensaios.

As planilhas e gráficos dos ensaios realizados, encontram-se no Apêndice, no final do trabalho.

5.1.2.5 Resumo dos resultados

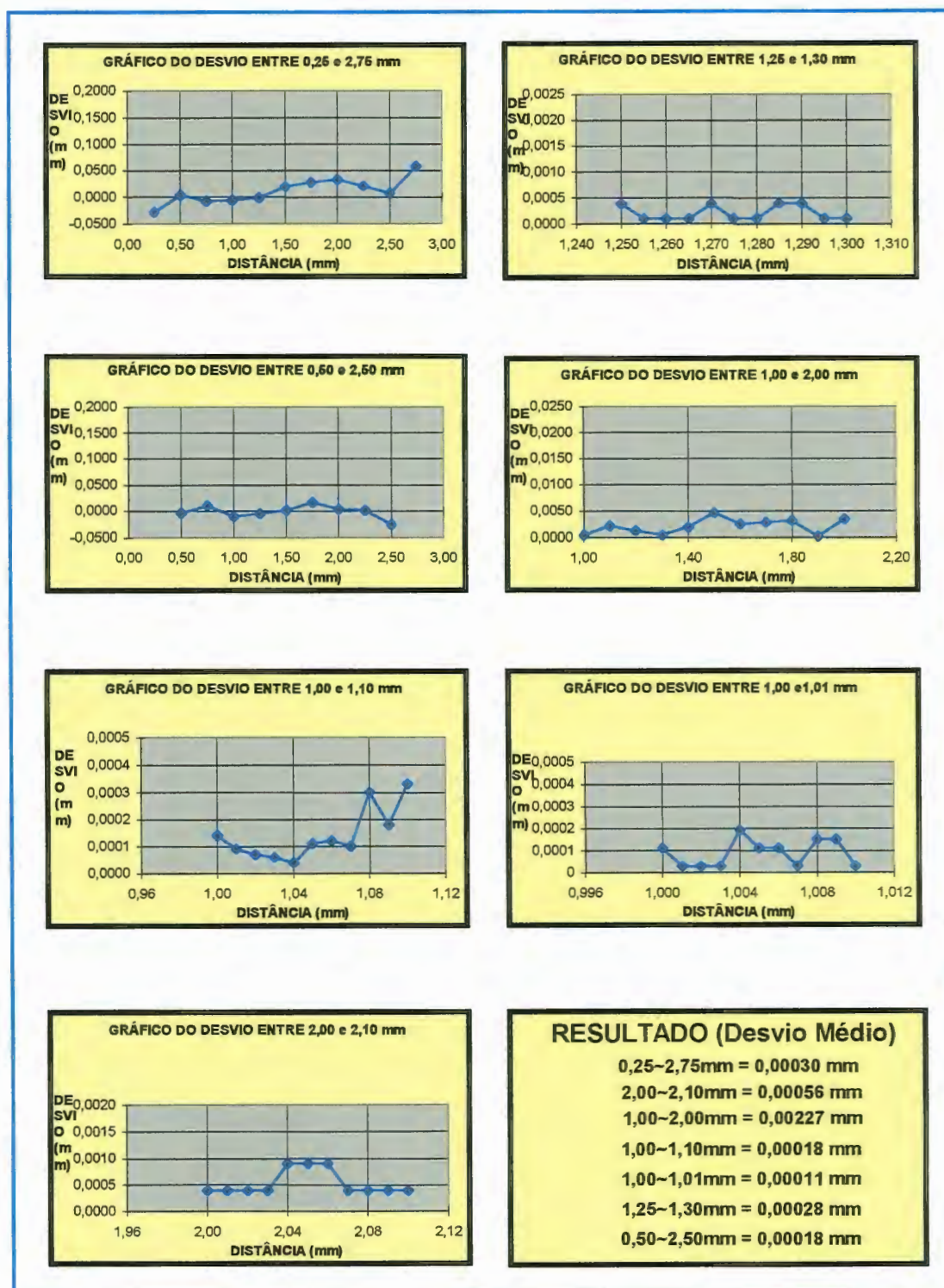


Figura 5.6 - Gráficos dos resultados obtidos em laboratório

5.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM FRESAMENTO

O ensaio em fresamento teve como propósito, avaliar os sensores de proximidade em uma aplicação prática, obtendo o deslocamento como dado de entrada, através das forças de cortes atuantes na ferramenta durante o processo de fresamento. Os ensaios feitos anteriormente em laboratório foram promissores, e permitiram que a avaliação dos sensores fosse completada.

5.2.1 Material fresado

5.2.1.1 Propriedades do material

O material das peças usadas nos ensaios foram obtidos à partir de chapa de aço ASTM A516 oxi-cortadas, com alívio de tensões e usinadas, com as seguintes propriedades físico-química e dimensões:

Propriedades físicas;

<input type="checkbox"/> Limite de resistência à tração	52 Kg/mm ²
<input type="checkbox"/> Limite de escoamento à tração	27 Kg/mm ²
<input type="checkbox"/> Alongamento	21%
<input type="checkbox"/> Dureza	149~187 HB
<input type="checkbox"/> Índice de usinabilidade	70%

Composição química;

- C = 0,30 ~ 0,35 %
- Mn = 0,50 ~ 0,90 %
- Si = 0,15 ~ 0,30 %
- P_{max} = 0,035 %
- S_{max} = 0,040 %

5.2.1.2 Dimensões

Para definir as dimensões do material, levou-se em consideração o tamanho máximo permitido pelo dispositivo modular de fixação, posicionado sobre a mesa da máquina, destinado à fixação das peças durante os ensaios de fresamento.

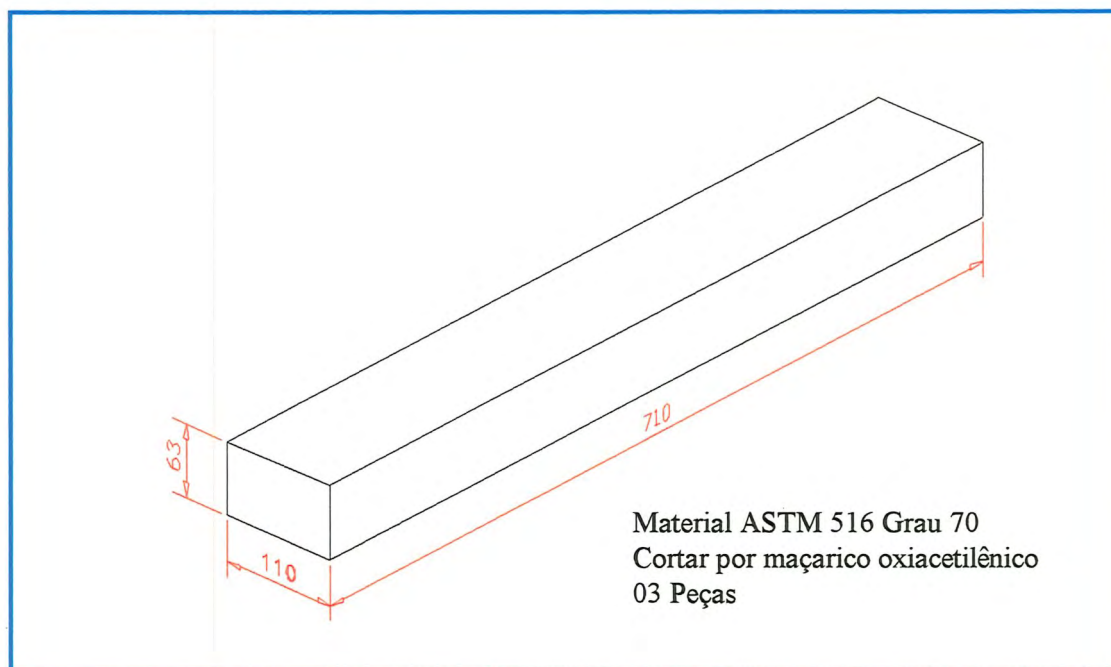


Figura 5.7 - Dimensões do material utilizado nos ensaios

5.2.1.3 Tratamento Térmico

O material cortado por maçarico oxiacetilênico foi levado a um forno de tratamento térmico para fazer o alívio de tensões nas 3 peças usadas no ensaio, eliminando as tensões provenientes do corte.

O forno foi programado para aquecer com 110 C°/h até a temperatura máxima de 620 C°, permanecendo nesse patamar por 3 horas. Posteriormente iniciando o processo de resfriamento à velocidade de 140 C°/h, conforme ciclo determinado para o processo (figura 5.8).

Para a determinação do ciclo de tratamento térmico foi levado em consideração a seção máxima do material a ser tratada, para assegurar a homogeneidade da dureza em qualquer região da peça.

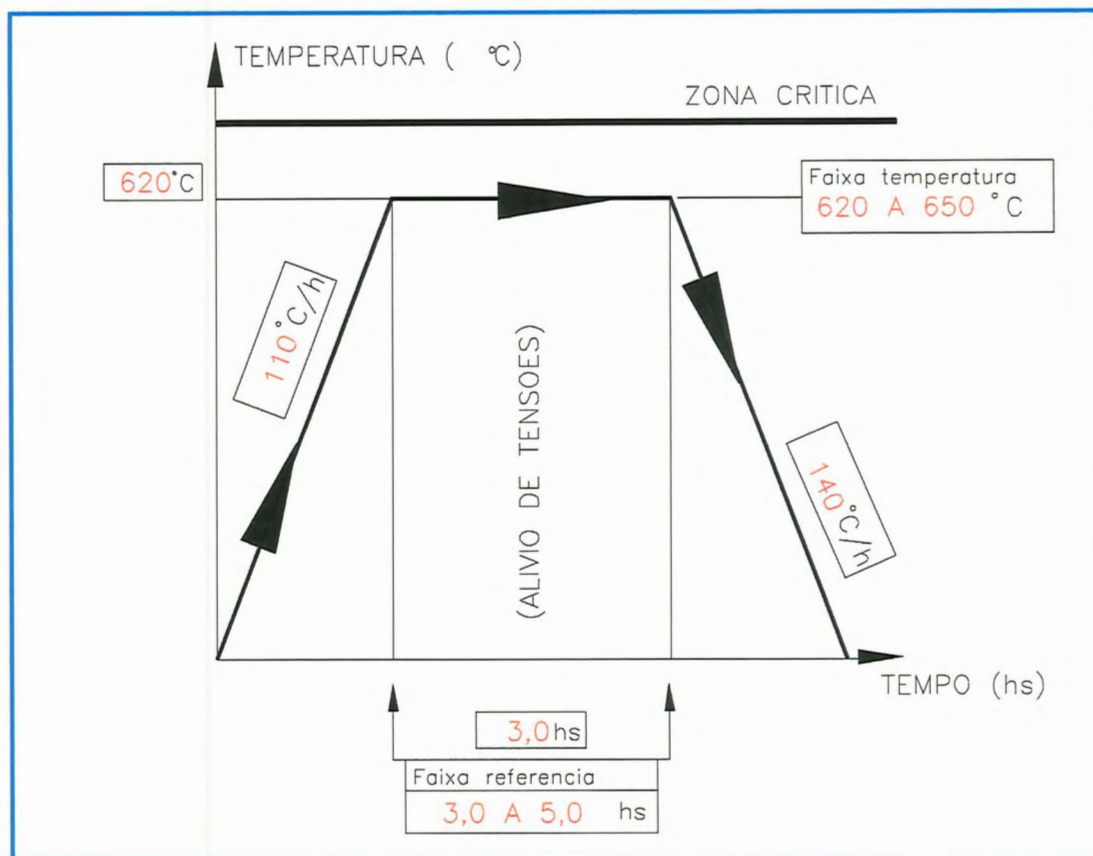


Figura 5.8 - Curva de alívio de tensões

5.2.1.4 Usinagem

Após o tratamento térmico, o material de ensaio foi fresado em todas as faces, conforme figura 5.9, para assegurar uma superfície sem irregularidades. Isso evita oscilações das forças de corte durante o fresamento, provenientes de variações na quantidade de material sendo removida pela ferramenta, assegurando uma perfeita face de assentamento sobre o dispositivo modular de fixação.

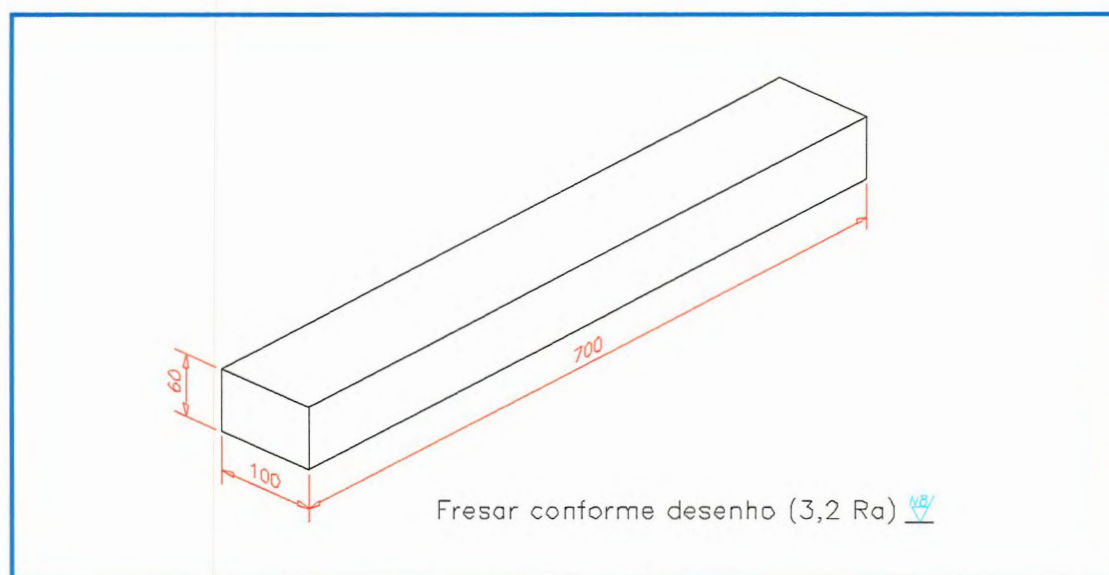


Figura 5.9 - Desenho de usinagem do corpo de prova

5.2.1.5 Ensaio de Dureza

As três peças destinadas ao ensaio de fresamento foram submetidas à medição de dureza pelo método Brinell. Para verificação da homogeneidade do material e conhecimento das propriedades mecânicas usou-se carga de 3000 Kgf e esfera de $\varnothing 10$ mm. Foram realizadas 10 medições, 5 em cada lado, cujo valor médio foi de 143 HB.

5.2.2 Máquina

5.2.2.1 Características

Furadeira vertical, mandrilhadora e fresadora de coordenadas de alta precisão, integradas, usada em ferramentaria, modelo HYDROPTIC 6A, de fabricação Suíça, conforme figura 5.10.

O deslocamento longitudinal é obtido através do movimento da mesa sobre barramento. O movimento transversal é obtido através deslocamento do cabeçote principal sobre o barramento transversal, e o deslocamento vertical através da travessa, que contém o cabeçote principal, sobre barramento vertical. A precisão dimensional obtida em qualquer sentido de deslocamento é de 0,001 mm ($1\mu\text{m}$).

A máquina está instalada em sala climatizada, com temperatura de 20°C. A estabilização térmica é importante pois o coeficiente de expansão térmica para ferro fundido e para a maioria dos aços comerciais é da ordem de $1,15 \times 10^{-5}$ mm/°C. Isso pode afetar a precisão.

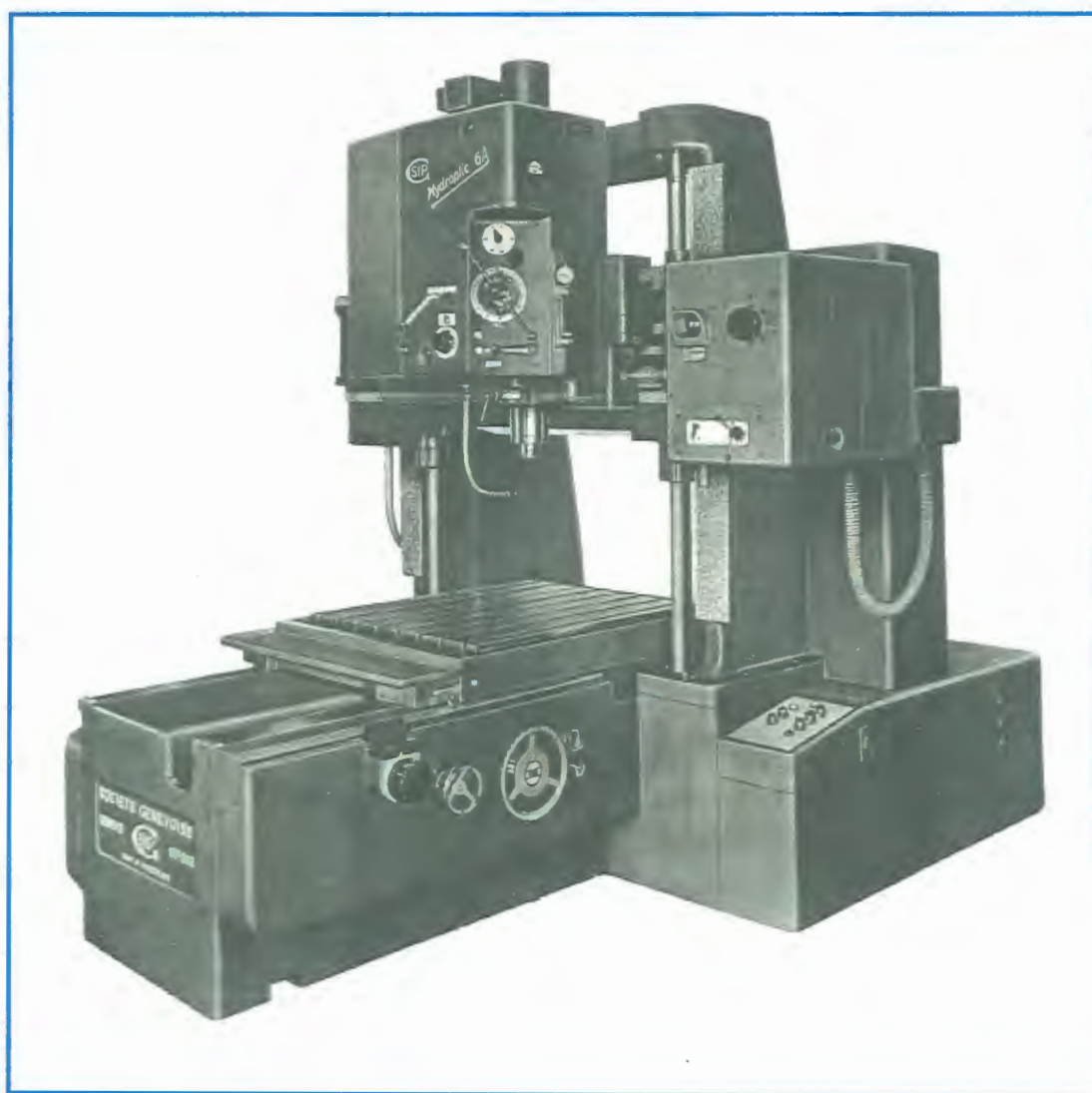


Figura 5.10 - Máquina utilizada no ensaio de fresamento

5.2.2.2 Dimensões (figura 5.11)

□ Dimensões da Mesa	1100 x 842 mm
□ Capacidade permitida sobre a Mesa	1000 Kg
□ Altura máxima sobre a Mesa	1000 mm
□ Diâmetro do Eixo Árvore	135 mm
□ Rotação do Eixo Árvore	40~2000 rpm
□ Avanço da Mesa	25~500 mm/min
□ Potência do Motor	10 kw

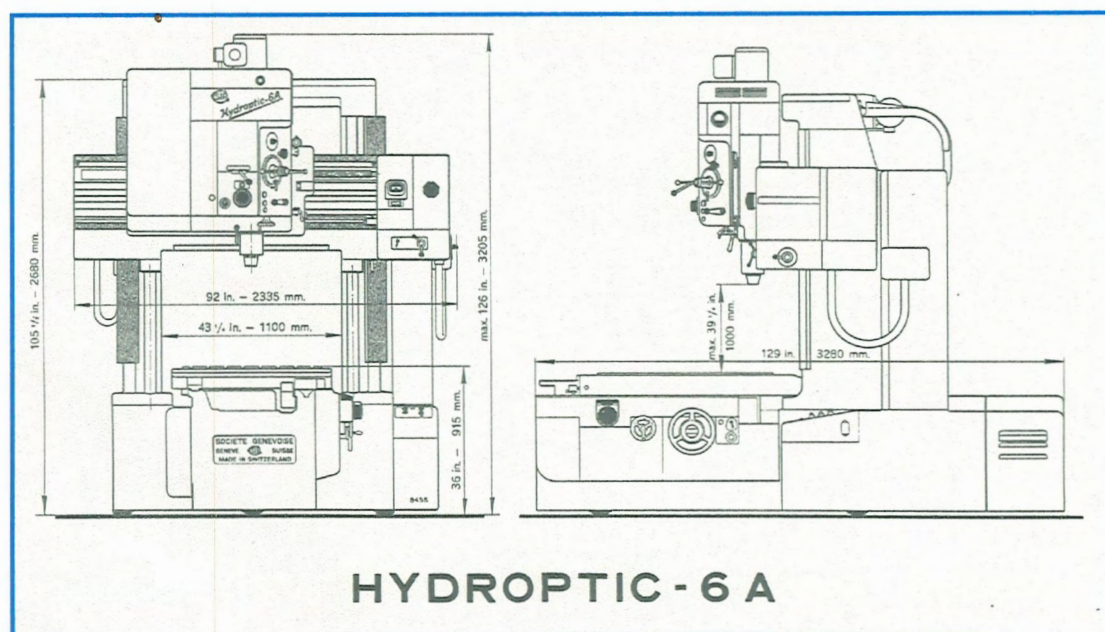


Figura 5.11 - Dimensões principais da máquina

5.2.3 Acessórios

5.2.3.1 Dispositivo modular

Para fixação da peça na mesa da máquina foi utilizado um dispositivo modular, figura 5.12, para assegurar uma perfeita fixação da peça durante o processo de fresamento. A configuração de montagem do dispositivo para receber a peça, foi feita obedecendo-se critérios, considerando o sentido e as forças de corte atuantes na ferramenta, para que não fosse permitido nenhum deslocamento da peça durante o fresamento.

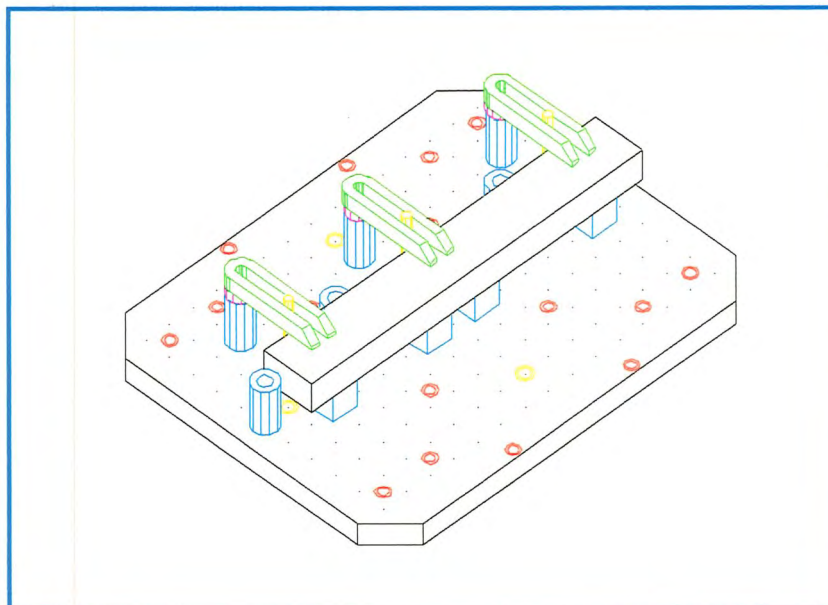


Figura 5.12 - Dispositivo modular de fixação

5.2.3.2 Suportes e adaptadores

Para a fixação da ferramenta na máquina foram usados suportes e adaptadores, especialmente construído para esse fim, comprados junto ao fabricante de ferramentas Precisa Ltda, objetivando assegurar perfeita fixação e precisão de giro durante os ensaios de fresamento. O suporte da ferramenta serviu também como base para detecção do deslocamento do eixo-árvore pelos sensores. O material usado no suporte da ferramenta foi o aço SAE 4140.

5.2.3.3 Dispositivo para fixação dos sensores

Para fixação dos sensores na máquina foi construído um suporte em chapa de aço, em estrutura soldada, fixado no cabeçote da máquina através de parafusos, figura 5.22. Basicamente este suporte foi construído com duas hastes de chapas dispostas à 90°, com rasgos longitudinais que permitiam a regulagem e o posicionamento dos sensores durante a ajustagem do “gap” de calibragem entre os sensores e o suporte de ferramenta, que serve de base para a aquisição dos sinais.

5.2.4 Ferramentas de corte

5.2.4.1 Fresa

Para a realização dos ensaios de fresamento, foi utilizada uma fresa de disco produzida pela SANDVIK, modelo T-max 331.2 10012, diâmetro 100mm, largura 12mm com 8 insertos TPAN 1103 PP classe P30. Para simular o desgaste gradativo da ferramenta os insertos foram retrabalhados.

5.2.5 Preparação dos Insertos

Para caracterizar o desgaste da ferramenta foi adotado o critério de modificar a aresta cortante dos insertos com um chanfro de 50° em toda a extensão da aresta de corte, conforme a figura 5.13. E para simular a quebra da ferramenta, foi retirado um dos insertos.

Para a execução da modificação nos insertos foi usada uma máquina afiadora-retificadora óptica específica para afiação de perfil, de procedência alemã da marca EpTeVe figura 5.14, destinada à afiação de perfis especiais em ferramentas de usinagem. A máquina possui um rebolo especial diamantado. O princípio de funcionamento basea-se no visual, seguindo parâmetros pré-estabelecidos para o perfil. A operação é acompanhada pelo operador através de um painel de ampliação localizado no lado esquerdo da máquina. Nesse painel é fixado uma ampliação do perfil em escala 1:20 em papel vegetal da aresta a ser afiada. O operador da máquina, usando comandos manuais precisos, segue visualmente nesse painel refletor o trajeto do rebolo para que o perfil da ferramenta seja obtido. Ao mesmo tempo o rebolo gera na ferramenta o perfil desejado. Os insertos foram afiados, um de cada vez, fixados à mesa da máquina através de dispositivo específico construído especialmente para esse fim.

Após a afiação da aresta de corte os insertos foram levados para um projetor de perfil para serem avaliados dimensionalmente.

Os insertos foram modificados variando de 0,1mm até 0,5mm de chanfro por 50° , considerando 8 insertos para cada fresa montada.

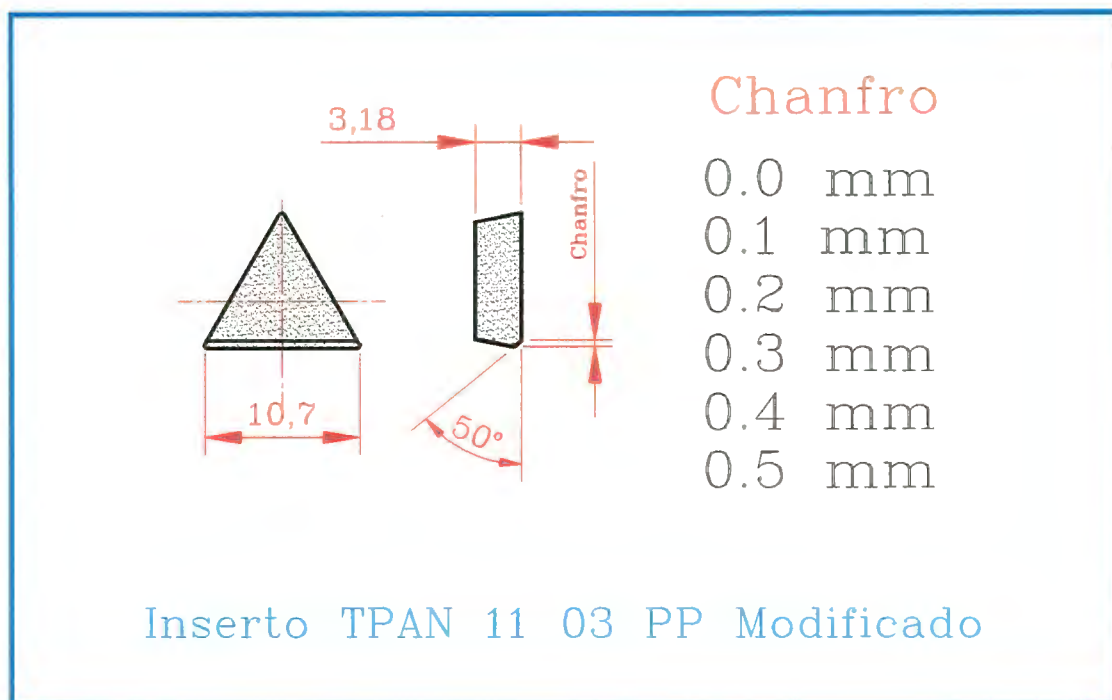


Figura 5.13 - Desenho do inserto modificado



Figura 5.14 - Detalhe da máquina afiadora de perfil.

5.2.6 Condições de corte usadas nos ensaios

5.2.6.1 Dados de corte para o fresamento

Para uma fácil seleção de ferramentas de corte, incluindo pastilhas, classes e dados de corte, os manuais de ferramentas dos fabricantes apresentam exemplos com abordagens claras a cada passo, mostrando os níveis de procedimentos com muitos detalhes.

O modo mais preciso para obter-se os dados de corte, é através do cálculo de todas as variáveis envolvidas no processo, levando em consideração todas as circunstâncias que podem afetar tanto a velocidade de corte como o avanço da ferramenta, tais como:

- ❑ Espessura máxima permitida para o cavaco;
- ❑ Profundidade radial da ferramenta;
- ❑ Diâmetro de corte efetivo;
- ❑ Diferença na dureza do material.

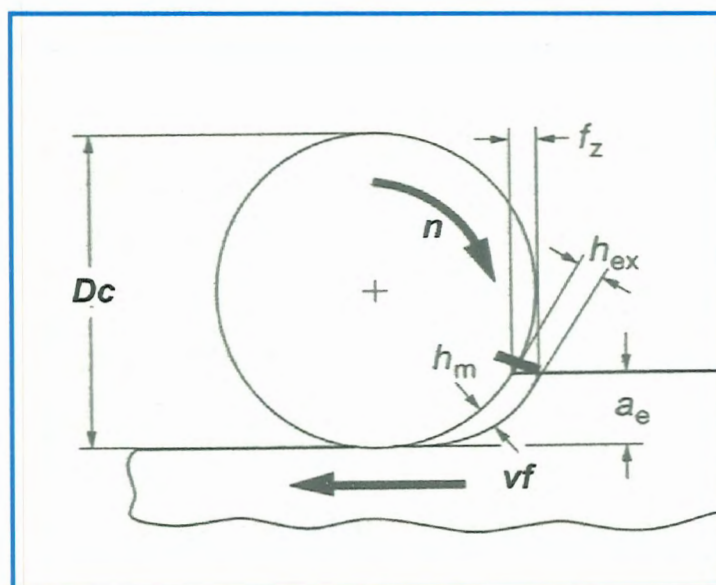


Figura 5.15 - Terminologia de corte

D_c = Diâmetro da Fresa

v_f = Velocidade de avanço da Mesa

a_e = Profundidade de corte

f_z = Avanço de corte por Dente

h_m = Espessura média do Cavaco

h_{ex} = Espessura máxima do Cavaco

n = Rotação da Ferramenta

5.2.6.2 Dados de corte adotados no ensaio de fresamento

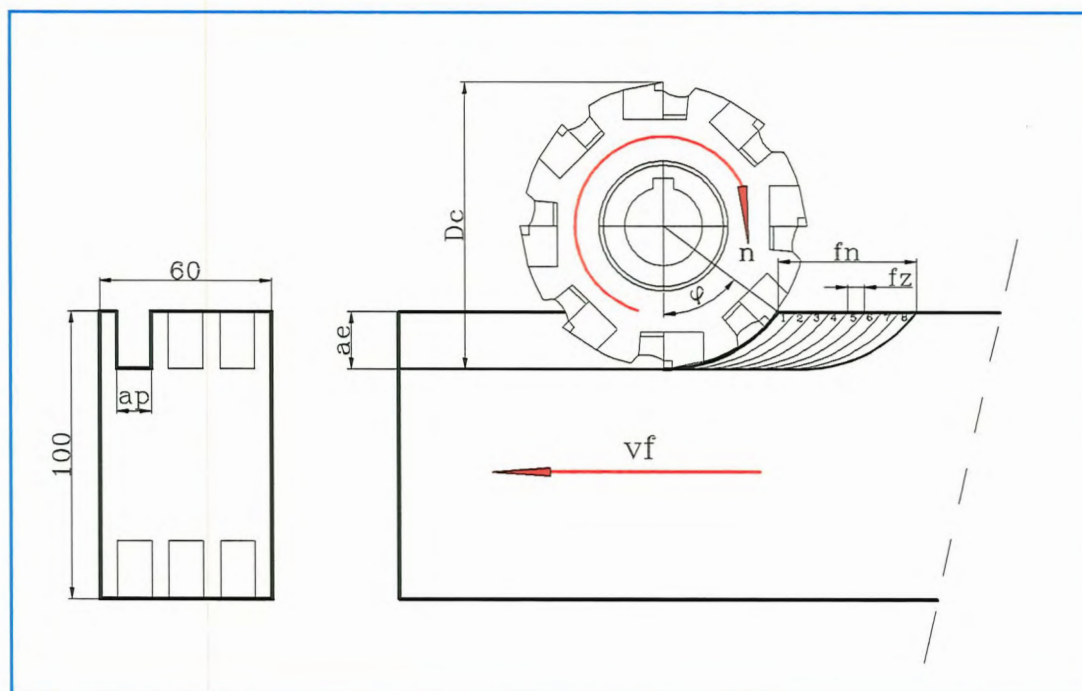


Figura 5.16 - Terminologia de fresamento

Velocidade de Corte	$V_c = 100 \text{ m/min.}$
Profundidade de Corte	$a_e = 20 \text{ mm}$
Largura de Corte	$a_p = 12 \text{ mm (Largura da Fresa)}$
Avanço por Dente	$f_z = 0,20 \text{ mm}$
Rotação do Eixo Árvore	$n = 318 \text{ rpm}$
Avanço da Mesa	$V_f = 254,4 \text{ mm/min.}$
Espessura Máxima do Cavaco	$h_{ex} = 0,17 \text{ mm}$
Espessura Média do Cavaco	$h_m = 0,09 \text{ mm}$
Ângulo de engajamento dos dentes	$\varphi = 53,11^\circ$

5.2.6.3 Cálculo da rotação do eixo árvore (n)

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_c} = \frac{100 \times 1000}{\pi \times 100} = 318 \text{ rpm}$$

$n = 320$ (adotado em função da máquina)

5.2.6.4 Cálculo da velocidade de corte corrigido (v_c)

V_{c0} = Constante para velocidade de corte. Essa constante está relacionada ao material da peça e à classe do inserto. Os materiais das peças são classificados e cada uma dessas classificações possui uma dureza nominal. Quando a dureza desvia da dureza nominal, deve-se usar um fator de compensação.

C_{vc} = Fator de correção para a velocidade de corte. Com esse fator de correção, a velocidade de corte é compensada com relação ao avanço.

h_{ex} = Espessura máxima do cavaco para a operação real. Cada aresta de corte é projetada com exclusividade para lidar com sua respectiva gama de trabalho.

$$V_{c0} = \text{constante para a velocidade de corte} = 120$$

$$C_{vc} = \text{Fator de correção para velocidade de corte} = -0,270$$

5.2.6.5 Cálculo da espessura máxima do cavaco (h_{ex})

A espessura máxima do cavaco é obtida, extendendo-se uma linha a partir do centro da fresa, até a região de saída ou entrada da ferramenta na peça, dependendo do sentido de corte da fresa, conforme mostra a figura 5.17.

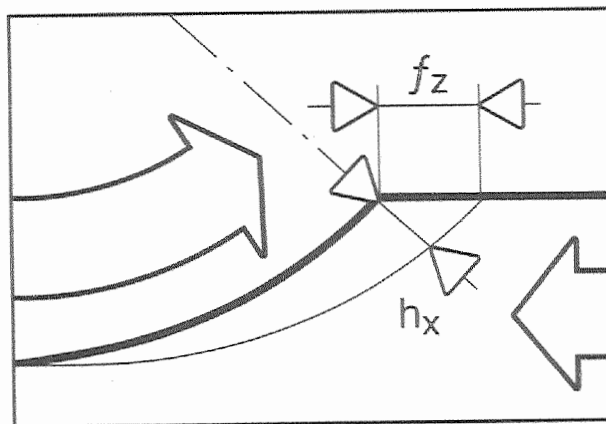


Figura 5.17 – Disposição de h_{ex} na região de corte

$$\mathbf{h}_{ex} = \mathbf{f}_z \times \text{sen}\varphi = 0,212 \times \text{sen}53,11^\circ = 0,17$$

$$\mathbf{h}_{ex} = 0,17 \text{ mm (valor adotado)}$$

$$V_c = V_{c0} \times e^{\left(\frac{C_w \times h_{ex} \times a_e}{\sqrt{D_c}}\right)} = 120 \times e^{\left(\frac{-0,2707 \times 0,17 \times 20}{\sqrt{100}}\right)} = 109,4$$

$$V_c = 100 \text{ m/min. (adotado como velocidade de corte)}$$

5.2.6.6 Cálculo do avanço da mesa (V_f)

$$V_f = \mathbf{n} \times \mathbf{z}_c \times \mathbf{f}_x$$

$$\mathbf{z}_c = \mathbf{z}_n / 2 = 8/2 = 4$$

$$\mathbf{f}_z = \mathbf{k}_1 \times \mathbf{h}_{ex} \quad \text{ou} \quad fz = 0,1 \sqrt{\frac{Dc}{ae}} = 0,1 \sqrt{\frac{100}{20}} = 0,22$$

$$\mathbf{k}_1 = \text{fator entre } D_c/a_e \text{ (1,25 tabelado)}$$

$$\mathbf{f}_z = 1,25 \times 0,17 = 0,212$$

$$\mathbf{f}_z = 0,20 \text{ mm/dente (adotado em função da máquina)}$$

$$V_f = \mathbf{n} \times \mathbf{z}_c \times \mathbf{f}_x = 318 \times 4 \times 0,2 = 254,4$$

$$V_f = 254,4 \text{ mm/min. (valor adotado)}$$

5.2.6.7 Cálculo da espessura média do cavaco (h_m)

O conceito da espessura do cavaco é um pouco mais complexo em fresamento do que em torneamento. Isto é resultado do fato de que uma aresta de corte durante seu caminho sobre a superfície da peça, produz um cavaco que não tem espessura constante. Por esta razão, foi introduzido para o cálculo de potência o conceito de espessura média (h_m) do cavaco. Entende-se por espessura média do cavaco, a área hachuriada, limitada pelo ângulo de engajamento dos dentes φ , conforme figura 5.18, dividida pelo comprimento do arco que a aresta descreve durante o corte. A espessura média do cavaco será sempre menor que o avanço por dente da ferramenta.

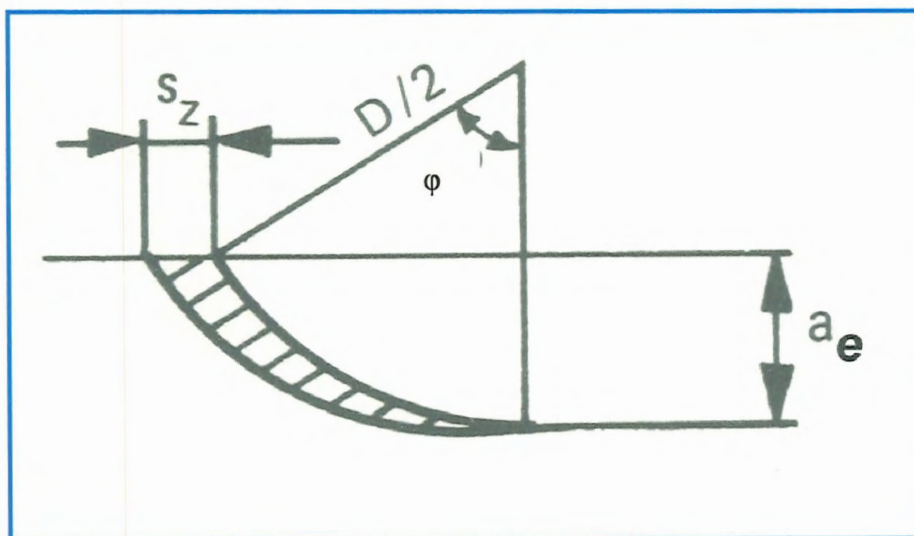


Figura 5.18 - Disposição de h_m na região de corte

$$h_m = \frac{360}{\pi} \times \frac{s_z \times a_r}{\varphi \times D_c} = \frac{360}{\pi} \times \frac{0,20 \times 20}{53,13 \times 100} = 0,09 \text{ mm}$$

$$h_m = 0,09 \text{ mm (valor adotado)}$$

Para a obtenção da espessura média do cavaco, a literatura oferecida pelos fabricantes tem um gráfico onde é possível obter-se através de um meio prático, os valores da espessura média do cavaco, a partir dos dados de corte e das características da ferramenta, figura 5.19.

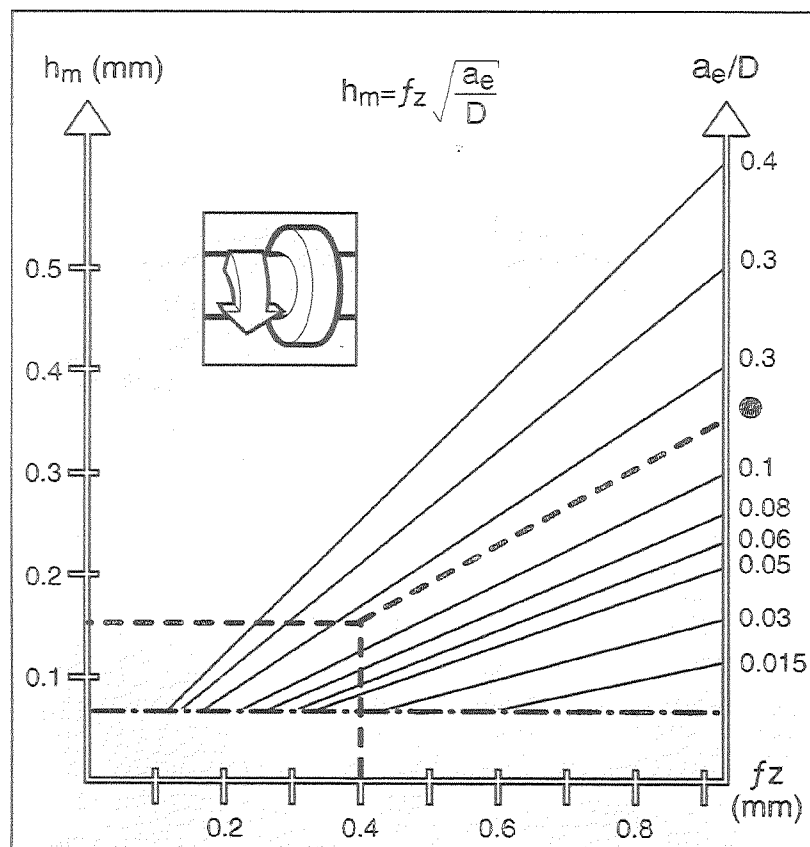


Figura 5.19 - Gráfico para a obtenção de h_m

5.2.6.8 Cálculo da força específica de corte (k_c)

A força específica de corte é um importante fator para estabelecer a potência de corte necessária nas operações de fresamento, ela é determinada em função da usinabilidade do material, da geometria da ferramenta e da espessura média do cavaco gerado.

A força específica de corte é a força necessária para cortar um cavaco com uma seção transversal de 1 mm^2 .

$$k_c = k_{c1} \times h_m^{-mc} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$k_{c1} = 250 \text{ (tabelado em função do material e da dureza)}$$

$$mc = 0,25 \text{ (tabelado em função do material e da dureza)}$$

$$k_c = 250 \times 0,09^{-0,25} = 456,4$$

$$k_c = 456 \text{ N/mm}^2 \text{ (adotado)}$$

5.2.6.9 Cálculo da potência necessária (N_c)

$$N_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{6,12 \times 10^6 \times \eta} = \frac{12 \times 20 \times 254,4 \times 456}{6,12 \times 10^6 \times 0,55} = 8,27 \text{ Kw}$$

(N_c) = 10 Kw (valor considerado para parâmetros de corte)

5.2.7 Forças de corte no fresamento

A tensão aplicada sobre a aresta de corte da ferramenta, através do processo de corte, é principalmente compressiva. A tensão de compressão é maior na ponta da ferramenta reduzindo-se, segundo varias formas, ao longo da superfície de saída. A área de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta está relacionada com as forças de corte e é um importante fator para otimização geométrica do quebra-cavacos. A aplicação de fluido de corte pode também afetar as forças de corte, mas este efeito é limitado a baixas velocidade de corte. A força de corte pode ser calculada teoricamente ou medida com um dinamômetro. A geometria do processo de formação de cavacos e o atrito no processo faz surgir componentes de força em varias direções.

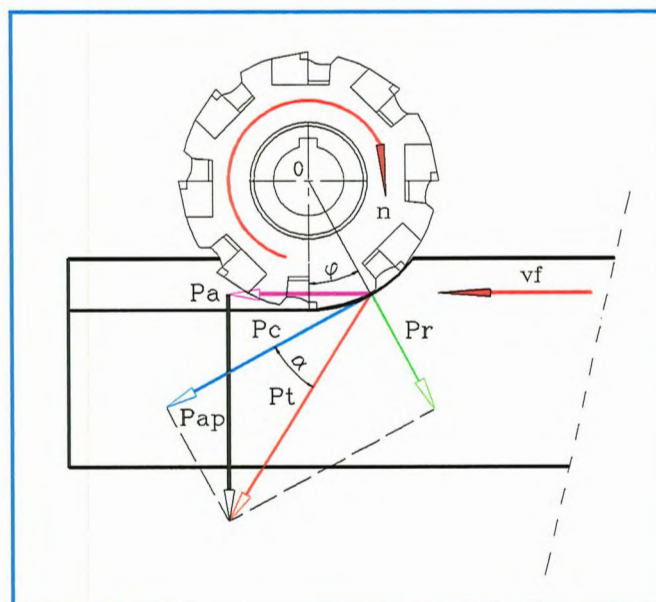


Figura 5.20 - Diagrama das forças de corte

Considerando-se o processo de formação de cavacos de um ponto de vista ortogonal, existe um estado de equilíbrio entre as componentes da força de corte no plano de cisalhamento. A força entre a peça e o cavaco, ao longo do plano de cisalhamento, e a força entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco são iguais, de modo que o cavaco formado esteja em equilíbrio (Braghini Junior, 1998).

Como nas ferramentas de torneamento, a componente principal tangencial \mathbf{P}_c da força de corte que atua na fresa é obtida conforme diagrama de forças da figura 5.20, visto anteriormente. A Força de corte \mathbf{P}_c , pode ser expressa pelo produto da área da seção transversal de corte ($\mathbf{h} \times \mathbf{b}$) pela pressão específica de corte (\mathbf{k}_s), $\mathbf{P}_c = \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{b}$. Segundo (Ferraresi, 1972) a pressão específica de corte \mathbf{k}_s depende de vários fatores e pode ser obtida através da espessura \mathbf{h} do cavaco (pelo critério de Kienzle).

No processo de fresamento a espessura \mathbf{h} do cavaco varia a cada instante, de maneira que a força tangencial de corte \mathbf{P}_c varia não só em direção mas em módulo. Além da força tangencial de corte \mathbf{P}_c , tem-se a componente \mathbf{P}_r , que também é importante no dimensionamento. Compondo estas duas forças tem-se a resultante \mathbf{P}_t , que é a força agindo no eixo-árvore da fresadora. Esta força resultante \mathbf{P}_t , por sua vez, pode ser decomposta nas forças \mathbf{P}_a , que é a força de avanço, e a força \mathbf{P}_{ap} , que é a força de profundidade, (Ferraresi, 1972).

Para determinar numericamente as forças de usinagem, analisa-se a figura 5.20 e determinam-se as relações:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_r}{P_c} \quad P_t = \sqrt{(P_c^2 + P_r^2)} \quad P_t = \sqrt{(P_a^2 + P_{ap}^2)}$$

O valor da relação $\mathbf{P}_r/\mathbf{P}_c$ vai depender do ângulo de engajamento dos dentes φ , dos ângulos de corte e do tipo do movimento relativo da ferramenta (concordante ou discordante). Para φ pequeno esta relação é muito grande no movimento discordante, devido ao efeito de cunha da ferramenta.

$$P_a = P_t \cdot \cos(\alpha - \varphi) \qquad P_a = P_t \cdot \sin(\alpha - \varphi)$$

(para movimento discordante)

$$P_a = P_t \cdot \cos(\alpha + \varphi) \qquad P_a = P_t \cdot \sin(\alpha + \varphi)$$

(para movimento concordante)

As relações entre P_a , P_{ap} e P_r foram obtidas experimentalmente em função da força tangencial média P_{tm} e encontram-se na Tabela 5.2, segundo Graupner

Tipo de Fresamento	Relação		
	P_r/P_{tm}	P_{am}/P_{tm}	P_{apm}/P_{tm}
Concordante	0,35 ~ 0,40	0,80 ~ 0,90	0,75 ~ 0,80
Discordante	0,35 ~ 0,40	1,00 ~ 1,20	0,20 ~ 0,30

Tabela 5.2 - Relação entre as forças de corte e o sentido de fresamento (Ferraresi, 1972)

5.2.8 Cálculo das forças de corte

Em operações de fresamento, a força tangencial de corte instantânea P_c , e suas componentes, conforme mostrado do diagrama de forças de corte, depende de sua magnitude, e podem provocar o deslocamento do eixo-árvore em uma máquina conforme sugere esse trabalho. Esta força pode ser decomposta em duas componentes que são:

- P_a - força de avanço, que age no sentido longitudinal;
- P_{ap} - força de profundidade que age no sentido transversal do eixo de fresamento.

As forças de corte atuantes na ferramenta são calculadas a seguir, a partir dos dados de corte previamente estabelecidos em função das características da máquina. Para cálculos numéricos, serão usadas as condições de corte máxima permitidas, com o objetivo de proporcionar máxima força possível atuando na ferramenta, mas assegurando a integridade da máquina.

P_c = Força de Corte Tangencial

P_r = Força de Corte Radial

P_t = Força Resultante

P_a = Força Componente Longitudinal

P_{ap} = Força Componente Transversal

$$P_c = k_c \times a_p \times h_m = 456 \times 12 \times 0,09 = 492,5$$

$$P_c = 492,5 \text{ Kgf}$$

5.2.9 Instrumentação

5.2.9.1 Considerações

Para a realização dos ensaios em fresamento, foi montada uma bancada de ensaio ao lado da máquina figura 5,21-A e B, contendo todos os instrumentos necessários para a aquisição e análise dos sinais captados no eixo-árvore da máquina pelos sensores. Sendo:

- Sensores de proximidade;
- Cabos de extensão;
- Condicionador/demulador;
- Adaptador AC;
- Interface de aquisição de sinais;
- Unidade de aquisição e análise de sinais (Docking Station);
 - ❖ Placa A/D CAD 12/36;
 - ❖ Placa de filtro FTR 0801V3;
 - ❖ Microcomputador Notebook 486 DX

- Programa para aquisição de dados – Aqdados;
- Programa para análise de sinais - SisDin.



Figura 5.21-A - Bancada de ensaios-Docking Station

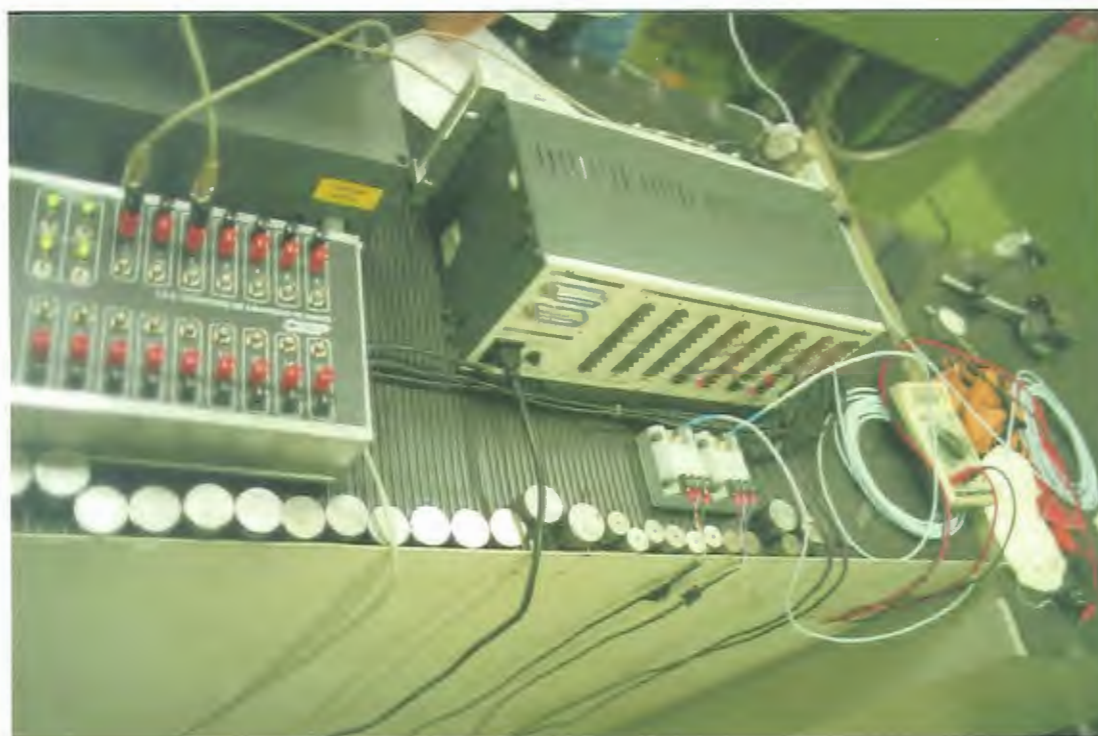


Figura 5.21-B - Bancada de ensaios para fresamento

5.2.10 Softwares

Os softwares “Aqdados” e “Disdin” utilizados neste trabalho e usados para aquisição e manipulação dos sinais emitidos pelos sensores de proximidade, são de propriedade da Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda.

5.2.10.1 Software “Aqdados 4”

O Aqdados versão 4 para MS-DOS é um aplicativo para a aquisição e armazenamento de dados em arquivos. É possível visualizar os sinais graficamente e realizar algumas análises. As características principais do Aqdados são:

- Permite aquisição de até 32 sinais analógicos;
- Frequência de amostragem programável entre 0,01 Hz ~ 100 KHz;
- Duração do ensaio programável;
- Apresentação de até 8 sinais simultaneamente durante a aquisição;
- Conversão para unidade de engenharia.

5.2.10.2 Software “SisDin 2”

O Sisdin versão 2 para MS-DOS é um programa para manipulação e análise de sinais, que tem como objetivo fornecer um conjunto de funções para análise matemática de séries temporais representativas de sinais analógicos. O Sisdin operando em conjunto com o programa Aqdados, constitui uma poderosa ferramenta para estudo e análise de sistemas dinâmicos. O Sisdin permite realizar as seguintes funções:

- Geração de séries temporais para simulação de sistemas;
- Manipulação de séries temporais por meio de operações aritméticas;
- Análise espectral;
- Análise estatísticas;
- Apresentação de gráficos e relatórios.

5.2.11 Descrição dos experimentos

O local escolhido para fazer a tomada dos sinais foi o diâmetro externo do suporte da ferramenta figura 5.22, trata-se de uma superfície retificada e com desvio de máximo “batimento” de 0,007 mm, medido com relógio comparador com resolução de 0,001 mm. Os sensores foram posicionados à aproximadamente 100 mm acima da ferramenta (fresa), e foram dispostos à 90° um do outro, com o objetivo de captar deflexões provocadas pela força de corte atuante na ferramenta, tanto a componente atuando no sentido longitudinal (F_y), quanto aquela atuando no sentido transversal (F_x). A figura 5.23 mostra a preparação da máquina, com todos os dispositivos usados para a execução do ensaio em fresamento, e a figura 5.24 mostra o detalhe de posicionamento dos sensores sobre o suporte da ferramenta.

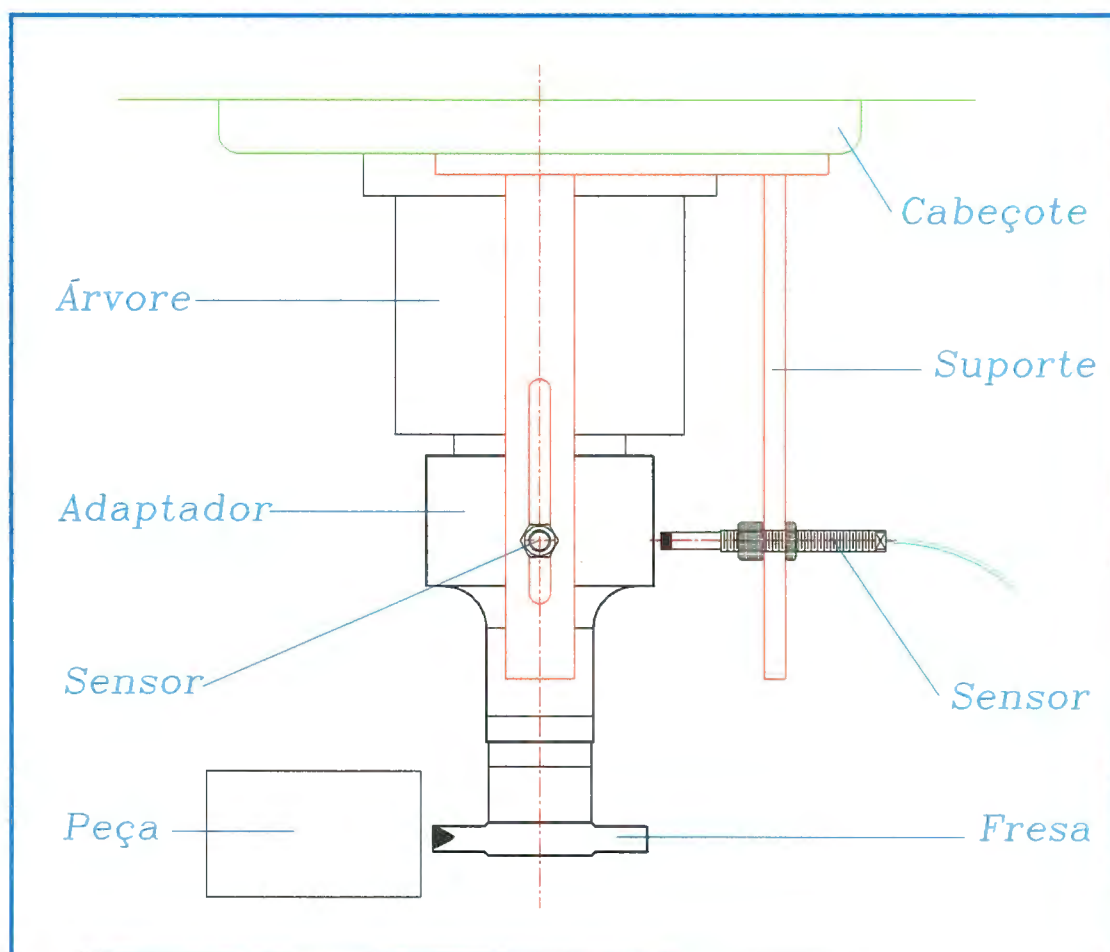


Figura 5.22 - Disposição de montagem para ensaio dos sensores de proximidade

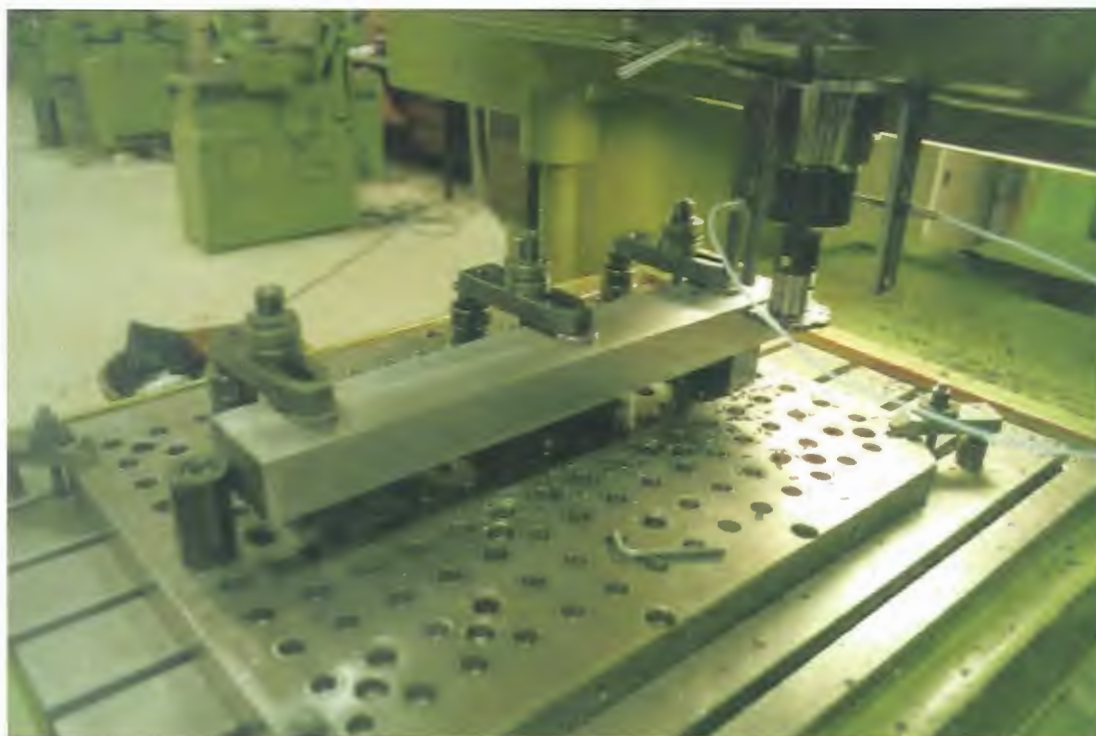


Figura 5.23 - Preparação da máquina para o ensaio



Figura 5.24 - Detalhe da disposição dos sensores

Os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa foi simulado o desgaste gradativo dos insertos, e medido o deslocamento provocado no eixo árvore da máquina em uma determinada posição. Na segunda etapa foi simulado a quebra, retirando um dos insertos, associado ao desgaste dos insertos, com o objetivo de provocar novos valores de deslocamento no eixo-árvore da máquina, na expectativa de se obter diversas intensidades do sinal, oriundo dessas variadas forças de corte.

A tabela 5.3 mostra o resultado dos deslocamentos máximos obtidos nos diversos ensaios de fresamento executados, para levantamento dos dados de laboratoriais para a comprovação da abordagem proposta.

A matriz de experimento é composta por 11 ensaios ao todo, utilizando o mesmo material e as mesmas condições de corte, exceto a características dos inserto, que foram modificados para simular o desgaste da ferramenta, agilizando assim, a duração do trabalho.

ENSAIOS EM FRESAMENTO			
		DESLOCAMENTO (um)	
<i>ENSAIOS</i>	<i>CONDIÇÃO DE CORTE</i>	<i>LONGITUDINAL</i>	<i>TRANSVERSAL</i>
1	Em vazio sem ferramenta	9,0540	9,302
2	Inserto original	13,767	32,619
3	Inserto com desgaste 0,1 mm	13,519	36,587
4	Inserto com desgaste 0,3 mm	20,464	41,548
5	Inserto com desgaste 0,4 mm	27,410	38,199
6	Em vazio com ferramenta	10,542	13,023
7	Simulação de quebra inserto original	21,333	44,402
8	Simulação de quebra ch-0,1 mm	22,200	48,246
9	Simulação de quebra ch-0,3 mm	24,805	52,091
10	Simulação de quebra ch-0,4 mm	25,797	58,292
11	Simulação de quebra ch-0,5 mm	26,666	59,532

Tabela 5.3 - Deslocamento do eixo-árvore em função das condições de corte

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são mostrados os gráficos resultantes dos ensaios feito em fresamento. Nas figuras 6.0 a 6.10 são apresentados os resultados obtidos de acordo com a matriz de experimentos mostrada anteriormente na Tabela 5.3.

ENSAIO EM VAZIO SEM FERRAMENTA

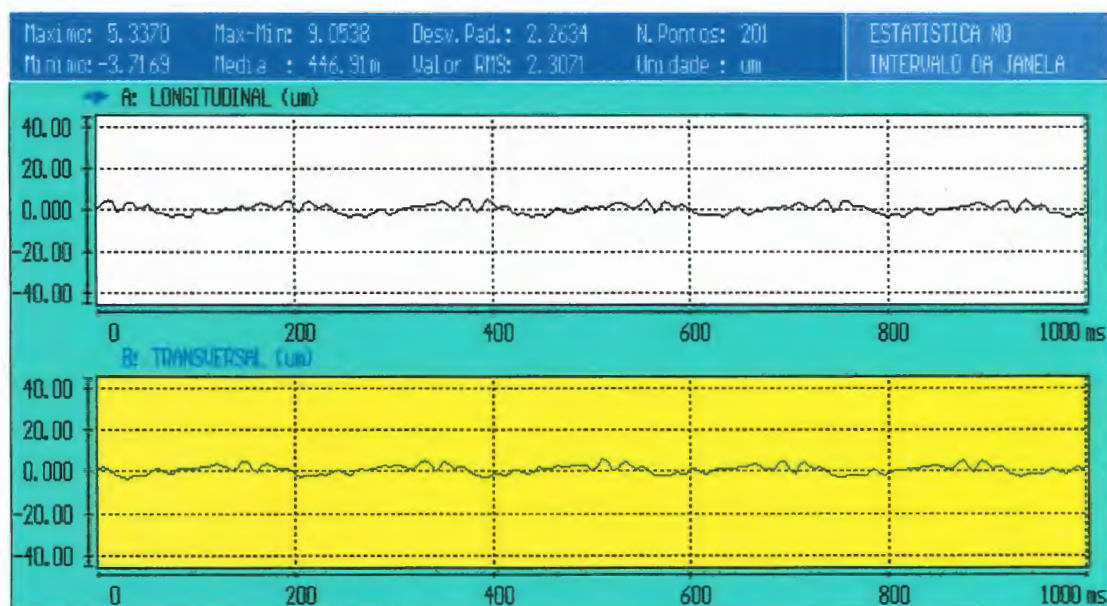


Figura 6.0 - Curva do ensaio em vazio, sem a ferramenta

ENSAIO COM INSERTO ORIGINAL CORTANDO

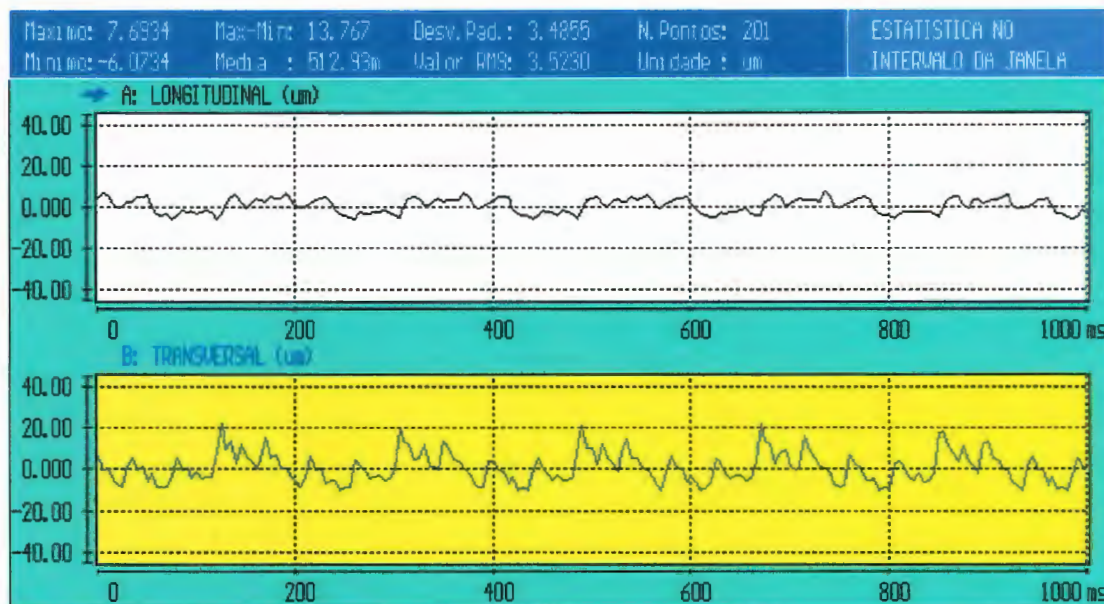


Figura 6.1 - Curva do ensaio com inserto original cortando

ENSAIO COM DESGASTE SIMULADO DE 0,1 mm

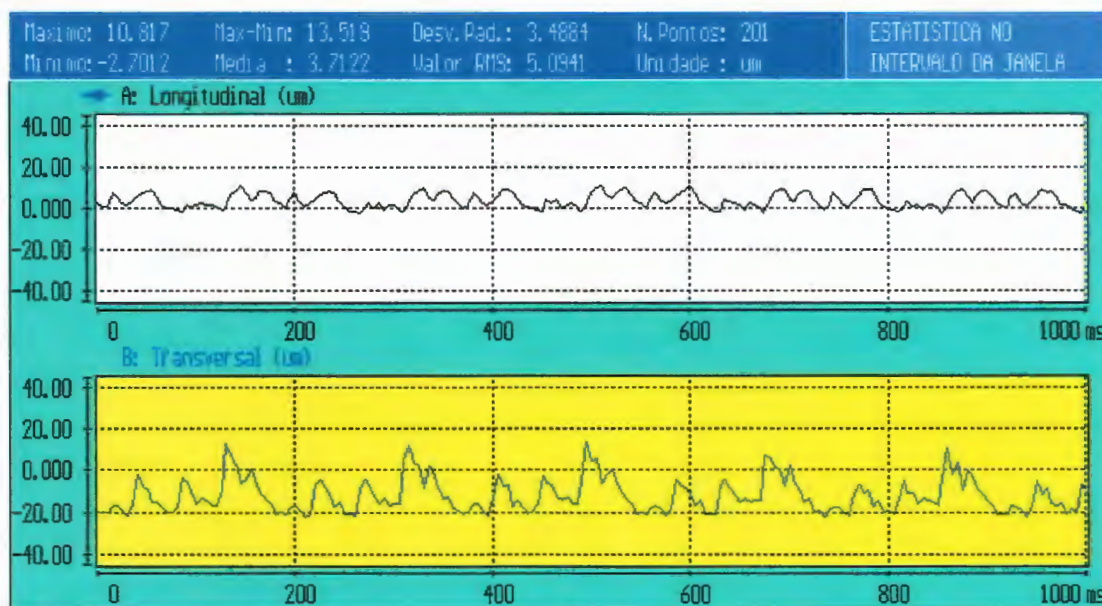


Figura 6.2 - Curva do ensaio com desgaste simulado de 0,1 mm

ENSAIO COM DESGASTE SIMULADO DE 0,3 mm

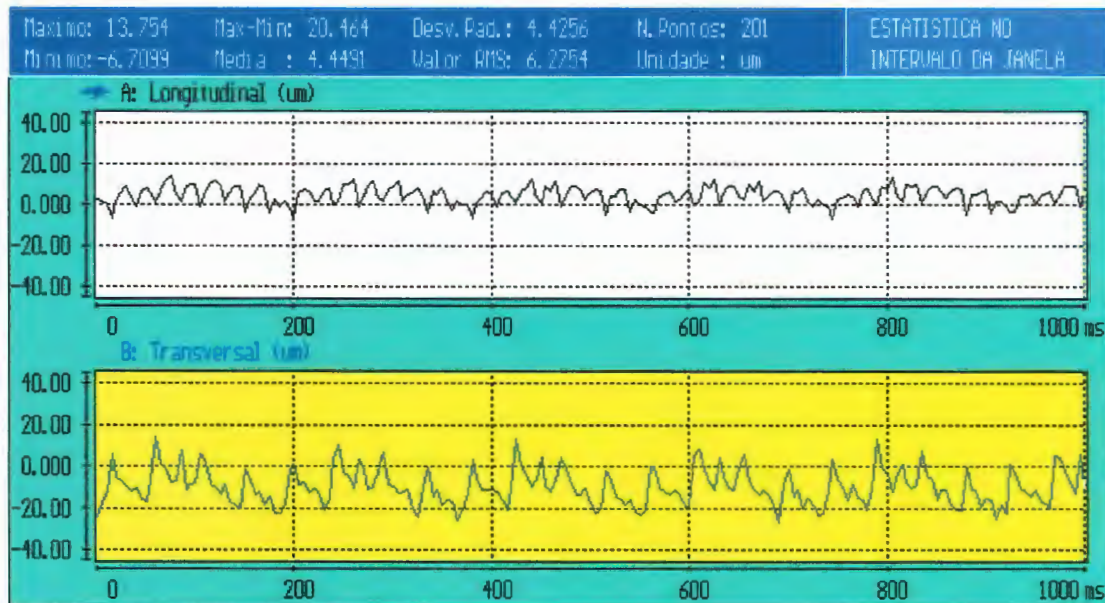


Figura 6.3 - Curva do ensaio com desgaste simulado de 0,3 mm

ENSAIO DE DESGASTE SIMULADO DE 0,4 mm

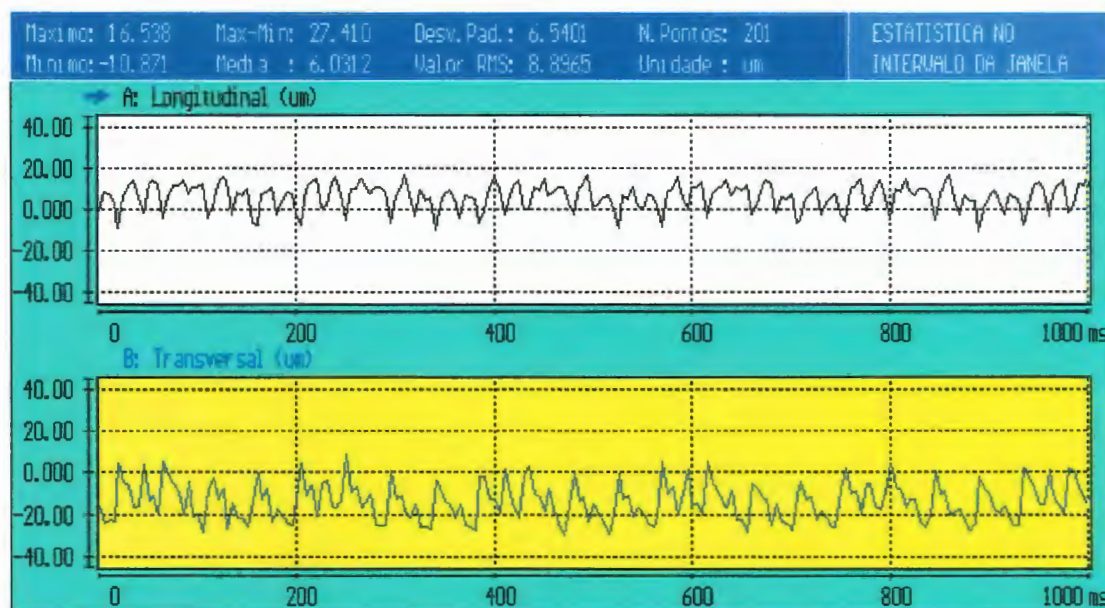


Figura 6.4 - Curva do ensaio de desgaste simulado de 0,4 mm

ENSAIO EM VAZIO COM A FRESA FIXA NO SUPORTE

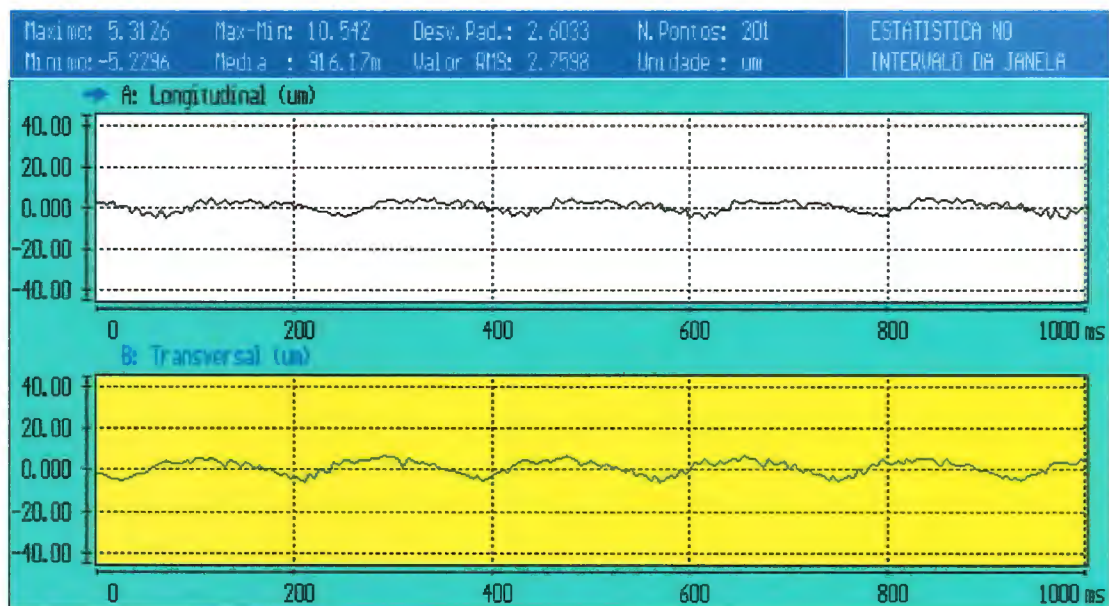


Figura 6.5 – Curva do ensaio com a fresa em vazio

ENSAIO COM SIMULAÇÃO DE QUEBRA DE UM INSERTO ORIGINAL

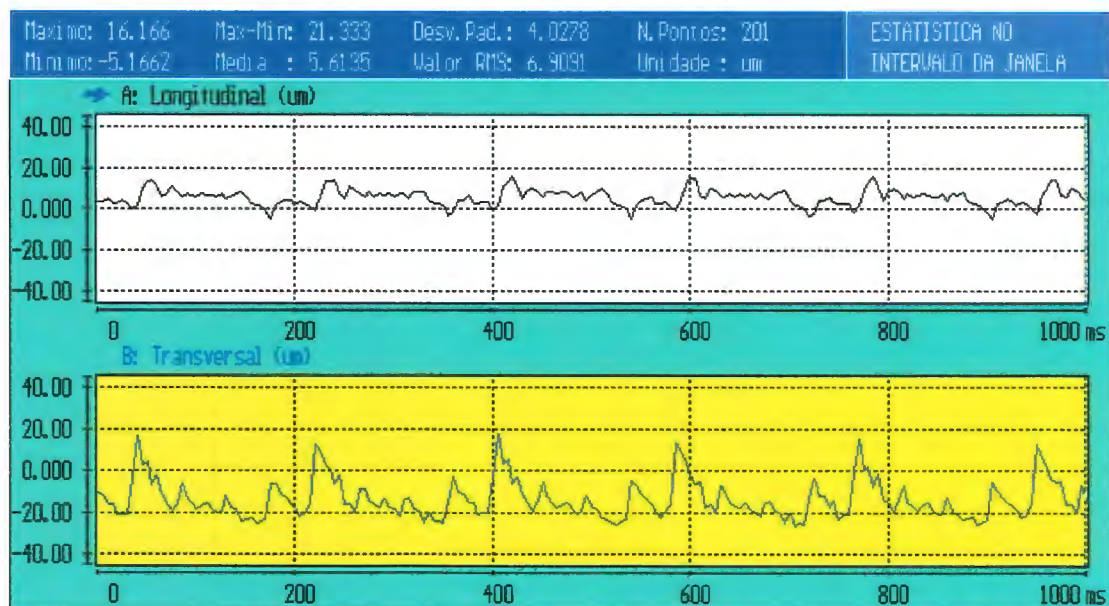


Figura 6.6 - Curva do ensaio para simulação de quebra com insertos originais

ENSAIO COM SIMULAÇÃO DE QUEBRA DE UM INSERTO E DESGASTE
SIMULADO DE 0,1 mm

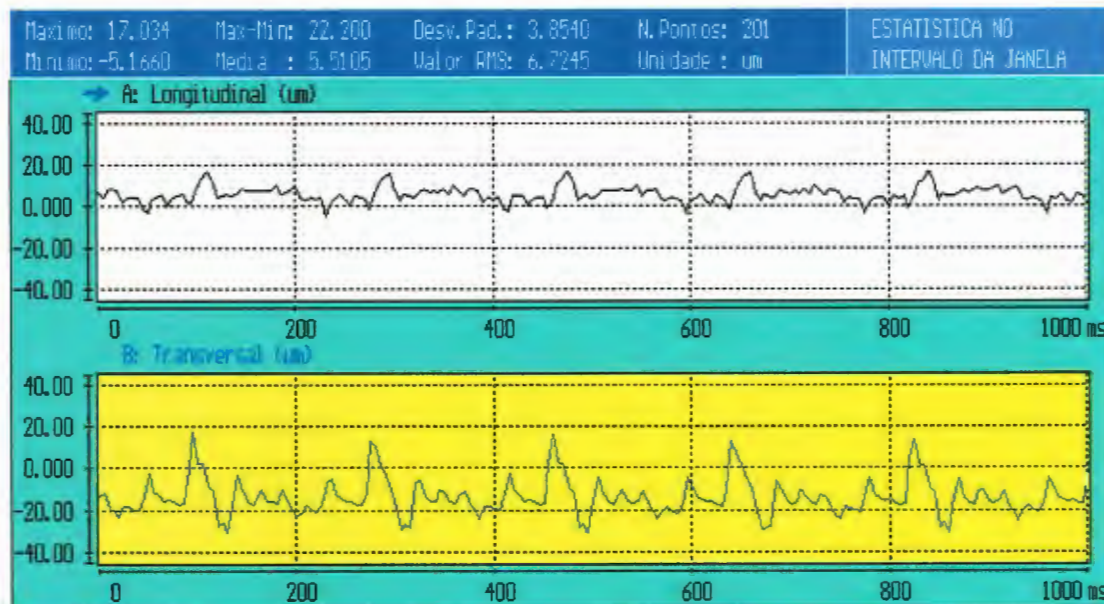


Figura 6.7 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,1 mm

ENSAIO COM SIMULAÇÃO DE QUEBRA DE UM INSERTO E DESGASTE
SIMULADO DE 0,3 mm

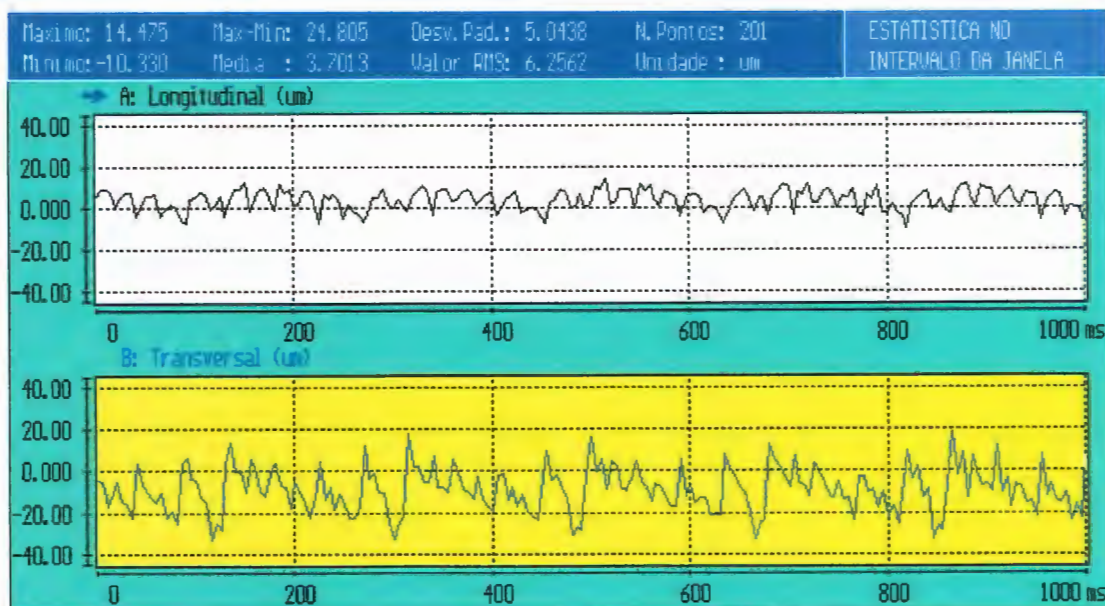


Figura 6.8 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,3 mm

ENSAIO COM SIMULAÇÃO DE QUEBRA DE UM INSERTO E DESGASTE
SIMULADO DE 0,4 mm

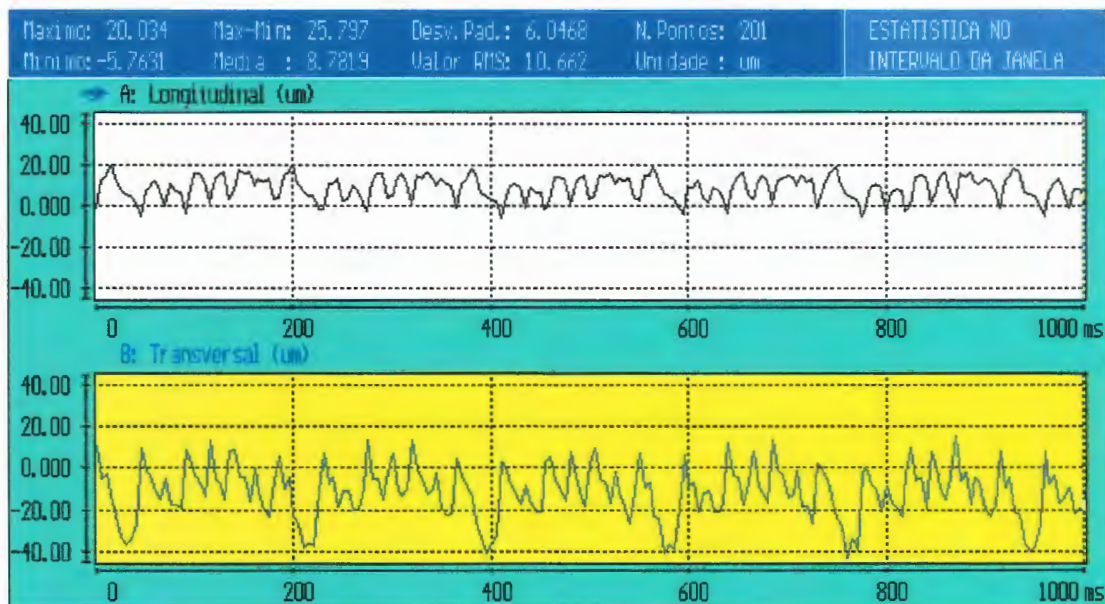


Figura 6.9 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,4 mm

ENSAIO COM SIMULAÇÃO DE QUEBRA DE UM INSERTO E DESGASTE
SIMULADO DE 0,5 mm

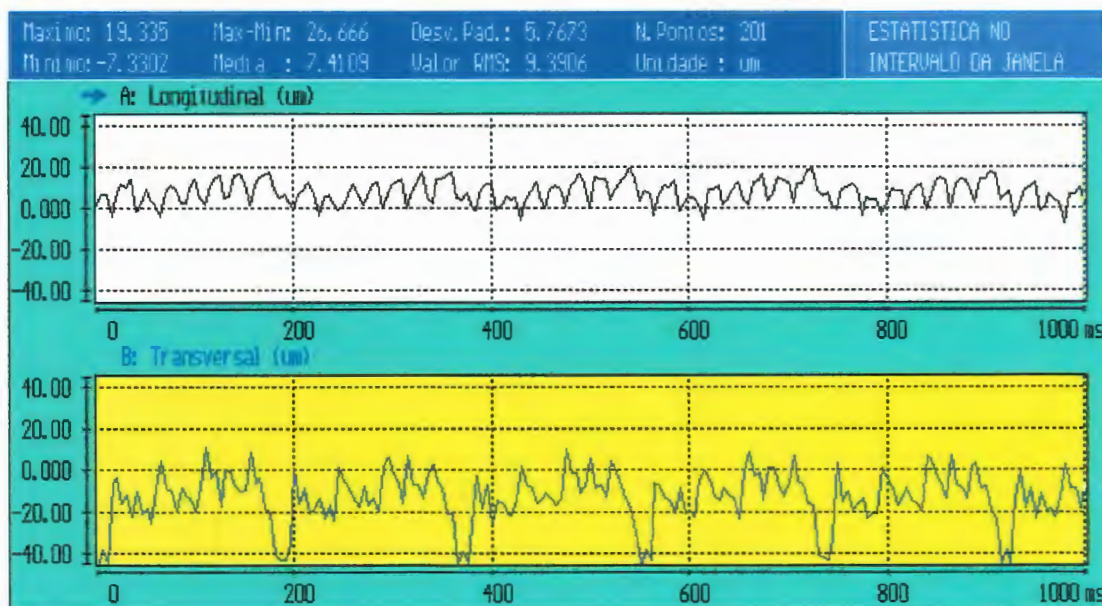


Figura 6.10 - Curva do ensaio simulando quebra de um inserto e desgaste de 0,5 mm

Na figura 6.11 estão algumas ampliações na escala vertical da figura 6.0 quando a ferramenta gira em vazio. Pode se notar que há uma defasagem temporal entre eles de $\sim 47\text{ms}$, que representam o tempo de $\frac{1}{4}$ de volta. Isto se deve ao posicionamento dos sensores na máquina, conforme mostrado figura 5.24. Os sinais de resposta dos sensores A e B apresentam o mesmo desenho de curva. É possível perceber-se o desvio de batimento captado pelo 1º sensor é também acusado pelo 2º sensor com as mesmas características da curva de resposta. Ambos os sinais limitam-se a uma amplitude de $9,05 \times 10^{-3} \text{ mm}$.

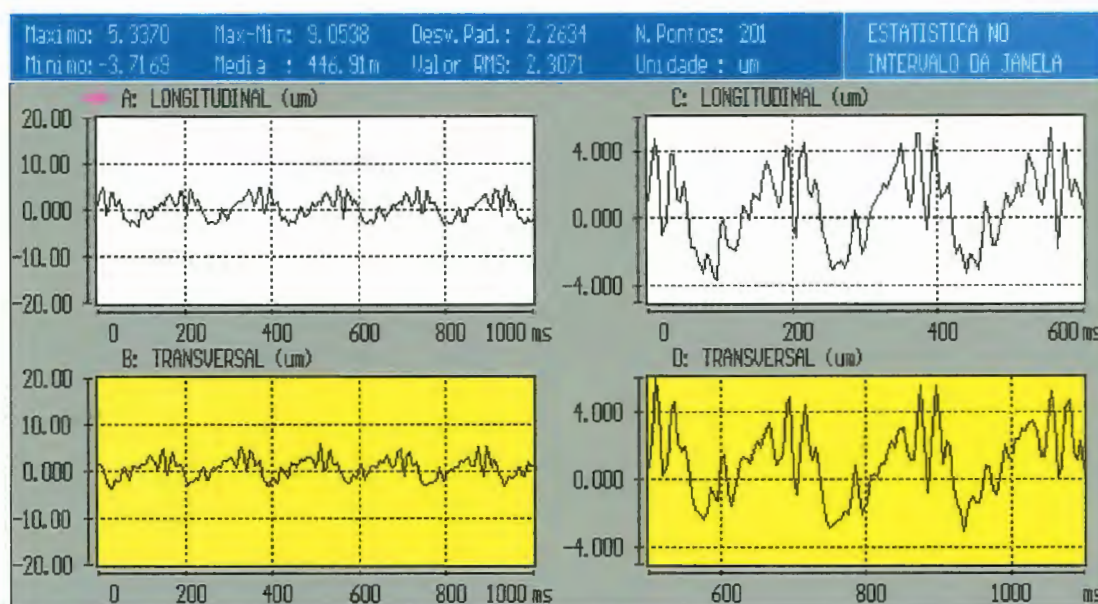


Figura 6.11 - Gráfico comparativo entre o sensor A e B

A observação das figuras 6.1 a 6.4 em seqüência, revela o aumento da amplitude dos sinais, de acordo com o crescimento de desgaste simulado de 0 a 0,4 mm. Observa-se também que há sempre maior amplitude do sinal na direção transversal, devido à maior componente da força de corte ser nesta direção. Esta força, por sua vez, é capaz de fletir o eixo-árvore, o que é detectado pelo sensor. As amplitudes variam aproximadamente entre 10 e 25 μm para a direção longitudinal e entre 30 e 40 μm para a direção transversal.

Da mesma forma que a análise anterior, a seqüência de figuras 6.6 a 6.10 mostra o crescente aumento de amplitude do sinal de acordo com o aumento do desgaste. Há porém, em todos os sinais um pico maior a cada volta da ferramenta (período de $\sim 0,188 \text{ s}$), o que é consequência da retirada de um inserto, simulando quebra. Novamente, a amplitude dos sinais oriundos da direção transversal é maior, em comparação com a direção longitudinal. As

amplitudes variam, aproximadamente, entre 20 e 25 μm na direção longitudinal e entre 45 e 60 μm na direção transversal.

Quando um inserto é quebrado, ou retirado, há um pequeno intervalo de tempo durante a volta no qual não há aresta de corte em contato com a peça. Isto porque o ângulo de engajamento ϕ é de $53,11^\circ$, formado pela composição entre raio da ferramenta e a profundidade de corte a_p , é menor do que o ângulo entre dois insertos consecutivos 45° , mas que sem um inserto torna-se 90° . Este intervalo sem contato permite ao eixo-árvore retornar de seu estado flexionado durante o corte. Este sinal pode ser melhor visualizado na figura 6.12, que mostra o mesmo sinal da figura 6.10, porém ampliado na escala vertical.

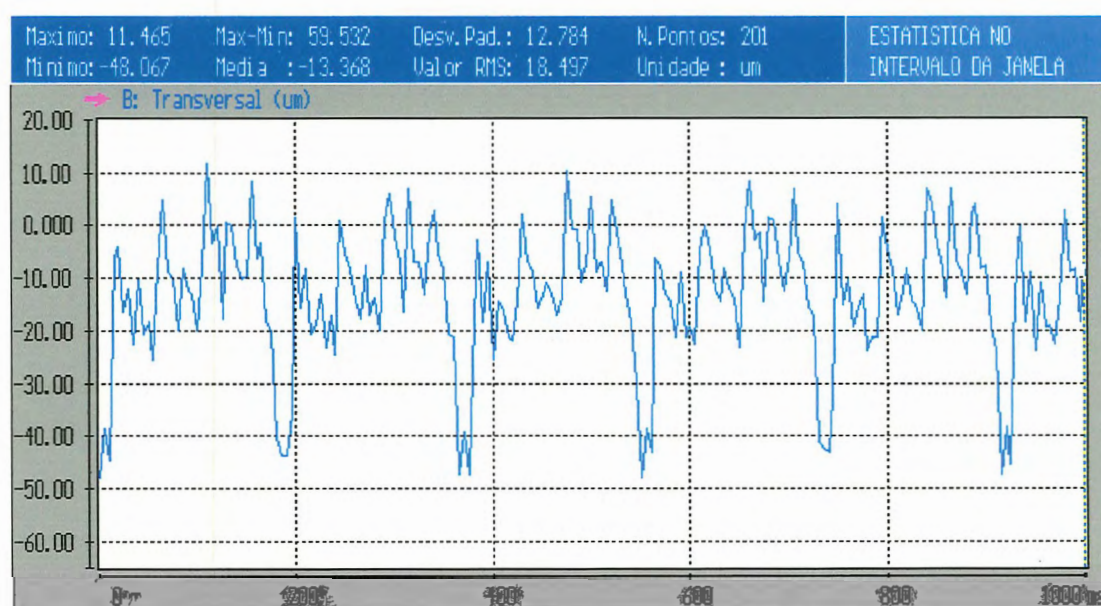


Figura 6.12 - Gráfico da simulação da quebra de um inserto

Como os picos do sinal provenientes da ausência de um inserto são perfeitamente distintos a cada ciclo, devido ao deslocamento havido no eixo-árvore da máquina, torna-se viável a detecção desses sinais através de equipamentos dedicados, tendo como base sensores de proximidade, com os avaliados nesse trabalho, para uso na detecção de quebra de ferramentas durante processos de fresamento de ranhuras de grande profundidade.

Os gráficos das figura 6.13 mostra o resumo dos resultados obtidos nos ensaio de fresamento. Neste gráfico tomou-se apenas a amplitude máxima do sinal em cada uma das condições ensaiadas.

Pode-se observar que há uma tendência de aumento dos valores de deslocamento de acordo com os valores de desgaste simulado. A mesma tendência se repete com a simulação de

quebra. Em função dessa tendência pode-se afirmar que há a possibilidade de usar esses sinais como uma ferramenta de auxílio ao operador, na detecção de quebras de ferramentas durante o processo de fresamento de ranhuras de grande profundidade em máquinas convencionais.

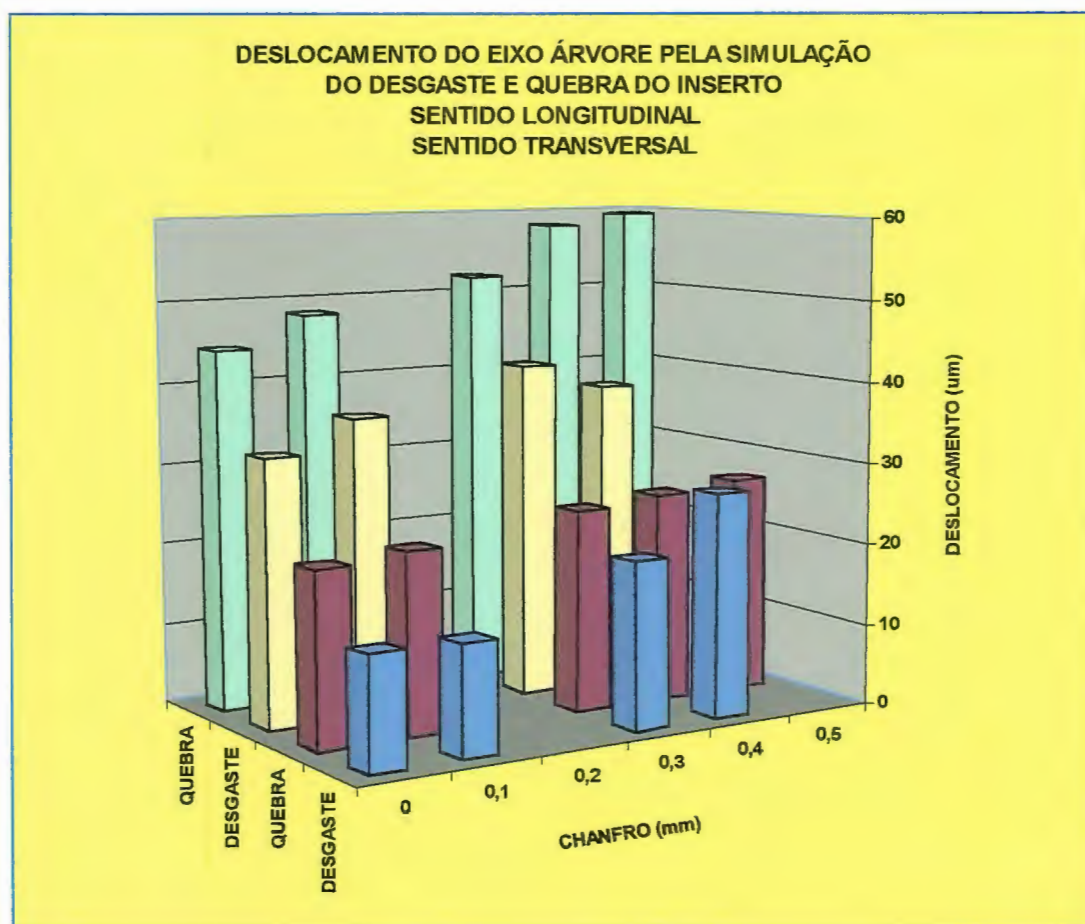


Figura 6.13 - Gráfico comparativo do deslocamento – Sentido horizontal e transversal

Os valores encontrados sugerem que o deslocamento obtido pela quebra, sempre são maiores que os obtidos pelo desgaste, tanto para o sentido transversal, como para o sentido longitudinal. A relação do deslocamento obtido no eixo-árvore da máquina no sentido transversal, é de aproximadamente 50% maior que o deslocamento obtido no sentido longitudinal. Como sugestão para um monitoramento mais econômico, sugere-se o monitoramento somente no sentido transversal, ou quando possível apenas no sentido da resultante das forças aplicadas na ferramenta pelas forças de corte oriundas do processo de fresamento.

Tomando como exemplo um gráfico que representa a simulação do desgaste e posterior quebra da ferramenta figura 6.12, onde existem picos do sinal a rotação, podemos

usá-los como base para uma proposta de desenvolvimento de um sistema de detecção de quebra de ferramentas no processo de fresamento de ranhuras de grande profundidade.

Através de um sistema eletrônico pode-se detectar picos que ultrapassem uma linha limítrofe de alerta (Threshold), o que indicaria ao operador a necessidade de parada para troca de ferramenta por desgaste. Pode-se ainda usar uma segunda linha limítrofe (Threshold), maior que a anterior, o qual indicará a interrupção sumária do corte devido à quebra da ferramenta. Isso é melhor ilustrado pela figura 6.14.

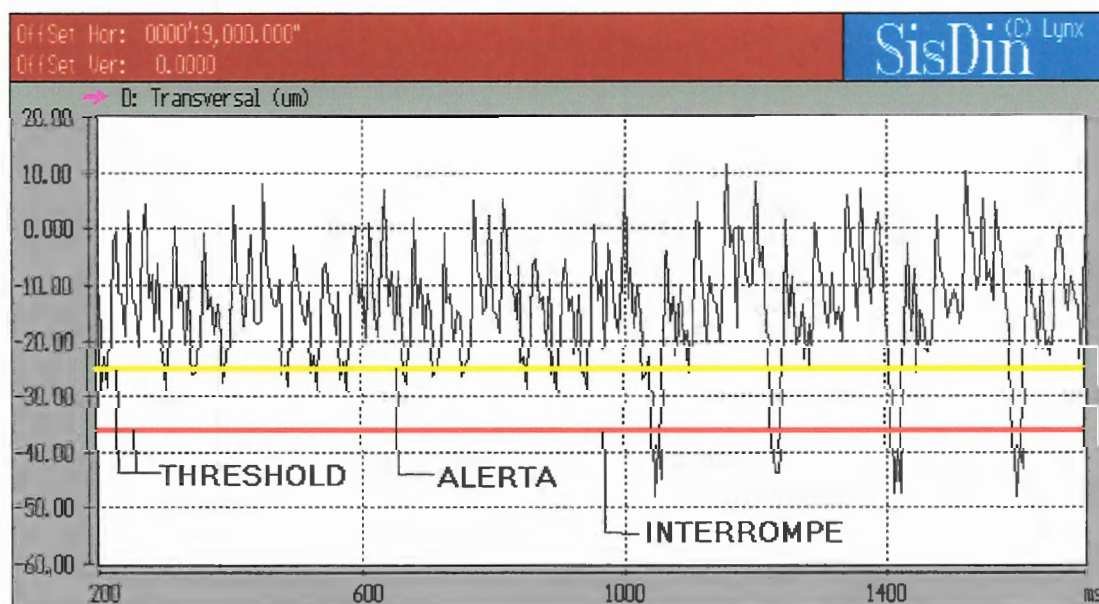


Figura 6.14 - Proposta de Linhas limítrofes (Threshold)

7 CONCLUSÕES

De acordo com os experimentos e discussão apresentados neste trabalho pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Os sensores de proximidade adotados neste trabalho possuem uma resolução da ordem de $1\ \mu\text{m}$. Os sensores montados na máquina foram capazes de medir desvios de batimento de ferramenta, que resultou da ordem de $9,5\ \mu\text{m}$.
- Os sinais obtidos pelos sensores demonstraram que houve um aumento da deflexão do eixo-árvore, de acordo com o aumento do desgaste dos insertos. Este aumento durante o corte foi da ordem de 10 a $25\ \mu\text{m}$ na direção longitudinal e de 30 a $40\ \mu\text{m}$ na direção transversal.
- Os sinais obtidos de forma equivalente, durante a simulação de quebra de um inserto, variam entre 20 e $25\ \mu\text{m}$ na direção longitudinal e entre 45 e $60\ \mu\text{m}$ na direção transversal.
- A fabricação de um circuito para a detecção de picos de sinal poderá servir para indicar o desgaste, quando os picos ultrapassarem um determinado valor limite. Um segundo limite mais alto poderia indicar a quebra de uma aresta, interrompendo imediatamente o processo, evitando danos à ferramenta, à peça ou à máquina.

7.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função dos resultados obtidos em todos os ensaios realizados terem sido satisfatórios, salientando os ensaios realizados em fresamento, julga-se ser possível dar continuidade a esse trabalho.

Para assegurar a viabilidade da proposta de utilização desses sensores como um sistema para monitoramento em tempo real do desgaste e quebra de ferramentas em fresamento, é necessário dar continuidade aos ensaios utilizando novos critérios, e que estes sejam os mais próximos possíveis das condições de corte reais previstas para a usinagem de ranhuras de grande profundidade.

Como é sabido, o monitoramento das condições da ferramenta é de fundamental importância para assegurar o sucesso das operações de fresamento, e que o monitoramento em tempo real proporciona tomada de ações emergenciais interrompendo a operação da máquina, evitando assim, danos generalizados nas peças que estão sendo fresadas ou mesmo nas máquinas.

Tendo em vista que para o uso prático desse sistema de monitoramento, alguns requisitos básico são necessários, devido à complexidade da operação de monitoramento, apresenta-se a seguir algumas propostas para trabalhos futuros.

- Ensaios em laboratório sob variadas condições de corte: (rotação, avanço e profundidade de corte);
- Efetuar ensaios próximo às condições reais de usinagem de ranhuras de grande profundidade;
- Utilizar outras máquinas de usinagem de grande porte tais como: fresadoras e mandrilhadoras, saindo do ambiente de laboratório, para aproximar os ensaios a uma condição real de trabalho;
- E finalmente desenvolver um sistema eletrônico capaz de detectar os picos do sinal emitido pelo sensor, quando submetido a condições severas de trabalho, devido à quebra e desgaste da ferramenta. Esse sistema deverá emitir um sinal de alerta quando houver desgaste, e interromper o processo não permitindo avanço da máquina quando os sinais ultrapassarem limites que indiquem a quebra, evitando por em risco a integridade da ferramenta, da máquina e da peça que está sendo usinada.

8 BIBLIOGRAFIA

ABDOU, G.; YIEN, J. (1995). Analisis of Force Patterns and Tool Life in Milling Operations. **The International Journal of Advanced Manufacturing Tecnology**, v. 10, p.11.

ALTINTAS, Y. (1992). Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements. **Journal of Engineering for Industry**. v. 114, p. 387, November.

ALTINTAS, Y.; YELLOWLEY, I.; TLUSTY, J. (1988). The Detection of Tool Breakage in Milling Operations. **Journal of Engineering for Industry**. V. 110, p. 271, August.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (1993). API 670. Noncontacting Vibration and Axial Position Monitoring System. 3ª ed. Washington, DC - USA.

BIRLA, S. (1980) Sensor for Adaptative Control and Machine Diagnostics. **Technology of Machine Tools**. v. 4 Machine Tools Controls. ed. LLNL, p. 7.12-1 – 7.12-70.

BRAGHINI JUNIOR, A . (1998). Investigação do desgaste de ferramentas de pcbn e metal duro no fresamento de topo de aços endurecidos. São Carlos. 106p. **Dissertação (Mestrado)** - Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; INASAKI, I.; KETTELER, G.; KONIG, W.; TETI, R. (1995). Tool Conditon Monitoring (TCM) - The Status of Research and Industrial Application. **Annals of the CIRP**. v. 44/2, p. 541-567.

CAROLAN, T. A. T.; HAND, D. P.; BARTON, J. S.; JONES, J. D. C.; WILKINSON, P.; REUBEN, R., L. (1996). Assessment of Tool Wear in Milling Using Acoustic Emission Detected by a Fiber-Optic Interferometer. **Journal of Manufacturing science and Engineering**. v. 118, p. 429, August.

CHRYSSOLOURIS, G.; DOMROESE, M.; BEAULIEU, P. (1992). Sensor Synthesis for Control of Manufacturing Process. **Journal of Engineering for Industry**. v. 114, p. 159, May.

COLGAN, J.; CHIN, H.; DANAI, K.; HAYASHI, S. R. (1994). On-Line Tool Breakage Detection in Turning: A Mult-Sensor Method. **Journal of Engineering for Industry**. v. 116, p. 117 February.

DOEBELIN, E. (1983). **Measurement Systems Application and Design**. Singapore 3. ed. International Student Edition. McGraw-Hill Book Co.

DORNFELD, D., A. (1993). Present State of Tool and Process Monitoring in Cutting. **New Developments in Cutting**, VDI Berichte n° 988, p.363-376 ,Düsseldorf, Germany.

DORNFELD, D., A. (1995). Monitoring Technologies for Intelligent Machining. Proc. **CIRP/VDI**. Conference on Monitoring of Machining and Forming Processes. VDI Berichte n° 1179, p. 71-90, Düsseldorf, Germany.

DU, R.; ELBESTAWI, M. A .; WU, S. M. (1995). Automated Monitoring of Manufacturing Processes, Part 1: Monitoring Methods. **Journal of Engineering for Industry**. v. 117, p. 121, May.

FERRARESI, D. (1972). **Usinagem dos metais**. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 4ª Edição.

FERRARESI, D. (1977). **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo, Edgard Blücher.

HEWLETT PACKARD (1991). Effective Machinery Measurements using Dynamic Signal Analyzers. v.243-1, p. 1-10, October.

INASAKI, I. (1985). Monitoring of Dressing and Grinding Process with AE Signals. **Annals of the CIRP**. v. 34/1, p. 277-280.

INASAKI, I.;BLUM, T.; SUZUKI, H.; ITAGAKI, H.; SATO, M. (1988). A Practical Mounting Device for an AE Sensor for the Failure Detection of multipoint Cutting Tools. **USA-Japan Symposium. On Flexible Automation, ASME**. New York. V. 2, p.1017-1024.

INASAKI, I. (1994). Monitoring of Cutting and Grinding in Japan. Proc. Workshop on Tool Condition Monitoring. **CIRP**, v.III, p. 43-49.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. (1974). ISO 2372. Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards. 1. ed. Switzerland.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. (1986). ISO 1940/1. Mechanical vibration - Balance quality requirements of rigid rotors - Part 1: Determination of permissible residual unbalance. 1. Ed. Switzerland.

JAWAIR, I. S.; LUTTERVELT, van C. A. (1993). Recent Developments in Chip Research and Applications. **Annals of the CIRP**. v. 44/2, p. 569-585.

KEGG, R. (1993). Proc. First Workshop on Tool Condition Monitoring (TCM). **CIRP**, Paris, January.

KEGG, R. (1994). Sensor History – Machine Tools Applications Table. Proc. Workshop on Tool Condition Monitoring, v. III. p. 51, **CIRP**, Paris.

KLUFT, W. (1997). Monitorando a ferramenta e visualizando o processo de corte, melhora-se a produção. **Máquinas e Metais**, nº. 378, p.20 - 49, Julho.

LAYNE, M. (1997). Corrigir desbalanceamento em suportes de ferramentas? Sim, é necessário. **Máquinas e Metais**, nº. 381, p. 18 - 33, Outubro.

LUTTERVELT, van C. A; JAWAIR, I. S. (1993). Recent Developments in Chip Research and Applications. **Annals of the CIRP**. v. 44/2, p. 569-585.

MATSUMOTO, T.; INASAKI, I.; OGAWA, K. (1993). Monitoring of Grinding Process with a Sensor Integrated CBN Wheel. **SME Technical paper**, MR 93-367.

MICHELETTI, D. F.; KOENING, W.; VICTOR, H. R. (1976). In Process Tool Wear Sensors for Cutting Operations. **Annals of the CIRP**. v. 25/2, p. 483-496.

Modern Metal Cutting. - A practical handbook. (1994). Sandviken, Tofters Tryckeri AB.

MORIWAKI, T. (1993). Proc. First Workshop on Tool Condition Monitoring (TCM). **CIRP**, Paris, January.

MORIWAKI, T. (1994). Intelligent Machine Tool: Perspective and Themes for Future Development. **Manufacturing Science and Engineering-ASME**. v. 2, p. 841-849.

Process Monitoring. Brankamp ProcessMonitoring® system

[Http://www.brankamp.com/html/default_how_it_works.html](http://www.brankamp.com/html/default_how_it_works.html). (20/04/98).

PROMESS – Tool Condition Monitoring. (1996). Brighton, Michigan - USA.

RANGWALA, S.; DORNFELD, D. A. (1989). Learning and Optimization of Machining Operation using Computing Abilities of Neural Networks. **IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics**, v. 19, nº 2, p. 299 – 314.

RAMAMURTHI, K.; HOUGH, JR. C. L. (1993). Intelligent Real-Time Predictive Diagnostics for Cutting Tools and Supervisory Control of Machining Operations. **Transactions of the ASME**, v. 115, p. 268, August.

SATA, T.; MATSUSHIMA, K.; NAGAKURA, T.; KONO, E. (1973). Learning and Recognition of Cutting States by Spectrum Analysis. **Annals of the Cirp**. v. 22/1, p. 41 - 42.

Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining - SIMON-. Intelligent Manufacturing Systems. Mitsubishi Materials Corporation. [Http://www.ims.org/simon.htm](http://www.ims.org/simon.htm). (20/04/98).

SHIRAISHI, M. (1989) Scope of In Process Measurement, Monitoring and Control Techniques in Machining Process – Part 3 In Process Techniques for cutting Processes and Machines Tools. **Precision Engineering**, v. 11/1, p. 39 – 47.

SOUSA, M.; DUARTE, M.; MACHADO, A . (1997). Utilizando a vibração mecânica para monitorar a usinagem pôr fresamento. **Máquinas e Metais**, nº. 379, p. 102 - 105, Agosto.

TAKATA, S.; AHN, J. H.; MIKI, M.; MIYAO, Y.; SATA, T. (1986). A Sound Monitoring System for Fault Detection of Machine and Machining States. **Annals of the Cirp**, v. 35/1 p. 289 – 292.

TARN, J. H.; TOMIZUKA, M. (1989). On-Line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling. **Transactions of the ASME**, v. 111, p. 206, august

TARNG, Y. S. (1993). Monitoring of Fracture in Milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Tecnology**, v. 8, p.2.

TARNG, Y. S.; HSEIH, Y. W.; HWANG, S., T. (1994). An intelligent Sensor for Monitoring Milling Cutter Breakage. **The International Journal of Advanced Manufacturing Tecnology**, v. 9, p.141.

TETI, R. (1995). A review of Tool Condition Monitoring Literature Date Base. **Annals of the CIRP**. v. 44/2, p. 659-666.

TLUSTY, J.; ANDREWS, G.,C. (1983). A critical Review of Sensors for Unmanned Machining. **Annals of the CIRP**. v. 32/2, p. 563-572.

TÖNSHOFF, H. K.; WULFSBERG, J. P.; KALS, H. J. J.; KONIG, W. (1988). Development and Trends in Monitoring and Control of Machining Process. **Annals of the CIRP**. v. 37/2, p. 611-622.

Tool and process monitoring - perfect monitoring. (1995). ARTIS, Bisingen-Behringen, Germany.

Transducer Systems – Rotating Machinery Information System and Services. (1990). 35^a Edition, Bentry Nevada Corporation –Minden, Nevada - USA.

UEHARA, K.; TAKESHITA, H. (1989). Prognostication of the Chipping of the Cutting Tools. **Annals of the Cirp**. v. 38/1, p. 95 - 98.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - EESC. (1996). São Paulo. Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP. 2. Ed.

Vibração monitoring system - VIMOS. The six sense. (1988). Asea Brown Boveri - Västerås, Sweden.

WAKUDA, M.; INASAKI, I.; OGAWA, K.; TAKAHARA, M. (1993). Monitoring of the Grinding Process with na AE sensor Integrated CBN Wheel. **Journal of Advanced Automation Technology**. v. 5/4 n° 1, p. 179-184.

WEIS, W. (1994). Survey: Industrial Applications of TCM System. University of Karlsruhe, Germany.

WU, C.; FURNESS, R. (1995). Intelligent Sensor-based Manufacturing Challenges and Opportunities. Proc. **CIRP/VDI**. Conference on Monitoring of Machining and Forming Processes. VDI Berichte n° 1179, p. 1-15, Düsseldorf, Germany.

APÊNDICE

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (q_i) ENTRE 0.50 mm ~ 2,50 mm

q_i	q_0	q_i^2	$q_i q_0$	m	$m q_i$	b	$b - q_0$	$(m q_i + b - q_0)^2$
0,25	1,87	0,0625	0,4675	8,003	2,0008	0,068	-1,802	0,03950
0,50	4,10	0,2500	2,0500	8,003	4,0015	0,068	-4,032	0,00093
0,75	5,99	0,5625	4,4925	8,003	6,0023	0,068	-5,922	0,00644
1,00	7,99	1,0000	7,9900	8,003	8,0030	0,068	-7,922	0,00656
1,25	10,03	1,5625	12,5375	8,003	10,0038	0,068	-9,962	0,00174
1,50	12,15	2,2500	18,2250	8,003	12,0045	0,068	-12,082	0,00601
1,75	14,20	3,0625	24,8500	8,003	14,0053	0,068	-14,132	0,01607
2,00	16,22	4,0000	32,4400	8,003	16,0060	0,068	-16,152	0,02132
2,25	18,10	5,0625	40,7250	8,003	18,0068	0,068	-18,032	0,00064
2,50	19,87	6,2500	49,6750	8,003	20,0075	0,068	-19,802	0,04223
2,75	21,45	7,5625	58,9875	8,003	22,0083	0,068	-21,382	0,39219
16,50	131,97	31,625	252,44					0,53362
272,25								
13,50	108,65	24,000	192,985					0,10193
182,25								

$$m = \frac{N \sum q_i q_0 - (\sum q_i)(\sum q_0)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} = \frac{7,92509}{8,00267} = 8,00267$$

$$S_{q_0}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_0)^2 = 0,048511$$

$$S_{q_0}^{2*} = 0,011326$$

$$b = \frac{(\sum q_0)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_0)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} = \frac{0,10964}{0,06822} = 0,06822$$

$$S_m^2 = \frac{N S_{q_0}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} = 0,007056$$

$$S_m^{2*} = 0,003020$$

$$S_b^2 = 0,02029$$

$$S_{q_i}^2 = 0,000772$$

$$S_b^{2*} = 0,00805$$

$$S_{q_i}^{2*} = \frac{S_{q_0}^2}{m^2} = 0,000177$$

Tabela A.01 - Ensaio com deslocamento entre 0.25 mm e 2.5 mm

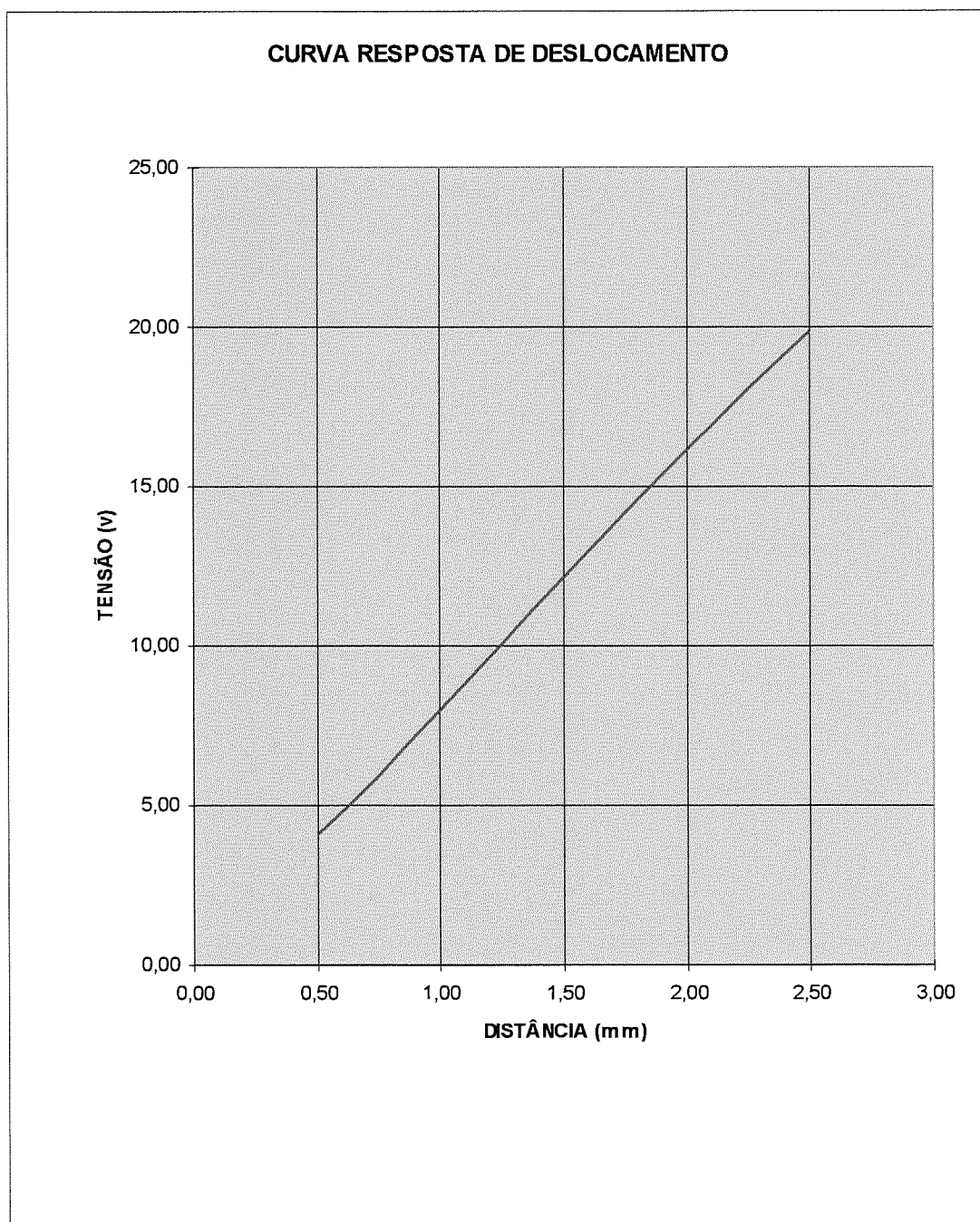


Figura A.01 - Curva para resposta de deslocamento entre 0,50mm ~ 2,50mm.

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (q_i) ENTRE 0,25 mm ~ 2,75 mm

q_i	q_o	q_i^2	$q_i q_o$	m	$m q_i$	b	$b - q_o$	$(m q_i + b - q_o)^2$
0,25	1,87	0,0625	0,4675	7,925	1,9813	0,11	-1,76	0,04895
0,50	4,10	0,2500	2,0500	7,925	3,9625	0,11	-3,99	0,00076
0,75	5,99	0,5625	4,4925	7,925	5,9438	0,11	-5,88	0,00406
1,00	7,99	1,0000	7,9900	7,925	7,9250	0,11	-7,88	0,00202
1,25	10,03	1,5625	12,5375	7,925	9,9063	0,11	-9,92	0,00019
1,50	12,15	2,2500	18,2250	7,925	11,8875	0,11	-12,04	0,02326
1,75	14,20	3,0625	24,8500	7,925	13,8688	0,11	-14,09	0,04895
2,00	16,22	4,0000	32,4400	7,925	15,8500	0,11	-16,11	0,06760
2,25	18,10	5,0625	40,7250	7,925	17,8313	0,11	-17,99	0,02520
2,50	19,87	6,2500	49,6750	7,925	19,8125	0,11	-19,76	0,00276
2,75	21,45	7,5625	58,9875	7,925	21,7938	0,11	-21,34	0,20589
16,50	131,97	31,625	252,44					0,42964
272,25								
13,50	108,65	24,000	192,985					0,17480
182,25								

	m		$S_{q_o}^2$
$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	7,92509		0,03906
	m^*	$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2$	$S_{q_o}^{2*}$
	8,00267		0,01942
	b		S_m^2
$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	0,10964		0,00568
	b^*	$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	S_m^{2*}
	0,06822		0,00518
	S_b^2		$S_{q_i}^2$
$S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	0,01633		0,00062
	S_b^{2*}	$S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2}$	$S_{q_i}^{2*}$
	0,01381		0,00030

Tabela A.02 - Ensaio com deslocamento entre 0.25 mm e 2.75 mm

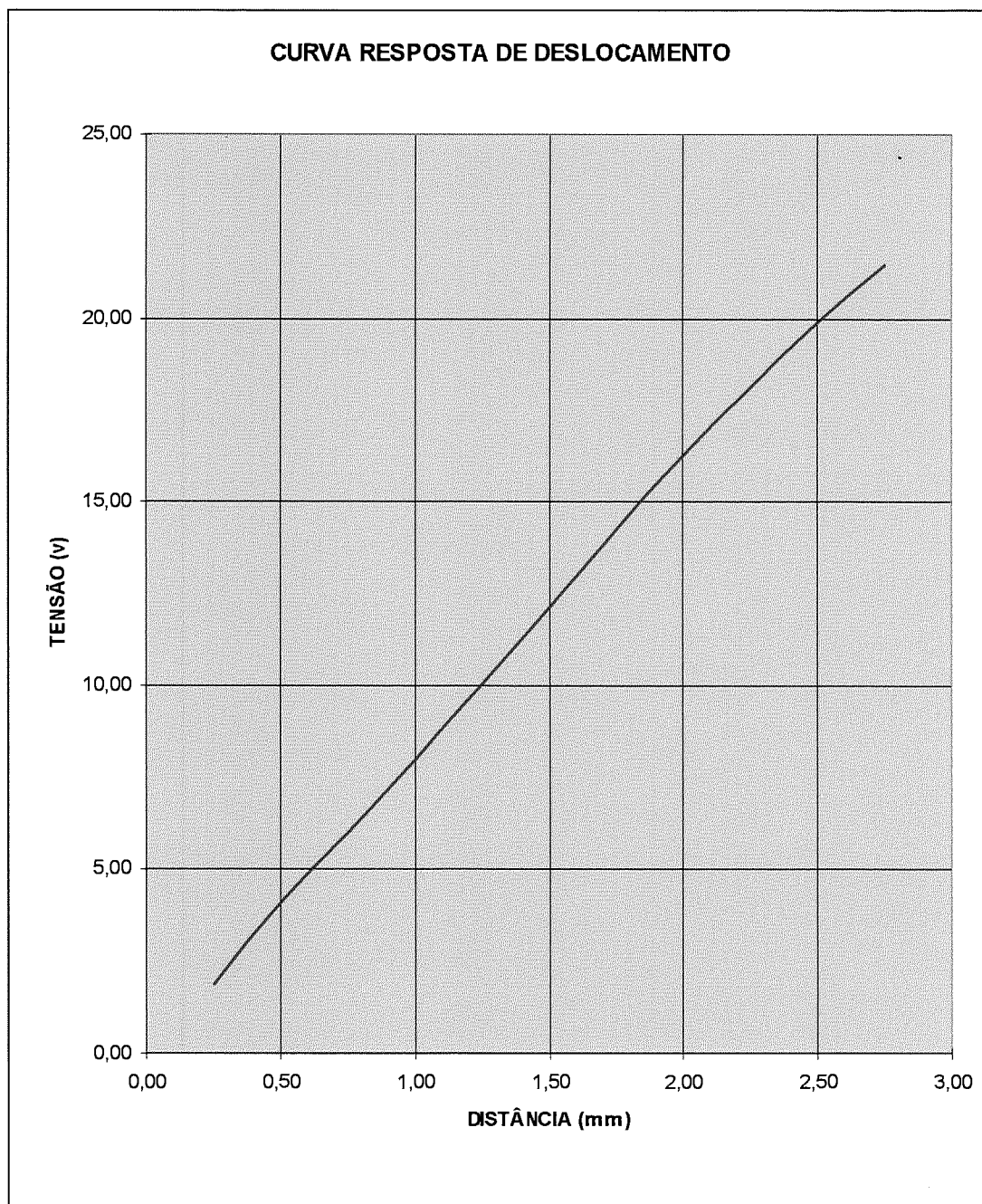


Figura A.02 - Curva para resposta de deslocamento entre 0,25mm ~ 2,75mm.

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (q_i) ENTRE 1,00 mm ~ 1,10 mm

q_i	q_o	q_i^2	$q_i q_o$	m	$m q_i$	b	$b - q_o$	$(m q_i + b - q_o)^2$
1,000	7,994	1,0000	7,9940	8,016	8,0160	-0,0209	-8,0149	0,0000012
1,010	8,076	1,0201	8,1568	8,016	8,0962	-0,0209	-8,0969	0,0000005
1,020	8,156	1,0404	8,3191	8,016	8,1763	-0,0209	-8,1769	0,0000003
1,030	8,237	1,0609	8,4841	8,016	8,2565	-0,0209	-8,2579	0,0000020
1,040	8,316	1,0816	8,6486	8,016	8,3366	-0,0209	-8,3369	0,0000001
1,050	8,395	1,1025	8,8148	8,016	8,4168	-0,0209	-8,4159	0,0000008
1,060	8,477	1,1236	8,9856	8,016	8,4970	-0,0209	-8,4979	0,0000009
1,070	8,557	1,1449	9,1560	8,016	8,5771	-0,0209	-8,5779	0,0000006
1,080	8,639	1,1664	9,3301	8,016	8,6573	-0,0209	-8,6599	0,0000069
1,090	8,718	1,1881	9,5026	8,016	8,7374	-0,0209	-8,7389	0,0000021
1,100	8,794	1,2100	9,6734	8,016	8,8176	-0,0209	-8,8149	0,0000073
11,550	92,359	12,1385	97,06513					0,0000228
133,403								
9,450	75,571	9,929	79,39773					

$$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad m = 8,01636 \quad S_{q_o}^2 = 0,0000021$$

$$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2 \quad S_{q_o} = 0,0014386$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad b = -0,0209 \quad S_m^2 = 0,0001881$$

$$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad S_m = 0,0137167$$

$$S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad S_b^2 = 0,00021 \quad S_{q_i}^2 = 0,0000000$$

$$S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2} \quad S_{q_i} = 0,0001795$$

Tabela A.03 - Ensaio com deslocamento entre 1,00 mm e 1,10 mm

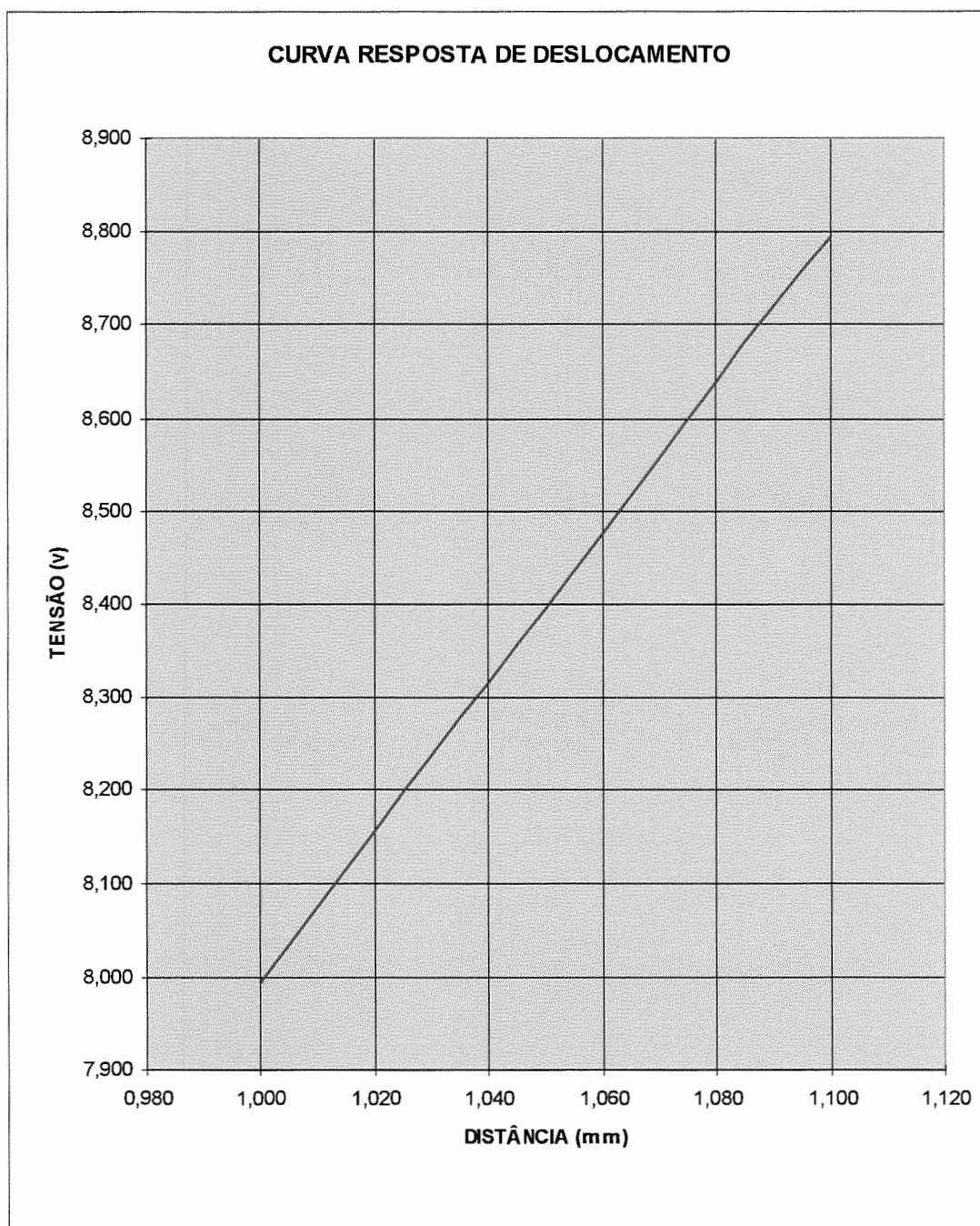


Figura A.03 - Curva para resposta de deslocamento entre 1,00mm ~ 1,10mm.

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (q_i) ENTRE 1,00 mm ~ 2,00 mm

q_i	q_o	q_i^2	$q_i q_o$	m	$m q_i$	b	$b - q_o$	$(m q_i + b - q_o)^2$
1,00	7,99	1,000	7,9900	8,226	8,2260	-0,241	-8,231	0,00002
1,10	8,79	1,210	9,6690	8,226	9,0486	-0,241	-9,031	0,00031
1,20	9,62	1,440	11,5440	8,226	9,8712	-0,241	-9,861	0,00010
1,30	10,45	1,690	13,5850	8,226	10,6938	-0,241	-10,691	0,00001
1,40	11,26	1,960	15,7640	8,226	11,5164	-0,241	-11,501	0,00024
1,50	12,06	2,250	18,0900	8,226	12,3390	-0,241	-12,301	0,00144
1,60	12,90	2,560	20,6400	8,226	13,1616	-0,241	-13,141	0,00042
1,70	13,72	2,890	23,3240	8,226	13,9842	-0,241	-13,961	0,00054
1,80	14,54	3,240	26,1720	8,226	14,8068	-0,241	-14,781	0,00067
1,90	15,39	3,610	29,2410	8,226	15,6294	-0,241	-15,631	0,00000
2,00	16,22	4,000	32,4400	8,226	16,4520	-0,241	-16,461	0,00008
16,50	132,94	25,850	208,459					0,00384
272,25								
13,50	108,73	20,850	168,029					

$$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad \begin{matrix} m \\ 8,22636 \end{matrix} \quad \begin{matrix} S_{q_o}^2 \\ 0,00035 \end{matrix}$$

$$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2 \quad \begin{matrix} S_{q_o} \\ 0,01868 \end{matrix}$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad \begin{matrix} b \\ -0,2541 \end{matrix} \quad \begin{matrix} S_m^2 \\ 0,00032 \end{matrix}$$

$$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad \begin{matrix} S_m \\ 0,01781 \end{matrix}$$

$$S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad \begin{matrix} S_b^2 \\ 0,00075 \end{matrix} \quad \begin{matrix} S_{q_i}^2 \\ 0,0000052 \end{matrix}$$

$$S_b = \begin{matrix} S_b \\ 0,02731 \end{matrix} \quad \begin{matrix} S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2} \\ 0,00227 \end{matrix} \quad \begin{matrix} S_{q_i} \\ 0,00227 \end{matrix}$$

Tabela A.04 - Ensaio com deslocamento entre 1,00 mm e 2,00 mm

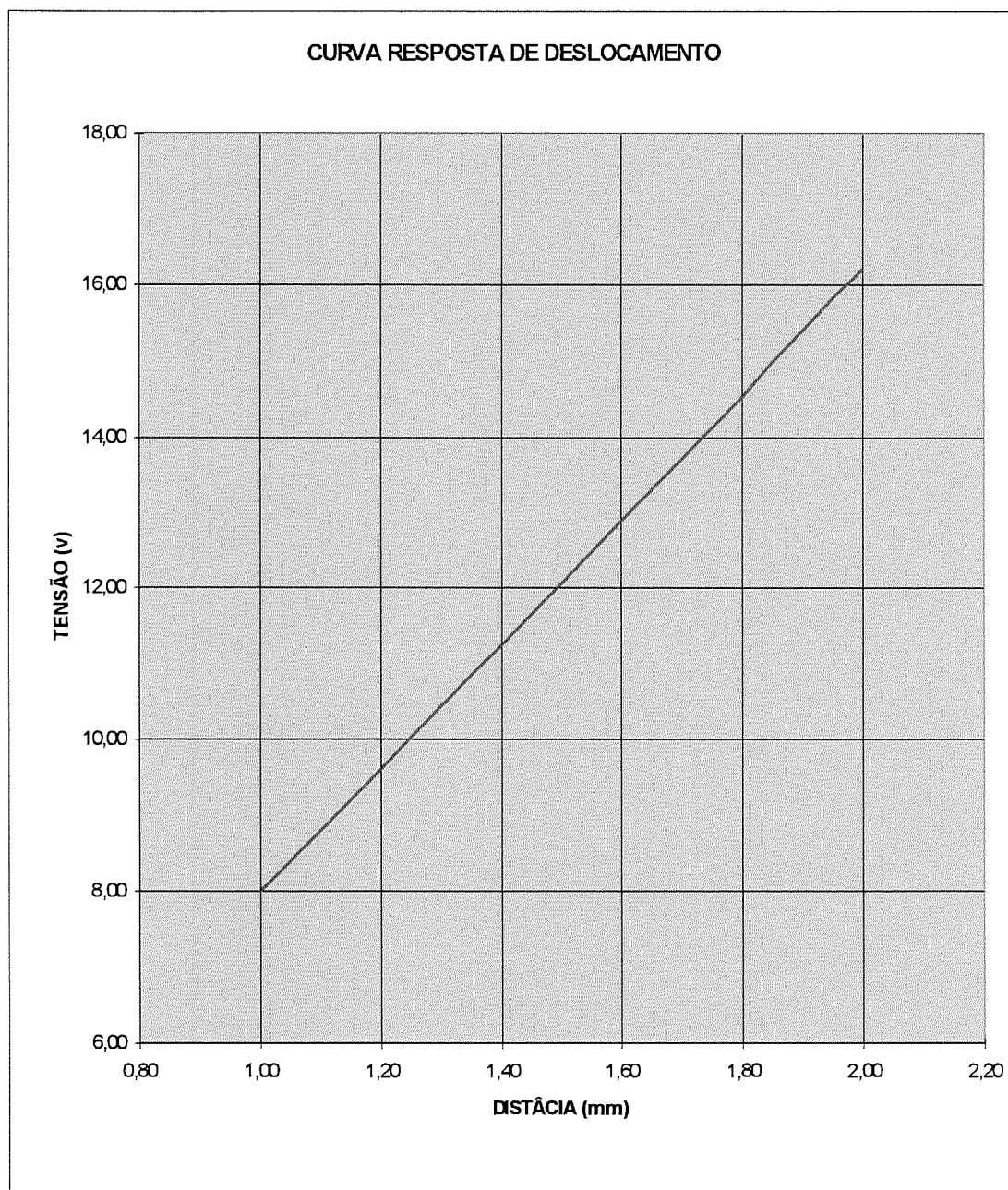


Figura A.04 - Curva para resposta de deslocamento entre 1,00mm ~ 2,00mm.

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (qi) ENTRE 1,00 mm ~ 1,01 mm

qi	qo	qi ²	qiqo	m	mqi	b	b - qo	(mqi + b - qo) ²
1,000	7,994	1,0000	7,9940	9,182	9,1820	-1,189	-9,183	0,000001
1,001	8,002	1,0020	8,0100	9,182	9,1912	-1,189	-9,191	0,000000
1,002	8,011	1,0040	8,0270	9,182	9,2004	-1,189	-9,200	0,000000
1,003	8,021	1,0060	8,0451	9,182	9,2095	-1,189	-9,210	0,000000
1,004	8,028	1,0080	8,0601	9,182	9,2187	-1,189	-9,217	0,000003
1,005	8,040	1,0100	8,0802	9,182	9,2279	-1,189	-9,229	0,000001
1,006	8,049	1,0120	8,0973	9,182	9,2371	-1,189	-9,238	0,000001
1,007	8,057	1,0140	8,1134	9,182	9,2463	-1,189	-9,246	0,000000
1,008	8,065	1,0161	8,1295	9,182	9,2555	-1,189	-9,254	0,000002
1,009	8,077	1,0181	8,1497	9,182	9,2646	-1,189	-9,266	0,000002
1,010	8,085	1,0201	8,1659	9,182	9,2738	-1,189	-9,274	0,000000
11,055	88,429	11,1104	88,8722					0,000010
122,213								
9,045	72,350	9,0903	72,7123					

$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	m 9,18182	$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2$	$S_{q_o}^2$ 0,000001
$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	b -1,1887	$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	S_{q_o} 0,000975 S_m^2 0,008639
$S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$	S_b^2 0,00873 S_b 0,09341	$S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2}$	S_m 0,092944 $S_{q_i}^2$ 0,000000 S_{q_i} 0,000106

Tabela A.05 - Ensaio com deslocamento entre 1,00 mm e 1,01 mm

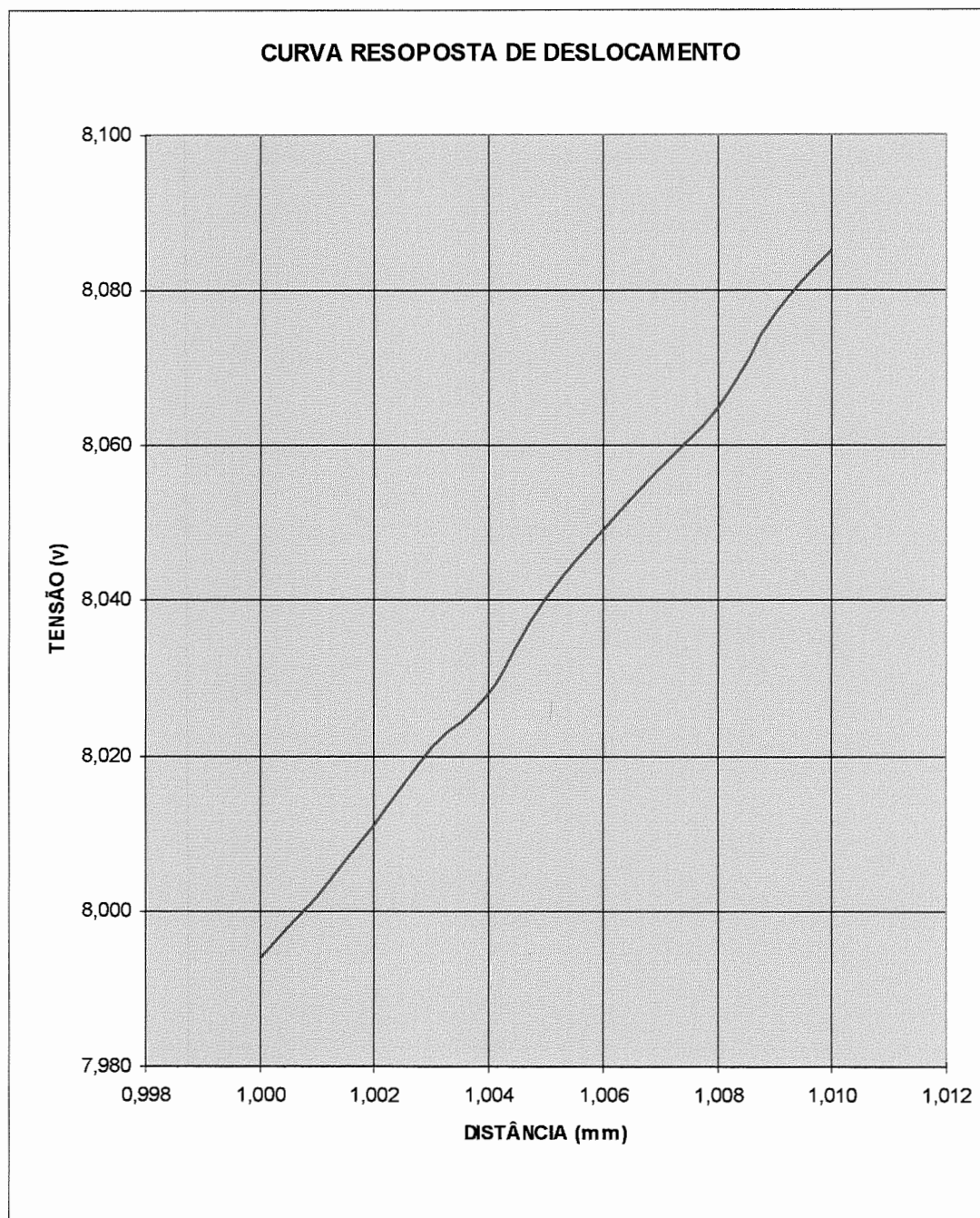


Figura A.05 - Curva para resposta de deslocamento entre 1,00mm ~ 1,01mm.

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (q_i) ENTRE 2,00 mm ~ 2,10 mm

q_i	q_o	q_i^2	$q_i q_o$	m	$m q_i$	b	$b - q_o$	$(m q_i + b - q_o)^2$
2,00	16,220	4,0000	32,4400	8,000	16,0000	0,217	-16,003	0,00001
2,01	16,300	4,0401	32,7630	8,000	16,0800	0,217	-16,083	0,00001
2,02	16,380	4,0804	33,0876	8,000	16,1600	0,217	-16,163	0,00001
2,03	16,460	4,1209	33,4138	8,000	16,2400	0,217	-16,243	0,00001
2,04	16,530	4,1616	33,7212	8,000	16,3200	0,217	-16,313	0,00005
2,05	16,610	4,2025	34,0505	8,000	16,4000	0,217	-16,393	0,00005
2,06	16,690	4,2436	34,3814	8,000	16,4800	0,217	-16,473	0,00005
2,07	16,780	4,2849	34,7346	8,000	16,5600	0,217	-16,563	0,00001
2,08	16,860	4,3264	35,0688	8,000	16,6400	0,217	-16,643	0,00001
2,09	16,940	4,3681	35,4046	8,000	16,7200	0,217	-16,723	0,00001
2,10	17,020	4,4100	35,7420	8,000	16,8000	0,217	-16,803	0,00001
22,55	182,79	46,2385	374,8075					0,00022
508,503								
18,45	149,55	37,83	306,6255					

$$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad m \quad 8,0000 \quad S_{q_o}^2 \quad 0,000020$$

$$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2 \quad S_{q_o} \quad 0,004462$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad b \quad 0,21727 \quad S_m^2 \quad 0,001810$$

$$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad S_m \quad 0,042543$$

$$S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad S_b^2 \quad 0,00761 \quad S_{q_i}^2 \quad 0,0000003$$

$$S_b \quad 0,08722 \quad S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2} \quad S_{q_i} \quad 0,000558$$

Tabela A.06 - Ensaio com deslocamento entre 2,00 mm e 2,10 mm

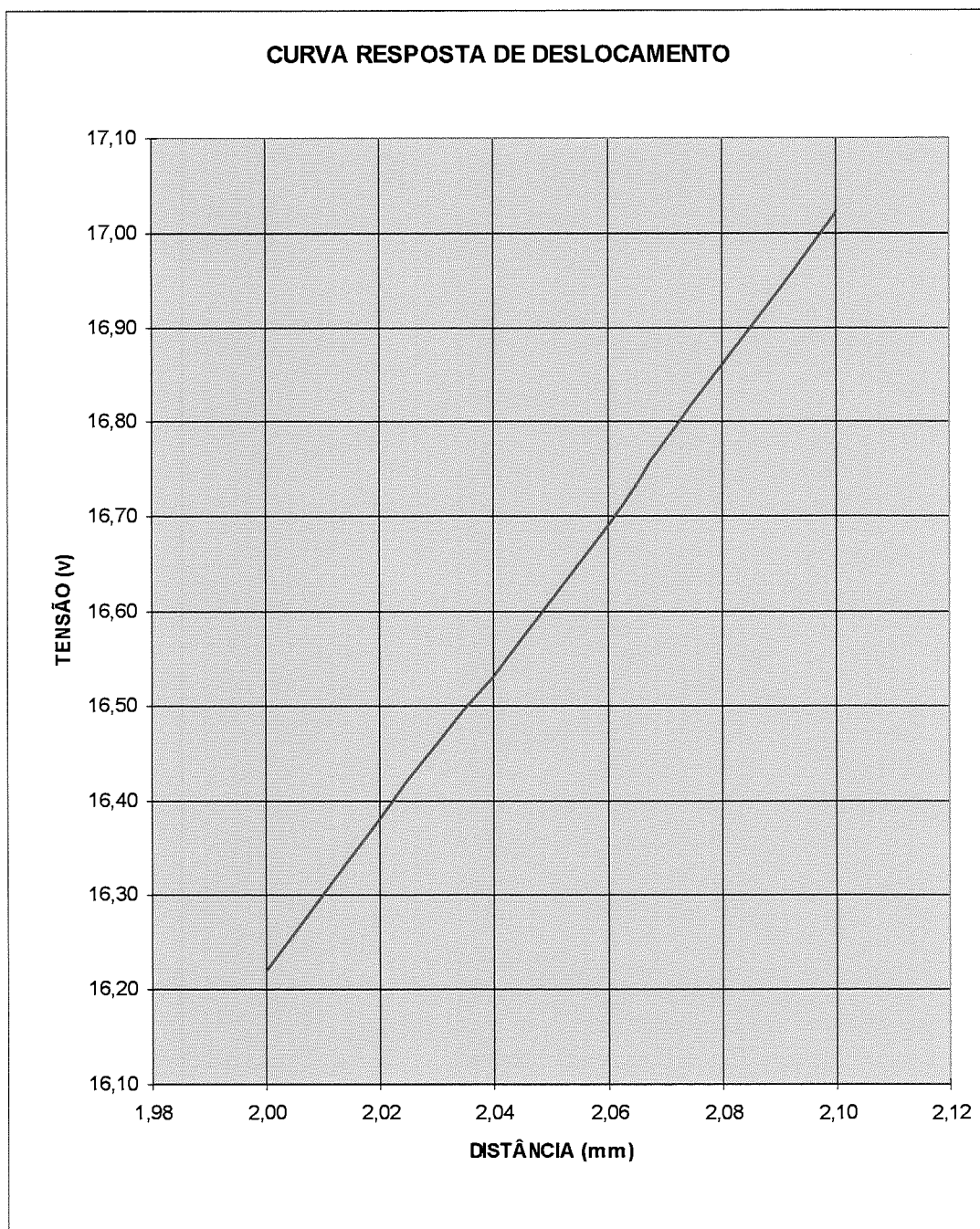


Figura A.06 - Curva para resposta de deslocamento entre 2,00mm ~ 2,10mm.

ENSAIO COM DESLOCAMENTO (q_i) ENTRE 1,25 mm ~ 1,30 mm

q_i	q_o	q_i^2	$q_i q_o$	m	$m q_i$	b	$b - q_o$	$(m q_i + b - q_o)^2$
1,250	10,034	1,5625	12,5425	8,135	10,1688	-0,1317	-10,1657	0,00001
1,255	10,077	1,5750	12,6466	8,135	10,2094	-0,1317	-10,2087	0,00000
1,260	10,120	1,5876	12,7512	8,135	10,2501	-0,1317	-10,2517	0,00000
1,265	10,159	1,6002	12,8511	8,135	10,2908	-0,1317	-10,2907	0,00000
1,270	10,203	1,6129	12,9578	8,135	10,3315	-0,1317	-10,3347	0,00001
1,275	10,240	1,6256	13,0560	8,135	10,3721	-0,1317	-10,3717	0,00000
1,280	10,279	1,6384	13,1571	8,135	10,4128	-0,1317	-10,4107	0,00000
1,285	10,318	1,6512	13,2586	8,135	10,4535	-0,1317	-10,4497	0,00001
1,290	10,359	1,6641	13,3631	8,135	10,4942	-0,1317	-10,4907	0,00001
1,295	10,404	1,6770	13,4732	8,135	10,5348	-0,1317	-10,5357	0,00000
1,300	10,445	1,6900	13,5785	8,135	10,5755	-0,1317	-10,5767	0,00000
14,025	112,638	17,8846	143,6358					0,00006
196,701								
11,475	92,159	14,6321	117,5148					

$$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad m = 8,13455 \quad S_{q_o}^2 = 0,000005$$

$$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2 \quad S_{q_o} = 0,002254$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad b = -0,1317 \quad S_m^2 = 0,001848$$

$$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad S_m = 0,042990$$

$$S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad S_b^2 = 0,00300 \quad S_{q_i}^2 = 0,0000001$$

$$S_b = 0,05482 \quad S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2} \quad S_{q_i} = 0,000277$$

Tabela A.07 - Ensaio com deslocamento entre 1,25 mm e 1,30 mm



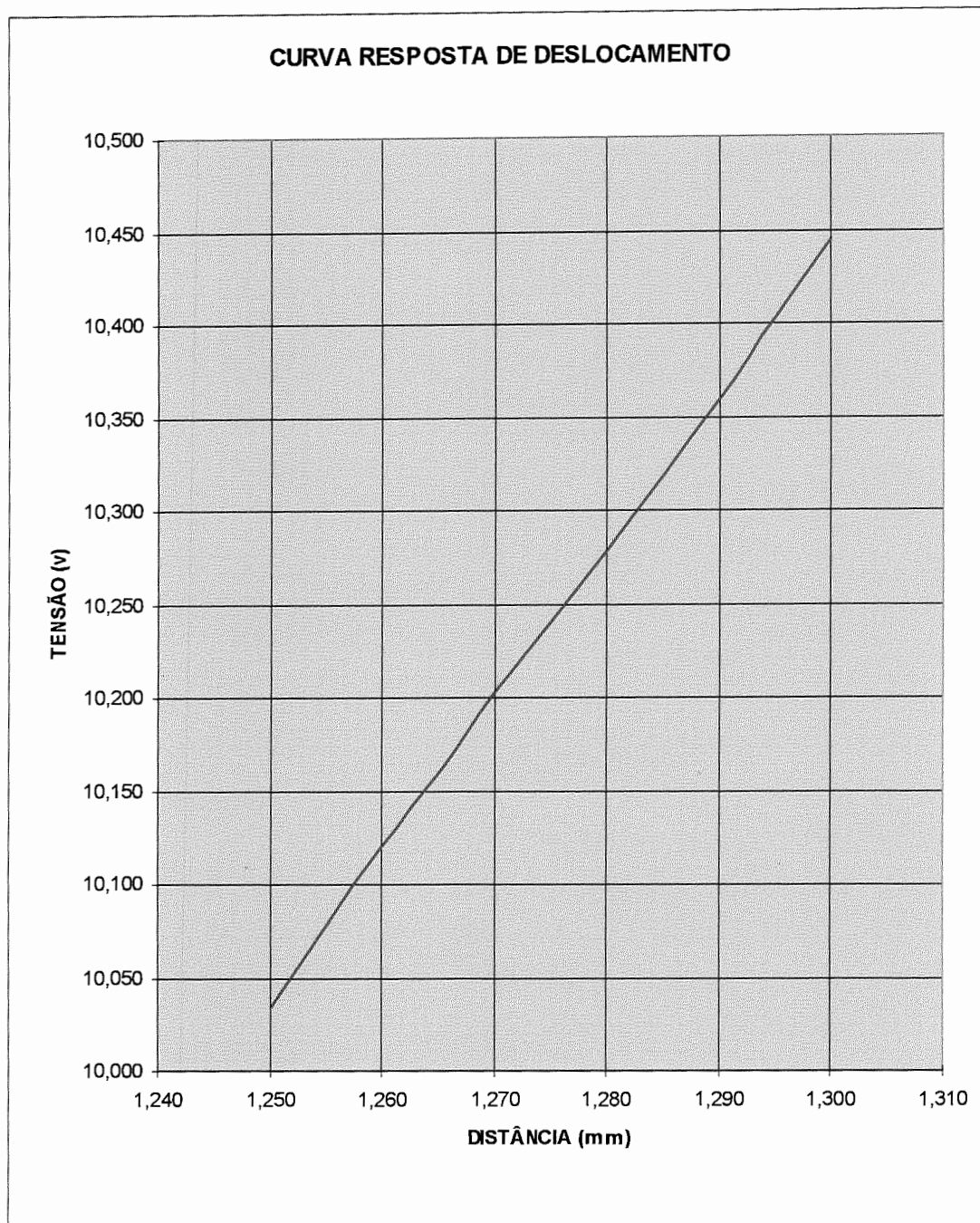


Figura A.07 - Curva para resposta de deslocamento entre 1,25mm ~ 1,30mm.