

MON  
620.178  
A159j  
TES/MEM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**IDEALIZAÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE  
ESCLERÔMETROS RETILÍNEOS TOTALMENTE  
COMPUTADORIZADOS**

Dissertação apresentada  
à Universidade Federal de Uberlândia por:

**ANTHONY ABRAHÃO**

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Mecânica

SISBI/UFU



1000215475

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Paulo Lépore Neto	- UFU (Orientador)
Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho	- UFU
Prof. Dr. João Maurício Rosário	- Unicamp
Prof. Dr. José Francisco Ribeiro	- UFU
Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco	- UFU

AGOSTO - 1999

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
BIBLIOTECA



SISBI/UFU  
215475

FU000325061

#### FICHA CATALOGRÁFICA

A159i

Abrahão, Anthony.

Idealização, projeto, construção e avaliação de esclerômetros retilíneos totalmente computadorizados / Anthony Abrahão. - Uberlândia, 1999.

121f. : il.

Orientador: Francisco Paulo Lé pore Neto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Materiais - Testes - Teses. 2. Desgaste mecânico - Teses. 3. Tribologia - Teses. 4. Revestimentos - Teses. 4. Equipamentos - Teses. 5. Automação - Teses. 6. Engenharia mecânica - Teses. I. Lé pore Neto, Francisco Paulo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 620.178 (043.3)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA  
Av. João Naves de Ávila 2160 Campus Santa Mônica Uberlândia - MG 38408-100  
Fone: 0342394149- FAX: 034 2394282

**ALUNO: ANTHONY ABRAHÃO**

**NÚMERO DE MATRÍCULA: 5962601-4**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Mecânica dos Solos e Vibrações**

**PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO**


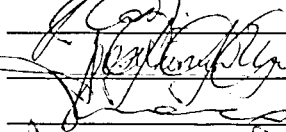
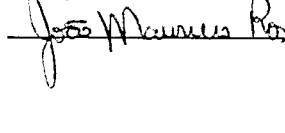


**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**

Idealização, Projeto, Construção e Avaliação de Esclerômetros Retilíneos

Totalmente Computadorizados

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco Paulo Lé pore Neto**

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1X do Campus Santa Mônica, em 06 de agosto de 1999, as horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Francisco Paulo Lé pore Neto, Prof. Dr.	UFU	
João Carlos Mendes Carvalho, Prof. Dr.	UFU	
José Francisco Ribeiro, Prof. Dr.	UFU	
Sinésio Domingues Franco, Prof. Dr.	UFU	
João Maurício Rosário, Prof. Dr.	UNICAMP	

Uberlândia, 06 de agosto de 1999.

A memória de um grande amigo e guerreiro Vandr  Calil Coelho.

## Agradecimentos

A minha família. Meus pais José Luiz e Maria de Lourdes. Meus irmãos Marcelo, Polyana, Alexandre, Cynthia e Etienne. Meus sobrinhos Caroline, Patrick e Lucas. E minha companheira Luana, pelo amor, confiança, amizade e constantes incentivos.

A Francisco Paulo Lépre Neto, orientador deste trabalho, pelo convívio e exemplo de integridade acadêmica. Um brilhante cientista que sempre manteve viva a engenharia em sua carreira acadêmica.

A José Daniel Biasoli de Mello, co-orientador e idealizador deste trabalho, sem o qual este não seria possível.

A João Carlos Mendes Carvalho, orientador de iniciação científica durante todo o curso de Graduação, por despertar em mim a vocação científica.

À toda equipe do Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia, pelo apoio e amizade. Aos Professores Sinésio, Raslan, Henara, Pedro, Haroldo e Rafael, e aos demais funcionários Ângela, Eunice, Ivo e Mordente.

A Alcimar Barbosa Soares pela preciosa contribuição técnica ao trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela inestimável colaboração à minha formação ética, científica e acadêmica.

A todos os colegas de dentro e fora do Laboratório de Vibrações dos Sistemas Mecânicos pelo auxílio, companheirismo e incentivo durante todo o desenvolvimento do trabalho.

A Marcio Ribeiro de Souza por sua colaboração e amizade.

À Universidade Federal de Uberlândia, patrocinadora de minha formação profissional.

Ao Colegiado da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelos constantes incentivos.

À CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

A Deus por minha existência.

*"Nós somos consequência do que pensamos."*

**Buda.**

# Idealização, Projeto, Construção e Avaliação de Esclerômetros Retilíneos Totalmente Computadorizados

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 O SISTEMA DE ENSAIO ESCLEROMÉTRICO</b> .....	<b>12</b>
2.1 Requisitos de projeto .....	12
2.2 Descrição do esclerômetro desenvolvido .....	17
2.2.1 Sistema de acionamento e controle de movimento .....	19
2.2.2 Sistema de controle da força de penetração .....	20
2.2.3 Sistema de monitoramento das forças atuantes sobre o penetrador .....	20
2.2.4 Sistema de monitoramento da posição do penetrador .....	21
2.2.5 Sistema de monitoramento de emissão acústica .....	21
2.2.6 Sistema de proteção contra níveis excessivos de força .....	21
2.2.7 Procedimento de calibração automática do sistema de medição das forças atuantes no penetrador .....	22
2.2.8 Sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial .....	22
2.3 Descrição do sistema computacional gerenciador de ensaios .....	22
2.3.1 Extensibilidade .....	26

2.3.2	Portabilidade .....	26
2.3.3	Confiabilidade .....	27
2.3.4	Compatibilidade .....	28
2.3.5	Desempenho .....	28
<b>2.4</b>	<b>Procedimento experimental e automatização do ensaio .....</b>	<b>29</b>
2.4.1	Inserção da amostra e troca do penetrador .....	29
2.4.2	Definição da área de trabalho.....	30
2.4.3	Detecção automática da altura de contato do penetrador com a superfície da amostra .....	30
2.4.4	Definição do tipo de ensaio .....	31
2.4.5	Posicionamento do risco ou impressão sobre a superfície da amostra .....	32
2.4.6	Ajuste das variáveis do ensaio .....	33
2.4.7	Execução do ensaio .....	33
2.4.8	Análise, tratamento e visualização dos dados .....	33
2.4.9	Impressão e armazenamento dos dados .....	33
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE CONTROLE .....</b>	<b>36</b>
3.1	Requisitos de projeto do sistema de controle .....	37
3.2	Sistema de acionamento e controle de ensaios .....	38
3.3	Sistema de controle da profundidade de penetração .....	41
3.4	Sistema de controle da força de penetração .....	44
3.4.1	Implementação do controle da força diretamente no controlador de movimento .....	48



3.4.2	Implementação do controle da força utilizando o computador gerenciador do equipamento .....	52
3.4.2.1	Implementação de controladores digitais em tempo real em sistemas operacionais multitarefa .....	54
3.4.2.2	O controlador digital implementado .....	61
3.4.2.3	Sugestões futuras para o ajuste do controlador PID da força de penetração .....	64
<b>4</b>	<b>SISTEMAS DE MONITORAMENTO .....</b>	<b>68</b>
4.1	Requisitos de projeto do sistema de monitoramento .....	69
4.2	Monitoramento das forças atuantes no penetrador .....	70
4.2.1	Transdutor de força .....	71
4.2.1.1	Procedimento de calibração automatizado .....	73
4.2.2	Monitoramento .....	74
4.2.2.1	Polled I/O .....	78
4.2.2.2	Interrupções .....	78
4.2.2.3	DMA .....	80
4.2.2.4	Dual-Channel bursting DMA, 16-Bit RipString e 32-Bit RipString .....	80
4.3	Monitoramento da posição do penetrador .....	82
4.3.1	Uso de sensores externos de medição de posição .....	82
4.3.2	Uso das equações cinemáticas do movimento .....	82
4.3.3	Uso Direto dos sinais dos encoders dos servo-motores das mesas acionadoras dos ensaios .....	83
4.4	Sistema de proteção contra níveis excessivos de força .....	91
4.5	Sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial .....	93

<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>101</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO I Análise dinâmica do transdutor de força .....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO II Circuitos Eletrônicos .....</b>	<b>119</b>

Abrahão, A., 1999, "Idealização, Projeto, Construção e Avaliação de Esclerômetros Totalmente Computadorizados", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## Resumo

O desgaste abrasivo de materiais é um fenômeno complexo. Assim, técnicas experimentais são ferramentas fundamentais para o estudo do problema. O efeito de uma única partícula abrasiva agindo sobre a superfície da amostra de um material pode ser analisado através de ensaios esclerométricos, controlando-se as condições de carregamento, a velocidade de riscamento e a taxa de penetração. O projeto de um esclerômetro retilíneo e a automatização dos procedimentos experimentais são apresentados neste trabalho. São propostas metodologias para ensaios esclerométricos e de indentação. A arquitetura do *hardware* desenvolvido e seu controle é administrado por um *software* que opera em plataforma Windows NT, resultando em uma metodologia experimental confiável e flexível.

---

*Palavras chave: Esclerometria, Esclerômetro, Desgaste abrasivo, Teste de revestimento, Indentação.*

Abrahão, A., 1999, "Idealization, Design, Construction and Evaluation of Fully Computerized Linear Esclerometer", M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## Abstract

The abrasive wear of materials is a complex phenomenon. Therefore experimental techniques are fundamental tools to study the problem. The effect of a single abrasive particle acting on a material sample surface can be analyzed in esclerometric test, controlling at least, the load conditions, the scratching speed and the penetration rate. The design of a linear sclerometer, and the automatization of experimental procedures are presented. Scratch and indentation test methodologies are proposed. The developed test system hardware setup and control is managed by a software that operates on a Windows NT platform, resulting a reliable a flexible experiment material methodology.

---

*Keywords: Scratch-testing, Esclerometer, Abrasive wear, coating test, Indentation.*

## Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática de um tribosistema. ....	1
1.2	Esquema ilustrativo dos tipos de desgaste abrasivo. ....	2
1.3	Simulação do desgaste abrasivo através da esclerometria. ....	3
1.4	Configurações convencionais de esclerômetros. ....	5
1.5	Ensaio de teste de adesão de revestimento substrato. ....	6
1.6	Teste de indentação. ....	7
1.7	Imagens microscópicas de riscos gerados por esclerometria. ....	8
1.8	Topografia de um sulco gerado por esclerometria. ....	8
1.9	Esclerômetro desenvolvido. ....	10
2.1	Protótipo desenvolvido. ....	14
2.2	Microesclerômetro. ....	16
2.3	Macroesclerômetro. ....	18
2.4	Esquema dos subsistemas constituintes do esclerômetro desenvolvido. ....	19
2.5	Microscópio mecânico de varredura construído, adaptando uma sonda topográfica ao esclerômetro desenvolvido. ....	23
2.6	Diagrama funcional do sistema computacional do macroesclerômetro, ilustrando os módulos que o compõem. ....	24
2.7	Programa computacional gerenciador do ensaio. ....	25
2.8	Esquema ilustrativo de um teste esclerométrico aplicado a uma amostra qualquer. ....	30
2.9	Definição da posição de segurança do penetrador. ....	31
2.10	Ensaio esclerométrico com correção da inclinação superficial da amostra. ....	32

2.11	Ilustração do posicionamento de riscos esclerométricos com trajetória complexa, utilizando-se mira microscópica. ....	33
2.12	Caixa de diálogo de ajuste dos dados de um ensaio esclerométrico com profundidade de penetração constante. ....	34
2.13	Programa computacional gerenciador do Macroesclerômetro. ....	34
2.14	Relatório impresso pelo programa computacional executor do ensaio. ....	35
3.1	Ilustração dos ensaios realizados no esclerômetro desenvolvido. ....	36
3.2	Mesas acionadoras utilizadas. ....	39
3.3	Controlador de trajetória proporcional, integral e derivativo, com retroalimentação de velocidade. ....	40
3.4	Ensaio esclerométrico com penetração em rampa. ....	41
3.5	Ensaios esclerométricos com profundidade de penetração constante. ....	42
3.6	Ensaio esclerométrico com correção da inclinação superficial da amostra. ....	43
3.7	Ensaio esclerométrico com penetração constante. ....	45
3.8	Ensaio esclerométricos com controle: penetração constante. ....	46
3.9	Ensaio esclerométrico com força constante. ....	47
3.10	Diagrama de bloco de um controlador digital atuando em malha fechada. ....	48
3.11	Ensaio de adesão revestimento-substrato. ....	51
3.12	Controlador digital da força de penetração proporcional, integral e derivativo, utilizado no projeto do Macroesclerômetro. ....	52
3.13	Esquema do controlador Digital. ....	53
3.14	Teste do controlador PID. ....	62
3.15	Avaliação da parcela proporcional do controlador PID, utilizado no controle da força de penetração. ....	63

3.16	Avaliação da parcela proporcional do controlador PID. ....	64
3.17	Avaliação da parcela proporcional do controlador PID, com o tipo de material da amostra em teste. ....	65
3.18	Flexibilidade do atuador mecânico da força de penetração. ....	67
4.1	Esquema do ensaio esclerométrico. ....	68
4.2	Esquema geral do Subsistema de Monitoramento das forças atuantes no penetrador. ....	71
4.3	Esquema geral do procedimento de calibração do transdutor de força. ....	73
4.4	Resultado da calibração do transdutor de força. ....	75
4.5	Esquema de digitalização e transferência dos dados das forças atuantes no penetrador. ....	77
4.6	Esquema do tipo de trajetória das mesas acionadoras geradas pelo controlador de movimento. ....	83
4.7	Movimento executado pelo controlador de movimento. ....	84
4.8	Ensaio de indentação, realizados no Macroesclerômetro. ....	85
4.9	Esquema de funcionamento do <i>encoder</i> incremental óptico, utilizado no controle das mesas acionadoras do ensaio. ....	85
4.10	Esquema dos sinais disponíveis nos <i>encoders</i> utilizados. ....	86
4.11	Gráficos dos canais de <i>encoder</i> adquiridos pela placa digitalizadora. ....	87
4.12	Esquema geral de funcionamento do sistema de monitoramento da posição do penetrador. ....	88
4.13	Comportamento dos valores contidos nos contadores dos <i>encoders</i> das mesas acionadoras. ....	90
4.14	Esquema de funcionamento do sistema de proteção contra níveis excessivos de força. ....	92
4.15	Ação do sistema de proteção contra níveis excessivos de força. ....	93

4.16	Impressão fotografada no microsscópico eletrônico de varredura (LTM-MEV), e sua correspondente topografia digitalizada obtida no Macrosclerômetro. ....	94
4.17	Esquema de funcionamento da sonda topográfica utilizada no equipamento desenvolvido. ....	95
4.18	Impressão gerada em um ensaio de dureza Brinell, executado em uma amostra de alumínio (LTM-MEV). ....	96
4.19	Topografia digitalizada, utilizando-se o Macrosclerômetro. ....	97
4.20	Curvas de nível da topografia digitalizada, medida no Macrosclerômetro. ....	98
4.21	Imagem digitalizada (CGI), da impressão em teste, no Macrosclerômetro. ....	99
6.1	Esquema da análise dinâmica da célula de carga. ....	110
6.2	Função de transferência direta $H_{zz}$ , excitada em $z$ e medida em $z$ . ....	111
6.3	Função de transferência cruzada $H_{zx}$ , excitada em $z$ e medida em $x$ . ....	112
6.4	Função de transferência cruzada $H_{zy}$ , excitada em $z$ e medida em $y$ . ....	113
6.5	Função de transferência cruzada $H_{xz}$ , excitada em $x$ e medida em $z$ . ....	114
6.6	Função de transferência direta $H_{xx}$ , excitada em $x$ e medida em $x$ . ....	115
6.7	Função de transferência cruzada $H_{xy}$ , excitada em $x$ e medida em $y$ . ....	116
6.8	Função de transferência cruzada $H_{yz}$ , excitada em $y$ e medida em $z$ . ....	117
6.9	Função de transferência direta $H_{yy}$ , excitada em $y$ e medida em $y$ . ....	118
7.1	Circuito eletrônico de proteção contra níveis excessivos das forças atuantes no penetrador. ....	119
7.2	Circuito eletrônico decodificador - contador de sinais de <i>encoders</i> . ....	120



## Lista de Tabelas

2.1	Características mecânicas das mesas acionadoras do sistema. ....	20
3.1	Propriedades dos ensaios realizados.....	44
3.2	Propriedades dos ensaios realizados.....	50
3.3	Tipos de Timers e suas resoluções no Windows NT .....	60
4.1	Resultado das funções de transferência obtidas no processo de calibração. ....	74

# Capítulo 1

## Introdução

Na degradação de materiais, a abrasão, entre outros, é o mecanismo mais freqüente e o mais destrutivo.

De um modo geral, o desgaste abrasivo pode ser definido como a remoção de matéria devido a um contato deslizante com partículas abrasivas ou uma superfície áspera, ou a perda progressiva de matéria das superfícies de corpos, como consequência do movimento relativo.

A resistência à abrasão não é uma propriedade intrínseca do material, mas sim do sistema tribológico imposto (tribosistema), constituído por um complexo abrasivo das superfícies em contato e de um produto interfacial. O contato entre o complexo abrasivo e a superfície em estudo é determinado pelo conjunto das condições mecânicas e físico-químicas atuantes (Figura 1.1), (Nogueira, 1988).

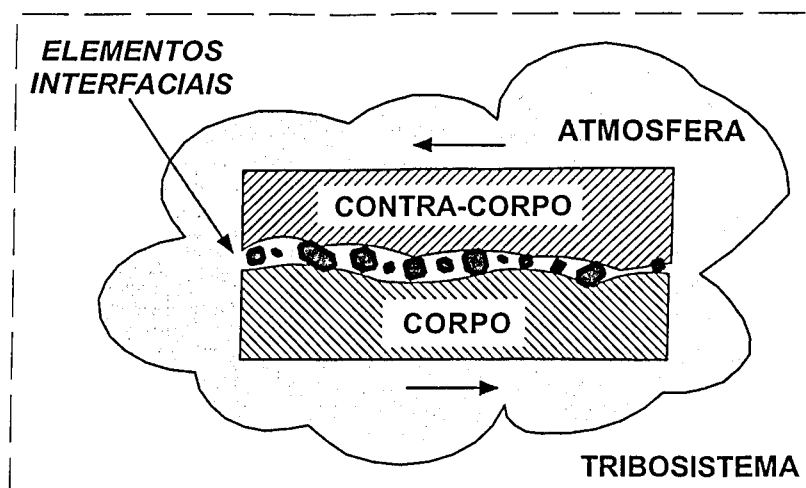


Figura 1.1- Representação esquemática de um tribosistema.

Formalmente o desgaste abrasivo é definido como *"a perda de matéria devido ao movimento relativo de duas superfícies e decorrentes da ação de:*

- *Asperidades duras em uma das superfícies, ou*
- *partículas abrasivas livres entre as duas superfícies, ou*
- *partículas abrasivas engastadas em uma das superfícies."*

Neste contexto, quando uma ou mais superfícies duras agem contra uma superfície, sulcando-a ou escavando-a devido à força normal aplicada, tem-se o desgaste abrasivo chamado de *abrasão a dois corpos* (Figura 1.2). Por outro lado, quando partículas duras são "aprisionadas" entre duas superfícies que deslizam entre si, pode ocorrer o chamado *desgaste abrasivo a três corpos*.

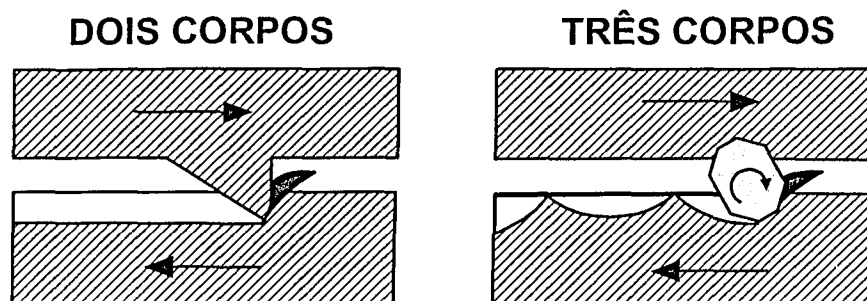


Figura 1.2- Esquema ilustrativo dos tipos de desgaste abrasivo.

O processo abrasivo é um fenômeno interfacial complexo com elevado número de variáveis, com difícil reprodução em laboratório e modelagem teórica. Atualmente, não se dispõe de modelos satisfatórios matemáticos e/ou computacionais para sua simulação. Suas propriedades e características somente podem ser estimadas através de ensaios laboratoriais.

Experimentalmente, o desgaste abrasivo pode ser abordado sob duas óticas: testes em *condições reais* e testes com *modelos simplificados*.

Os ensaios reais de abrasão são realizados em condições normais de operação de um equipamento e se caracterizam por:

- apresentarem longa duração;
- serem laboriosos, com alto custo operacional;
- apresentarem elevada dificuldade em se isolar variáveis e de variar condições de operação;

Nestes ensaios, pela dificuldade de se alterar as condições dos testes, a análise da influência de variáveis de ensaios é prejudicada.

Os testes com modelos simplificados utilizam amostras dos materiais sob estudo, são realizados controlando-se o estado inicial das superfícies, o abrasivo utilizado, as condições

de esforço e velocidade nas superfícies de contato. Estes testes admitem duas abordagens principais.

A *abordagem global* enfoca o fenômeno como um todo, analisando o material quanto ao seu desempenho e vida útil, quando submetido à abrasão. Neste caso, a abrasometria, apresenta-se como principal técnica experimental (Nogueira e De Mello, 1989). Nesta técnica, geralmente o sistema é examinado antes e a após o ensaio abrasométrico, atribuindo-se as diferenças encontradas à ação do processo abrasivo. Comumente sua análise é efetuada observando-se a superfície em estudo, utilizando microscopia óptica ou eletrônica de varredura, e também avaliando a taxa de desgaste através do método gravimétrico interrompido. Estes ensaios levam a determinação de propriedades globais envolvidas no processo abrasivo.

Tendências modernas para o estudo do processo abrasivo apresentam uma abordagem local, onde procura-se compreender os aspectos fundamentais do desgaste abrasivo, evidenciados através de uma análise localizada (Nogueira e De Mello, 1989). Neste caso a esclerometria apresenta-se como sua principal técnica experimental (Figura 1.3).

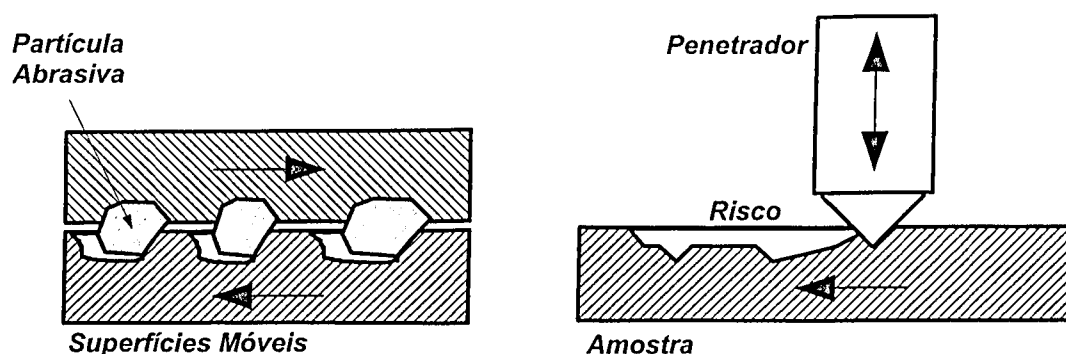


Figura 1.3- Simulação do desgaste abrasivo através da esclerometria.

A técnica esclerométrica tem sido modernamente modelada, baseando-se na consideração do processo abrasivo como um processo de riscagem múltipla, onde é admitida a ação de partículas abrasivas isoladas.

A técnica esclerométrica consiste na riscagem controlada da superfície em estudo, geralmente polida, com um penetrador de geometria simples (esférico, cônico ou piramidal), de forma que o efeito mecânico da partícula sobre a superfície seja simulado. Estas condições, muito embora idealizadas, permitem a utilização de modelos simples, podendo contribuir para a compreensão de aspectos fundamentais do processo abrasivo, tais como:

- determinar os esforços atuantes sobre as diferentes fases constituintes do material;

- a partir de considerações da mecânica do contato, e para cada fase considerada isoladamente, pode-se determinar: dureza ao risco, a tenacidade, a energia específica de deformação e o índice de fragilidade;
- estudar a morfologia da deformação nas proximidades do penetrador e determinar: efeito da geometria do penetrador, o fator de perda da matéria e o ângulo crítico de ataque;
- estabelecer critérios para a transição abrasão "dúctil" / abrasão "frágil" e discriminar a contribuição de cada uma ao processo abrasivo.

Além destas características, quando o penetrador risca a superfície da amostra, simulando uma partícula abrasiva, dependendo das características tribológicas locais presentes no contato, a formação do sulco pode apresentar-se sobre a forma de três mecanismos básicos (Franco, 1989):

- **Microsulcamento:** a partícula abrasiva provoca deformações plásticas sem que haja, praticamente, perda de matéria. O material deformado acumula-se à frente da partícula e flui lateralmente, acomodando-se em ambos os lados do sulco.
- **Microcorte:** ocorre a formação de micro-cavacos sem deformação plástica lateral;
- **Microlascamento:** grandes fragmentos são arrancados da superfície devido a formação e propagação de trincas. Este mecanismo está restrito aos materiais frágeis.

No estudo do desgaste abrasivo a compreensão do micromecanismo presente na formação dos sulcos gerados pelas partículas abrasivas é importante, pois caracteriza a natureza da perda de material da superfície investigada. Esta informação é crucial para se projetar superfícies resistentes à abrasão.

Ao longo de vários anos, a técnica de investigação esclerométrica tem sido objeto de estudos por parte do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia. Trabalhos desenvolvidos anteriormente por este grupo (Nogueira e De Mello, 1989 e De Mello, 1983) apresentam, de forma detalhada, os princípios e a potencialidade desta técnica. Nestes trabalhos, estão sistematizadas as informações disponíveis na literatura.

Existem algumas variantes no arranjo experimental do ensaio esclerométrico (Figura 1.4). Os mais utilizados são o retilíneo, o pendular e o rotativo.

Em um esclerômetro retilíneo, o risco é gerado linearmente, por movimentos conjugados de riscagem e penetração do penetrador sobre a amostra em teste.

Um esclerômetro pendular consiste de um penetrador preso à extremidade de um pêndulo, que irá percutir na amostra. Este esclerômetro produz velocidades maiores que o anterior, sendo mais adaptado aos estudos dinâmicos, principalmente para a determinação de energias específicas de deformação.

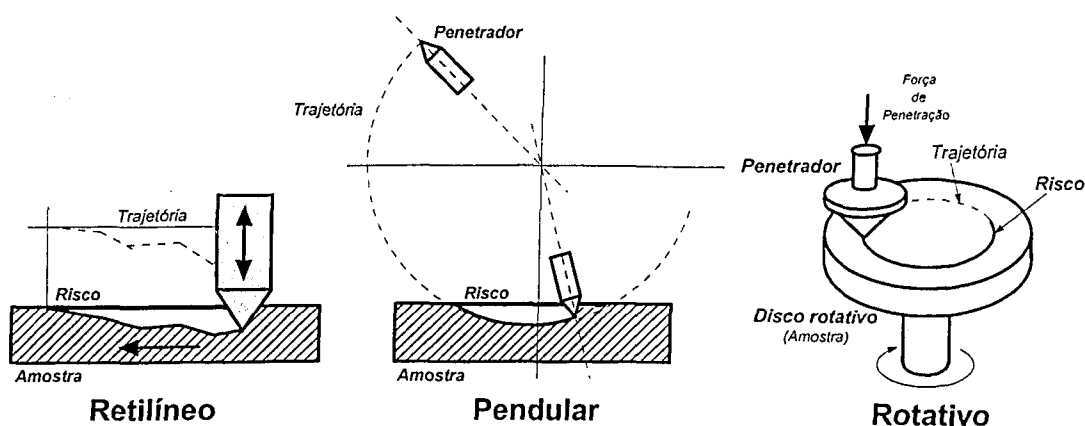


Figura 1.4- Configurações convencionais de esclerômetros.

O esclerômetro rotativo consiste na fixação da partícula abrasiva em uma roda ou disco. A rotação deste disco produzirá sucessivos riscos na amostra. Este esclerômetro é especialmente adaptado à simulação da usinagem por abrasão.

Os esclerômetros retilíneos são os mais tradicionais e versáteis, possibilitando variar com repetibilidade e controlar as condições de ensaio, permitindo uma análise mais precisa dos resultados. Além dos ensaios tradicionais, nos quais os esforços e ou as velocidades são mantidas contantes, podem ser realizados testes em revestimentos finos através da imposição de um movimento lateral oscilatório ao penetrador, superposta ao seu movimento longitudinal (CSEM, 1999).

Em um ensaio esclerométrico usando um esclerômetro retilíneo, os parâmetros de interesse para a análise das propriedades esclerométricas ao longo de um risco são:

- a geometria do penetrador;
- o estado cinemático do penetrador (posição, velocidade e aceleração);
- o estado dinâmico atuante no penetrador (força normal de penetração, forças tangencial e lateral ao risco).

Os tipos de ensaios convencionais desejados em um esclerômetro retilíneo são:

- ensaio esclerométrico com controle de força de penetração;
- ensaio esclerométrico com controle de profundidade de penetração.

Estes ensaios podem ser executados com ajuste da variável de controle, força ou profundidade de penetração, de modo a produzir condições de perfil constante, de perfil em rampa ascendente (ou descendente) e de perfil complexo escolhido pelo usuário.

Na versão à carga constante, a profundidade do sulco formado pelo penetrador pode variar de uma porção do material para a outra dependendo da distribuição da dureza ao longo do risco. A carga aplicada normal, entretanto, permanece constante.

Já no ensaio retilíneo à profundidade constante é imposta uma profundidade para o risco. Esta profundidade permanece constante independentemente da distribuição da dureza do material que esteja sendo riscado. A variação da resistência ao risco se reflete na força normal.

Além dos testes convencionais citados acima, dois outros testes de grande importância, principalmente na análise de propriedades mecânicas de revestimentos, podem ser realizados utilizando um esclerômetro retilíneo (CSEM, 1999):

- ensaio de teste de adesão de revestimento-substrato;
- ensaio de indentação.

O ensaio de teste de adesão de um revestimento-substrato é um ensaio esclerométrico tradicional com perfil de carga (ou de penetração) crescente, acrescido do monitoramento da *emissão acústica*<sup>1</sup> provinda da amostra sob ensaio.

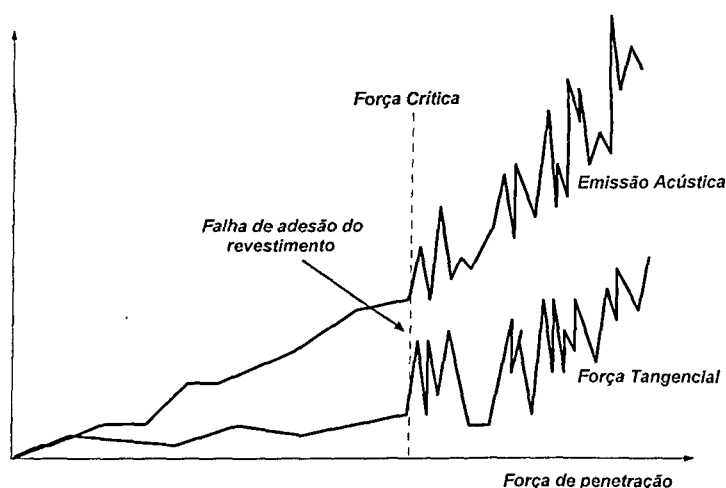


Figura 1.5- Ensaio de teste de adesão de revestimento substrato.

A falha de adesão do revestimento geralmente produz um sinal peculiar, que apresenta variação na força tangencial e/ou uma flutuação na emissão acústica, que é correlacionada ao valor das forças atuantes no penetrador, determinando assim a carga limite de aderência do revestimento-substrato ensaiado, de acordo com a Figura 1.5.

<sup>1</sup> *Emissão acústica* são ondas de tensões geradas quando o estado de deformação de um corpo varia. Estas ondas de tensões propagam-se através do corpo com velocidade sônica e seus efeitos, tais como deformações superficiais, podem ser medidos e analisados por sensores e sistemas de medição específicos.

O ensaio de indentação é uma técnica que apresenta grande potencialidade na análise de propriedades mecânicas de materiais. No caso mais comum, são determinadas a dureza e módulo de elasticidade. Quando se trata de um revestimento, a técnica apresenta considerável importância, especialmente para o estudo de camadas finas, caso em que esta é uma das únicas técnicas viáveis (Randall, 1998).

A essência desta técnica baseia-se na penetração gradual de um indentador com geometria bem definida. Aplica-se um carregamento mostrado na Figura 1.6, até que seja estabelecido o equilíbrio mecânico na região de contato e em seguida descarrega-se o indentador. Este processo de carga e descarga pode ser cíclico, sendo continuamente monitorado o carregamento e o deslocamento do indentador. Da análise dos dados monitorados, calcula-se a rigidez de contato entre o superfície da amostra e o indentador, através da qual se obtém as propriedades mecânicas de interesse (NANO, 1999).

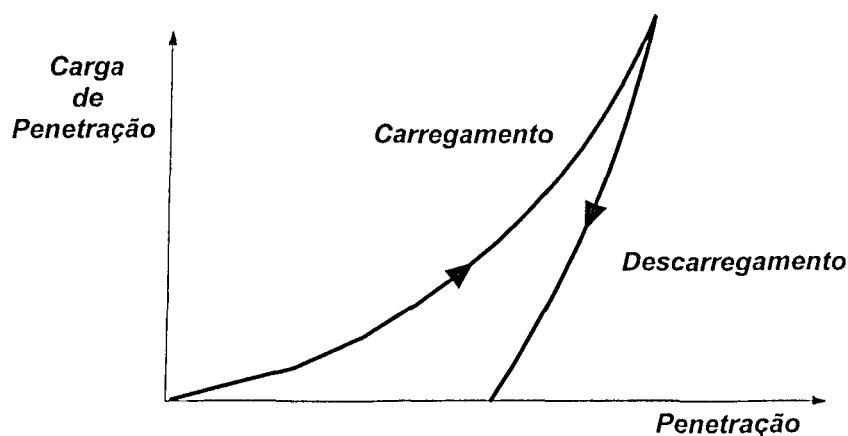


Figura 1.6- Teste de indentação.

Após a realização de ensaios esclerométricos, ou de indentação, a análise experimental dos dados é realizada correlacionando-se os sinais monitorados ao longo do ensaio (cinemática e dinâmica do penetrador, e/ou emissão acústica provinda da amostra), com a inspeção microscópica (óptica e/ou eletrônica de varredura) e perfilométrica do sulco gerado na superfície da amostra. Esta análise objetiva compreender localmente a natureza do processo abrasivo, ao longo de todo o risco ou impressão gerada.

Nos ensaios esclerométricos os sinais monitorados das forças atuantes no penetrador, e da emissão acústica provinda da amostra, trazem informações importantes sobre o mecanismo de interação do mesmo com a amostra em estudo, caracterizando assim, as propriedades tribológicas presentes na superfície investigada, como por exemplo: a pressão média resistente



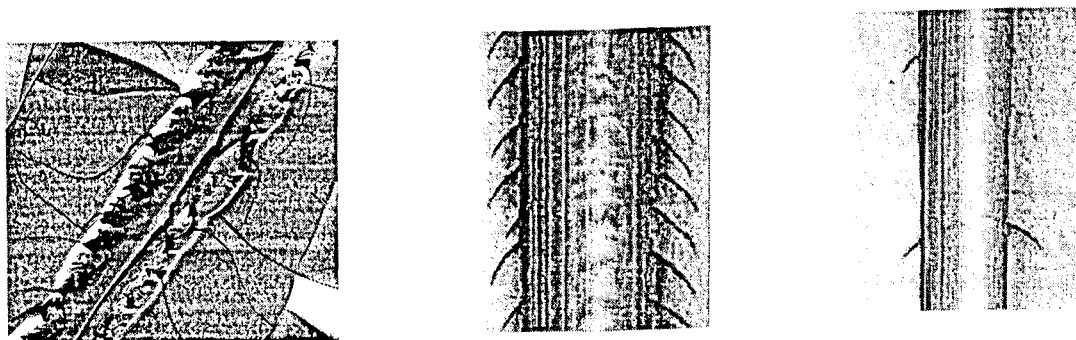


Figura 1.7- Imagens microscópicas de riscos gerados por esclerometria.

à penetração, ou dureza ao risco, a energia necessária para movimentar uma unidade de volume de matéria, ou energia específica, entre outras.

A inspeção microscópica do sulco gerado nos ensaios (Figura 1.7) permite determinar localmente, informações sobre a morfologia da deformação permanente (largura do sulco ou impressão gerada), sobre a natureza e distribuições das trincas geradas (posição, orientação e número de trincas) e sobre o mecanismo de remoção de material. Esta inspeção, quando sincronizada com os sinais monitorados, permitem relacionar efeito e causa e caracterizar a natureza estatística dos eventos tribológicos.

Por meio de técnicas de perfilometria (Figura 1.8), a análise do sulco produzido na amostra pode indicar se um ou mais micro-mecanismos de abrasão estão presentes. Obtido um perfil do sulco, são observadas as áreas  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , em relação à superfície da amostra.

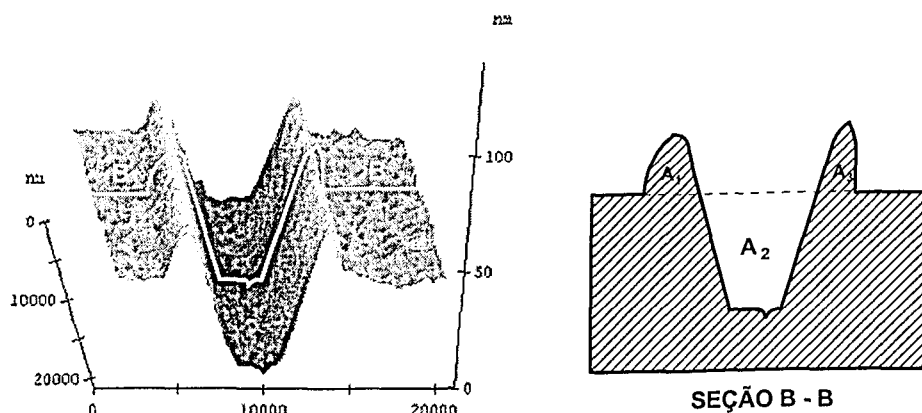


Figura 1.8- Topografia de um sulco gerado por esclerometria.

Nesta configuração a área  $A_2$  está abaixo da superfície de referência, enquanto  $A_1$  e  $A_3$  estão acima. A área de material removida pode ser definida por:

$$A_w = A_2 - (A_1 + A_3) \quad (1.1)$$

A análise da equação acima conduz a três situações distintas:

- $A_w = 0$ , não há retirada de material e somente o mecanismo de microsulcamento ocorre;
- $A_w/A_2 = 1$ , ou seja,  $A_1 = A_3 = 0$ , todo o material movimentado é destacado e somente o mecanismo de micro-corte ocorre;
- $A_w \neq 0$  e  $A_w/A_2 \neq 1$ , indicam os modos intermediários, onde simultaneamente o microsulcamento e o microcorte ocorrem.

Apesar da técnica esclerométrica e o uso de esclerômetros retilíneos apresentarem grande potencialidade, o mercado mundial apresenta uma escassez de produtos e soluções específicas, quando se trata da questão de desenvolvimento de esclerômetros retilíneos, o que reforçou a justificativa no investimento do projeto.

O uso de esclerômetros retilíneos informatizados possibilitam a concepção da idéia básica de padronização do ensaio esclerométrico (Ouadow e Mathia, 1991).

Em nível mundial, o custo aproximado de um esclerômetro retilíneo é de US\$ 60.000,00. Este custo diz respeito apenas ao equipamento básico, uma vez que o mesmo não é informatizado, requerendo ainda a utilização de registradores gráficos.

A origem deste projeto, o desenvolvimento e construção de um esclerômetro retilíneo totalmente computadorizado se deve a três tipos de motivação:

- aquisição científica e tecnológica das metodologias de projeto de sistemas automatizados de medição;
- flexibilização e automatização dos procedimentos de ensaios esclerométricos;
- considerações econômicas.

Foi construído um protótipo de um esclerômetro retilíneo que incorpora uma técnica original e útil para a investigação e simulação dos fenômenos de desgaste abrasivo. Este equipamento, denominado Macroesclerômetro, é mostrado na Figura 1.9.

Na revisão bibliográfica, explorando o assunto *esclerometria*, muitas referências foram encontradas sobre os aspectos relacionados à aplicação e metodologia da técnica esclerométrica. Entretanto, poucas referências abordam os aspectos construtivos de esclerômetros retilíneos.

Nogueira, 1989, apresenta um trabalho sobre o assunto, abordando a técnica esclerométrica e sua análise. Neste trabalho, também é apresentado o desenvolvimento de um protótipo de um esclerômetro retilíneo computadorizado, capaz de executar ensaios esclerométricos com carga de penetração constante, utilizando peso morto.

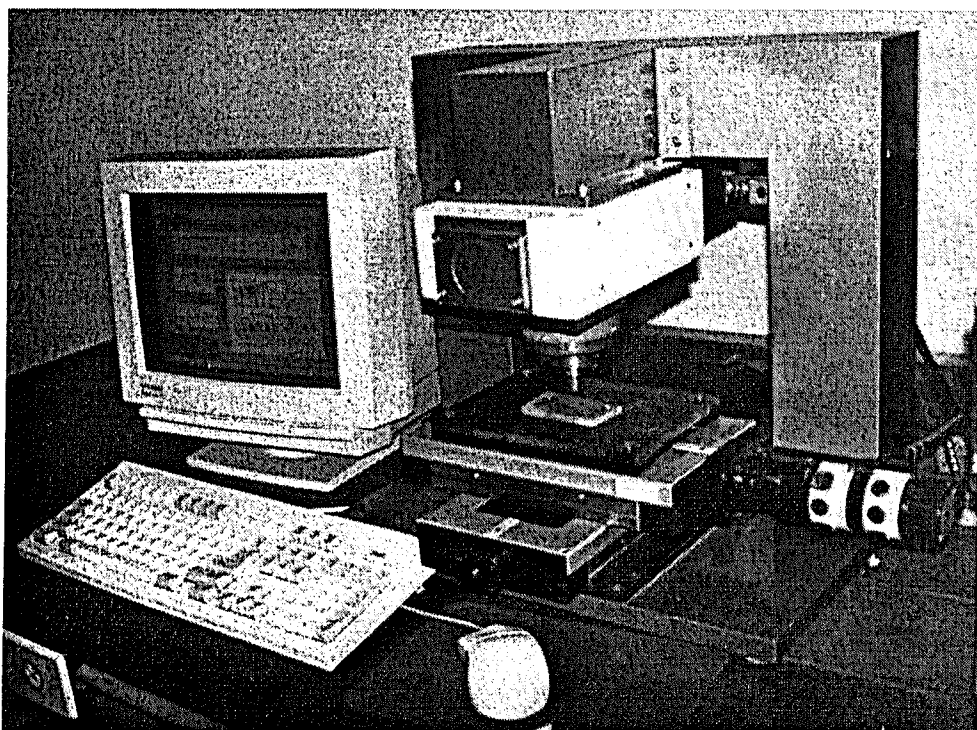


Figura 1.9- Esclerômetro desenvolvido.

Ouadow e Mathia, 1991, em seu trabalho, apresentam informações gerais sobre a concepção básica de esclerômetros retilíneos totalmente computadorizados e suas potencialidades.

A escassa bibliografia sobre o assunto em oposição a popularidade da técnica esclerométrica, nos faz crer que a construção de esclerômetros é um tema restrito, em sua maioria segredo industrial. O pouco domínio da comunidade acadêmica e científica sobre o tema também foi um fator motivador deste trabalho.

Este trabalho apresenta o projeto, construção e avaliação de um esclerômetro retilíneo e propõe metodologias para os ensaios esclerométricos e de indentação.

Atualmente o projeto do equipamento apresentado encontra-se em desenvolvimento. A maturidade tecnológica do equipamento será consequência de sua aplicação no estudo e investigação do processo abrasivo.

Não é finalidade deste trabalho a execução de ensaios com vistas ao estudo da abrasometria. O objetivo principal é a idealização, projeto, construção e avaliação de um esclerômetro retilíneo. A principal contribuição tecnológica do trabalho consiste no desenvolvimento das metodologias e estratégias que possibilitam a execução de ensaios no esclerômetro proposto, especificamente os ensaios esclerométricos de indentação e adesão de revestimentos-substrato.

O ajuste e adequação das metodologias apresentadas devem ser motivos de trabalhos futuros, a serem desenvolvidos pela equipe do LTM, a quem este trabalho será estendido, agora sobre o ponto de vista central da aplicação da técnica experimental. Neste contexto,

o equipamento proposto apresenta grandes potencialidades na execução de ensaios, com precisão, confiabilidade e repetibilidade.

Os resultados de ensaios típicos realizados no equipamento desenvolvido, assim como seu desempenho e potencialidades, serão apresentados e discutidos ao longo dos capítulos seguintes.

O **capítulo 2** apresenta uma descrição global do sistema proposto, de seus componentes fundamentais e dos requisitos desejados no projeto, descrevendo seus efeitos na forma final do protótipo desenvolvido.

O **capítulo 3** apresenta o sistema de controle, suas estratégias e utilização na realização dos ensaios esclerométricos e de indentação.

O **capítulo 4** apresenta o sistema de monitoramento das variáveis de ensaio, os sensores, os condicionadores e os métodos de transferência de dados para o computador gerenciador do equipamento.

O **capítulo 5** apresenta as conclusões do trabalho e as propostas para estudos futuros.

# Capítulo 2

## O Sistema de Ensaio Esclerométrico

Esclerômetros são equipamentos complexos, de aplicação específica, não convencionais e de instrumentação sensível. O projeto do esclerômetro exigiu considerações iniciais e definição de diretrizes básicas que conduziram ao sucesso do equipamento. Este capítulo disserta sobre este tema.

O capítulo inicialmente aborda as diretrizes básicas do projeto, suas motivações, suas pretensões. Também relata um breve histórico de todo o projeto, que vai muito além do equipamento desenvolvido.

As metas e diretrizes relatadas neste capítulo aplicam-se, de maneira geral, ao desenvolvimento de esclerômetros totalmente automatizados.

O capítulo também apresenta uma breve introdução ao esclerômetro desenvolvido, fornecendo uma visão geral sobre o equipamento, sua tecnologia e seus subsistemas constituintes.

O esclerômetro desenvolvido fornece uma técnica original e útil.

Ao final do capítulo é apresentado o procedimento experimental e a metodologia de automatização dos ensaios, para a investigação e simulação dos fenômenos de desgaste abrasivo.

Ao longo da dissertação, as informações contidas neste capítulo serão aprofundadas oportunamente.

### 2.1 Requisitos de projeto

O Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia tem uma tradição, ao longo de vários anos, na linha de pesquisa de estudo do desgaste abrasivo. Para isto, o Laboratório desenvolve soluções tanto em nível de *hardware* como de *software*, em conjunto com várias empresas, na identificação e simulação dos mecanismos de desgaste abrasivo, criando soluções que geram superfícies adaptadas ao seu tribosistema de operação, maximizando ou minimizando os efeitos da abrasão.

O projeto de desenvolvimento de esclerômetros se enquadra em duas linhas específicas nas atividades do LTM:

- o desenvolvimento de equipamentos de teste;
- a análise estatística de sinais provindo do monitoramento de ensaios de desgaste abrasivo.

A primeira atividade não é o objetivo principal do LTM, mas objetivando a análise experimental do processo abrasivo, o desenvolvimento de equipamentos de testes específicos é crucial. Esta atividade tem contribuído em muito na compreensão da natureza do processo de desgaste abrasivo.

A segunda linha, a análise estatística de sinais provindo do monitoramento de ensaios de desgaste abrasivo, é um tema promissor, mundialmente em aberto. Muito se conhece sobre o sistemas específicos de desgaste abrasivo, mas pouco se sabe sobre as informações estatísticas contidas nestes sinais.

*"Seria possível identificar o mecanismo de desgaste abrasivo atuante, analisando apenas certos sinais monitorados ao longo do ensaio experimental ?*

*Especificamente, em um ensaio esclerométrico à força de penetração e tangencial, atuante no penetrador, infere sobre o mecanismo de desgaste atuante ?*

*E qual a relação do desgaste abrasivo e a emissão acústica provinda da amostra ?"*

Estas questões, assim como muitas outras relacionado a tribologia, estão sendo estudadas e o esclerômetro desenvolvido contribuirá para esta investigação.

O esclerômetro desenvolvido é parte de um projeto maior, que contempla o estudo e a investigação de novos materiais, financiado pelo PADCT.

O objetivo do projeto é aparelhar o Laboratório com um esclerômetro totalmente computadorizado, que tivesse as seguintes características:

- executar ensaios esclerométricos com:
  - Penetração constante;
  - Força de penetração constante;
- monitorar as forças atuantes no penetrador (normal, lateral e tangencial);
- ajuste total sobre as variáveis de ensaio:
  - Faixa ampla de velocidade de riscamento;
  - Comprimento de riscos variáveis;
  - Taxa de digitalização;
  - Profundidade ou força de penetração;
- utilizar qualquer tipo de penetrador;
- utilizar amostras que requeiram pouca ou nenhuma, preparação superficial;
- automatizar os procedimentos dos ensaios esclerométricos.

Além dos testes esclerométricos convencionais, citados acima, dois outros testes de grande importância, principalmente na análise de propriedades mecânicas de revestimentos, também devem ser realizados utilizando o esclerômetro proposto:

- ensaio de teste de adesão de revestimento-substrato;
- ensaio de indentação.

Com este intuito, o esclerômetro desenvolvido deve em um ensaio esclerométrico ou de indentação, ter capacidade de:

- aplicar perfil de carga ou penetração continuamente crescente ou decrescente;
- aplicar cargas na faixa de 0 a 300 N;
- monitorar a emissão acústica provinda da amostra em teste.

Com base nestas características iniciais a equipe criadora do esclerômetro idealizou e construiu um protótipo (Figura 2.1).

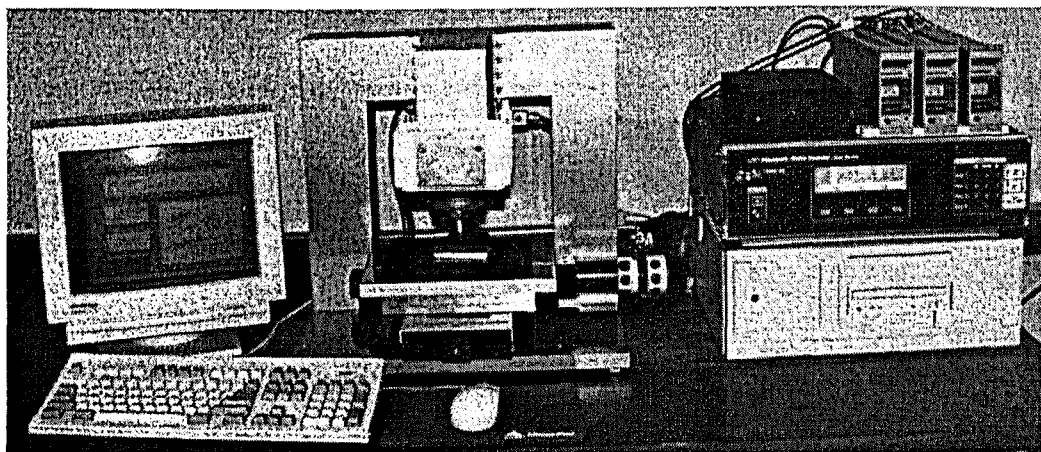


Figura 2.1- Protótipo desenvolvido.

No protótipo desenvolvido, além das características iniciais apresentadas acima, também deve ser capaz de se comportar como um equipamento de análise científica, garantido a cada tipo de ensaio executado: precisão, confiabilidade e repetibilidade.

A precisão garante que os valores monitorados ao longo dos ensaios correspondam fielmente à propriedade medida, ou seja, são valores verdadeiros que representam a grandeza física medida.

A precisão e confiabilidade de equipamentos são características complementares. A precisão corresponde a verdade nos valores monitorados, já a confiabilidade implica que eventos registrados nas variáveis monitoradas (e/ou controlados) ao longo de um ensaio são integral-

mente gerados pela interação do penetrador com a amostra testada, não sendo provocadas pelo sistema mecânico executor do ensaio, instabilidade mecânica dos atuadores, características impróprias do transdutor de força ou flutuações do controlador utilizado. Por exemplo: a flutuação da força de penetração não pode provir da operação do equipamento, mas sim do sistema tribológico em estudo.

A repetibilidade de um ensaio é fundamental em um equipamento de teste, ou seja, dois ensaios de mesma natureza devem ser executados exatamente com mesmas condições. A repetibilidade de um ensaio é fundamental à técnica experimental, ela garante uma população maior e idêntica, que permite a análise posterior e possibilita a correlação estatística dos resultados.

Desenvolver equipamentos de teste sem erro gerado pelo monitoramento e/ou controle é impossível ou exige um projeto caro demais. Esta realidade está presente no esclerômetro desenvolvido, cujos erros presentes na execução de um ensaio são conscientes e foram minimizados, na medida do possível, dentro das restrições orçamentárias do projeto.

Entre todas as diretrizes apresentadas uma última, e importantíssima, é a viabilidade econômica do equipamento. Esta última meta implica em um custo final viável do equipamento.

O resultado final do projeto, um protótipo desenvolvido, satisfaz todas as suas diretrizes básicas inicialmente propostas, apresentando uma arquitetura original e útil na investigação do processo abrasivo. Com algumas alterações este protótipo será comercialmente atraente e competitivo, atendendo às necessidades da comunidade científica e industrial. A característica marcante no mercado mundial, de fornecer uma arquitetura totalmente aberta, garante ao equipamento desenvolvido um baixo custo em relação a sua potencialidade. No decorrer de todo o capítulo este fato será evidenciado.

Na década de 90, dois esclerômetros foram desenvolvidos no LTM:

- Um pendular (Franco, 1989);
- Um retilíneo (Nogueira, 1988).

O esclerômetro retilíneo, desenvolvido em 1988, já apresentava um certo grau de automatização do procedimento experimental, possibilitando a aplicação de cargas normais de penetração na ordem de gramas, usando peso morto.

Atualmente, além do protótipo apresentado neste trabalho, outros dois esclerômetros retilíneos totalmente computadorizados estão simultaneamente sendo desenvolvidos no LTM. Estes dois esclerômetros apresentam as mesmas características do esclerômetro proposto neste trabalho, exceto que são projetados para aplicar cargas normais de penetração na ordem de miligramas. Um deles está sendo construído para ensaiar amostras sujeitas a altas temperaturas em atmosfera de vácuo, simulando condições extremas de desgaste abrasivo.



Em breve o LTM estará aparelhado com quatro esclerômetros retilíneos, cobrindo uma ampla faixa de operação de cargas de penetração. Um operando em quilos, um em gramas e outros dois, um à frio outro à quente, operando em miligramas. Respectivamente, eles são denominados internamente no LTM, como *Macroesclerômetro*, *Microesclerômetro*, *Nanoesclerômetro* e *Nanoesclerômetro à quente*. Esta classificação foi idealizada levando-se em consideração a largura e profundidade do sulco gerado na superfície das amostras ensaiadas. Geralmente, os riscos gerados no Macroesclerômetro podem ser observados macroscopicamente, já os gerados no Microesclerômetro podem ser observados por microscopia óptica e finalmente os gerados nos Nanoesclerômetros devem ser observados por microscopia eletrônica de varredura. Esta nomenclatura utilizada nem sempre é coerente com a realidade, mas é útil.

As cargas aplicáveis no Macroesclerômetro possibilitarão a análise de propriedades globais, macroestruturas e grandes partículas presentes na superfície investigada, assim como o estudo de revestimentos resistentes. Em contrapartida, o Microesclerômetro e os Nanoesclerômetros possibilitarão investigar propriedades microestruturais das fases constituintes, presentes na superfície em estudo e também a análise de revestimentos extremamente finos.

Uma última opção, a análise superficial, com cargas elevadas e altas velocidades de riscamento é possibilitada utilizando o esclerômetro pendular disponível.

O esclerômetro desenvolvido, o Macroesclerômetro, é uma evolução do Microesclerômetro proposto por (Nogueira, 1988), mostrado na Figura 2.2.

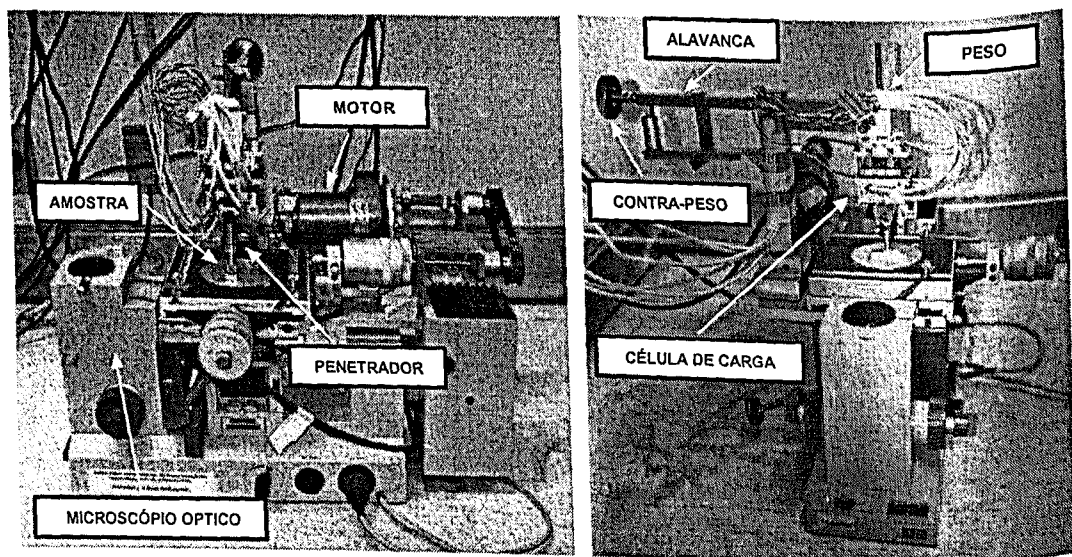


Figura 2.2- Microesclerômetro.

Basicamente o Macroesclerômetro evoluiu em relação ao Microesclerômetro em duas características:

- a técnica de aplicação de carga de penetração;
- qualidade dos componentes utilizados.

No Microesclerômetro, a carga normal de penetração é aplicada sobre o penetrador pela ação da força da gravidade, para isto, utiliza-se um sistema de alavanca peso e contra-peso. Já o Macroesclerômetro inova este projeto, utilizando um sistema sofisticado de acionamento do penetrador.

O sistema de aplicação de força normal, no Microesclerômetro, tem a grande vantagem da simplicidade e o baixo custo, porém limita o equipamento a executar apenas ensaios esclerométricos com força de penetração constante. No Macroesclerômetro, apesar de complexo e caro, o sistema de acionamento do penetrador capacita o equipamento realizar ensaios esclerométricos e de indentação com trajetórias complexas, executadas com controle da força de penetração ou da profundidade de penetração.

Quando o Microesclerômetro foi desenvolvido, a lei de reserva de mercado nacional fez com que as opções construtivas do projeto fossem limitadas. Muitos de seus componentes foram montados e/ou improvisados no próprio LTM. Extinta esta política, o projeto e construção do Macroesclerômetro possibilitou a utilização de componentes com grande precisão e alta tecnologia, adquiridos no mercado mundial, com isto, agregando ao equipamento características únicas. Este fato é marcante no sistema mecânico acionador do ensaio.

Uma característica importante presente no Microesclerômetro, que não pôde ser incorporada ao projeto do Macroesclerômetro, é a capacidade de visualizar "*in situ*" do processo abrasivo de materiais. O Microesclerômetro está montado sobre um microscópio óptico, permitindo, em amostra transparente ou translúcida, como o quartzo, a visualização em tempo real do risco em formação, possibilitando a investigação sobre os aspectos da mecânica da fratura e da natureza dinâmica dos mecanismo de perda de matéria. No Macroesclerômetro esta configuração não pôde ser executada.

## 2.2 Descrição do esclerômetro desenvolvido

A Figura 2.3 apresenta uma fotografia do esclerômetro retilíneo informatizado desenvolvido, enquanto a Figura 2.4 ilustra de forma esquemática, os subsistemas constituintes do protótipo.

O esclerômetro desenvolvido pode ser subdividido em oito módulos principais e distintos:

- sistema de acionamento e controle de movimento;
- sistema de monitoramento das forças atuantes sobre o penetrador;
- sistema de controle da força de penetração;

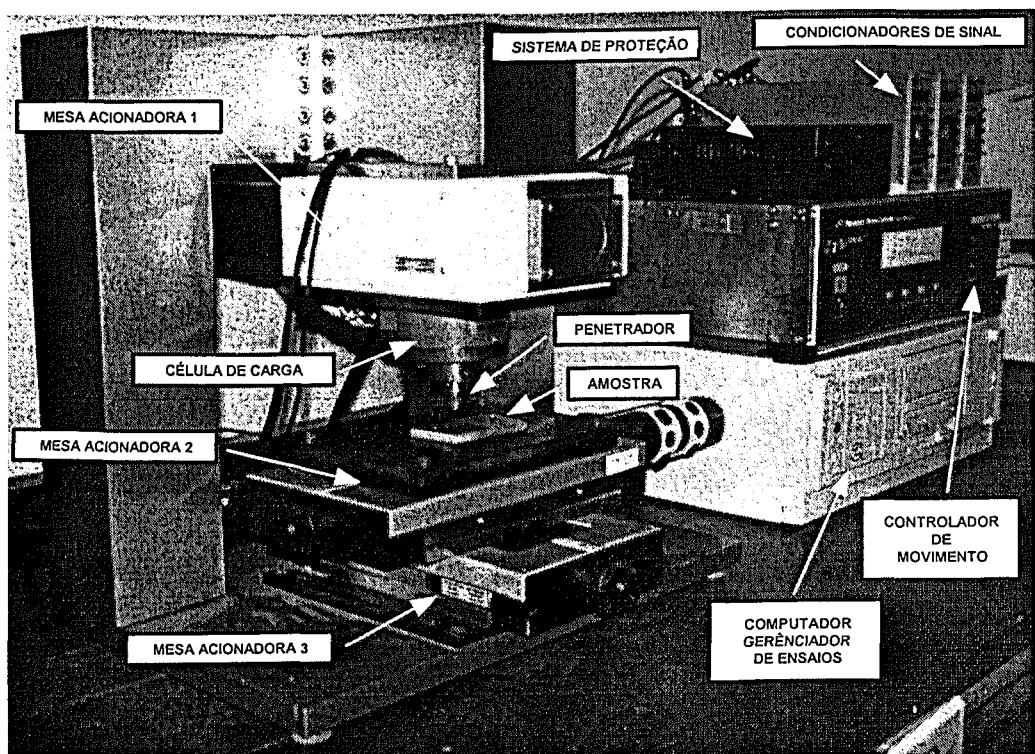


Figura 2.3- Macrosclerômetro.

- sistema de monitoramento da posição do penetrador;
- sistema de monitoramento de emissão acústica;
- sistema de proteção contra níveis excessivos de força;
- sistema computacional gerenciador do ensaio.

Além destes sistemas, dois procedimentos independentes, que contribuem na automação dos ensaios podem ser identificados:

- procedimento de calibração automática do sistema de medição das forças atuantes no penetrador;
- sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial.

As subseções a seguir discutem os sistemas constituintes do Macrosclerômetro em maior detalhe e descrevem seu efeito na forma final do protótipo desenvolvido.

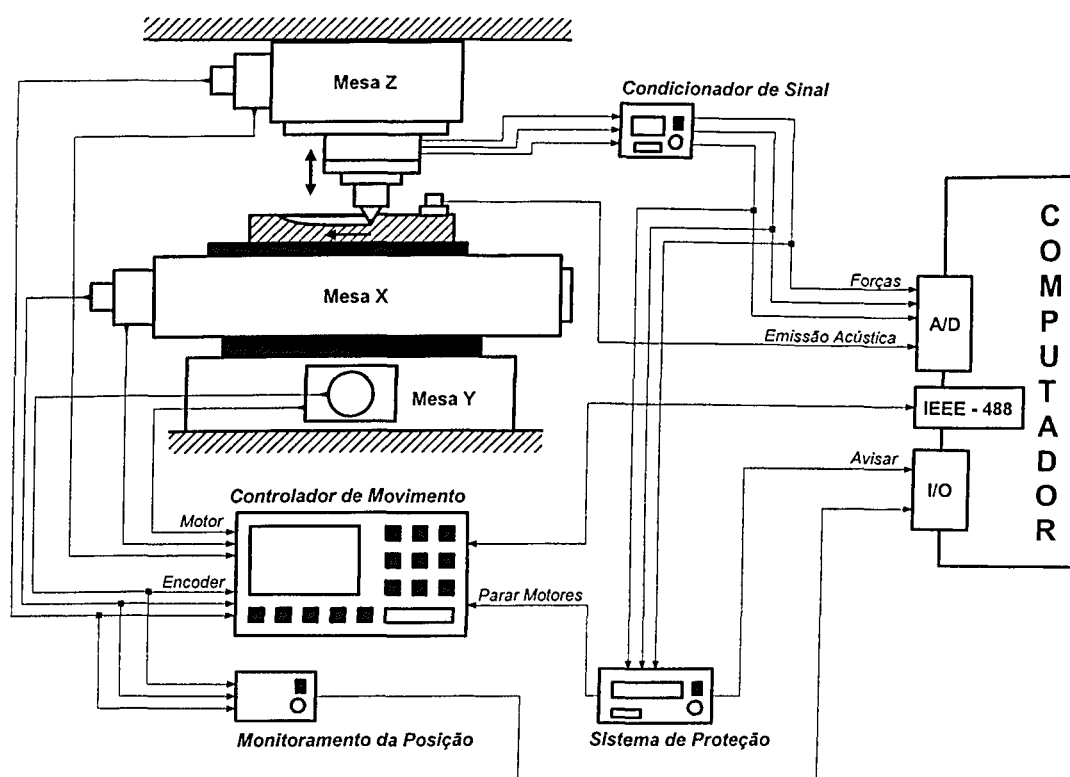


Figura 2.4- Esquema dos subsistemas constituintes do esclerômetro desenvolvido.

### 2.2.1 Sistema de acionamento e controle de movimento

O sistema de acionamento mecânico de ensaios disponível no esclerômetro é constituído por três mesas de comando numérico de precisão, acionadas por um controlador de trajetórias computadorizado, controlado remotamente, através de uma interface GPIB, pelo computador gerenciador do equipamento. As mesas acionadoras, são montadas formando um sistema de movimentação micrométrico de coordenadas cartesiano ( $xyz$ ). Esta arquitetura garante ao equipamento flexibilidade para a execução de vários ensaios.

Nesta arquitetura, o penetrador é fixado à mesa acionadora 1, a qual é responsável pelo movimento vertical (de penetração ou movimento em  $z$ ) do penetrador. A amostra é fixada na mesa acionadora 2 (movimento em  $x$ ), que por sua vez é montada sobre a mesa acionadora 3 (movimento em  $y$ ). Esta configuração garante controle total sobre a posição da amostra ao longo de todo o espaço de trabalho disponível, permitindo trajetórias tão complexas quanto se deseje, respeitadas as resoluções das mesas.

Nos ensaios esclerométricos o movimento de riscagem pode ser executado tanto pela mesa acionadora 2, como pela 3 ou por movimentos conjugados de ambas. Geralmente no esclerômetro desenvolvido, os ensaios esclerométricos são realizados pelo movimento em conjunto das mesas acionadoras 1 e 2. Nesta configuração, a mesa acionadora 3 permite uma

movimentação lateral da amostra possibilitando a execução de múltiplos riscos, um ao lado do outro, permitindo a análise esclerométrica de uma superfície.

No equipamento desenvolvido, ensaios esclerométricos podem ser realizados com a opção de movimentação lateral oscilatória do penetrador. Neste caso, o risco gerado é executado com movimentos conjugados das mesas acionadoras 2 e 3.

Os movimentos realizados apresentam grande estabilidade dinâmica, aliadas a alta precisão de posicionamento. A Tabela 2.1 apresenta as características mecânicas distintas de cada mesa acionadora.

Tabela 2.1- Características mecânicas das mesas acionadoras do sistema.

	Mesa 1 (z)	Mesa 2 (x)	Mesa 3 (y)
Motor de acionamento	De passo	De passo	Corrente contínua
Incremento mínimo do Motor [ $\mu\text{m}$ ]	0.1	0.1	0
Resolução do Encoder [ $\mu\text{m}$ ]	0.1	0.1	1
Velocidade Máxima [mm/s]	0.4	2.5	40
Aceleração Máxima [mm/s <sup>2</sup> ]	8	8	160
Curso Máximo [mm]	9	100	100
Carga Máxima [N]	300	300	300

2.2.2 Sistema de controle da força de penetração

Este módulo é executado em ensaios que exigem um controle da força de penetração. O controle é feito digitalmente através de um algoritmo de controle. Neste módulo, a rotina computacional executora do controle, iterativamente e em laço, lê o valor atual da força de penetração atuante no penetrador, utilizando um conversor A/D, através da lei de controle calcula um incremento de penetração necessário e aciona a mesa onde o penetrador está fixado.

2.2.3 Sistema de monitoramento das forças atuantes sobre o penetrador

O módulo é composto por uma célula de carga, três condicionadores de sinal independentes e um sistema de conversão digital analógico. Esta configuração capacita o equipamento monitorar e registrar as três forças atuantes no penetrador.

O sistema de conversão digital analógico, ou interface A/D, é composto por uma placa digitalizadora instalada no computador gerenciador do equipamento. Este dispositivo é re-

sponsável pela conversão dos sinais analógicos, provindos dos condicionadores de sinais, em sinais digitais que são transferidos e armazenados na memória do computador.

A interface A/D utilizada é capaz de digitalizar simultaneamente até 4 canais analógicos, com resolução de 12 Bits, a uma taxa de aquisição máxima de 1 MHz por canal.

#### **2.2.4 Sistema de monitoramento da posição do penetrador**

Neste módulo, os sinais dos *encoders* das mesas acionadoras, que retroalimentam o controlador de movimento são utilizados. Ao longo da execução dos ensaios, os sinais dos *encoders* são monitorados continuamente pelo computador gerenciador do equipamento. Assim, em tempo real, as posições  $x$  e/ou  $y$  da amostra e a penetração  $z$  do penetrador são monitoradas e registradas.

No equipamento, o sistema de monitoramento da posição do penetrador, garante a resolução de  $0.1 \mu\text{m}$ , em função dos *encoders* utilizados.

#### **2.2.5 Sistema de monitoramento de emissão acústica**

Este módulo é composto por um sensor de emissão acústica, situado em um lugar estrategicamente escolhido perto do penetrador, um pré-amplificador de sinal e uma placa de aquisição, instalada no computador capaz de digitalizar simultaneamente 2 canais analógicos com 16 Bits de resolução cada, a uma taxa de aquisição máxima de 8 MHz por canal em tempo compartilhado.

Neste trabalho, não será discutida a utilização deste sistema.

#### **2.2.6 Sistema de proteção contra níveis excessivos de força**

O sistema apresenta um módulo independente de proteção, que permanentemente monitora os níveis das forças atuantes no penetrador. Caso este nível exceda o nível máximo admissível, automaticamente os motores das mesas acionadoras são bloqueados, e o penetrador é recolhido a uma posição de segurança, protegendo o sistema mecânico contra eventuais colisões do penetrador (com a amostra ou porta-mostra), ou penetrações excessivas ajustadas ou decorrentes da execução de um ensaio pelo usuário.

O sistema de proteção garante a integridade estrutural do equipamento, imprimindo-lhe robustez, produtividade e segurança na sua utilização.

### **2.2.7 Procedimento de calibração automática do sistema de medição das forças atuantes no penetrador**

No equipamento desenvolvido, a calibração do sistema de medição de força é uma atividade importante para a realização dos ensaios. Ela determina a função de transferência, que associa a leitura do conversor A/D em Volts, à carga aplicada em Newtons, devendo ser feita periodicamente, no ajuste do fundo de escala do equipamento.

Como a calibração da cadeia de instrumentação de força é uma atividade freqüente no equipamento, este processo foi automatizado. A completa calibração de força, no equipamento desenvolvido, é realizada em poucos minutos, utilizando-se um procedimento computacional de calibração das forças, executada pelo computador gerenciador do equipamento.

O procedimento de calibração automatizado dá agilidade e garante precisão ao sistema de monitoramento das forças atuantes no penetrador.

### **2.2.8 Sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial**

O módulo é composto por uma sonda de contato mecânico de varredura, instalada no esclerômetro desenvolvido. As mesas micrométricas de coordenadas  $xy$  são usadas para movimentar a amostra em relação à sonda, que permanece estacionária (Figura 2.5). Esta configuração capacita o equipamento desenvolvido executar a varredura microscópica de superfícies, extraíndo a topografia superficial digitalizada de áreas desejadas da amostra.

O acréscimo da sonda topográfica ao projeto possibilita o Macroesclerômetro ser utilizado na caracterização de superfícies, como:

- perfilômetro;
- rugosímetro;
- microscópio mecânico de varredura.

No equipamento desenvolvido, o sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial garantem precisão e agilidade nas análises experimentais das técnicas esclerométricas e de indentação, sem o acréscimo significativo no custo final do projeto.

## **2.3 Descrição do sistema computacional gerenciador de ensaios**

Como o esclerômetro desenvolvido apresenta uma arquitetura totalmente aberta, nesta configuração a materialização do equipamento de teste é realizada pela utilização de um

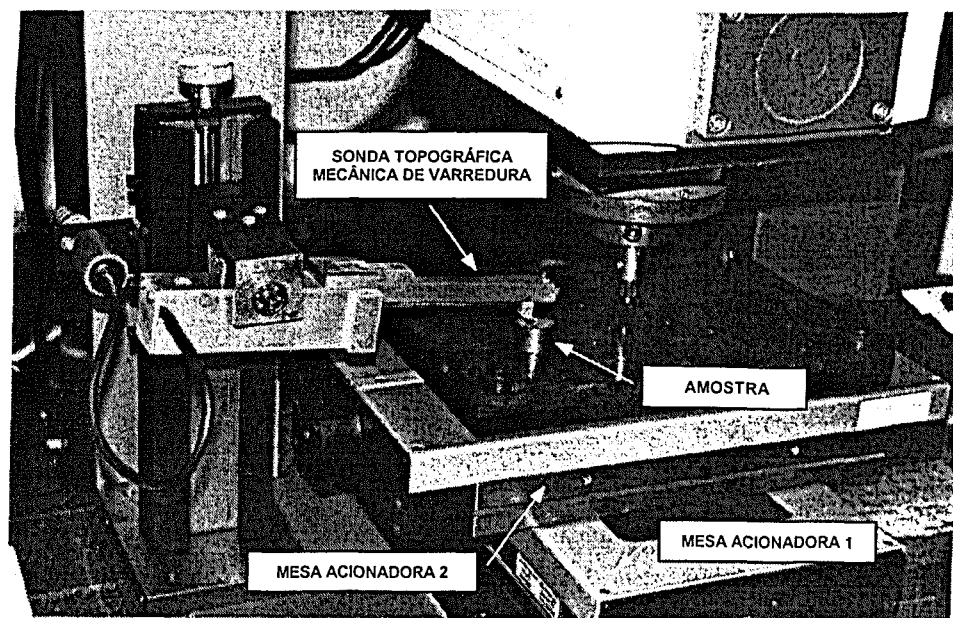


Figura 2.5- Microscópio mecânico de varredura construído, adaptando uma sonda topográfica ao esclerômetro desenvolvido.

procedimento computacional específico executor de um ensaio. Ou seja, entre os vários tipos de ensaios executados, a mudança está presente apenas no procedimento computacional.

Com a implementação de novos procedimentos computacionais executando ensaios cada vez mais específicos, o Macroesclerômetro poderá realizar inúmeros testes. Futuramente dispondo de uma vasta e extensível biblioteca de ensaios, o equipamento desenvolvido possibilitará a concepção da idéia básica de uma *máquina universal* de execução de ensaios, aplicado à investigação e caracterização de superfícies, disponibilizando, em um só equipamento, sempre com o controle total sobre as variáveis de ensaio:

- simulação de esclerômetros pendulares rotativos;
- simulação de tribômetros superpondo riscos sucessivos;
- aplicação de carregamento cíclico a fim de se estudar o endurecimento superficial e/ou fadiga de contato;
- permitindo ainda, configurações complexas para o ensaio de indentação, adequando suas características a materiais não convencionais;

O Macroesclerômetro possibilitará inovações na configuração dos ensaios esclerométricos e de indentação. Propriedades específicas de superfícies, revestidas ou não, poderão ser exploradas de forma mais adequada.



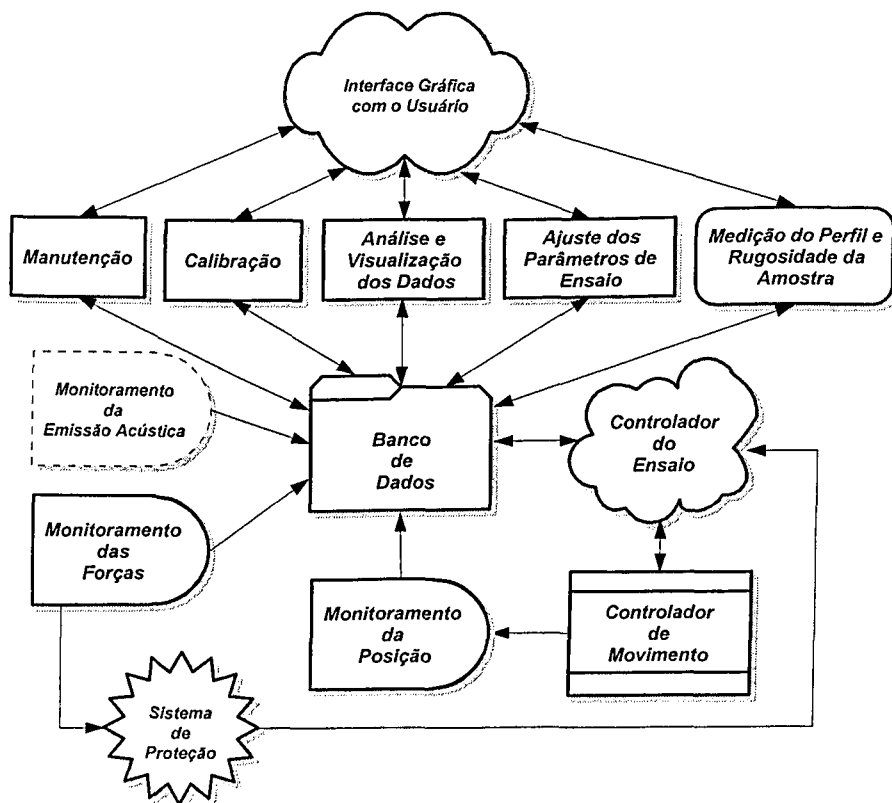


Figura 2.6- Diagrama funcional do sistema computacional do macroesclerômetro, ilustrando os módulos que o compõem.

O sistema computacional do esclerômetro, esquematizado na Figura 2.6, integra em um só módulo: a execução, a calibração, o ajuste e o controle total do ensaio, a coleta, o tratamento, a análise e o armazenamento organizado dos dados referentes ao ensaio, imprimindo a esta técnica experimental produtividade, segurança e abstração de detalhes irrelevantes ao processo experimental, tudo assistido por uma interface em software/usuário/sistema intuitiva e de alto nível visual.

O *software* gerenciador do equipamento foi desenvolvido para plataforma Windows NT 4.0, utilizando programação orientada a objeto em C++ (Figura 2.7). A interface com o usuário foi construída usando-se a biblioteca de classes da Microsoft (MFC - *Microsoft Foundation Classes*).

No Macroesclerômetro, este é o único módulo do equipamento que consome tempo de processamento do computador gerenciador, ao longo de todo o ensaio e é responsável por todo o sincronismo entre as partes atuantes no ensaio.

Baseando-se na proposta inicial de automatização completa do ensaio, a análise e o desenvolvimento do módulo computacional foi estruturada para:

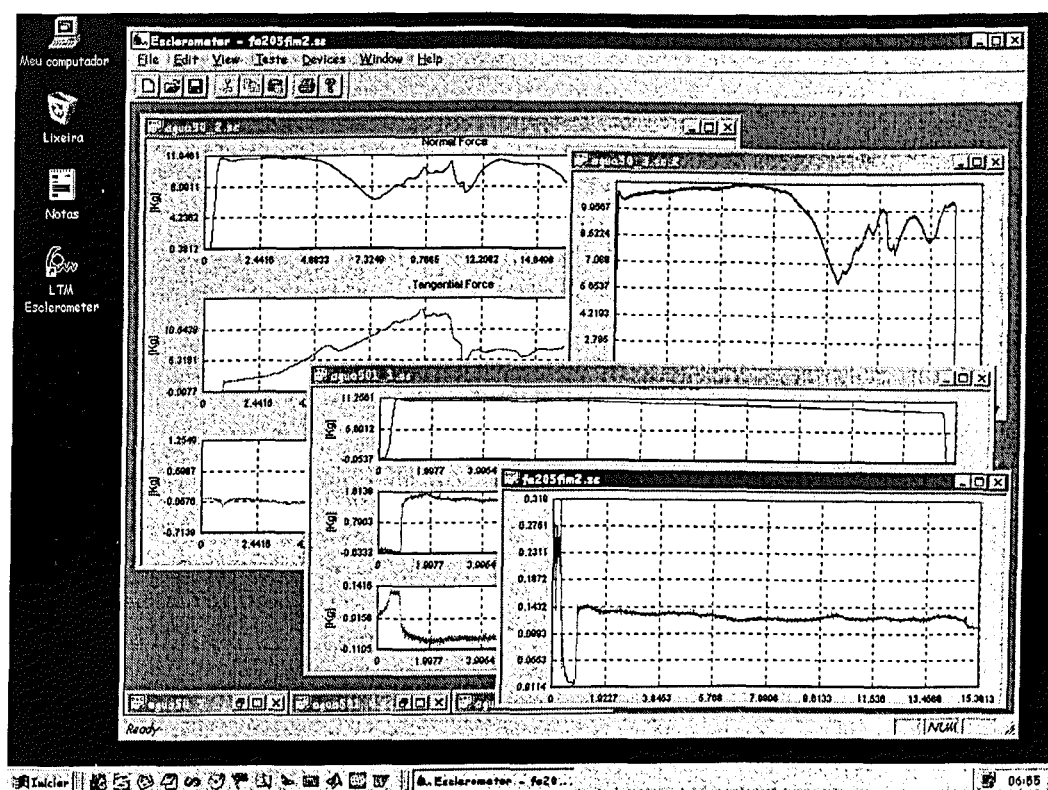


Figura 2.7- Programa computacional gerenciador do ensaio.

- i. Escolher vários tipos de ensaios;
- ii. Ajustar dados referente ao ensaio;
- iii. Executar automaticamente o ensaio;
- iv. Monitorar os dados do ensaio;
- v. Visualizar gráficos de dados;
- vi. Analisar e tratar estatisticamente os sinais monitorados;
- vii. Manter banco de dados, gerenciando o armazenamento e o levantamento dos dados referentes a inúmeros ensaios;
- viii. Imprimir relatórios técnicos referentes a dados solicitados pelo usuário.

O projeto computacional de controle do equipamento é o coração do esclerômetro desenvolvido e exigiu elaborações sérias e cuidadosas. Para que o sistema atenda de forma produtiva às exigências do usuário da técnica experimental sendo crucial que recursos complexos como segurança do sistema fossem incorporados desde o início.

Na execução do projeto computacional do Macroesclerômetro foram elaboradas cuidadosamente um conjunto de metas para o projeto, que ajudaram a estabelecer as características do sistema. As metas do projeto do Macroesclerômetro são as seguintes:

- **Extensibilidade.** O código tem de ser escrito para crescer confortavelmente e mudar quando mudarem as exigências da técnica experimental.
- **Portabilidade.** Conforme ditam as exigências dos usuários, o código precisa ser capaz de passar facilmente de um sistema operacional para o outro.
- **Confiabilidade e Robustez.** O sistema deve ser capaz de proteger a si próprio contra os problemas internos e intromissões externas, devendo apresentar comportamento previsível em todos os momentos e os ensaios não devem conseguir danificar o sistema mecânico ou seu funcionamento.
- **Compatibilidade.** Embora o Esclerômetro seja escrito para Windows NT, sua operação e sua interface devem ser compatíveis com os sistemas Microsoft futuros e existentes.
- **Desempenho.** Dentro das limitações das outras metas do projeto, o sistema deve ser o mais rápido possível, explorando o máximo a capacidade tanto do hardware utilizado, como também da técnica experimental.

As subseções a seguir discutem as metas de projeto computacional do Macroesclerômetro em maior detalhe e descrevem seu efeito na forma final do sistema.

### 2.3.1 Extensibilidade

Todos os sistemas invariavelmente mudam com o tempo. O sistema computacional do macroesclerômetro deve ser capaz de crescer confortavelmente de acordo com a interação com o usuário, atendendo e facilitando seu trabalho experimental. Assim a adição de novos recursos, novos tipos de ensaios (mais específicos), novas ferramentas de visualização gráfica e novas ferramentas de análise estatística, têm que ser suportadas no futuro, sem maiores complicações.

Neste aspecto, a modularização na implementação do código aliada à programação orientada ao objeto foram de vital importância na construção do projeto. O projeto todo, desde seu núcleo, foi implementado usando o paradigma da *Programação Orientada ao Objeto*, o que possibilitou sucesso no cumprimento desta meta.

### 2.3.2 Portabilidade

A segunda meta do projeto, portabilidade do sistema, está intimamente ligada à extensibilidade. A extensibilidade permite que um sistema seja facilmente aprimorado, ao passo que

a portabilidade permite que todo o sistema seja deslocado para um outro sistema operacional ou para uma configuração de hardware diferente, com mínima recodificação possível.

A portabilidade no projeto computacional do macroesclerômetro é sustentada tanto em nível de software, troca do sistema operacional, como de hardware, troca de componente do hardware do sistema, como o conversor A/D, o cartão GPIB, controlador de movimento...

A linguagem C++ é padronizada e disponível em qualquer sistema operacional existente, como todo projeto foi implementado em C++ a portabilidade do sistema para um outro sistema operacional é facilmente sustentada.

Todo código dependente do hardware (diretamente ligado) está encapsulado e abstraído dentro de módulos facilmente substituíveis na forma de bibliotecas de ligação dinâmica (DLLs), assim a substituição de um subsistema de hardware do sistema pode ser executada sem a recompilação do código fonte, o que garante a portabilidade sobre o aspecto de dispositivo de hardware. Por exemplo, caso seja necessário trocar o tipo de conversor D/A, basta trocar a DLL referente a este dispositivo que o sistema será insensível à mudança.

### 2.3.3 Confiabilidade

A confiabilidade é a terceira meta do projeto computacional do Macroesclerômetro. A confiabilidade refere-se a duas idéias diferentes, mas relacionadas. Primeiro, um sistema deve ser robusto, respondendo previsivelmente a condições de erro, mesmo aquelas causadas por falhas de hardware. Segundo, o sistema deve ativamente proteger-se e a seus usuários contra danos acidentais ou deliberados provocados em ensaios realizados por usuários.

O sistema de proteção do Macroesclerômetro pode ser abordado sobre dois aspectos: do ponto de vista computacional ou do ponto de vista mecânico.

O fato do sistema computacional do macroesclerômetro ser desenvolvido sobre a plataforma do sistema operacional Windows NT da Microsoft permite que o sistema como um todo agregue todos os recursos de proteção nativos do sistema operacional contra o usuário, explicitamente, sistemas gerenciados por senhas, recursos e arquivos compartilhados por permissão, administrados por um administrador do sistema. O usuário sem permissão é impossibilitado de executar operações como cópia, deleção, instalação de programas, garantindo ao sistema segurança contra usuários negligentes. Particularmente este recurso é muito precioso na disponibilização do equipamento Macroesclerômetro para o uso de vários usuários, sem necessidade de monitoramento das atitudes deste, pois o equipamento se beneficia do sistema de proteção nativo do projeto computacional.

Do ponto de vista da proteção mecânica do equipamento, o sistema apresenta um módulo de proteção que permanentemente monitora os níveis das forças atuantes no penetrador (provinda da célula de carga triaxial), caso este nível exceda o nível máximo permitido, automaticamente os motores param e o penetrador é recolhido a uma posição de segurança,

protegendo o sistema mecânico contra colisões do penetrador (com a amostra ou porta - mostra) ou penetrações excessivas ajustada ou decorrentes da execução de um ensaio pelo usuário. O sistema de proteção garante a integridade estrutural do equipamento imprimindo-lhe robustez, produtividade e segurança do ponto de vista do usuário.

Neste projeto, o sistema operacional foi encarado como parte integrante do equipamento. É importante salientar que o uso do Windows NT como sistema operacional foi de suma importância para a qualidade final do projeto. Além do aspecto da segurança o sistema como um todo se beneficiou com uso do Windows NT, como sistema operacional, devido a outros recursos inerentes ao programa, entre eles: o uso do sistema de 32 Bits, o uso de recursos compartilhados em rede de computadores, o uso de memória virtual e o uso de APIs<sup>2</sup> do sistema.

### 2.3.4 Compatibilidade

Compatibilidade de software, quarta meta do projeto para o código do sistema computacional do Macroesclerômetro. Em geral, compatibilidade refere-se à capacidade que um sistema tem de executar seu código em outros sistemas operacionais ou para versões anteriores do mesmo.

Este problema de compatibilidade de programas de computadores entre sistemas operacionais diferentes é crítico quando se refere à interface gráfica com o usuário. No caso, a interface gráfica com usuário utilizada no projeto computacional do Macroesclerômetro foi desenvolvida utilizando-se a bibliotecas de classe da Microsoft (MFC - *Microsoft Foundation Classes*), isto significa que o programa desenvolvido rodará em qualquer sistema operacional de 32 Bits, presente ou futuro, desenvolvido pela Microsoft, incluindo a linha do Windows 95/98, no entanto, com desempenho inferior e lógico, sem os recursos de segurança contra o usuário, agregados do Windows NT.

### 2.3.5 Desempenho

A meta final do projeto computacional do Macroesclerômetro era obter um desempenho estupendo, tanto do ponto de vista computacional, como do ponto de vista da técnica experimental.

A tecnologia utilizada na construção do projeto computacional, linguagem C++, Interface Gráfica com o usuário usando a MFC, compilada com o compilador Microsoft Visual C++ 5.0, é atualmente a máxima tecnologia que se dispõe na geração de programas para Windows NT. No aspecto da qualidade final e desempenho, o software gerado é rápido e eficiente.

<sup>2</sup> - *Application Program Interface*. A biblioteca de funções e declarações que são utilizadas na construção dos programas de aplicação para invocar funções específicas e serviços provenientes do sistema operacional ou programas de serviços.

## 2.4 Procedimento experimental e automatização do ensaio

No procedimento computacional, explorou-se ao máximo as características físicas do sistema, visando garantir um alto grau de automatização do esclerômetro desenvolvido.

Consiste das seguintes etapas a execução de um ensaio esclerométrico:

- i. Inserção da amostra e troca do penetrador;
- ii. Definição da área de trabalho;
- iii. Detecção automática da altura de contato do penetrador com a superfície da amostra;
- iv. Definição do tipo de ensaio;
- v. Posicionamento do risco ou impressão sobre a superfície da amostra;
- vi. Ajuste das variáveis do ensaio;
- vii. Execução do ensaio;
- viii. Análise, tratamento e visualização dos dados;
- ix. Impressão e armazenamento dos dados.

Geralmente a preparação e execução de ensaios no Macroesclerômetro é uma tarefa demorada. A execução de determinados testes que realizam inúmeros ensaios, em uma mesma amostra, pode durar horas. Assim, para a comodidade do usuário do equipamento, vários ensaios podem ser programados na amostra em teste e agendados. Automaticamente, o programa computacional executor de ensaios executará estes ensaios agendados de forma automática, sem a necessidade da presença do usuário, ou seja, no Macroesclerômetro o usuário programa os ensaios e horas depois volta para analisá-los. Esta configuração, extremamente conveniente, só é possível devido a característica totalmente computadorizada do equipamento desenvolvido.

Nas subseções abaixo, alguns detalhes do procedimento e automatização dos ensaios executados no equipamento são apresentados. Com a utilização continuada do equipamento, espera-se que novas metodologias sejam elaboradas, atendendo de forma conveniente às necessidades específicas dos usuários das técnicas experimentais utilizadas no Macroesclerômetro.

### 2.4.1 Inserção da amostra e troca do penetrador

O ensaio começa com o deslocamento das mesas acionadoras para suas máximas posições, facilitando a fixação da amostra no porta amostra e a troca do penetrador. Várias amostras com qualquer geometria, podem ser ensaiadas ao mesmo tempo. Esta é a única ação manual, não automática, que o usuário executa ao longo de todo processo.

### 2.4.2 Definição da área de trabalho.

O usuário "manualmente" (através do programa movendo as mesas acionadoras e verificando visualmente a posição do penetrador sobre a amostra) define sobre a superfície da amostra dois pontos, delimitando a área de trabalho, ou seja, nenhum movimento será executado fora desta região (Figura 2.8).

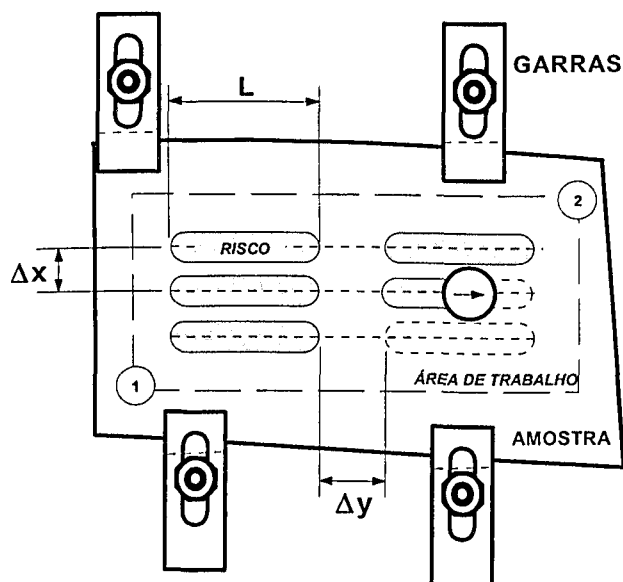


Figura 2.8- Esquema ilustrativo de um teste esclerométrico aplicado a uma amostra qualquer.

Caso habilitado, apenas para amostras retangulares, a área de trabalho é automaticamente determinada, com um processo de detecção da superfície lateral, equivalente ao descrito no item acima.

A definição da área de trabalho é importante para evitar a colisão acidental do penetrador e do suporte de fixação da amostra.

### 2.4.3 Detecção automática da altura de contato do penetrador com a superfície da amostra

Para certos procedimentos executados nos ensaios realizados no equipamento, é interessante determinar uma *posição de segurança* do penetrador para evitar que este percorra desnecessariamente grandes distâncias verticais (Figura 2.9). Esta posição é definida como sendo a menor distância possível do penetrador, com a altura superficial máxima da amostra em teste. De tal forma que, nesta posição, o penetrador pode movimentar-se lateralmente

sem o perigo de colisão com a superfície da amostra ao longo de todo o espaço de trabalho, disponível para ensaio.

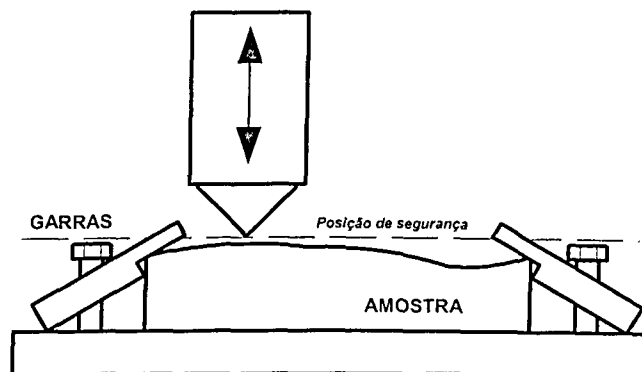


Figura 2.9- Definição da posição de segurança do penetrador.

Após a inserção da amostra e da tarefa de definição da área de trabalho dos ensaios, a posição de segurança é estipulada manualmente pelo usuário.

Outro procedimento importante na execução de ensaios é o processo de *detecção da superfície da amostra*. Neste procedimento, o penetrador incrementalmente se movimenta do seu extremo em direção a superfície da amostra, o valor da força de penetração é monitorado ao longo do processo, caso este valor exceda um limite de referência estipulado, é admitido o contato do penetrador e a superfície da amostra. Este processo particularmente apresenta grande importância para a correção da inclinação da amostra.

Ilustrando as potencialidades experimentais do equipamento, em um ensaio esclerométrico à profundidade de penetração constante, executado em amostras com sua superfície de teste inclinada (Figura 2.10), o processo de detecção da superfície da amostra permite identificar, tocando as extremidades do risco, sua inclinação superficial. Assim, a trajetória do penetrador é corrigida ao longo do ensaio, imprimindo produtividade ao equipamento. Outra vantagem importante neste processo é que em certos casos pode-se executar ensaios em amostras sem preparo da superfície (polimento ou lapidação), fato conveniente para ensaios em revestimentos cerâmicos.

#### 2.4.4 Definição do tipo de ensaio

O ensaio esclerométrico de fato começa com o usuário escolhendo o tipo de ensaio, que são basicamente:

- Esclerométrico com controle de posição ou controle de força;



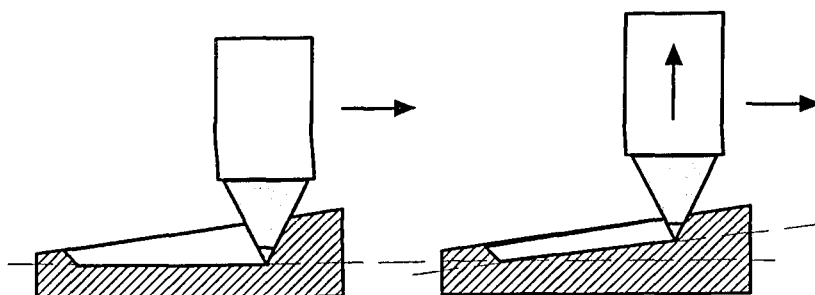


Figura 2.10- Ensaio esclerométrico com correção da inclinação superficial da amostra.

- Indentação;
- Teste de revestimento;
- Caracterização topográfica da superfície:
  - Perfilometria;
  - Rugosidade;
  - Topografia.

#### 2.4.5 Posicionamento do risco ou impressão sobre a superfície da amostra

O usuário pode optar pelo posicionamento manual ou automático, baseado em uma distância entre riscos definida previamente pelo usuário ( $\Delta x$  e  $\Delta y$ ).

No caso de esclerômetros retílenos computadorizados, existe uma terceira opção extremamente conveniente de posicionamento do ensaio sobre a superfície da amostra em teste, o uso de uma “*mira microscópica*”, adaptando-se ao esclerômetro um microscópio óptico e utilizando um sistema de aquisição digital de imagens instalado no computador gerenciador do equipamento. Em amostras preparadas metalograficamente, na tela do computador, pode-se automaticamente posicionar riscos ou impressões para serem executados sobre detalhes superficiais desejados na amostra em teste.

O Macroesclerômetro não tem um sistema de mira microscópica. Mas esta configuração é perfeitamente adaptável em seu projeto.

Um detalhe interessante na utilização de miras microscópicas no Macroesclerômetro, é que o sistema de acionamento da amostra em teste, possibilita a execução de riscos com trajetórias complexas, em qualquer direção, possibilitando a análise local de estruturas superficiais múltiplas.

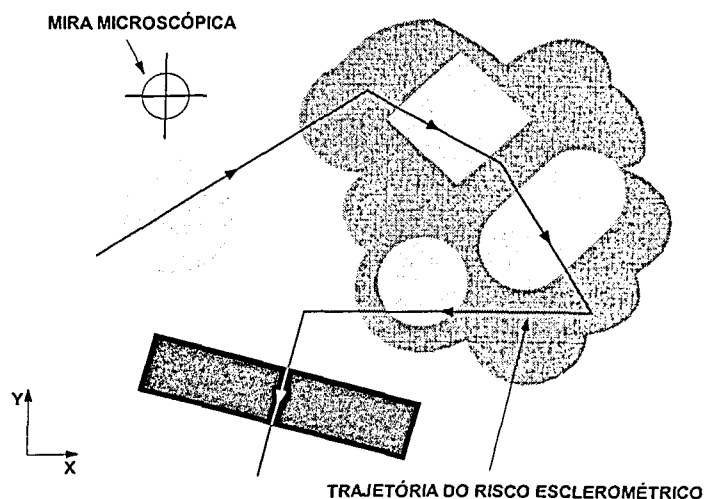


Figura 2.11- Ilustração do posicionamento de riscos esclerométricos com trajetória complexa, utilizando-se mira microscópica.

#### 2.4.6 Ajuste das variáveis do ensaio

O usuário ajusta as variáveis conveniente a cada tipo de ensaio. No caso esclerométrico: velocidade de riscamento, perfil de força/penetração de controle, comprimento do risco (Figura 2.12). Todas as demais variáveis não diretamente ligadas ao ensaio, são automaticamente ajustadas para garantir uma maior performance do ensaio, este é o caso da taxa de digitalização, número de pontos digitalizados, e outras.

#### 2.4.7 Execução do ensaio

O usuário visualiza em tempo real as variáveis monitoradas no ensaio.

#### 2.4.8 Análise, tratamento e visualização dos dados

O usuário visualmente tem controle total sobre esta etapa (Figura 2.13).

#### 2.4.9 Impressão e armazenamento dos dados

Os dados podem ser exportados em vários formatos, e impressos sobre a forma de relatórios técnicos (Figura 2.14).

Todo ensaio é armazenado em um banco de dados que organiza as informações do equipamento.

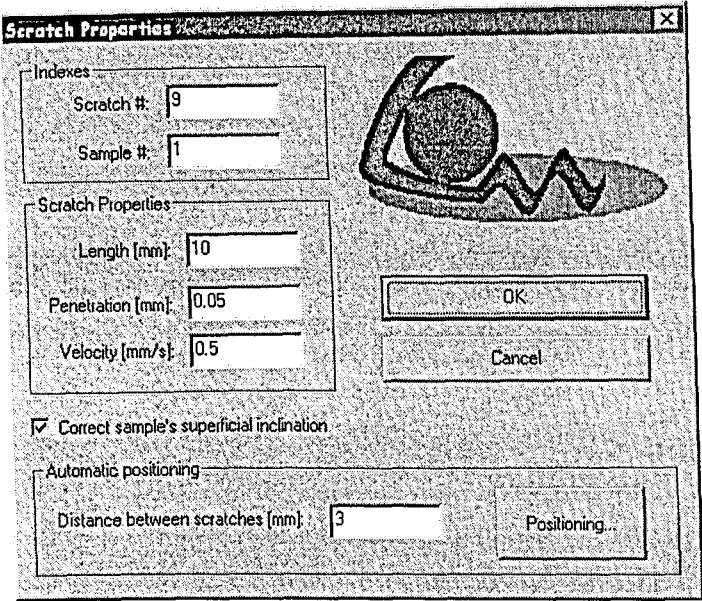


Figura 2.12- Caixa de diálogo de ajuste dos dados de um ensaio esclerométrico com profundidade de penetração constante.

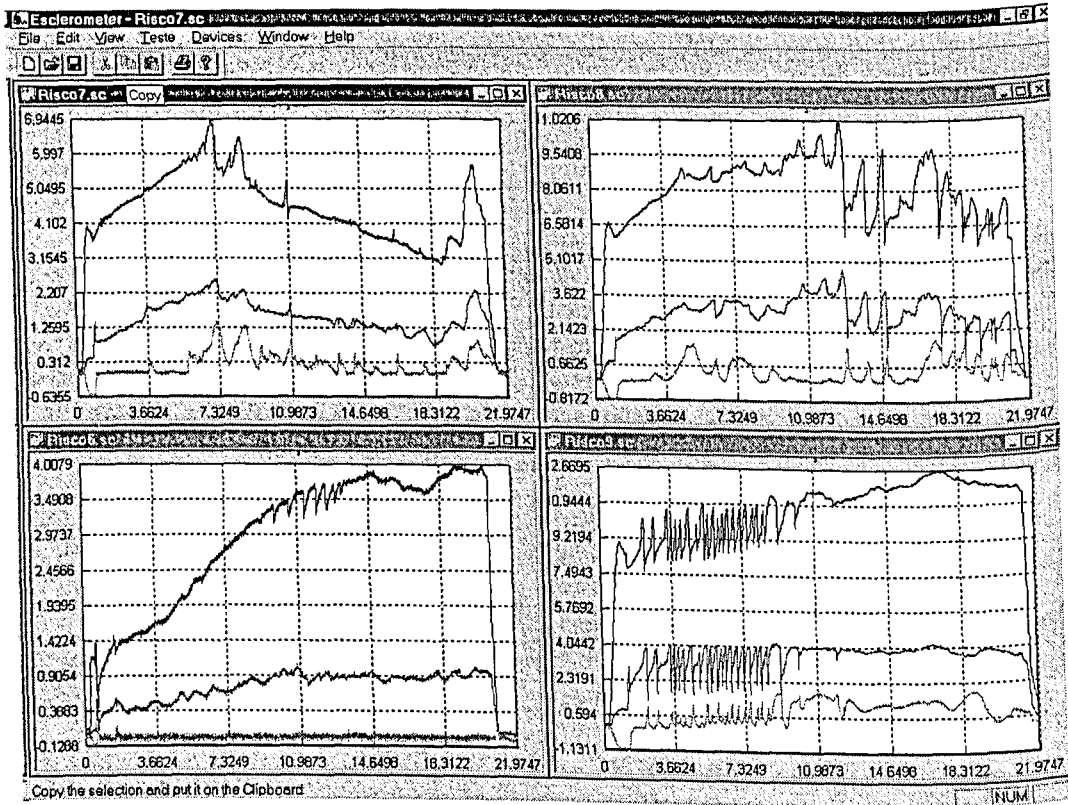


Figura 2.13- Programa computacional gerenciador do Macroscaler.

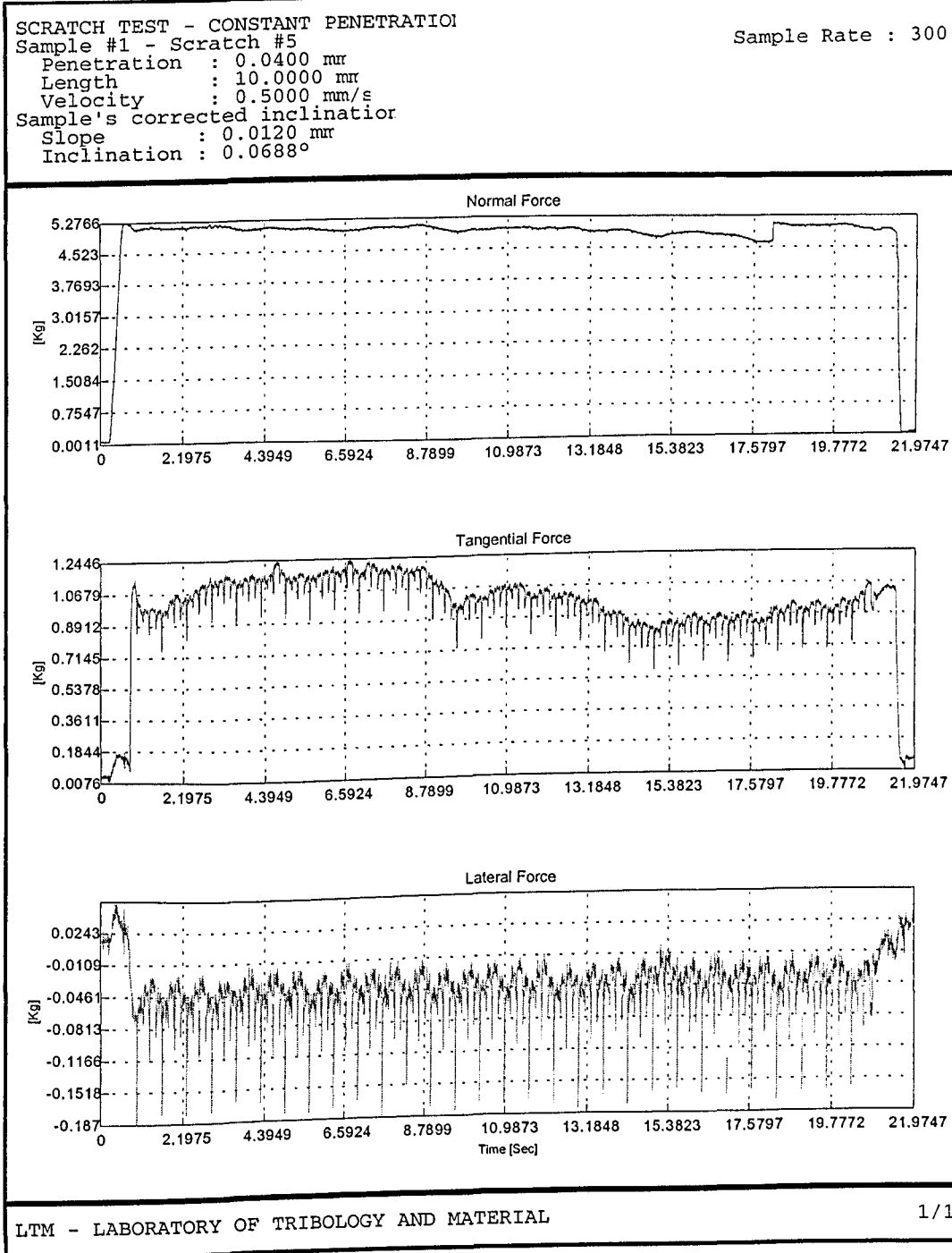


Figura 2.14- Relatório impresso pelo programa computacional executor do ensaio.

# Capítulo 3

## Sistema de Controle

O sucesso e o diferencial do esclerômetro projetado é apresentar uma arquitetura totalmente aberta, o que garante ao equipamento proposto um baixo custo em relação a sua potencialidade.

O Macroesclerômetro apresenta uma proposta para o sistema de acionamento mecânico do ensaio totalmente computadorizada. Esta característica permite que vários ensaios diferentes sejam executados no equipamento (Figura 3.1). Para isto, a cinemática e dinâmica do penetrador e da amostra em teste são governadas pelo acionamento controlado das mesas motorizadas do equipamento. Este capítulo disserta sobre isto, a estratégia de controle utilizada no acionamento dos ensaios realizados no Macroesclerômetro.

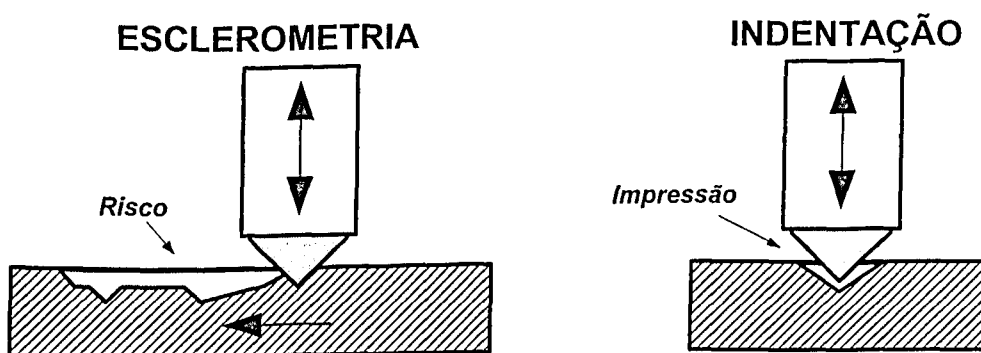


Figura 3.1- Ilustração dos ensaios realizados no esclerômetro desenvolvido.

O Macroesclerômetro é capaz de realizar ensaios esclerométricos e de indentação com:

- controle da profundidade de penetração;
- controle da força de penetração.

Estes ensaios podem ser executados com ajuste da variável de controle com:

- perfil constante;
- perfil em rampa ascendente (ou descendente);
- perfil complexo editado pelo usuário.

Neste capítulo, o controle dos ensaios realizados no esclerômetro desenvolvido, foi dividido em três atividades distintas:

- sistema de acionamento e controle de ensaios;
- sistema de controle da profundidade de penetração;
- sistema de controle da força de penetração.

Estes subsistemas de controle são apresentados em detalhes, na ordem citada, apresentando suas respectivas técnicas, atividades computacionais, estratégias e a participação deste sistema complexo que é o sistema computacional gerenciador de ensaios que controla o Macroescelômetro desenvolvido.

### 3.1 Requisitos de projeto do sistema de controle

Baseado nas propostas iniciais de projeto do Macroescelômetro, apresentadas no capítulo anterior, para satisfazer às exigências da técnica experimental, o sistema de controle projetado, deve garantir que a variável de controle, em cada tipo de ensaio, seja controlada com:

- precisão;
- confiabilidade;
- repetibilidade;
- generalidade.

A precisão garante que as variáveis controladas, ao longo dos ensaios, correspondam satisfatoriamente a seu perfil estipulado, ou seja, caracterizem fielmente o tipo de ensaio em execução (constante ou em rampa).

A precisão e confiabilidade do controle, utilizadas nos ensaios, são características complementares. A precisão corresponde à obediência dos valores controlados, já a confiabilidade implica que a ação de controle não introduz, ao longo de um ensaio, instabilidades que comprometam o estado desejado, presente na superfície da amostra em estudo, ou seja, comportamentos peculiares presentes na variável controlada (exemplo flutuação da força de penetração) não podem provir da ação do controle do ensaio, mas sim do sistema tribológico em estudo.

A repetibilidade de um ensaio é fundamental em um equipamento de teste, ou seja, dois ensaios de mesma natureza devem ser executados exatamente com mesmas condições. Esta

condição está intimamente comprometida com a estratégia de controle utilizada. O projeto inadequado do controle compromete a credibilidade científica do equipamento.

A generalidade do sistema de controle é uma quarta característica importante no projeto do equipamento desenvolvido. O controle, de forma geral, seus ajustes, técnicas e estratégias utilizadas, devem satisfazer às três características inicialmente mencionadas: precisão, confiabilidade e generalidade, sem a dependência de configurações particulares do ensaio, ou seja, o controle deve se comportar de forma adequada independentemente das propriedades da amostra em teste, seu material, geometria do penetrador e tipo de ensaio. Sempre haverá ajustes e estratégias mais adequadas a configurações particulares do ensaio, porém o implementado no equipamento deve sempre se comportar de forma geral e satisfatória.

Do ponto de vista experimental, a execução de ensaios esclerométricos com controle, de força ou penetração, é uma tarefa complexa. Estes ensaios são muito sensíveis, fortemente influenciados pelas condições superficiais presentes na amostra em teste. Este trabalho, como dissertação de Mestrado, não tem a pretensão de garantir total precisão, confiabilidade e repetibilidade dos ensaios realizados no equipamento. O objetivo do trabalho foi desenvolver metodologias e estratégias que possibilitassem a execução de ensaios controlados, utilizando o Macroesclerômetro com generalidade. O ajuste e adequação destas técnicas, devem ser motivos de trabalhos futuros, desenvolvidos pela equipe do LTM.

A etapa de projeto do sistema controlador de ensaios do Macroesclerômetro encontra-se em desenvolvimento. A maturidade deste módulo será consequência da utilização continuada deste equipamento na investigação do processo abrasivo.

As seções a seguir discutem os sistemas de controle utilizados no projeto do Macroesclerômetro em maior detalhe e descrevem seu efeito na forma final do protótipo desenvolvido.

### 3.2 Sistema de acionamento e controle de ensaios

O sistema de acionamento mecânico de ensaios utilizado no Macroesclerômetro, é constituído por três mesas de comando numérico de precisão, comandadas por um avançado controlador de trajetórias computadorizado. Na realização dos ensaios, este controlador de trajetória é comandado pelo computador que gerencia o equipamento, através de um procedimento computacional, o *sistema computacional gerenciador de ensaios do Macroesclerômetro*.

O sistema computacional gerenciador de ensaios do Macroesclerômetro é o "coração" do esclerômetro desenvolvido. Este módulo é que gerencia todo o equipamento, automatizando os ensaios executados.

As mesas acionadoras usadas no projeto utilizam uma configuração construtiva em série de um *encoder*, fixado ao moto-redutor, acoplado a um fuso-de-esferas-recirculantes, que movimenta seu carro sobre guias prismáticas apoiados em roletes (Figura 3.2). Os movimen-

tos realizados, utilizando-se as mesas acionadoras, apresentam grande estabilidade dinâmica, aliadas a alta precisão de posição.

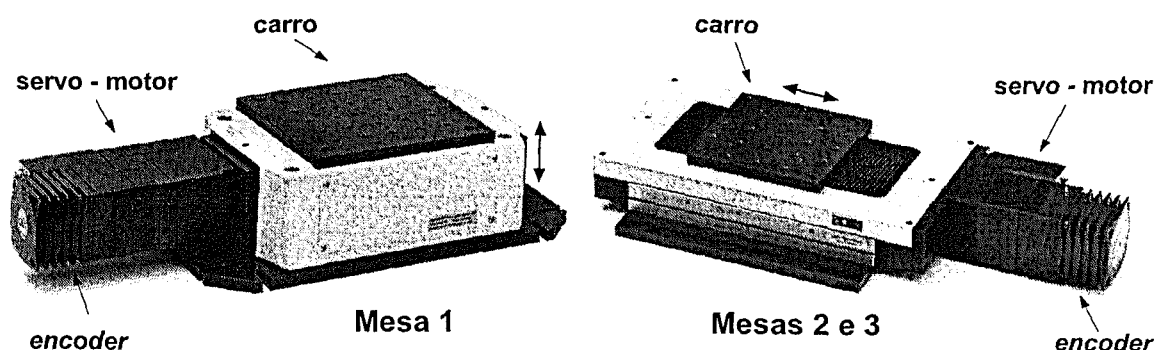


Figura 3.2- Mesas acionadoras utilizadas.

O controlador de movimento utilizado é um módulo computadorizado independente, que utiliza uma CPU *Intel 80486DX - 33 MHz*, conectado ao computador gerenciador do equipamento através de uma interface *GPIB*, utilizando o protocolo de comunicação *IEEE-488*. Este módulo basicamente integra o controlador de trajetórias e o sistema de potência acionador dos servo-motores (*drivers*) das mesas acionadoras.

O controlador de movimento utilizado, fornece um conjunto de instruções básicas, sua "*linguagem de programação*" própria, que possibilitam seu controle através de um computador acoplado. Esta linguagem é estabelecida na forma de mensagens, típico na comunicação por interface *GPIB*. Assim, utilizando comandos independente ou em blocos, constituindo programas, o computador gerenciador de equipamento, controla totalmente as ações do controlador de movimento. Nesta arquitetura, o controlador de movimento se comporta como um computador independente, conectado em rede ao computador principal. Os programas carregados e executados no controlador de movimento são executados independentemente do computador principal que gerencia as atividades do equipamento.

Além da *GPIB*, este controlador de movimento também fornece como interfaces utilitárias:

- duas entradas analógico-digital com 8 bits de resolução cada, operando de 0 a 5 Volts;
- uma entrada digital de 8 bits;
- uma saída digital de 8 bits.

As entradas (ou saídas) digital e analógica, fornecem uma comunicação alternativa com o controlador de movimento, não utilizando a interface *GPIB*. Este recurso é constantemente utilizado pelo programa executor de ensaios quando o tráfego de dados através da *GPIB*



está bloqueada. Geralmente, quando o controlador de movimento executa procedimentos computacionais iterativos em laço, sua comunicação através da GPIB é interrompida.

Uma característica importante neste controlador é que o controle de movimento das mesas acionadoras do ensaio executa trajetórias sempre com perfil trapezoidal de velocidade e utiliza para isto um algoritmo de controle de movimento em malha fechada, proporcional, integral e derivativo, com retroalimentação de velocidade (*PID loop with Feed-Forward*, Figura 3.3). Este tipo de controle garante grande precisão na geração das trajetórias (Newport, 1995). Este controlador também permite que trajetórias complexas sejam geradas com movimentos sincronizados (interpolação linear) ou não das mesas acionadoras.

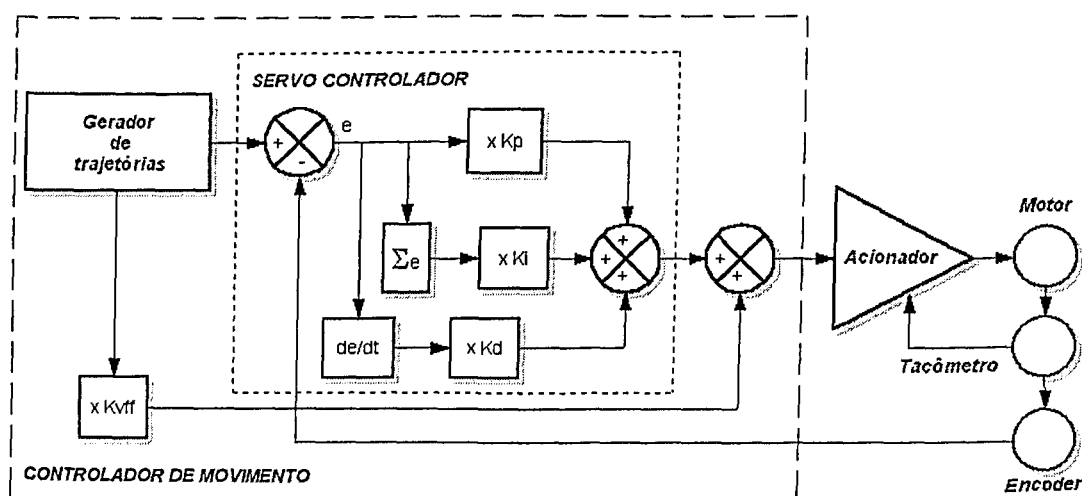


Figura 3.3- Controlador de trajetória proporcional, integral e derivativo, com retroalimentação de velocidade.

No projeto do Macroesclerômetro, o uso de uma mesa de translação no acionamento do penetrador, ao invés do uso direto de um atuador de força (eletromagnético, hidráulico ou pneumático), é uma contribuição original ao projeto de esclerômetros retilíneos informatizados. Esta configuração, o uso de um atuador de posição, permite que ensaios com controle de força de penetração e ensaios com controle de profundidade de penetração, sejam realizados em um mesmo equipamento, o que é inviável utilizando-se apenas um atuador de força. O inconveniente desta configuração, a qualidade do controle de força comandado indiretamente através da posição, pode ser solucionado adotando-se um projeto adequado para o controlador de força.

Outra questão importante no esclerômetro desenvolvido, é a escolha da mesa acionadora da amostra em teste. Na execução de ensaios esclerométricos, há duas possibilidades na escolha da mesa acionadora da amostra, as mesas 2 e 3. A mesa 2 utiliza um motor passo, em contrapartida a mesa 3 utiliza um motor de corrente contínua. Ambas têm respectivamente

como resoluções do encoder de  $0.1 \mu\text{m}$  e  $1 \mu\text{m}$ . Na translação da amostra em teste, a questão em um ensaio esclerométrico não é somente a precisão de posição da amostra, a qualidade da trajetória gerada também é crucial para a qualidade do ensaio. Apesar da alta resolução de posição da mesa 2 (10 vezes) em relação a mesa 3, a utilização da mesa acionadora 3 garante uma trajetória de melhor qualidade, mais suave, devido às características inerentes aos motores de corrente contínua, contra o acionamento discreto dos motores passos. Outra vantagem da utilização da mesa 3 é permitir faixas maiores de aceleração (20 vezes) e velocidade (16 vezes).

O sistema de acionamento de ensaios utilizado simplificou consideravelmente o projeto do esclerômetro proposto. Assim como, a grande precisão de posição e velocidade das trajetórias geradas, garantem precisão aos ensaios esclerométricos, característica fundamental do equipamento desenvolvido.

### 3.3 Sistema de controle da profundidade de penetração

Em um ensaio esclerométrico com controle da profundidade de penetração, um perfil de profundidade é previamente imposto ao longo do risco. A profundidade de penetração é controlada independentemente da dureza do material que esteja sendo riscado. A variação da resistência ao risco se reflete na força normal (Figura 3.4).

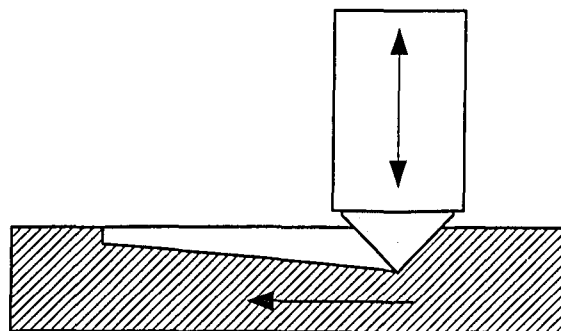


Figura 3.4- Ensaio esclerométrico com penetração em rampa.

Os ensaios esclerométricos com controle da profundidade de penetração são de difícil preparação e execução, porém são fáceis de serem implementados no Macroesclerômetro.

A Figura 3.5 apresenta de forma esquemática um ensaio esclerométrico com profundidade de penetração constante. Neste ensaio é estipulado uma penetração  $p$ . Durante a execução do ensaio, o penetrador deve ser acionado de tal forma que a profundidade de penetração, ao longo de todo o risco se mantenha constante.

A estratégia de execução deste tipo de ensaio é simples: previamente, conhecido o perfil superficial da amostra no local onde será riscado. O controlador de movimento é programado inicialmente para penetrar o penetrador de  $p$  na superfície da amostra, no início do risco. Depois executa uma trajetória fixa previamente programada que obedece ao perfil superficial conhecido. Desta forma, o sulco do risco é gerado com profundidade constante  $p$ .

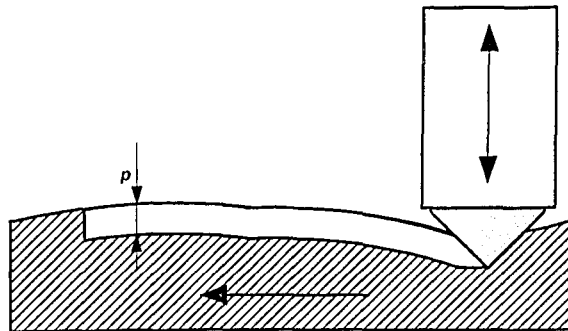


Figura 3.5- Ensaio esclerométrico com profundidade de penetração constante.

A grande dificuldade prática deste procedimento é obter previamente o perfil superficial da amostra no local onde será riscado. No equipamento desenvolvido, este problema pode ser contornado, realizando a medição do perfil desejado através:

- do processo de detecção da superfície da amostra;
- da utilização da sonda topográfica.

O *processo de detecção da superfície da amostra* é um procedimento computacional, executado internamente pelo controlador. Neste procedimento, o controlador de movimento é programado para:

- i. Incrementalmente movimentar o penetrador de uma posição de segurança em direção a superfície da amostra, com sua resolução máxima disponível ( $0.1 \mu\text{m}$ ).
- ii. Assim, a cada interação, o valor da força de penetração é monitorado. Neste caso, a entrada de A/D disponível no controlador de movimento é utilizada.
- iii. Quando o valor da força de penetração excede o limite de referência estipulado previamente no ensaio, o movimento é cessado e o contato do penetrador com a superfície da amostra é admitido.
- iv. O programa computacional que gerencia o ensaio lê e armazena a posição de contato desejada.
- v. O penetrador retorna à sua posição de segurança.

vi. O processo de detecção é finalizado.

Este processo de detecção da superfície da amostra é geralmente muito demorado. Para evitar que o penetrador percorra desnecessariamente grandes distâncias, este processo de detecção parte e retorna sempre a uma *posição de segurança* (Seção 2.4).

O perfil superficial desejado em ensaios esclerométricos pode ser medido executando-se sucessivos processos de detecção da superfície da amostra, ao longo da direção definida para o risco.

Uma outra alternativa interessante, na medição do perfil prévio ao risco, é utilizar a sonda topográfica instalada no equipamento. Esta configuração tem a vantagem de permitir uma medição rápida, direta e precisa do perfil em relação ao processo de detecção da superfície da amostra. A disponibilidade de utilização da sonda topográfica é recente na história do Macroesclerômetro. Neste trabalho, sua utilização na execução de ensaios esclerométricos não foi possível.

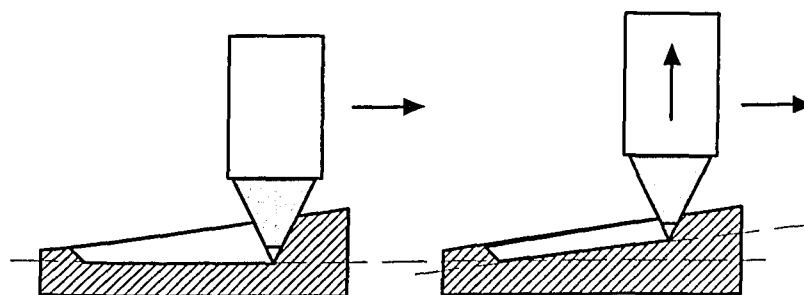


Figura 3.6- Ensaio esclerométrico com correção da inclinação superficial da amostra.

A Figura 3.5 ilustra uma condição extrema da utilização de um ensaio esclerométrico com penetração constante. Geralmente a superfície das amostras ensaiadas, nestes tipos de ensaios, são adequadamente polidas e preparadas. No entanto, a fixação, preparo e paralelismo entre superfícies são problemas críticos da preparação de amostras. Apesar da excelente planicidade superficial, nestes ensaios, ainda a inclinação superficial da amostra deve ser corrigida (Figura 3.6), mantendo, na execução do ensaio, o paralelismo da superfície da amostra e a trajetória do penetrador.

Nesta versão simplificada apenas as extremidades do risco são tocadas, calculando-se a inclinação superficial da amostra, o desnível é corrigido ao longo do ensaio, com um único movimento ascendente (ou descendente).

Nos ensaios esclerométricos com penetração em rampa, a técnica utilizada é similar ao ensaio com profundidade de penetração constante.

A Figura 3.7 apresenta o resultado de um ensaio esclerométrico com penetração constante, cujas características estão na Tabela 3.1, executado no Macroesclerômetro com correção da inclinação superficial. Vários ensaios com as mesmas características são apresentados na Figura 3.8.

Tabela 3.1- Propriedades dos ensaios realizados.

Características	Valores
Material da amostra	Aço
Penetrador	Esférico
Profundidade de penetração	50 $\mu\text{m}$
Velocidade de translação da amostra	0.5 mm/s
Comprimento do risco	10 mm
Frequência de amostragem	300 Hz
Inclinação*	0.1948°
Desnível*	34 $\mu\text{m}$

\*medido pelo equipamento.

A precisão, confiabilidade e repetibilidade dos ensaios esclerométricos com controle da profundidade de penetração são fortemente influenciados pela preparação das superfícies, em teste e de apoio (base), da amostra ensaiada. O preparo inadequado e defeitos de planicidade comprometem a confiabilidade dos resultados.

Na preparação de amostras, para ensaios esclerométricos, cuidados especiais devem ser tomados na preparação da sua superfície de apoio. Uma base inadequada pode percutir em instabilidade na fixação e deformações do corpo da amostra, alterando a natureza do ensaio.

3.4 Sistema de controle da força de penetração

Em um ensaio esclerométrico com controle da força de penetração, um perfil de força é previamente imposto ao longo do risco. A força de penetração atuante no penetrador é controlada independentemente da dureza superficial do material que esteja sendo riscado. A variação da resistência ao risco se reflete na penetração (Figura 3.9).

Os ensaios esclerométricos com controle da força de penetração, ao contrário dos ensaios com controle da profundidade de penetração, são fáceis de serem preparados e executados, porém são de difícil implementação no Macroesclerômetro.

A Figura 3.9 apresenta de forma esquemática um ensaio esclerométrico com força de penetração constante. Neste ensaio é estipulado uma força de penetração  $f$ . Durante a

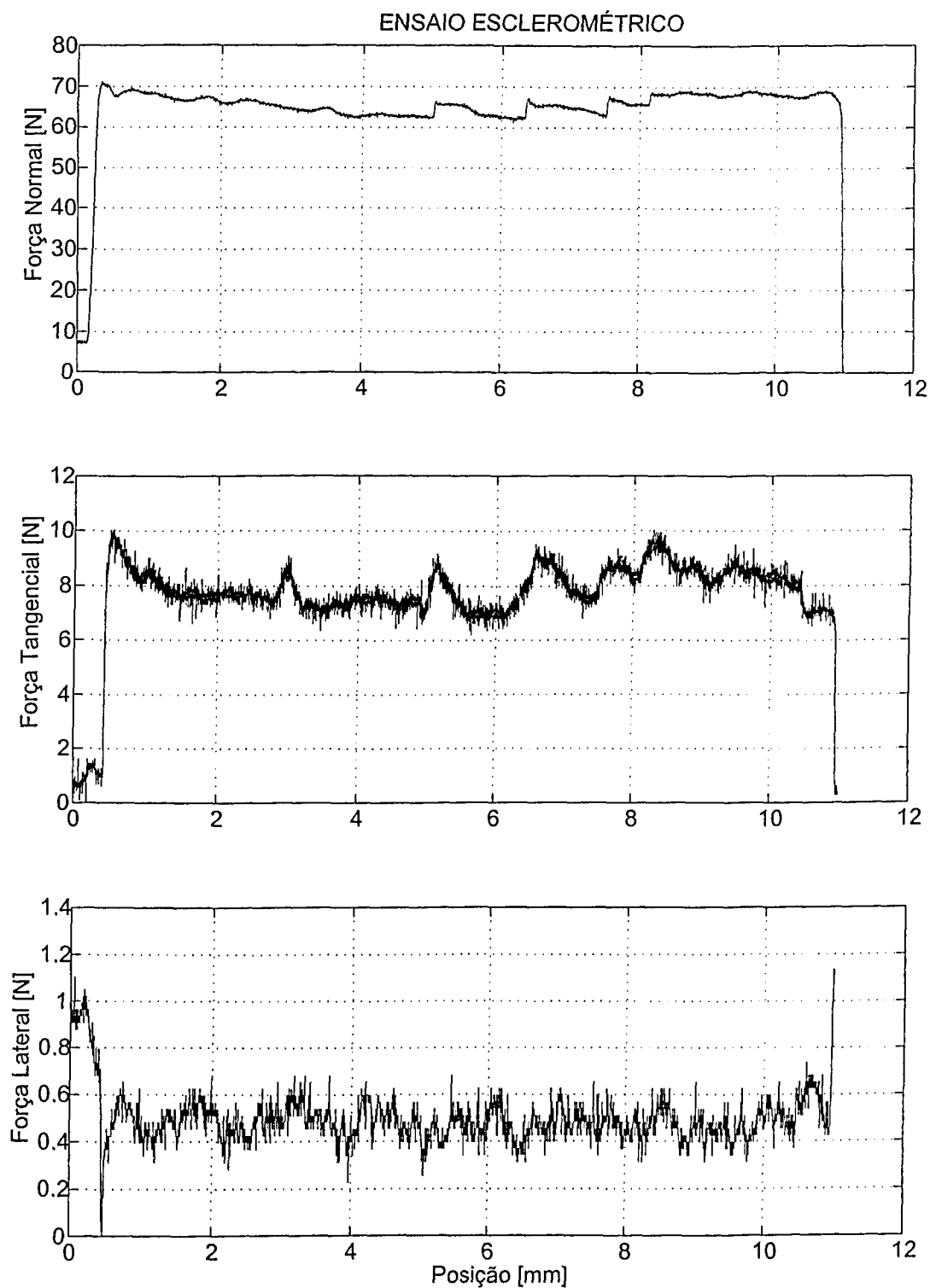


Figura 3.7- Ensaio esclerométrico com penetração constante.

execução do ensaio, o penetrador deve ser acionado de tal forma que a força de penetração, ao longo de todo o risco, se mantenha constante.

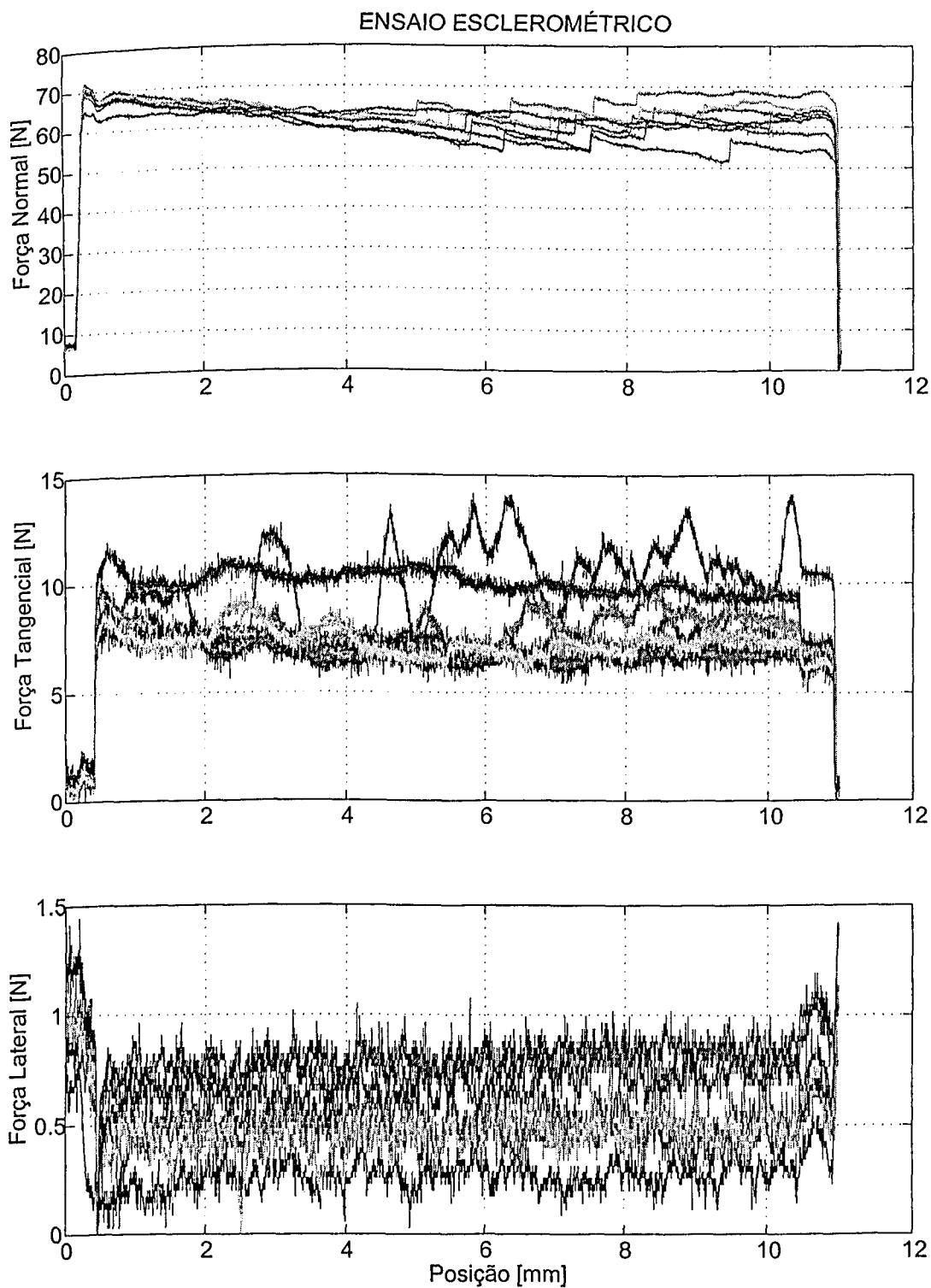


Figura 3.8- Ensaio esclerométricos com controle: penetração constante.

A estratégia de execução deste tipo de ensaio é complexa: é utilizado um controlador digital para o controle da força de penetração ao longo da execução dos ensaios esclerométricos.

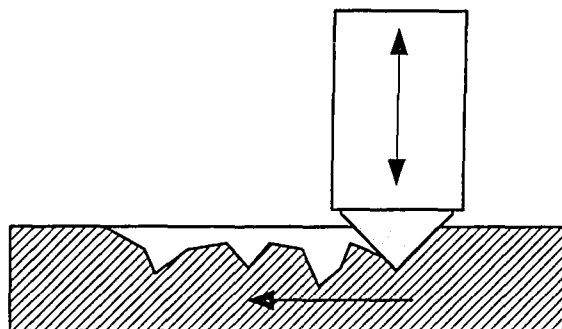


Figura 3.9- Ensaio esclerométrico com força constante.

Um esquema de controle no qual um computador digital é incluído no laço (*loop*) de controle para realizar o processamento do sinal em uma forma desejada é chamada de *controle direto digital*. O controle direto digital tem sido aplicado desde 1960, em larga escala, em sistema de controle de processo. O avanço expressivo em microprocessadores e microcomputadores, desde meados de 1970, tem habilitado os engenheiros à aplicação tecnológica do controle direto digital.

Controle direto digital de um processo, ou planta, tem as seguintes vantagens sobre o correspondente controle analógico (Ogata, 1987):

- o processamento dos dados no controlador digital é direto; o cálculo de controles complexos podem ser executado facilmente;
- programas de controles (característica do controlador) podem ser mudados facilmente sem que nenhuma mudança física seja necessária;
- controladores digitais são largamente melhores do que os correspondentes controladores analógicos, do ponto de vista do ruído interno e efeitos de deriva.

Porém, o controle digital tem algumas desvantagens, como as abaixo:

- os processos de amostragem e quantização tendem para resultados com mais erros, o qual degradam a performance do sistema;
- projetar controladores digitais que compensem tal degradação é mais complexo que o projeto de controladores analógicos com um nível de performance equivalente.

Um modelo simplificado da arquitetura de um controlador digital atuando em malha fechada está ilustrado na Figura 3.10. Cada componente constituinte do controlador está representado por blocos. Basicamente se resume a um *conversor-analógico-digital* (A/D), um *processador numérico* (CPU) e um *conversor-digital-analógico* (D/A), acoplados em série, trabalhando sincronizadamente controlados por um *temporizador* (*clock*). A cada instante,



na taxa de amostragem do controle, a ação de controle é avaliada na CPU por uma rotina numérica implementada (*lei de controle*). Esta rotina é alimentada pelo transdutor através do conversor A/D. A ação de controle é operacionalizada pelo conversor D/A, que aciona o atuador. Desta forma, em malha fechada, opera o sistema de controle.

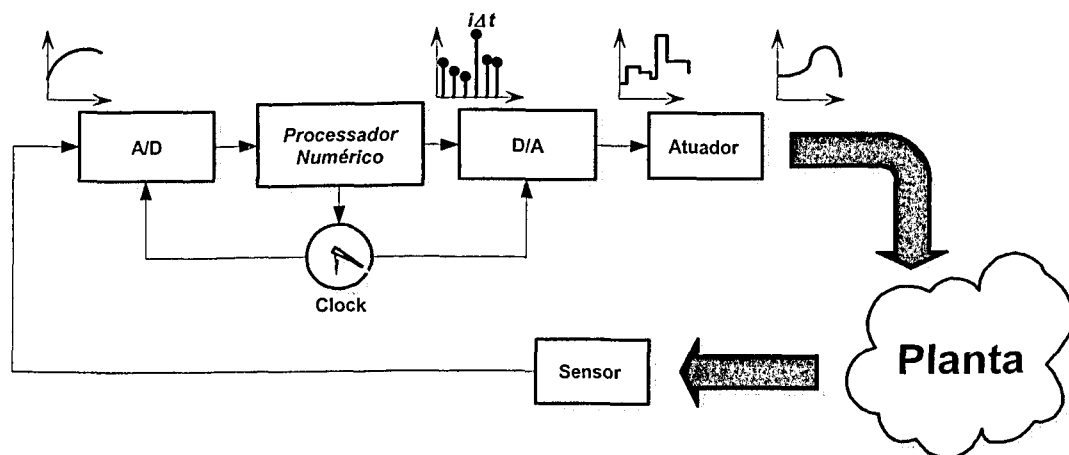


Figura 3.10- Diagrama de bloco de um controlador digital atuando em malha fechada.

Várias são as opções de materialização deste controlador digital. Neste trabalho, foram avaliadas para a implementação do controle da força:

- diretamente no controlador de movimento;
- utilizando o computador gerenciador do equipamento.

As subseções a seguir discutem as estratégias de implementação do controle de força do Macrosclerômetro em maior detalhe e descrevem seu efeito na forma final do sistema de controle desenvolvido.

### 3.4.1 Implementação do controle da força diretamente no controlador de movimento

Nesta versão, o controle em malha fechada é estabelecido utilizando-se as entradas analógicas disponíveis no controlador de movimento. Esta configuração é atraente, não requer componentes adicionais, simplificando significativamente a arquitetura do sistema controlador da força de penetração.

Entretanto, os comandos disponíveis na linguagem utilizada para a programação do controlador de movimento são restritos, fornecem apenas recursos limitados. Isto dificulta, e

em certos casos impossibilita, a implementação de algoritmos de controle digital sofisticados, como um PID. Utilizando esta configuração, até o presente momento, conseguiu-se apenas implementar um controlador com força de penetração, do tipo *ON/OFF* (*Bang-bang* ou *Liga-desliga*).

Numa versão para força de penetração constante, o controlador digital *ON/OFF* implementado trabalha sempre com incrementos ( $\Delta z$ ) fixos de penetração. Caso o valor da força de penetração exceda o limite de referência, estabelecido previamente para o ensaio, o penetrador recua, caso contrário avança. Desta forma, na execução de um ensaio esclerométrico tenta-se manter a força de penetração constante, sendo o passo de penetração uma variável de controle que deve ser ajustada pelo usuário.

O uso do controlador digital *ON/OFF* no controle da força de penetração foi descartado nas aplicações esclerométricas à força de penetração constante, basicamente, por dois motivos:

- resposta lenta do atuador de posição;
- sua ação discreta é oscilatória.

No controle *ON/OFF*, a ação de controle é sempre constante, independe do erro presente na força de penetração. No ajuste do controlador, quando ajustado pequenos incrementos de penetração a mesa que aciona o penetrador produz uma restituição lenta da força de penetração, não satisfazendo às necessidades de controle. Em contrapartida, quando ajustados grandes incrementos de penetração, a ação discreta do controle gera uma resposta oscilatória da força de penetração, o erro nunca estabiliza. Neste tipo de controlador, caso seja possível um ajuste adequado, ou seja, haja uma penetração ideal, esta com certeza, será um caso particular ao material ensaiado, não satisfazendo uma diretriz básica do projeto de controle: a generalidade. Assim, o controlador *ON/OFF*, apresentando um comportamento insatisfatório no controle da força de penetração, não garante confiabilidade aos ensaios esclerométricos realizados no Macroesclerômetro.

A implementação do controle da força diretamente no controlador de movimento tem sido uma técnica útil em procedimentos complementares. Similarmente à implementação do controlador *ON/OFF*, o processo de "toque superficial" da amostra, descrito na Seção 3.3, é realizado.

Outro tipo de ensaio interessante, que também pode ser realizado utilizando esta técnica de implementação, é o ensaio de adesão revestimento-substrato. Nesta configuração, é necessário que ao longo do ensaio a força normal atuante no penetrador cresça continuamente, até atingir um valor máximo estipulado previamente pelo usuário. A implementação desta versão é similar ao algoritmo do processo de "toque superficial", porém nesta configuração a força admitida para o toque do penetrador com a superfície da amostra é ajustada para a força de penetração máxima desejada.

A Figura 3.11 apresenta o resultado de três ensaios de adesão revestimento-substrato, com características descritas na Tabela 3.2, executados no Macroesclerômetro.

Tabela 3.2- Propriedades dos ensaios realizados.

Características	Valores
Material da amostra	Aço sinterizado
Revestimento	Camada fina de óxido
Penetrador	Esférico
Incremento de penetração	0.3 $\mu\text{m}$
Velocidade de translação da amostra	0.1 mm/s
Comprimento do risco	15 mm
Frequência de amostragem	300 Hz

Nesta versão de implementação do ensaio de adesão revestimento-substrato, de fato não há controle sobre a força de penetração. Na realidade, estes ensaios são executados com incremento de penetração constantes. O comportamento crescente da força de penetração é consequência exclusivamente da interação do penetrador com a superfície da amostra. O ensaio realizado desta forma não apresenta repetibilidade. Não existe controle da taxa de aplicação da força normal e o comprimento do risco para a carga máxima é aleatório. Apesar da falta de repetibilidade e controle da força normal, estes ensaios são úteis e apresentam grandes potencialidades na caracterização de revestimento (CSEM, 1999).

Nos ensaios mostrados na Figura 3.11, neste trabalho, não houve a preocupação de analisar se ocorreu ou não a falha de adesão do revestimento. O objetivo destes testes no texto foram ilustrar as potencialidades do equipamento na realização deste tipo de ensaio.

No LTM, o estudo da técnica esclerométrica aplicada na análise de adesão revestimento-substrato é uma atividade que está sendo realizada paralelamente a este trabalho, por outros membros da equipe.

Como a implementação do controle da força diretamente no controlador de movimento não satisfaz todas as necessidades de projeto do Macroesclerômetro, uma nova estratégia de controle da força de penetração foi adotada: utilizar o computador que gerencia o equipamento, como controlador da força de penetração. Esta nova arquitetura, mais flexível, possibilita a implementação de qualquer tipo de controlador digital. Agora, pode-se tentar executar ensaios com perfis complexos da força de penetração, utilizando-se algoritmos de controle, do tipo PID.

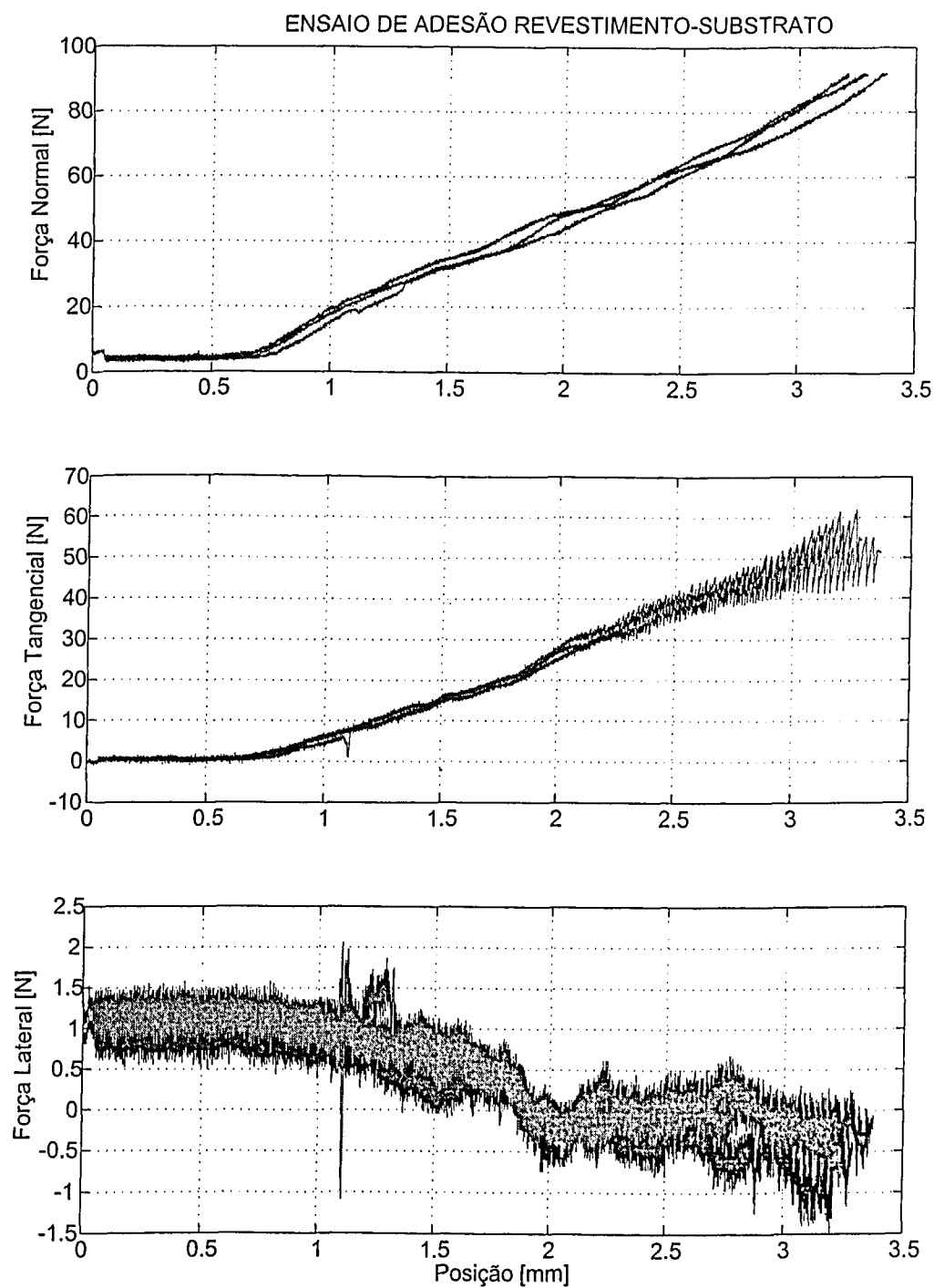


Figura 3.11- Ensaio de adesão revestimento-substrato.

### 3.4.2 Implementação do controle da força utilizando o computador gerenciador do equipamento

O sistema computacional de controle digital da força de penetração desenvolvido é um módulo que integra o programa computacional gerenciador de ensaios, no projeto do Macroesclerômetro. Este módulo é uma ferramenta útil e pode ser utilizada de forma geral, em problemas de controle digital em tempo real, implementados e executados em computador.

Neste etapa implementou-se um controlador digital do tipo PID clássico, mostrado na Figura 3.12. Este controlador foi aplicado aos ensaios esclerométricos com o controle da força de penetração. A escolha deste algoritmo de controle se deve basicamente à sua simplicidade de implementação.

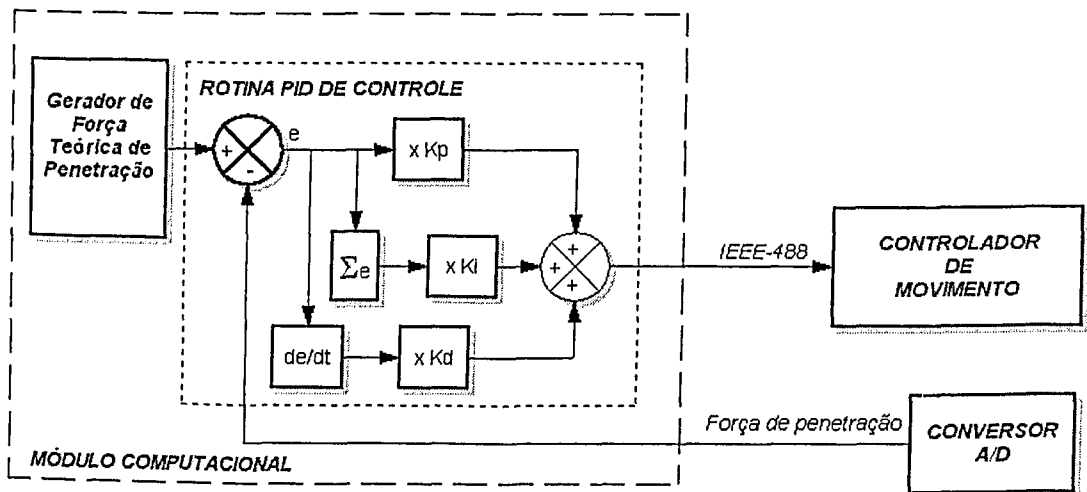


Figura 3.12- Controlador digital da força de penetração proporcional, integral e derivativo, utilizado no projeto do Macroesclerômetro.

A utilização de controle digital em tempo real utilizando computadores é algo comum nas aplicações da engenharia moderna, apresentando a grande vantagem de serem flexíveis quando comparados a sistemas dedicados de controle - sistemas analógicos e microprocessados.

Esta flexibilidade é caracterizada pela possibilidade de implementação de plantas de controle mais sofisticadas; utilizando sensores e atuadores não convencionais, programas acoplados de simulação numérica, instrumentação à distância, leis de controle mais complexas (Rede Neurais, Lógica Fuzzy, etc), com ajuste em tempo real dos parâmetros de controle. Além destas características o uso de múltiplos sensores e/ou atuadores com taxas diferentes de digitalização é facilmente suportada.

Atualmente, a maior desvantagem da utilização do controle digital via computadores é a utilização de taxas limitadas de execução do controle, limitando sua ação a sistemas dinâmicos que respondem a baixa e média frequência. Frequências na ordem de 20 KHz são inviáveis nesta implementação. Tal limitação tem sido constantemente suprida através do desenvolvimento de novas tecnologias de *software* e de *hardware*.

Uma característica importantíssima na implementação do controlador digital, no computador gerenciador do equipamento, é que este utiliza um sistema operacional *multitarefa*, o Windows NT.

A multitarefa é muito conveniente nas aplicações práticas que utilizam controladores digitais implementados via computador. Esta característica, presente em alguns sistemas operacionais, permite a implementação de controladores mais sofisticados que realizam várias tarefas simultâneas (Figura 3.13). Disponibilizando, além da operação de controle digital, o sistema simultaneamente monitorar, visualizar, tratar e armazenar em disco seus dados em tempo real durante a execução do controle. No caso do Windows NT, tudo isso aliado a uma interface gráfica de alto nível, amigável com o usuário. Além do mais, em aplicações especiais que exigem o monitoramento contínuo, a multitarefa permite que o computador utilizado não se torne exclusivo, sendo capaz de ser usado, normalmente em outras atividades.

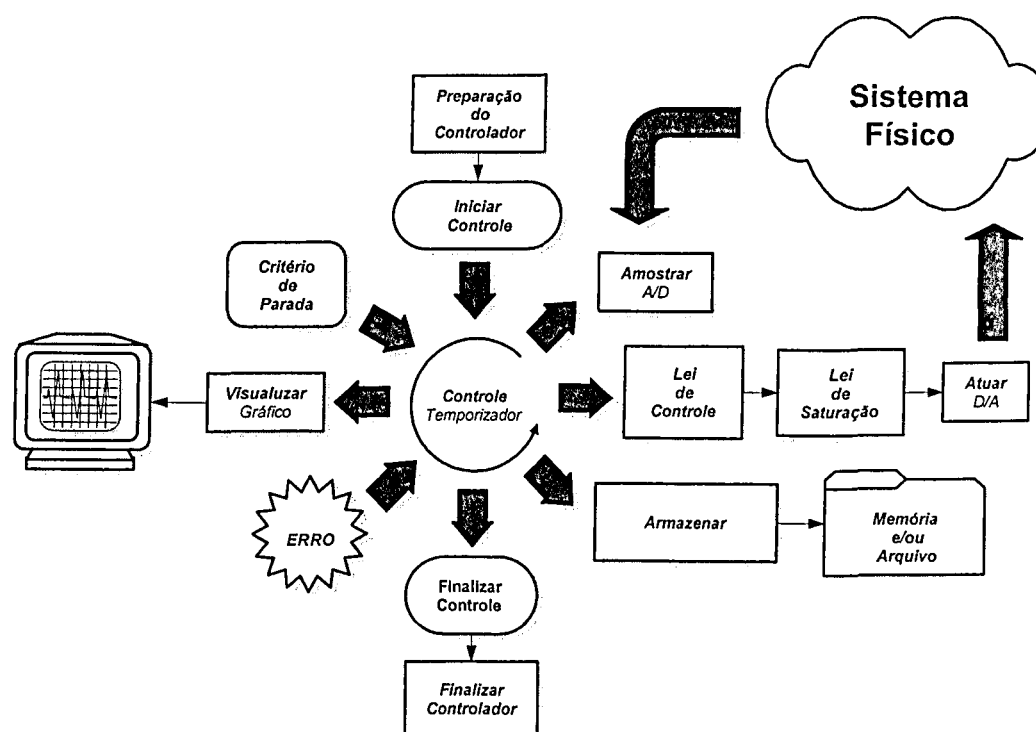


Figura 3.13- Esquema do controlador Digital.

Nos computadores modernos a atividade computacional presente nos algoritmos de controle digital, como um controlador PID, ocupa muito pouco da capacidade total de processamento disponível na máquina. No caso do controlador PID desenvolvido no trabalho, esta ocupação testada no computador gerenciador do equipamento, um *Pentium 100 MHz*, é da ordem de 5%, sobre o Windows NT medido no TaskManager. Assim, a execução de outras atividades estão disponíveis no sistema sem interferir na operação do controle. Neste caso, o computador está subutilizado em cerca de 95% de sua capacidade total, o que permitiu a sofisticação do programa computacional gerenciador de ensaios.

Apesar das vantagens da utilização de algoritmos de controle em sistemas operacionais multitarefas, ainda sistemas operacionais monotarefa, especialmente o MS-DOS, comumente estão em uso nas aplicações de engenharia, isto se deve basicamente à inerente simplicidade de programação destes sistemas operacionais. No entanto, sistemas operacionais monotarefa estão cada vez mais em desuso, assim, dificilmente serão criadas aplicações modernas, como novos compiladores. Todas as novas tecnologias, como o aprimoramento de *hardware* e *software*, estão sendo desenvolvidas para sistemas operacionais modernos que possibilitam a multitarefa, esta é a tendência do mercado mundial. Além do mais, depois de dominada sua tecnologia de implementação, os sistemas operacionais multitarefas modernos, apresentam possibilidades mais eficientes e adequadas para a implementação de controladores digitais, em relação aos sistemas monotarefas. Os sistemas operacionais multitarefas utilizam melhor as tecnologias disponíveis nos computadores modernos.

O uso de implementações de controladores digitais via computador, utilizando sistemas operacionais multitarefa, atualmente é tema de pouco domínio nas aplicações práticas da engenharia. A subseção seguinte pretende desmistificar o assunto, apresentando várias técnicas de implementação prática de controladores digitais em tempo real nos sistemas operacionais multitarefa. Apesar das tecnologias apresentadas serem comuns aos engenheiros de *software*, o assunto é algo "nebuloso" nas aplicações práticas da engenharia de controle.

#### **3.4.2.1 Implementação de controladores digitais em tempo real em sistemas operacionais multitarefa**

Em sistemas operacionais multitarefa, o processador tem que simultânea e compartilhadamente atender a várias tarefas. Com isto, programas convencionais, até então utilizados em sistemas operacionais monotarefa, como o MS-DOS, não conseguem garantir a estabilidade da taxa de controle, impossibilitando sua utilização em sistemas dinâmicos que exigem controle em tempo real.

Quando o controlador digital é executado em tempo real em computadores, a tecnologia de implementação em sistemas multitarefa é viabilizada pela construção de temporizadores que garantem a estabilidade da taxa de controle.

## Sistemas operacionais monotarefa

Em sistemas operacionais monotarefa, como o MS-DOS, a implementação de um temporizador para controle digital é relativamente simples - um *laço de interação* (Codificação 1). Neste caso, a CPU do computador funciona dedicadamente, garantindo estabilidade ao fluxo de comandos e da taxa de execução do algoritmo computacional de controle. Este algoritmo é executado exclusivamente.

Código 1- Implementação genérica de um controlador digital em sistemas monotarefas.

```
int main(void)
{
    while( IsControlling( ) )
    {
        float x,y;
        x = ReadAD( );
        y = ComputeControlAction( x );
        WriteDA( y );
        DelayControl( );
    }
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

Nestes casos, quando necessário, a *calibração* da taxa de ação do controle é implementada, consumindo-se tempo de processamento da CPU. Apesar deste método garantir a precisão no intervalo de controle, sua execução está intimamente ligada ao desempenho e capacidade de processamento do hardware utilizado. Este por sua vez, está ligado às características e ajustes do computador (*ROM-BIOS* e sistema operacional). Assim, o controlador implementado na Codificação 1 é dependente da máquina e deve ser recalibrado a qualquer mudança das configurações do computador. Estas alterações estão presentes em computadores de mesmo modelo. Outro inconveniente é que a CPU está subutilizada, desperdiçando capacidade de processamento.

Ainda em sistemas operacionais monotarefa, uma implementação mais sofisticada pode ser utilizada: o temporizador pode ser implementado utilizando-se a interrupção<sup>3</sup> de relógio do processador (*clock*). Este recurso é responsável no sistema operacional pelo gerenciamento do tempo. Neste caso, o programa ajusta a frequência de *clock* para a frequência desejada no controle digital, substitui a rotina que atende e manipula os eventos de interrupção do relógio pela rotina de controle. Desta forma, o controle é executado paralelamente com o

---

<sup>3</sup> Interrupções são condições do sistema operacional que desviam o processador para um código fora do fluxo normal de controle. Elas podem ser detectadas tanto pelo hardware quanto pelo software. Quando uma interrupção é detectada, o processador pára o que está fazendo e transfere (expede) o controle para um local especificado na memória, endereço de código que lida com a condição. São geradas basicamente por dispositivos que requerem serviço do processador, dispositivos de entrada e saída, relógio do processador, ou timers.



aplicativo principal. A comunicação entre a rotina de controle e o aplicativo principal, pode ser implementada com o uso de variáveis globais à aplicação.

O uso da interrupção de relógio na construção do temporizador do controle digital garante precisão e ajuste de uma larga faixa de frequências. Esta técnica possibilita o uso de altas taxas de controle.

Nesta versão, ainda, o controlador digital implementado com a utilização de interrupção, garante um temporizador com frequência de ação de controle independente das características e ajuste do computador utilizado. Isto torna o controlador digital conveniente nas aplicações comerciais que exigem segurança.

### Sistemas operacionais multitarefa

Os sistemas operacionais multitarefa (*multitasking*) possibilitam a execução simultânea de várias aplicações, esta é a tendência dos sistemas operacionais modernos, como o UNIX, o LINUX e toda a família Windows 95/98/NT. Um sistema operacional multitarefa divide o tempo de CPU disponível entre as tarefas que o requisitam. No caso, o Windows NT é projetado para suportar *multitarefa preemptivas*, ou seja, o sistema aloca pequenas fatias de tempo (*slice time*) da CPU entre cada tarefa em competição. Devido ao fato de que cada uma destas fatias de tempo, executada na CPU, são pequenas, tem-se a impressão que as múltiplas tarefas estão sendo executadas ao mesmo tempo. Isto ocorre realmente nos sistemas com multiprocessadores, cujas tarefas executáveis são distribuídas entre os processadores disponíveis.

Nos aplicativos desenvolvidos especialmente para sistemas multitarefa, a utilização dos recursos de processamento paralelo normalmente tende melhorar sua performance, especialmente quando utilizado modelos mais modernos de processador. Este aumento de desempenho ocorre com o melhor agendamento das atividades processadas pela CPU. A capacidade de processamento da CPU em um sistema operacional multitarefa é a mesma nos sistemas monotarefa. O ganho de performance é conseguido evitando a ociosidade da CPU.

No caso extremo de uma sobrecarga de tarefas executadas compartilhadamente pelo processador, o desempenho das aplicações tende a piorar. Cabe ao programador projetar, utilizando ou não, adequadamente da implementação dos recursos de compartilhamento, objetivando a otimização da performance da aplicação.

Em aplicações que sobrecarregam o processador com atividades simultâneas, a utilização de mais de um processador é uma solução atraente. Entretanto, para que a aplicação aproveite este recurso, seu projeto e sua implementação devem explorar a multitarefa. Aplicações que não foram projetadas para suportarem a multitarefa rodam praticamente com o mesmo desempenho independentemente do número de processadores disponíveis na máquina. Este é um tópico comumente apresentado na literatura sobre programação para Windows, basicamente com "*Multithread Programs*".

Apesar da semelhança entre o Windows 95/98/NT, a arquitetura implementada na multitarefa do Windows NT é melhor elaborada, apresentando melhor desempenho. Na escolha entre as versões do Windows, o NT é superior.

A codificação 1, quando executada sobre o Windows NT, apresenta um comportamento que pode causar sérios problemas de performance. Na construção do temporizador de controladores digitais em sistemas operacionais multitarefa, as implementações convencionais, até então utilizadas em sistemas monotarefa (Codificação 1), não conseguem garantir a estabilidade da taxa de controle, pois serão executadas concorrentemente e sem prioridade entre as outras atividades presentes no sistema. Haverá momentos em que a execução do controle será suspensa, a não ser que o controle executado seja a única atividade presente, o que é uma condição atípica nos sistemas operacionais multitarefa. A utilização deste tipo de implementação da temporização nos algoritmos de controle digital em aplicações reais, controlando sistemas dinâmicos, não é confiável (instável) tornando seu uso inviável.

Este aspecto tem desencorajado desnecessariamente muitos programadores a utilizarem sistemas multitarefa em suas aplicações de controle (e/ou monitoramento) digital, adiando a tendência moderna, constantemente se sujeitando às limitações dos sistemas operacionais antigos (memória segmentada, interface gráfica primitiva, etc), e não aproveitando integralmente a tecnologias disponíveis em *software* e *hardware* para os computadores modernos.

Nos sistemas multitarefa, a implementação do programa de controle digital, especialmente o projeto do temporizador, necessita da interação com o sistema operacional usando seus recursos nativos para estabilizar a taxa de controle e garantir seu funcionamento correto.

No Windows NT, a temporização do controle digital pode ser implementada utilizando-se:

- *Multithreads*;
- *Timers*;
- Interrupções.

Destes recursos, as *Multithreads* e os *Timers* são recursos nativos no Windows NT, disponíveis na Win32 API, acessados por qualquer compilador C ou C++, que permite programação específica para Windows NT.

As *interrupções* no Windows NT, por motivo de segurança do sistema, só podem ser utilizadas em programas através de *drivers*, instalados previamente pelo administrador do sistema. A construção destes *drivers* é uma atividade complexa, recomendada apenas para especialistas. Comercialmente são disponíveis inúmeros *drivers* genéricos, que acessam portas e manipulam interrupções, que poupam o programador de todo este "*trabalho sujo*".

## Multithreads

A multitarefa no Windows se processa por duas entidades básicas: *processo* e *threads*. Um processo é um programa (.EXE) que é lançado, carregado e preparado para a execução. Cada processo tem sua própria memória, código, dados, manipuladores de arquivo e outros recursos do sistema. Se dois programas são lançados, em seguida, têm-se dois processos independentes, sendo executados simultaneamente. Um processo individual pode conter caminhos de execução separados, chamados de *threads*. Beveridge, 1997, é uma boa referência sobre o assunto.

Uma *thread* é uma *linha de processamento*, a entidade básica para a qual o sistema operacional aloca tempo de CPU. Uma *thread* pode executar qualquer parte do código de um processo, inclusive uma parte que é executada atualmente por outra *thread*. Todo o código e espaço de dados de um processo estão disponíveis a todas as *threads* que o constituem.

No Windows cada processo é inicializado com uma única *thread*, mas outras *threads* podem ser criadas e executadas independentemente. Desta forma, um processo utilizando várias *threads*, executando concorrentemente partes independentes de seu código, se estabelece o processamento paralelo sobre o Windows NT.

No Windows NT, a utilização de *thread* na implementação do temporizador do controlador digital baseia-se no mesmo princípio de temporização, utilizada nos sistemas monotarefas: a utilização de um laço iterativo, comportando-se de maneira análoga (Codificação 2<sup>4</sup>).

Esta versão apresenta as mesmas desvantagens de estabilização da taxa de execução do controle digital. Nesta estratégia, se expede a execução da função de controle em uma *thread* específica, que será executada paralelamente ao processo principal de controle.

A vantagem de se utilizar *threads* específicas para o controlador digital é poder especificar sua *prioridade de execução* no sistema operacional.

A prioridade de uma *thread* é um parâmetro que ranqueia qual será a próxima *thread* a ser executada na concorrência entre todas em execução pela CPU. Uma maior prioridade implica em maior chance de ser processada primeiro. Este parâmetro está intimamente ligado à porcentagem total da quantidade de tempo de execução que a *thread*, ocupado na CPU.

O Windows NT permite uma larga faixa de prioridades, que se estendem desde normal (menor prioridade) até tempo crítico (maior prioridade permitida ou *Real Time*). Assim, na tentativa de estabilizar a taxa de controle, pode-se escolher uma prioridade adequada para a *thread* executora do controlador digital, garantido a ocupação de uma fatia de tempo maior do processamento da CPU.

<sup>4</sup> No texto, a apresentação das Codificações 1 e 2, não têm a intenção de mostrar detalhes específicos de programação. Elas apenas ilustram o fato de que ambas são implementações de algoritmos idênticos de controle digital, porém sua adequação ao sistema operacional as tornam completamente diferentes. Estas codificações não poderão ser extrapoladas no texto, para o caso de interrupções e *timers*, suas implementações são extremamente complexas.

Codificação 2 - Implementação genérica do controlador digital por *thread* utilizando a Win32 API.

```
int main(void)
{
HANDLE hThread;
DWORD idThread;
    hThread = CreateThread( NULL,0,DigitalControlFnc,
                          CREATE_SUSPENDED,&idThread);
    if(hThread == 0) exit(EXIT_FAILURE);
    SetThreadPriority(hThread,THREAD_PRIORITY_TIME_CRITICAL);
    ResumeThread(hThread);
    WaitForSingleObject(hThread ,INFINITE );
return EXIT_SUCCESS;
}
/* Rotina do Controlador Digital */
DWORD WINAPI DigitalControlFnc(LPVOID n)
{
    while( IsControlling( ) )
    {
        float x,y;
        x = ReadAD( );
        y = ComputeControlAction( x );
        WriteDA( y );
        DelayControl( );
    }
return 0;
}
```

No caso extremo, quando executada em *Real Time*, a *thread* ocupa todo o processamento da CPU. Neste caso, todo o sistema pára e só a *thread* de controle é executada, com se fosse um sistema operacional monotarefa. Esta é uma boa opção para programas de controle digital MS-DOS serem portados para Windows NT sem problema com a multitarefa. Estas aplicações são executadas como se estivessem no programa nativo MS-DOS, rodando exclusivamente. Os controladores digitais implementados como em monotarefa, na verdade quando lançados sobre o Windows, se comportam como uma *thread* com prioridade normal, ou seja, sem vantagem na concorrência por sua execução.

## Timers

Um *timer*, no sistema operacional, é uma rotina interna (cronômetro) que repetidamente mede um intervalo especificado, em milissegundos. A aplicação de *timers* é comum na programação para Windows, freqüentemente encontrada nos livros especializados. O Windows

NT disponibiliza várias opções de *timers* que cobrem uma faixa de frequência bastante ampla, que se estendem até o máximo de 10 MHz (Tabela 3.3).

Tabela 3.3- Tipos de Timers e suas resoluções no Windows NT

Tipos de timer	Resolução mínima	Resolução máxima	Frequência máxima
Normal	-	100 ms	10 Hz
Multimedia	-	1 ms	1 KHz
Thread	-	50 $\mu$ s	20 KHz
I/O	1 s	100 ns	10 MHz

A utilização destes *timers* tem a complexidade de implementação diretamente relacionada à sua resolução máxima.

Os *Timers Normais* e de *Multimídia* estão disponíveis através de um conjunto de funções da Win32 API. São também disponíveis também para Windows 95/98.

Os *Timers normais* são de uso comum nas aplicações feitas em Windows (WM\_TIMER). Eles não apresentam compromisso de precisão, têm baixa prioridade e são descartados quando sobrecarga do sistema. Este tipo de *Timer* não é adequado para aplicações em tempo real.

Os *Timers Multimídia* são de alta resolução. Estes *Timers* têm altas prioridades de execução e garantem resolução. Eles são uma opção atraente na construção de temporizadores para controle digital.

Marcato, 1998, disponibiliza um conjunto de classes em C++, implementadas para Microsoft Visual C++ 5.0, que encapsulam simplificando muito a utilização destes dois tipos de *Timers*.

Os *Timers de I/O* e baseados em *Threads* são de implementação complexa, fazem parte da biblioteca de construção de *drivers* para Windows NT, o Windows NT DDK (Driver Development Kit). A utilização destes *timers* exige do programador um conhecimento profundo sobre arquitetura de *drivers* do Windows NT. Estes *Timers* não são disponíveis nas versões do Windows 95/98. Baker, 1997, apresenta uma boa referência sobre o assunto.

## Interrupção

No Windows NT, a utilização da interrupção de relógio não é disponível, pois esta é o coração do sistema operacional. A grande maioria dos recursos e aplicações no Windows são gerenciadas e sincronizadas pelo tempo. Para se usar a interrupções como temporizador do controle digital é preciso utilizar um hardware capaz de gerar interrupções.

desejada. Em aplicações domésticas do laboratório tem se usado a interrupção disponível na porta paralela do computador, gerada por um gerador de frequência acoplado.

A temporização, utilizando interrupções sobre o Windows NT, é o método mais preciso, pois a temporização é estabelecida por hardware. Frequências altas de expedição, aproximadamente à 20 KHz, comumente congestionam o sistema operacional.

### 3.4.2.2 O controlador digital implementado

Na versão final do sistema computacional de controle digital da força de penetração desenvolvido, implementou-se um controlador digital do tipo PID clássico. Nesta etapa a técnica de temporização utilizada no programa foi: *Timers de Multimédia*.

Esta escolha deve-se basicamente a duas características desta técnica de temporização:

- precisão;
- facilidade de implementação.

Os *timers de multimédia*, dentre todas as técnicas de temporização aplicáveis ao Windows NT apresentadas no trabalho, satisfazem às necessidades temporais do projeto, apresentando uma codificação simples na implementação do temporizador do controle digital da força.

Os *timers de multimédia* são os mais adequados para as aplicações comuns de controle digital em tempo real, aplicados em sistemas mecânicos, controlados em frequências de até 1 kHz.

Os *timers de interrupção*, apesar de sua precisão e altas taxas de temporização, têm o inconveniente de exigirem um hardware específico expedidor de interrupção, que quando não disponível, encarece o projeto.

No ajuste do controlador digital, além dos coeficientes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , também é necessário estipular a *taxa de ação do controle digital*, ajustada para o temporizador.

Esta taxa de temporização, no equipamento, está intimamente ligada a capacidade do controlador de movimento ser comandado pelo computador gerenciador do equipamento, através da interface GPIB.

Uma característica do controlador de movimento utilizado é que, quando acionado remotamente através da interface GPIB, tem uma capacidade máxima de executar comandos simultaneamente, em tempo real, à ação de movimento das mesas acionadoras do ensaio. Caso a taxa de comando enviada pelo computador ao controlador de movimento, seja excessiva duas são as consequências na ação de controle:

- o aglomeramento de comandos gera um acúmulo de ações no controlador de movimento. Neste caso, os comandos enviados são executados, perdendo o sincronismo com a ação de movimento, atrasando a ação de controle. O controlador de movimento não está

mais respondendo às ações dos comandos em tempo real;

- em uma condição extrema, a comunicação da GPIB é congestionada, levando à falha do programa computacional executor de ensaios. Neste caso, o sistema operacional aborta a execução do programa computacional gerenciador do equipamento.

O controlador de movimento utilizado no projeto do Macroesclerômetro é capaz de ser comandado adequadamente pela ação do controle digital da força, executado no computador gerenciador do equipamento um comando de movimentação das mesas acionadoras a cada 30 ms, aproximadamente. Em alguns casos, valores próximos a 20 ms são aceitáveis, porém eventualmente a comunicação fica instável.

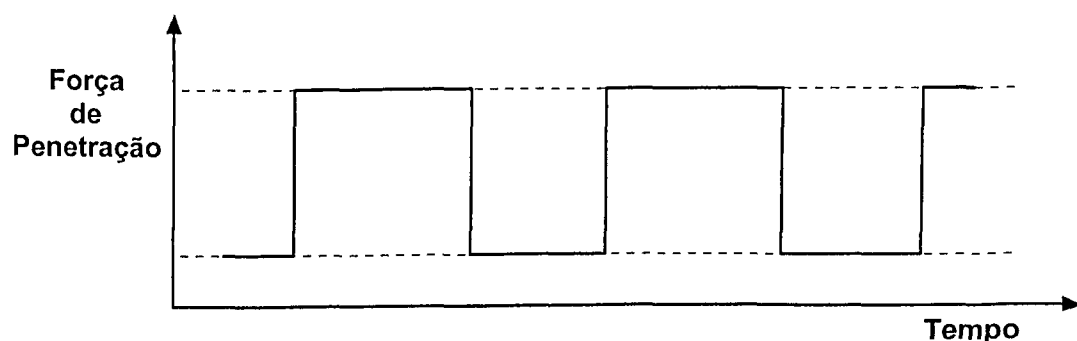


Figura 3.14- Teste do controlador PID.

A seguir, será mostrado alguns estudos preliminares, que mostram as potencialidades do controlador digital da força, implementado diretamente no computador gerenciador do equipamento. Novos estudos estão sendo feitos.

Com o temporizador do controle digital, ajustado em 30 ms ( $\sim 33$  Hz), o teste de inden-tação, mostrado na Figura 3.14, foi realizado. Neste teste preliminar, o controlador da força de penetração teve que reproduzir uma onda quadrada regular, com limites de 100 N e 200 N, ou seja, 100 N de amplitude.

O objetivo deste ensaio foi avaliar apenas a parcela proporcional  $k_p$  do controlador PID, que foi variado de 0.0005 até 0.003, com incrementos de 0.0005. No teste, utilizou-se um penetrador do tipo Vickers, e o material da amostra ensaiada foi aço. Os resultados estão mostrados na Figura 3.15 e Figura 3.16. Um valor de  $k_p = 0.002$  aparentemente é um valor satisfatório para a parcela proporcional do controlador PID.

É conveniente salientar que a presença de "overshoot" na ação do controle, é imprópria nas aplicações esclerométricas. Um nível excessivo, inesperado no sinal da força de penetração gerado pelo controlador, pode antecipadamente trincar ou danificar revestimentos ou alterar propriedades superficiais da amostra.

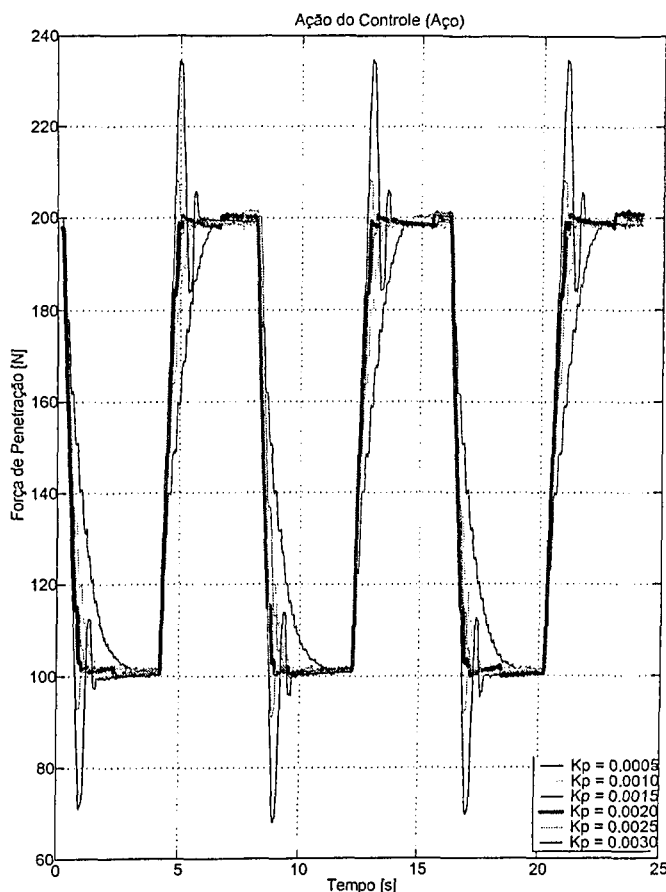


Figura 3.15- Avaliação da parcela proporcional do controlador PID, utilizado no controle da força de penetração.

Para avaliar a relação do parâmetro  $k_p$  do controlador PID com o tipo de material, o ensaio proposto acima foi realizado com amostras de aço, cobre e alumínio (Figura 3.17). O controlador apresentou boa generalidade.

Numa avaliação preliminar do sistema computacional de controle digital da força de penetração desenvolvido e implementado no computador gerenciador do equipamento, concluiu-se que este controlador digital mostrou ser potencialmente utilizável nos ensaios esclerométricos com controle de força, realizados no Macroesclerômetros. Aparentemente este controlador apresenta precisão, confiabilidade, repetibilidade e generalidade.



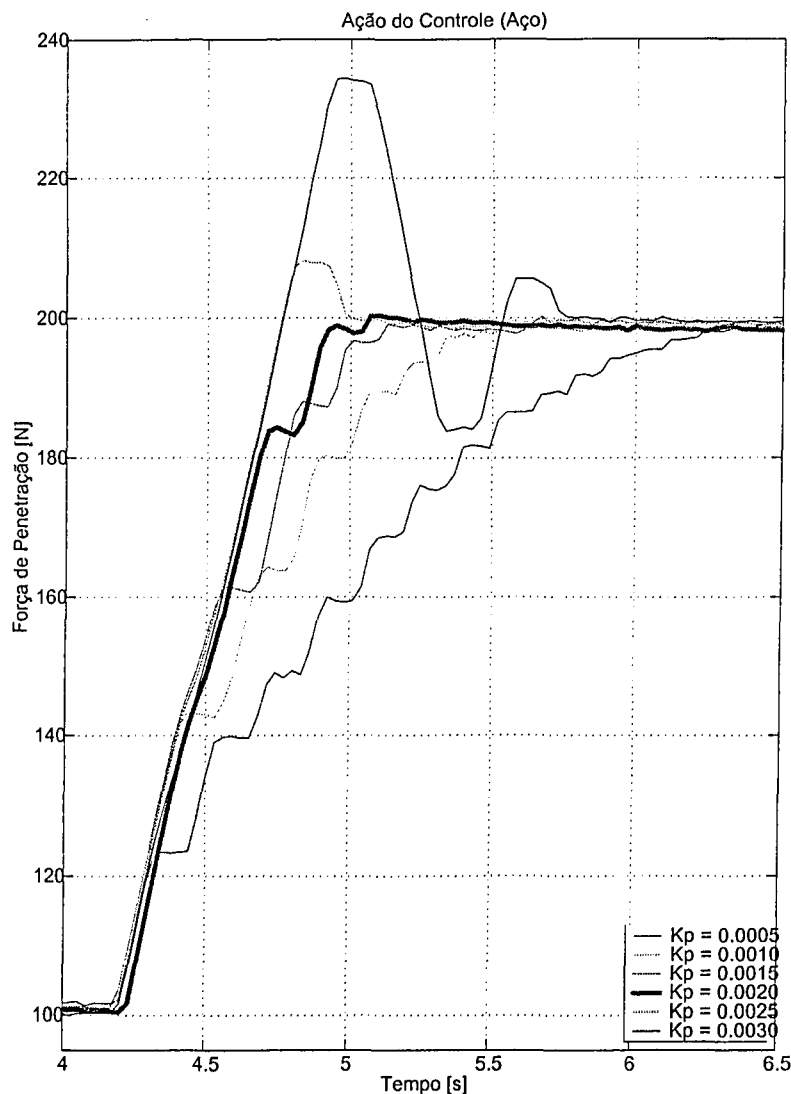


Figura 3.16- Avaliação da parcela proporcional do controlador PID.

### 3.4.2.3 Sugestões futuras para o ajuste do controlador PID da força de penetração

A etapa final de estudo das características dinâmicas do sistema mecânico, acionador dos ensaios e o ajuste fino do controlador digital da força, na execução do trabalho, foi comprometida pela quebra do sistema de acionamento dos ensaios do protótipo desenvolvido. Este dano, que se estendeu por vários meses, impossibilitou a operação e a realização de novos testes no equipamento.

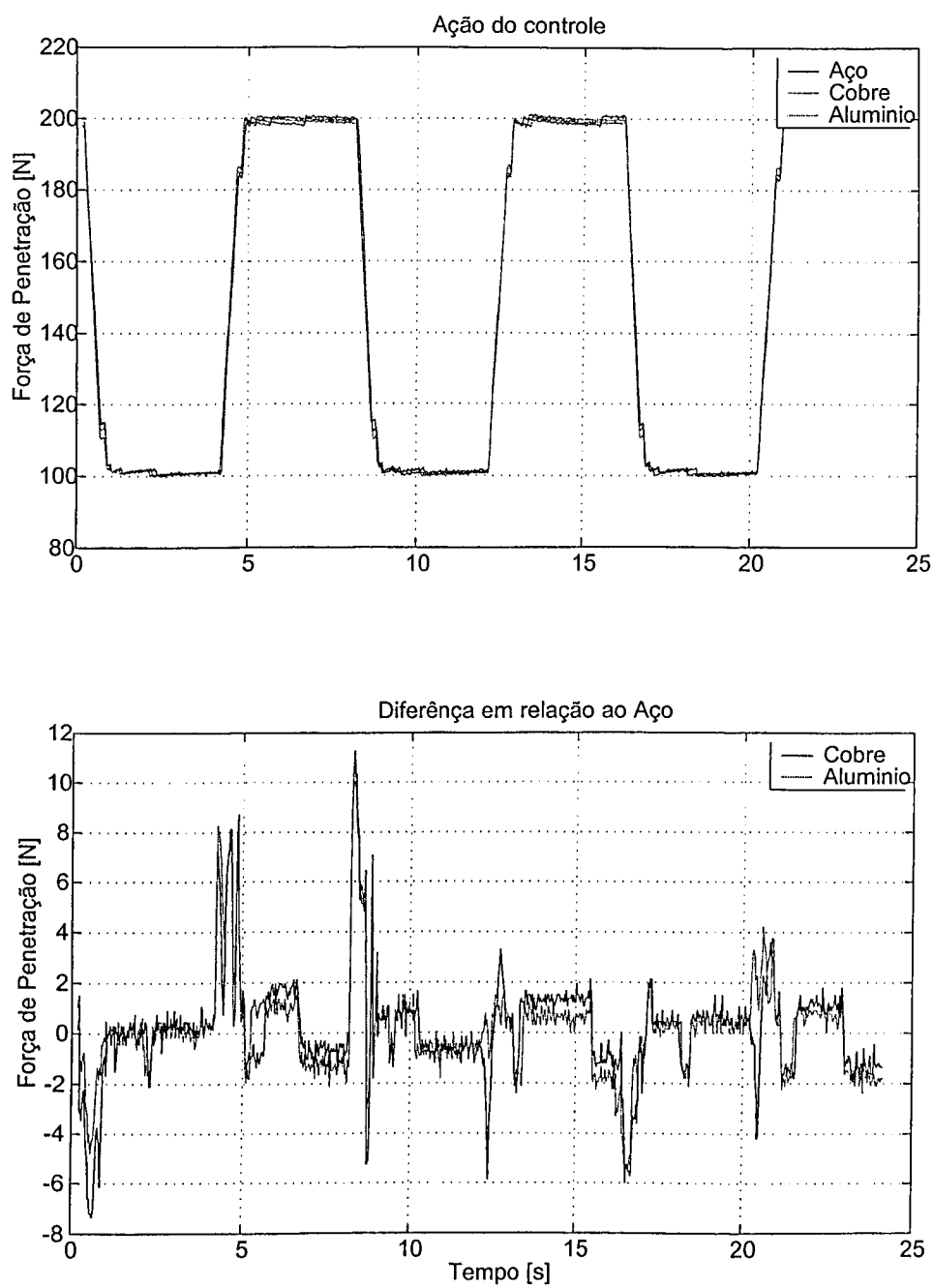


Figura 3.17- Avaliação da parcela proporcional do controlador PID, com o tipo de material da amostra em teste.

Com o objetivo de aumentar a qualidade do controlador digital da força de penetração no equipamento, duas estratégias podem ser avaliadas:

- refinar o ajuste dos coeficientes do PID;
- aumentar a taxa de execução do controle.

Estudos devem ser feitos para identificar as características dinâmicas e refinar o ajuste dos parâmetros do controlador PID ( $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ ), objetivando sua otimização. Nesta etapa pode-se avaliar a ação das parcelas integrais e derivativas sobre o sistema. Também a relação da ação do controlador digital com o tipo de material ensaiado e a geometria do penetrador (esférica ou piramidal) devem ser motivo de investigação. Ainda é interessante o estudo do comportamento do controlador seguindo referências mais complexas como em rampa, ou riscando amostras que apresentam severas irregularidades de topografia e/ou anisotropia superficial.

No sistema, o aumento da taxa de execução do controle digital da força é conseguido aumentando-se a capacidade de comunicação e comando do computador gerenciador do equipamento e o controlador de movimento. Com o objetivo de aumentar a taxa de comunicação, duas possibilidades merecem ser avaliadas:

- ajustar a comunicação GPIB;
- utilizar as entradas A/D disponíveis no controlador de movimento;

É possível sintonizar em baixo nível, os parâmetros de ajuste da comunicação, utilizando-se a interface GPIB; espera-se com isso, melhorar seu desempenho.

Também com este objetivo, uma nova estratégia pode ser estudada, com possibilidades de acelerar esta comunicação: ao invés de comandar o acionamento do penetrador através da interface GPIB, utiliza-se uma interface D/A<sup>5</sup> para diretamente acionar o controlador de movimento através de sua interface utilitária A/D. Neste caso, o controlador de movimento executa um procedimento computacional simples, no qual o penetrador é acionado proporcionalmente ao valor analógico enviado.

Com o objetivo de melhorar a precisão de acionamento do penetrador, no equipamento o estudo e levantamento do comportamento da deformação elástica (característica de toda a cadeia de acionamento-pórtico, mesa acionadora, célula de carga e penetrador) deve ser avaliada em função da carga de penetração aplicada (Figura 3.18). Na execução de ensaios, esta deformação estrutural elástica do acionador ( $\delta$ ), se calibrada, pode ser usada para corrigir a penetração acionada pelo controle ( $\Delta z$ ), garantido um acionamento mais preciso ( $\Delta z'$ ), imprimindo acurácia ao Macroesclerômetro.

---

<sup>5</sup> O sistema de aquisição de dados da força, utilizado no equipamento, disponibiliza a utilização de 4 canais D/A. Estes canais de D/A podem ser utilizados como sinal de acionamento do controle digital implementado.

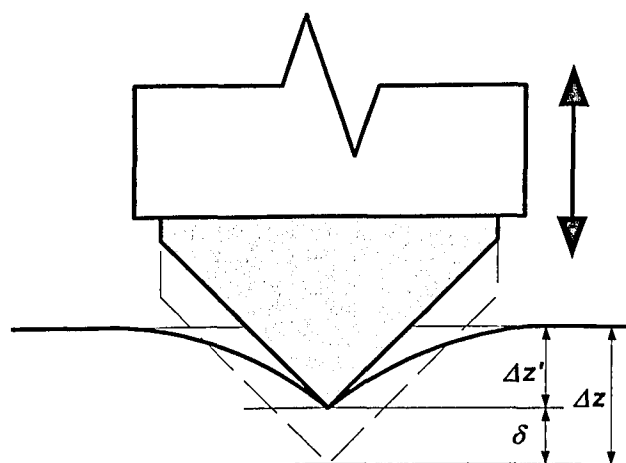


Figura 3.18- Flexibilidade do atuador mecânico da força de penetração.

# Capítulo 4

## Sistemas de Monitoramento

É responsabilidade de um esclerômetro totalmente computadorizado registrar e armazenar, ao longo da execução de um ensaio esclerométrico, as condições cinemáticas e dinâmicas atuantes no penetrador (Figura 4.1). Além destas variáveis tradicionalmente monitoradas, os ensaios esclerométricos podem ser acrescidos do monitoramento da emissão acústica provida da amostra em teste.

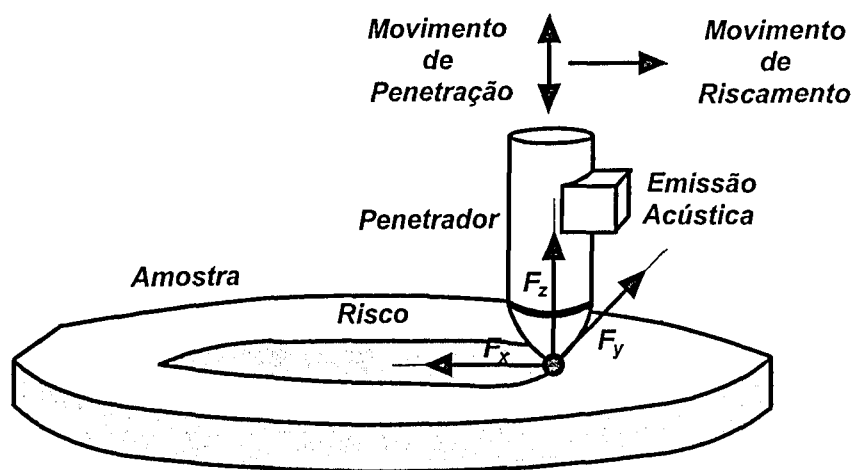


Figura 4.1- Esquema do ensaio esclerométrico.

Este capítulo disserta sobre o monitoramento dos ensaios realizados no esclerômetro desenvolvido. Essa atividade foi dividida em duas tarefas distintas:

- monitoramento das forças atuantes no penetrador;
- monitoramento da posição do penetrador.

Ainda neste capítulo, outros dois sistemas independentes, importantes no projeto do Macroesclerômetro, também serão apresentados:

- sistema de proteção contra níveis excessivos de força;
- sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial.

Neste capítulo, cada subsistema de monitoramento será apresentado em detalhes, na ordem citada, apresentando suas respectivas atividades computacionais, *hardwares* utilizados e a participação global na formação deste sistema complexo que é o sistema computacional gerenciador de ensaios que controla o Macroesclerômetro.

#### 4.1 Requisitos de projeto do sistema de monitoramento

Para satisfazer às exigências da técnica experimental, o sistema de monitoramento projetado deve ser capaz de:

- garantir precisão e repetibilidade dos eventos monitorados;
- digitalizar as forças atuantes no penetrador a uma taxa aproximada de 400 Hz;
- sincronizar os eventos de força e posição;
- coexistir com o sistema de controle digital da força.

A análise estatística de sinais aplicados a ensaios esclerométricos é uma linha de pesquisa pouco explorada mundialmente. A análise estatística tradicionalmente utilizada resume-se à determinação dos momentos estatísticos de baixa ordem (média, variância e desvio padrão) em trechos específicos e convenientes, do risco ensaiado. Com o esclerômetro desenvolvido espera-se, em um futuro próximo, a realização de análises estatísticas mais sofisticadas, como análise no domínio da frequência utilizando espectro de comprimento de onda, redes neurais e *transformada de Wavelet*, para identificar padrões característicos. Assim os sinais monitorados devem satisfazer critérios rígidos de amostragem temporal para que estas análises possam ser aplicadas.

Uma análise prévia de sinais esclerométricos mostrou que os sinais presentes, neste tipo de ensaio, apresentam características nas baixas frequências. Esta afirmativa foi reforçada pela consulta de catálogos de esclerômetros comerciais e todos os consultados, convergiram a um valor máximo de taxa de digitalização dos sinais de força de 400 Hz.

A capacidade de relacionar os eventos de força à posição do penetrador permite relacionar a penetração com seu efeito na força e sua posição ao longo do risco, indicando a ação de um evento particular sobre a superfície da amostra, identificando fenômenos de interesse no estudo das propriedades abrasométricas: colisão do penetrador com partículas, mudança de fase do material, falha de adesão, etc.

A posterior análise superficial, microscópica (ótica ou eletrônica de varredura) e/ou perfilométrica, comumente realizada em um ensaio esclerométrico, necessita do relacionamento entre o evento de força e sua posição ao longo do risco gerado na superfície da amostra, para que o efeito e causa de anomalias nos sinais da força (exemplo falha de adesão do revestimento) possam ser correlacionados.

Em um ensaio esclerométrico, os sinais monitorados das forças atuantes no penetrador trazem informações importantes sobre a natureza da interação do mesmo com a amostra em estudo, caracterizando, assim, propriedades importantes do sistema ensaiado.

Além das características citadas acima, a tarefa de monitoramento ao longo de um ensaio tem que ser realizada compartilhadamente com as atividades normais em execução do sistema computacional gerenciador do ensaio; como exemplo, o controle digital da Força. Os procedimentos computacionais das rotinas de monitoramento devem ser adequados à utilização em sistemas multitarefas, não consumindo muito tempo de execução da CPU do computador.

Outra característica importante do sistema de monitoramento é que, durante a execução dos ensaios esclerométricos, as variáveis monitoradas têm que ser disponíveis globalmente a todo o sistema computacional gerenciador do ensaio, especialmente a força de penetração, utilizada no controle digital da força normal atuante no penetrador.

É interessante, do ponto de vista do usuário, visualizar os sinais monitorados em tempo real na tela do computador, durante a execução dos ensaios no esclerômetro desenvolvido.

O sistema computacional de monitoramento projetado é ágil e explora eficientemente as tecnologias dos *hardwares* disponíveis e do sistema operacional utilizado, satisfazendo às exigências pré-estabelecidas.

As seções a seguir discutem os sistemas de monitoramento utilizados no projeto do Macroesclerômetro em maior detalhe e descrevem seu efeito na forma final do protótipo desenvolvido.

## 4.2 Monitoramento das forças atuantes no penetrador

Este subsistema é responsável em monitorar, durante a execução de um ensaio, o estado dinâmico atuante no penetrador, a cada instante, registrando sistematicamente ao longo do tempo:

- a força de penetração ( $F_z$ );
- a força tangencial ao risco ( $F_x$ );
- a força lateral ao risco ( $F_y$ ).

A cadeia completa de instrumentação das forças atuantes no penetrador, da célula de carga ao computador, pode ser dividida em duas partes (Figura 4.2): uma *analógica*, e a outra *digital*.

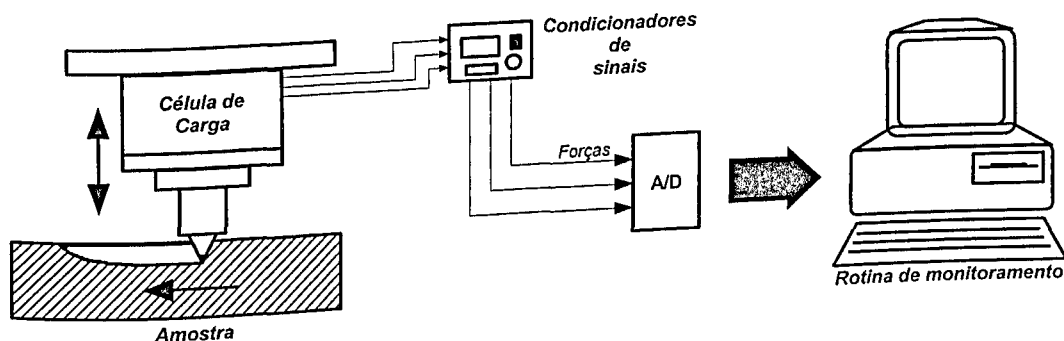


Figura 4.2- Esquema geral do Subsistema de Monitoramento das forças atuantes no penetrador.

A etapa analógica é constituída do transdutor de força acoplado ao penetrador e seus condicionadores de sinais. Este módulo converte as forças aplicadas no penetrador em sinais de tensão adequados. Na etapa seguinte, digitaliza-se estes sinais analógicos, disponibilizando-os ao programa gerenciador de ensaios, que os armazenam na memória do computador e/ou utilizam no controle da força de penetração.

#### 4.2.1 Transdutor de força

O módulo é composto por uma célula de carga e três condicionadores de sinais independentes.

A célula de carga utilizada é uma célula de carga tridimensional ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) do tipo corpo elástico, instrumentado com *strain-gages* colados (Doebelin, 1990). Ela tem capacidade de carga máxima de 500 N e está montada entre o penetrador e seu sistema de acionamento. Esta configuração capacita o esclerômetro desenvolvido no monitoramento das três forças atuantes no penetrador. A célula de carga utilizada apresentou boa linearidade e baixo efeito cruzado em relação a seu fundo de escala.

A função dos condicionadores de sinais no sistema é amplificar e filtrar os sinais providos da célula de carga e foram desenvolvidos especialmente para altas respostas, baixo ruído e permitem o ajuste variável de sua faixa de amplificação.

No sistema construído, os conversores A/D, utilizados na digitalização dos sinais providos do transdutor de força, têm resolução de digitalização 12 Bits cada, referente a seu fundo de escala de 5 volts. Como os condicionadores de sinais permitem amplificação, pode-se ajustar a escala de 5 volts.



Os filtros utilizados nos condicionadores de sinais são filtros passa-baixa *Butterworth* de 4 pólos, com ajustes da freqüência de corte em 10 Hz, 100 Hz, 1 KHz e 10 KHz, devendo ser ajustados adequadamente para:

- remover componentes desnecessárias;
- apresentar uma resposta em frequência adequada.

- trabalhar como filtro anti-fantasma (*anti-aliasing*) do sistema de digitalização.

Esta frequência de corte também foi estabelecida em 10 Hz ou 100 Hz, ou seja, as disponíveis de 10 Hz ou 100 Hz.

O uso de células de carga tridimensionais na instrumentação simplifica muito o projeto de cada elemento, reduzindo-se a resposta dinâmica apresentada no Anexo I. As funções de transferência para o transdutor de força, apresentaram um comportamento linear nulo, todas na faixa de frequência aproximada de até 100 Hz.

No esclerômetro construído, apesar de ser cruzado entre os sinais medidos das forças. Esta característica de

O projeto de instrumentação das forças atuantes no penetrador, desenvolvido de esclerômetros retilíneos, compromete a confiabilidade das informações contidas nestes sinais. O projeto é crítico na medição da força lateral e tangencial, característica dos testes de penetração cruzado apresentados pela célula de carga.

Atualmente a instrumentação das forças atuantes no penetrador é no projeto da instrumentação dos Nanoeslerômetros em des-

#### 4.2.1.1 Procedimento de calibração automatizado

No equipamento desenvolvido, a calibração do sistema de medição de força é uma atividade importante para a realização dos ensaios. Ela determina a função de transferência, que associa a leitura do conversor A/D em Volts, à carga aplicada em Newtons e deve ser feita:

- periodicamente;
- no ajuste do fundo de escala do equipamento.

Como a calibração da cadeia de instrumentação de força é uma atividade freqüente no equipamento, este processo foi automatizado. A completa calibração do transdutor de força, no Macroesclerômetro, é realizada em poucos minutos. Para isto, foi desenvolvido um *módulo de calibração automática do sistema de medição das forças atuantes no penetrador*. Este módulo de calibração é um componente independente, que integra o sistema computacional executor de ensaios pelo computador gerenciador do equipamento.

O processo de calibração automatiza o procedimento convencional, que aplica gradualmente massas padrão, na direção da força desejada para a calibração. Cargas são aplicadas diretamente no penetrador, carregando estaticamente a célula de carga com pesos-padrão (Figura 4.3). Nas forças tangencial e lateral, a carga é aplicada diretamente através de roldanas. Devido sua inacessibilidade, a força normal é calibrada aplicando-se a carga através de uma alavanca. Neste processo, o movimento micrométrico das mesas acionadoras são utilizados para nivelar e posicionar a alavanca, proporcionando um braço de alavanca preciso.

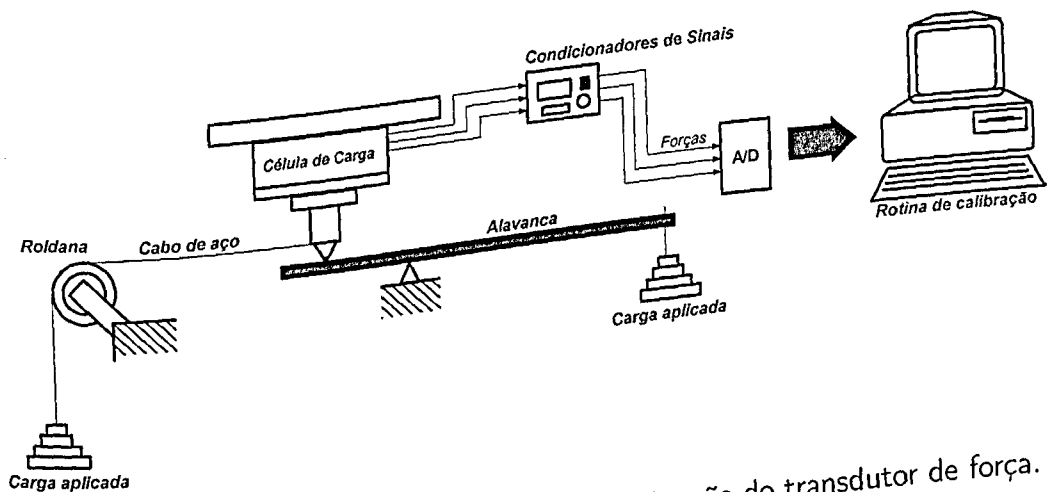


Figura 4.3- Esquema geral do procedimento de calibração do transdutor de força.

A rotina computacional de calibração da força para uma carga aplicada em uma direção desejada da célula de carga adquire um número pre-estabelecido de amostras de força nas três

direções, através do conversor A/D. Em seguida, são calculados a média e o desvio padrão para essas leituras. Os valores médios então são associados à carga aplicada sobre a célula de carga. Repetindo-se o procedimento para outras cargas na mesma direção, a tabela carga *versus* saída dos conversores A/D é montada. Em seguida, sua função de transferência é determinada, utilizando-se um algoritmo de regressão.

A Tabela 4.1 apresenta o resultado dos coeficientes ( $C_i$ ) da função de transferência, medido nas três direções do transdutor de força utilizado, obtidas no processo automatizado de calibração (Figura 4.4). Estas funções são lineares, do tipo  $F = C_0 + C_1 * AD$ , com excelente coeficiente de correlação ( $r$ ).

Tabela 4.1- Resultado das funções de transferência obtidas no processo de calibração.

Força	$C_0$	$C_1$	$r$
Normal	-0.023750	6.143904	0.999999
Tangencial	0.000777	3.477315	0.999985
Lateral	-0.068259	2.255555	0.999995

A Figura 4.4 mostra as funções de transferência para as três direções do transdutor de força utilizado, obtidas no processo automatizado de calibração.

O procedimento de calibração automatizado dá agilidade e garante precisão ao sistema de monitoramento das forças atuantes no penetrador.

#### 4.2.2 Monitoramento

O módulo é composto pela placa digitalizadora, utilizada na conversão dos sinais analógicos, provindos dos condicionadores de sinais, em sinais digitais. As amostras digitalizadas são sistematicamente armazenadas na memória do computador, que gerencia o ensaio através de um procedimento computacional de monitoramento.

Uma característica importante no projeto do sistema de monitoramento desenvolvido é a utilização de uma interface A/D, idealizada especialmente para operar em sistemas operacionais multitarefas, sendo capaz de adquirir grandes blocos de dados, em modo compartilhado sem ocupar tempo de processamento do computador. Assim, tarefas em execução no sistema operacional não são interrompidas por este processo contínuo de monitoramento, possibilitando a coexistência, em um mesmo computador, das tarefas computacionais de controle digital da força de penetração e monitoramento das forças atuantes no penetrador.

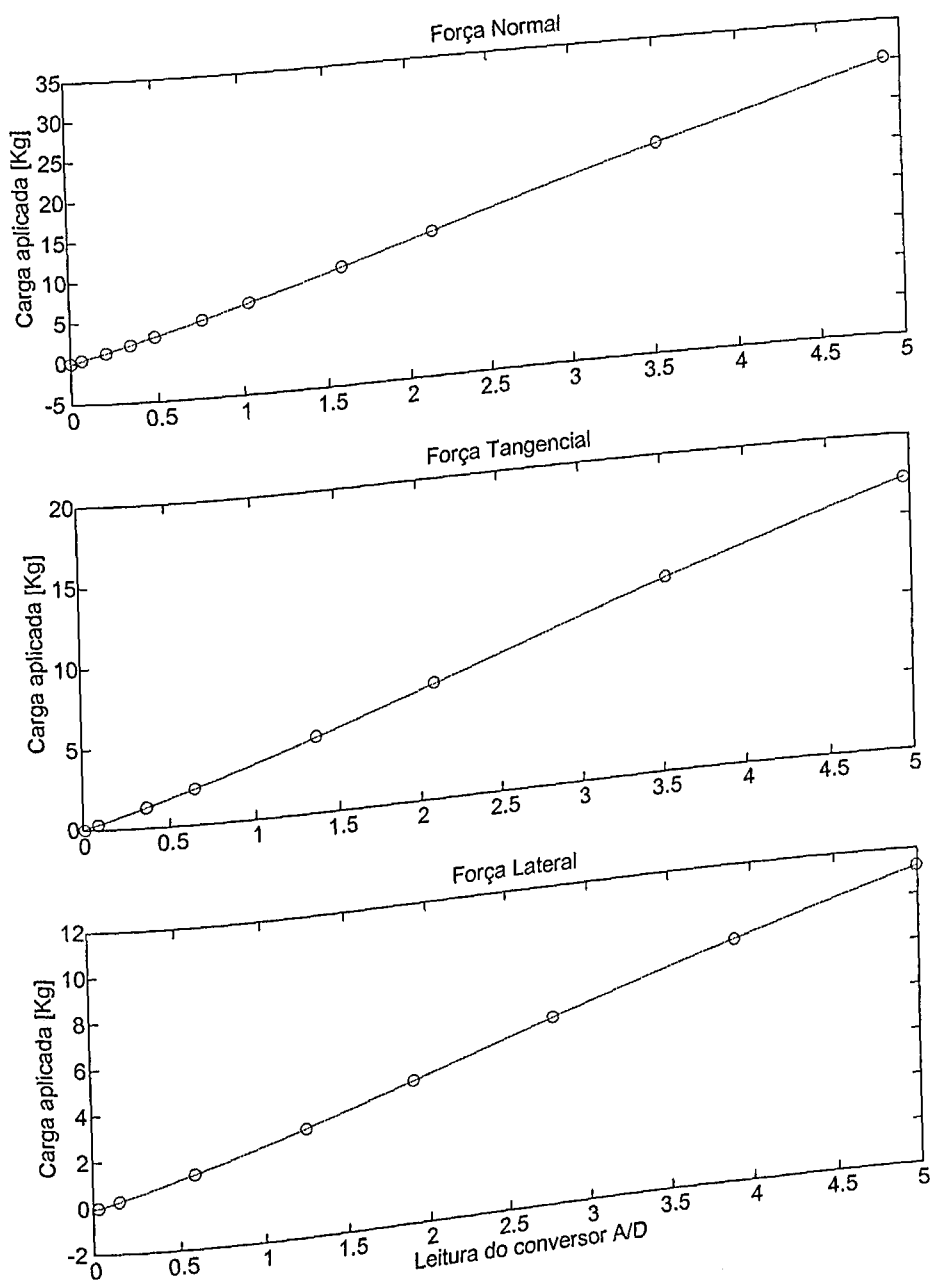


Figura 4.4- Resultado da calibração do transdutor de força.

A placa digitalizadora utilizada proporciona vários tipos de atividades de I/O simultaneamente. A placa digitalizadora tem as características:

- 12 canais de entrada A/D;
- 4 canais de saída D/A;
- 24 linhas digitais de I/O;
- processador DSP, programável;

- *trigger* interno e externo;
- *clock* interno e externo.

O **subsistema de A/D** suporta 12 canais de A/D, com resolução de 12 bits cada, sendo, entre estes, 4 simultâneos, todos operando na faixa de entrada de 0 a 5 Volts ou -5 a +5 Volts. A taxa máxima de digitalização permitida é 750 KHz para 1 canal, 860 KHz para 2 canais, 930 KHz para 3 canais, 1 MHz para 4 canais ou mais.

O **subsistema de D/A** suporta 2 canais com resolução de 16 bits cada e 2 canais com resolução de 12 bits cada, todos independentes e operando na faixa de -5 a +5 Volts. A frequência máxima de saída é de 100 KHz.

O **subsistema digital de I/O** suporta 24 linhas digitais de I/O agrupadas e 3 portas, de 8 bits cada, que podem ser programadas independentemente como entrada ou saída. As linhas de entradas ou saídas obedecem o padrão TTL para sinais digitais.

O **processador DSP** controla as operações internas da placa digitalizadora, sendo programável com memória interna disponível, em bits, de 1 K x 24 para programas e 512 x 16 para dados. Este recurso permite que códigos criados por usuários sejam descarregados por programação e executados internamente pelo DSP, possibilitando que tarefas específicas, não convencionais, sejam executadas independentemente do computador, pela placa digitalizadora. Este é o caso específico da implementação direta de um controlador digital, executado internamente no DSP em tempo real, utilizando os conversores A/D e D/A disponíveis na placa digitalizadora.

O **trigger** comanda o início e/ou término do processo de aquisição de dados, permitindo o ajuste entre *interno* e *externo*. No *trigger* interno o disparo de aquisição é feito por *software*. Já o *trigger* externo é comandado remotamente por um sinal do tipo pulsos TTL, neste caso, há vários modos de ajuste do disparo por: nível, subida e descida.

O **clock** comanda o instante de conversão dos conversores A/D, permitindo o ajuste *interno* e *externo*. No *clock* interno, as conversões do A/D são efetuadas automaticamente na taxa de digitalização ajustada por *software*. No *clock* externo, as conversões do A/D são efetuadas comandadas por um sinal externo, do tipo pulsos TTL. A utilização do *clock* externo permite que a aquisição dos dados seja executada sincronizadamente com eventos externos, o que é conveniente em muitas aplicações práticas.

As características da placa digitalizadora utilizada, descritas acima, fazem do sistema de monitoramento do esclerômetro desenvolvido um sistema versátil e útil, permitindo a elaboração de novas metodologias de ensaios, atendendo a configurações experimentais específicas.

Na placa digitalizadora utilizada, a aquisição de um conjunto de dados é executada em duas etapas (Figura 4.5). Na primeira etapa, a *operação de conversão*, os dados são convertidos pelos conversores A/D. Na segunda etapa, a *operação de transferência*, estes dados digitalizados são transferidos à memória do computador. Geralmente estas operações são controladas por seu DSP.

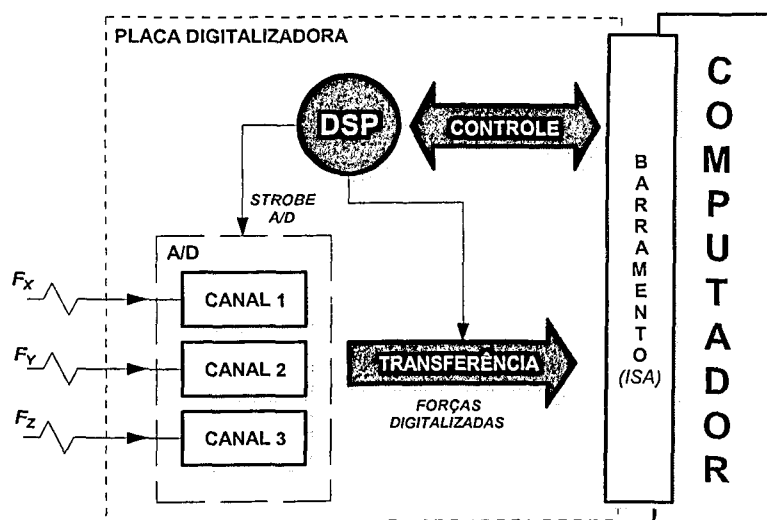


Figura 4.5- Esquema de digitalização e transferência dos dados das forças atuantes no penetrador.

A operação de transferência dos dados digitalizado à memória do computador define o processo de aquisição utilizado no monitoramento da força. Os métodos de transferência disponíveis na placa digitalizadora utilizada são por:

- Polled I/O;
- Interrupção;
- DMA;
- Dual-Channel bursting DMA;
- Operação 16-Bit RipString;
- Operação 32-Bit RipString.

Os três primeiros métodos de transferência citados acima são métodos tradicionais, disponíveis na maioria das placas digitalizadoras comerciais. Geralmente estas técnicas garantem taxas de transferência de dados limitadas em aproximadamente 50 KHz por Polled I/O, 10 KHz por interrupção e 250 KHz por DMA. Já os três últimos são métodos específicos de transferência de dados, são técnicas que capacitam altas transferências, sendo o máximo de 1MHz.

As subseções a seguir discutem as técnicas de transferência de dados disponíveis na placa digitalizadora em maiores detalhes e descrevem seu efeito final na forma do projeto do sistema de monitoramento do equipamento desenvolvido, utilizado na execução dos ensaios.

#### 4.2.2.1 Polled I/O

O método de Polled de I/O é a técnica mais simples de se obter uma sequência de amostras.

Utilizando Polled de I/O, a aquisição é feita da seguinte forma:

- i. O programa de aquisição continuamente monitora os estados dos registradores da placa digitalizadora, até o dados da conversão A/D serem disponíveis.
- ii. Os dados do conversor A/D são então lidos e armazenados na memória do computador pelo programa de aquisição.
- iii. Este processo se repete até que o conjunto de amostras desejadas sejam lidos.

O método de aquisição por Polled I/O tem a vantagem de ser extremamente simples, mas tem três desvantagens:

- A taxa de transferência é limitada pela velocidade do CPU do computador utilizado;
- Enquanto Polled I/O está sendo executado, a CPU está dedicada a este processo, sobrando pouco tempo de processamento disponível para outras atividades computacionais.
- Em sistemas operacionais multitarefas, como o Windows NT, por ser controlado totalmente por software, a aquisição é executada compartilhadamente, concorrendo com outros processos, não garantindo acuracidade temporal do intervalo de amostragem.

Polled de I/O é geralmente utilizado para:

- Conversões únicas;
- Conversões contínuas a baixa taxa de aquisição, sem precisão do intervalo de amostragem.

#### 4.2.2.2 Interrupções

Interrupções são condições do sistema operacional, que desviam o processador para um código fora do fluxo normal de controle. Elas podem ser detectadas tanto pelo hardware quanto pelo software. Quando uma interrupção é detectada, o processador pára o que está fazendo e transfere (expede) o controle para um local especificado na memória, endereço do código que lida com a condição.

A interrupção é um evento assíncrono, que ocorre a qualquer momento, e não está relacionado ao que o processador está executando. São geradas basicamente por dispositivos que requerem serviço do processador, dispositivos de entrada e saída, relógio do processador ou timers, e podem ser ativadas (ligadas) ou desativadas (desligadas).

A placa digitalizadora utilizada pode ser ajustada para gerar uma interrupção a cada digitalização do conversor A/D.

Utilizando interrupção de A/D a aquisição é feita da seguinte forma:

- i. A frequência de aquisição é ajustada;
- ii. O endereço da rotina de manipulação da interrupção é ajustado à interrupção de A/D, gerada pela placa digitalizadora. Esta rotina deve ler os resultados da conversão A/D e armazená-los na memória do computador. Esta tarefa deve ser o mais rápido possível para não congestionar o sistema operacional.
- iii. A geração da interrupção de A/D é habilitada.
- iv. A aquisição então é disparada. O programa de aquisição pode continuar com outras tarefas;
- v. Assim que cada conversão do A/D for completada, o sistema operacional chama a rotina de manipulação de interrupção. Isto se repete até que a geração da interrupção de A/D seja desligada;
- vi. Quando o número total de amostras desejada for adquirido, a interrupção de A/D é desabilitada.

O uso de interrupções para aquisição e transferência de dados é amplamente compatível com aplicações desenvolvidas para sistemas multi-tarefas. Foi feito um teste gerando-se interrupções a frequência de 5 KHz, o nível geral de ocupação da CPU medido no TaskManager do Windows NT foi de 5%. A interrupção utilizada no teste foi gerada na porta paralela, disponível no computador de controle do esclerômetro utilizado.

O método de aquisição por interrupção é de implementação simples e permite flexibilidade de programação da rotina de manipulação da interrupção de A/D. Convenientemente os dados digitalizados podem ser armazenados na memória do computador, em um formato criado especialmente para o programa gerenciador de ensaios do esclerômetro desenvolvido. Esta característica capacita, durante a execução de um ensaio, o controle da força de penetração e a visualização em tempo real dos sinais monitorados na tela do computador.

As conversões do A/D e conseqüentemente as interrupções de A/D, são geradas pelo clock interno da placa digitalizadora, ajustada pela frequência de aquisição, isto garante acuracidade temporal do intervalo de aquisição, meta fundamental ao sistema de monitoramento desenvolvido.

No equipamento desenvolvido, o método de aquisição por interrupções de A/D é o método utilizado no subsistema de monitoramento das forças atuantes no penetrador, na realização dos ensaios.



#### 4.2.2.3 DMA

O barramento ISA do computador disponibiliza o uso de canais de DMA (*Direct Memory Access*). Estes canais são usados para desempenhar transferências de dados em alta velocidade entre adaptadores ou dispositivos e a memória do computador. Isto é feito sem interromper o microprocessador e é importante para suportar muitos dispositivos de alta velocidade como adaptadores de redes, *Video Capture* e unidades de CD-ROM.

Utilizando DMA, a aquisição é feita da seguinte forma:

- i. A frequência de aquisição é ajustada;
- ii. O hardware de DMA do computador é ajustado com o endereço da memória, na qual se deseja transferir os resultados das conversões de A/D;
- iii. A uso de DMA é habilitado na placa digitalizadora;
- iv. A aquisição então é disparada. O programa de aquisição pode continuar com outras tarefas;
- v. Assim, a cada conversão do A/D completada, o resultado da conversão é transferido automaticamente à memória do computador. Isto se repete até que a transferência por DMA seja desligada;
- vi. Quando o número total de amostras desejadas for adquirido, a aquisição é interrompida e a transferência por DMA é desabilitada.

O método de aquisição por DMA, quando suportado pelo hardware de digitalização, é o método mais eficiente dentre os tradicionais. Os sistemas de monitoramento que utilizam DMA são bem adaptados a sistemas operacionais multitarefas. A acuracidade temporal do intervalo de amostragem também é satisfeita, as conversões de A/D são controladas pelo *clock* interno da placa digitalizadora. No entanto, em um computador convencional, os canais de DMA são escassos ou comumente não disponíveis, dependendo do número de adaptadores e dispositivos presentes no sistema.

Apesar de mais adequado, o uso de DMA exige implementação complexa, operações de baixo nível no sistema operacional. As baixas taxas de digitalização, presentes nos ensaios esclerométricos, não justificam o investimento do uso de DMA no projeto do sistema de monitoramento do esclerômetro desenvolvido.

#### 4.2.2.4 Dual-Channel bursting DMA, 16-Bit RipString e 32-Bit RipString

Estes métodos de aquisição são necessários quando o sistema de digitalização exige elevadas taxas de aquisição (na ordem de 1MHz).

Na placa digitalizadora utilizada, estas taxas elevadas são garantidas, devido ao uso de:

- memória interna de armazenamento (*Smart Cache*);
- transferência de dados à memória do computador em bloco;
- compactação dos dados transferidos.

Nestes métodos, a aquisição é feita da seguinte forma:

- A frequência de aquisição é ajustada;
- A uso de um dos três métodos é habilitado na placa digitalizadora;
- A aquisição então é disparada. O programa de aquisição pode continuar com outras tarefas;
- Assim, a cada conversão do A/D completada, o resultado da conversão é transferido diretamente ao *Smart Cache*.
- Quando metade do *Smart Cache* for ocupado, é gerado um sinal de interrupção avisando que o bloco de dados está disponível para transferência;
- Gerado o aviso de bloco disponível, o block inteiro é transferido à memória do computador, por DMA ou *Rep String*;
- Quando o número total de amostras desejados for adquirido, a aquisição é interrompida.

A memória interna disponível na placa digitalizadora tem capacidade de 1024 amostras, de 16 bit cada.

O método de transferência de dados em blocos DMA ou *Rep String* otimiza a transferência dos dados digitalizados à memória do computador.

*RepString* (*Rep Insw*), é um comando disponível nos processadores 80286/386/486/Pentium que executa um *loop* fazendo operações de 16 ou 32-Bit I/O, sem utilizar o processador.

Nestes métodos, objetivando aumentar a taxa de transferência de dados à memória do computador, os dados digitalizados podem ser compactados na forma: a cada 4 valores de 12 bits são armazenados em 3 valores de 16 bits. Taxas altas de digitalização, próximo a 1 MHz, só são possíveis de serem atingidas utilizando-se este recurso de compactação dos dados para sua transferência.

Estes métodos de aquisição não podem ser utilizados no sistema de monitoramento do esclerômetro desenvolvido, pelo motivo dos dados digitalizados mais recentes estarem compactados e armazenados na memória interna da placa digitalizadora, inacessíveis ao sistema computacional gerenciador de ensaios, impossibilitando o controle da força de penetração atuante no penetrador.

### 4.3 Monitoramento da posição do penetrador

Um risco gerado sobre a superfície da amostra é resultado dos movimentos conjugados, vertical do penetrador e horizontal da amostra em teste. Durante a execução de um ensaio, é desejado conhecer a posição do penetrador a cada instante.

Para isto, é necessário criar um método de avaliar a posição do penetrador e este módulo deve ser capaz de:

- monitorar a posição vertical (penetração) e horizontal (riscamento) do penetrador ao longo de todo ensaio;
- sincronizar os eventos de aquisição de força com a de posição.

Com objetivo de monitorar a cinemática do penetrador, foram analisadas três possibilidades de uso:

- de sensores externos de medição de posição;
- das equações cinemáticas do movimento;
- direto dos sinais dos *encoders* dos servo-motores das mesas acionadoras dos ensaios.

As subseções a seguir, discutem as estratégias de monitoramento da posição do penetrador em maiores detalhes e descrevem seu efeito final na forma do projeto do sistema de monitoramento do equipamento desenvolvido, utilizado na execução dos ensaios.

#### 4.3.1 Uso de sensores externos de medição de posição

O uso de sensores externos de posição foi descartado no projeto de monitoramento da posição do penetrador. A relação curso *versus* precisão em sensores de posição é inversamente proporcional, ou seja, cursos grandes (o caso de um risco) implicam em pouca precisão, caso contrário, alto custo, o que inviabiliza o projeto do esclerômetro.

#### 4.3.2 Uso das equações cinemáticas do movimento

Nos ensaios esclerométricos, a utilização das equações cinemáticas do movimento é uma solução atraente. O conjunto, mesas micrométricas e controlador de movimento adquiridos, apresentam precisão nas trajetórias geradas. Estas trajetórias são do tipo trapezoidal em velocidade (Figura 4.6).

O inconveniente do uso das equações cinemáticas do movimento para descrever o comportamento cinemático do penetrador é não poder ser utilizadas quando o penetrador desenvolve movimento oscilatório (inversão de direção de movimento). Este é o caso de ensaios com

força de penetração controlada, onde o penetrador oscila regido pela lei de controle digital da força.

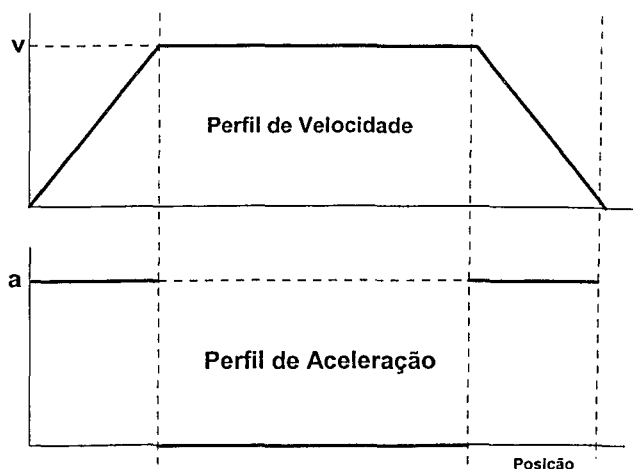


Figura 4.6- Esquema do tipo de trajetória das mesas acionadoras geradas pelo controlador de movimento.

Nos ensaios esclerométricos com controle de força de penetração, o uso das equações cinemáticas do movimento não são adequadas para descreverem o movimento vertical do penetrador. No entanto, são satisfatórias para descreverem o movimento horizontal da amostra em teste. Nos ensaios esclerométricos realizados no esclerômetro desenvolvido, os riscos sempre são gerados a velocidade constante de translação da amostra investigada. Para ilustrar este fato, estão mostrados nas Figura 4.7 e Figura 4.8, respectivamente, um movimento de translação da amostra e dois ensaios de indentação. A trajetória da amostra foi reconstruída através do monitoramento direto dos sinais provindos do *encoder* da mesa acionadora. Já nos ensaios de indentação, a trajetória do penetrador foi medida diretamente utilizando-se um sensor de proximidade, modelo DYMAC M600 da Division of Spectral Dynamics Corporation.

#### 4.3.3 Uso Direto dos sinais dos encoders dos servo-motores das mesas acionadoras dos ensaios

O controle de posição das mesas micrométricas, que acionam o penetrador e a amostra em teste, atua em malha fechada. O controlador de movimento utiliza os *encoders* acoplados aos servo-motores das mesas acionadoras dos ensaios. Estes *encoders* são de quadratura (Figura 4.9).

A saída provinda dos *encoders* incrementais ópticos, assim como outros tipos de dispositivos de medição, é conhecido como *signal de quadratura*. Um sinal de "Quadratura", consiste

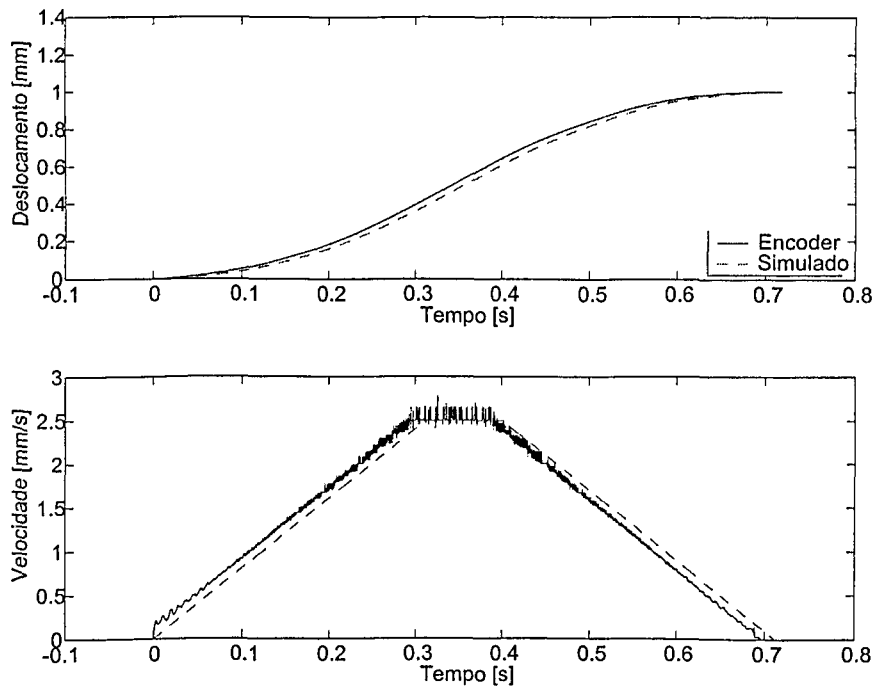


Figura 4.7- Movimento executado pelo controlador de movimento.

em duas ondas quadradas defasadas de  $90^\circ$  (canal A e B), Figura 4.10. Sua interpretação consiste em contar a transição das ondas quadradas. A direção é determinada pela comparação se o canal A “lidera” o canal B, e vice-versa. A real posição do *encoder* é determinada pela multiplicação do número de pulsos contados pela resolução mecânica de um pulso. A velocidade é computada da mesma forma, contando o número de pulsos por segundo.

Em adição aos dois sinais em quadratura os *encoders* utilizados fornecem um sinal de índice (canal I) com um pulso por revolução. Eles também são do tipo *encoders diferenciais*, fornecendo um sinal complementar (canais /A, /B e /I) para cada um dos três sinais-padrão (canais A, B e I). A transmissão diferencial previne a degradação do sinal em aplicações, onde o sinal é enviado a longas distâncias.

Os uso de *encoders* de quadratura no monitoramento da posição do penetrador, no equipamento desenvolvido, tem as vantagens:

- estão disponíveis nas mesas acionadoras;
- têm alta resolução de posição;
- possibilitam monitorar movimentos oscilatórios;
- são imunes ao ruído externo.

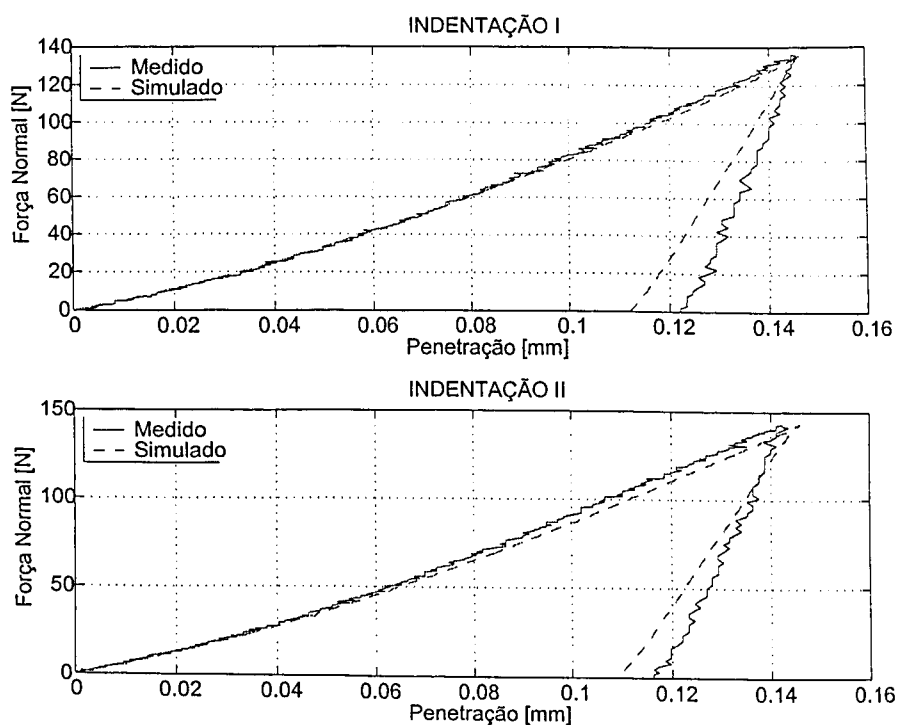


Figura 4.8- Ensaio de indentação, realizados no Macrosclerômetro.

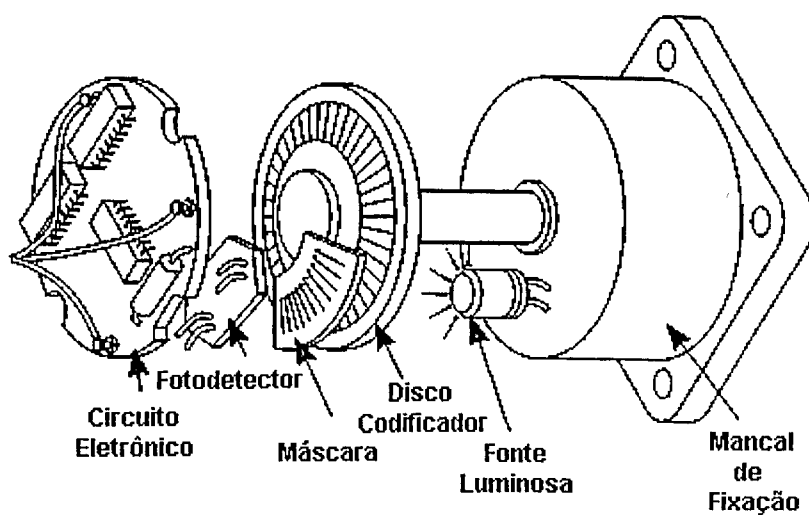


Figura 4.9- Esquema de funcionamento do *encoder* incremental óptico, utilizado no controle das mesas acionadoras do ensaio.

Estas características os tornam adequados para o monitoramento da cinemática do penetrador.

Os *encoders* utilizados são parte integrante do sistema motor das mesas acionadoras, não acarretando custo adicional ao equipamento e são de alta resolução  $0.1 \mu\text{m}$  em  $z$  e  $x$ , e

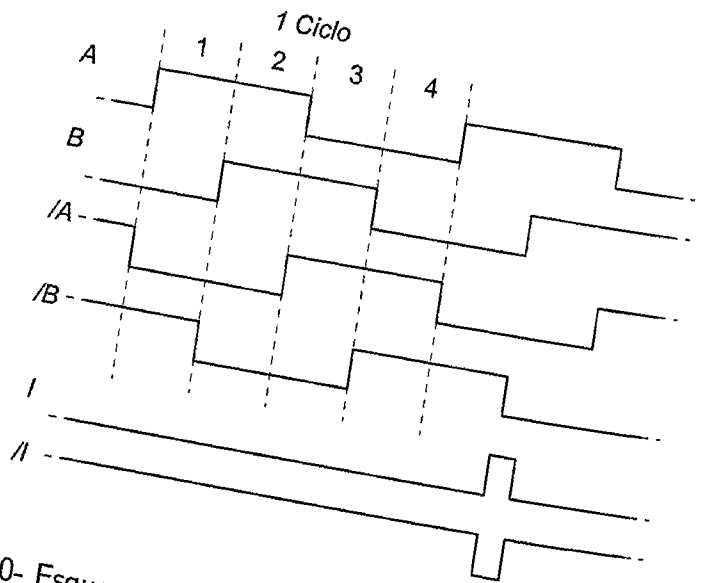


Figura 4.10- Esquema dos sinais disponíveis nos *encoders* utilizados.

1  $\mu\text{m}$  em  $y$ . No equipamento, a resolução dos *encoders* é a mesma das mesas acionadas dos ensaios. Isto os tornam sensíveis a qualquer movimento executado. Esta característica importante, principalmente nos ensaios esclerométricos com controle da força de penetração no qual movimentos oscilatórios de baixa amplitude são típicos.

O sinais digitais providos dos *encoders* são do padrão TTL. O padrão TTL define os sinais digitais um valor de referência aproximadamente de 2.5 Volts, que estabelece o estado digital, nível alto ou baixo (0 ou 1). Assim, para que os sinais providos dos *encoders* sejam corrompidos pela contaminação de ruído externo, esta deve ser da ordem de 2 V condição atípica do equipamento.

Durante a execução de um ensaio esclerométrico, há três etapas distintas no processo de monitoramento da posição do penetrador:

- i. decodificar os sinais dos *encoders*, convertendo-os em unidades de posição;
- ii. transferir os valores de posição monitorados para a memória do computador;
- iii. sincronizar estes eventos de posição com os eventos de forças atuantes no penetrador.

Satisfazendo as etapas listadas acima, duas estratégias foram avaliadas no projeto, uso:

- dos conversores A/D da placa digitalizadora;
- de um circuito digital decodificador-contador.

Na primeira estratégia, os sinais dos *encoders* (canal A e B) são adquiridos simultaneamente na placa digitalizadora (Figura 4.11), com os sinais das forças atuantes no penetrador. Finalizando o ensaio, os sinais digitalizados dos *encoders* são decodificados para determinar a posição do penetrador ao longo do tempo é registrada.

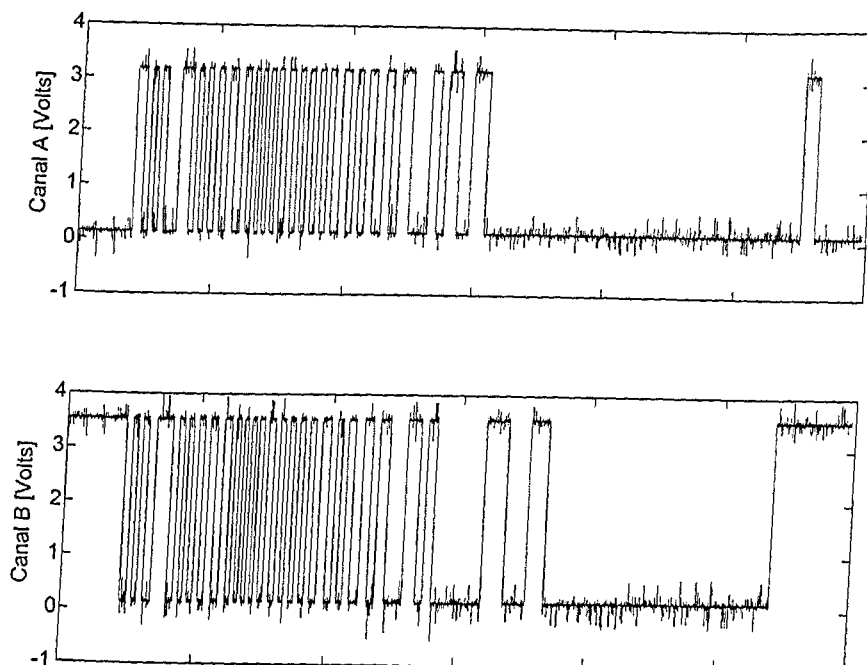


Figura 4.11- Gráficos dos canais de *encoder* adquiridos pela placa digitalizadora.

Além da simplicidade de implementação, este método tem a grande vantagem do sincronismo entre os eventos de força e de posição, garantido pela digitalização simultânea dos sinais. Em contrapartida, apresenta duas grandes desvantagens:

- a perda de sinais de transição dos canais dos *encoders*, ocorridos entre as conversões de A/D;
- e número elevado de dados digitalizados.

Como descrito na seção anterior, as conversões de A/D ocorrem a uma taxa de digitalização fixa, assim, para evitar a perda de sinais de transição dos *encoders*, a taxa de digitalização utilizada no monitoramento deve superar a taxa de ocorrência dos pulsos de *encoders*. Dependendo da velocidade de translação das mesas acionadoras, os ensaios tornam-se impraticáveis devido às altas taxas de digitalização e a quantidade de amostras digitalizadas.

No esclerômetro desenvolvido, um risco gerado em um ensaio esclerométrico é da ordem de 10 mm de comprimento. Como a resolução da mesa acionadora  $x$  é de  $0.1 \mu\text{m}$ , para que nenhum pulso dos sinais do *encoder* seja perdido devem ser amostrados  $10000/0.1$  eventos pelos conversores A/D. Em um ensaio esclerométrico são utilizadas duas mesas acionadoras com um *encoder* cada, ou seja quatro canais de A/D são necessários ao monitoramento da



posição. Em conjunto com os três sinais providos do transdutor de força, a quantidade de amostras necessárias no monitoramento utilizando esta técnica é impraticável.

O uso direto dos sinais dos *encoders* dos servo-motores, das mesas acionadoras dos ensaios, no monitoramento da posição do penetrador, foi inicialmente útil no estudo das características do equipamento, mas esta técnica é inviável para o projeto do sistema de monitoramento do esclerômetro desenvolvido.

Em uma segunda etapa, depois de conhecida a natureza dos sinais de *encoders*, uma nova estratégia foi adotada,: a construção de um *circuito digital contador-decodificador* de sinais de *encoders* em quadratura (Figura 4.12).

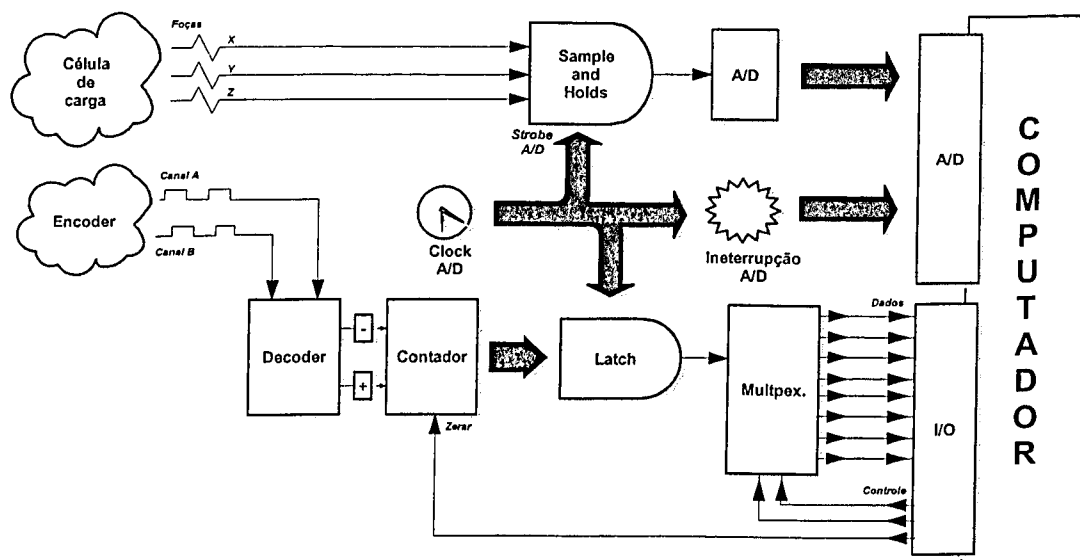


Figura 4.12- Esquema geral de funcionamento do sistema de monitoramento da posição do penetrador.

A arquitetura deste sistema é uma extensão do processo de digitalização, utilizado no monitoramento das forças atuantes no penetrador, descrito na seção anterior. O módulo projetado utiliza um sistema independente que se comunica com o computador através das 3 portas digitais de I/O, disponíveis na placa digitalizadora.

Este circuito é composto por 4 integrados digitais acoplados em seqüência (Figura 4.12):

- 1 *decoder*;
- 1 Contador 16 bits;
- 1 *latch*;
- 1 Multiplexador;

Nesta arquitetura, a etapa de decodificação dos sinais do *encoder* é executada pelo conjunto *decoder* e contador, a aquisição e transferência pelo conjunto de integrados *latch* e Multiplexador.

O *decoder* é um integrado digital específico para a decodificação de sinais provindos de *encoder* de quadratura (canais A e B). A medida que ocorre o movimento, o *decoder* comanda, incrementando ou decrementando, seu contador digital acoplado. Assim, a posição da mesa acionadora está disponível no valor digital registrado no contador.

Na etapa de aquisição e transferência, a cada evento de aquisição requisitado, os valores registrados no contador são copiados e retidos temporariamente no *latch*, em seguida são lidos e transferidos à memória do computador através da porta digital de I/O. Esta porta de I/O é de 8 bits, assim, na operação de transferência, o valor de 16 bits, disponível no *latch*, é transferido em duas etapas de 8 bits cada. Tal divisão é função do multiplexador. No sistema, o integrado de *latch* é necessário, pois ao longo da operação de transferência, os valores registrados nos contadores estão continuamente sendo alterados.

Das três portas de 8 bits disponíveis, duas portas são utilizadas na transferência dos dados, uma para cada mesa acionadora do ensaio esclerométrico. A terceira porta digital disponível, é utilizada pelo computador no controle das ações do dispositivo digital contador-decodificador. Este controle é responsável em:

- zerar os valores registrados nos contadores;
- disparar a retenção dos valores registrados no contador no *latch* (operação de travamento);
- controlar a multiplexagem dos valores registrados no *latch*.

No início de cada ensaio, os valores registrados nos contadores são zerados, assim a posição do penetrador monitorada é relativa ao início do risco gerado.

A operação de travamento do *latch* para aquisição e transferência é comandada de duas formas:

- via porta de I/O;
- via strobe de A/D.

Essas formas garantem sincronismo, ou não, entre os eventos de força e posição. O comando via porta de I/O é utilizado quando invocado uma aquisição independente controlada por programação. No caso do monitoramento contínuo ao longo de um ensaio, o travamento do *latch* é controlado via sinal de *strobe de A/D*. Este sinal internamente comanda e dispara a operação de amostragem e retenção (*Sampling and Hold*<sup>7</sup>) na placa digitalizadora. O *strobe*

<sup>7</sup> "Sample-and-hold" é geralmente o termo usado para um amplificador *sample-and-hold*. Ele descreve um circuito que recebe uma entrada de sinal analógico e mantém este sinal em um valor constante por um período de tempo especificado. Geralmente, o circuito de *sample-and-hold* é parte integrante dos conversores A/D comercialmente disponíveis.

de A/D ocorre na taxa de digitalização ajustada para aquisição dos sinais de força. O uso do *strobe* de A/D no travamento do *latch*, garante na execução dos ensaios esclerométricos, o sincronismo entre os eventos no monitoramento da cinemática e das forças atuantes no penetrador no equipamento desenvolvido.

O monitoramento da posição do penetrador incrementa e sofisticada o sistema de digitalização das forças atuantes sobre o mesmo, ambos são controlados por interrupção de A/D. A cada conversão de A/D, a rotina de manipulação que atende a interrupção de A/D gerada, nesta versão, além dos valores de força digitalizados, também adquire e armazena na memória do computador os valores da posição do penetrador. Todo este processo ocorre sistematicamente, sendo executado compartilhadamente com o programa computacional gerenciador de ensaios.

Nos ensaios esclerométricos, as mesas acionadoras executam basicamente dois movimentos: um oscilatório do penetrador e outro contínuo sempre na mesma direção, executado pela amostra em teste. Estas duas situações garantem interpretações diferentes dos valores registrados nos contadores (Figura 4.13).

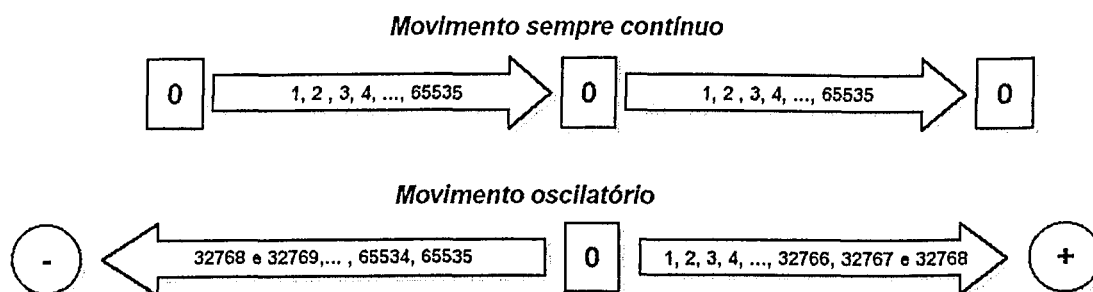


Figura 4.13- Comportamento dos valores contidos nos contadores dos *encoders* das mesas acionadoras.

A resolução digital de 16 bits dos contadores utilizados garante a representabilidade de  $2^{16}$  (0 a 65535), associada à resolução  $0.1 \mu\text{m}$  dos *encoders* permitindo ao sistema a capacidade máxima de medição de aproximadamente 6.5 mm. Como os ensaios esclerométricos, executados no equipamento desenvolvido, geram riscos da ordem de aproximado de 10 mm, ao longo da execução de um risco, a 6.5536 mm do início do risco gerado, o contador é automaticamente reinicializado (zerado); nesta condição, a posição registrada no contador deve ser acrescida de 6.5536 mm. Esta estratégia permite medir a posição do penetrador superior à capacidade dos contadores utilizados.

No movimento oscilatório do penetrador, o contador responsável em monitorar seu movimento vertical é incrementado e decrementado à medida que o ensaio é executado. Estabelecida a posição zero, o contador tem um curso representável de  $\pm 3.2768$  mm de avanço ou

recuo, ou seja, metade da capacidade máxima. Nesta condição, em relação a posição zero, o movimento de avanço (curso positivo) é representado na faixa digital de 1, 2, 3, ..., até 32768; analogamente, o movimento de recuo (curso negativo) de 65535, 65534, 65533, ..., a 32769. O curso máximo de 3.2768 mm, disponível na medição do movimento vertical, não é uma limitação do equipamento. Penetrações desta ordem geram níveis de carga não previstos no projeto.

O sistema de monitoramento da posição do penetrador, através de um circuito digital contador-decodificador dos sinais dos *encoders* das mesas acionadoras projetado, teve um protótipo construído e testado com sucesso. Porém, sua intergração ao equipamento será concluída futuramente. O Anexo II apresenta o desenho esquemático do circuito eletrônico desenvolvido.

#### 4.4 Sistema de proteção contra níveis excessivos de força

O Macroesclerômetro apresenta um sofisticado módulo independente de proteção, que permanentemente monitora os níveis (em módulo) das forças atuantes no penetrador. Caso este nível exceda o nível máximo admissível, automaticamente os motores das mesas acionadoras são bloqueados e o penetrador é recolhido a uma posição de segurança, protegendo o sistema mecânico contra eventuais colisões do penetrador (com a amostra ou porta-mostra), ou penetrações excessivas ajustadas ou decorrentes da execução de um ensaio pelo usuário.

O módulo de proteção é constituído basicamente por um circuito analógico desenvolvido no laboratório. O Anexo II apresenta o desenho esquemático deste circuito. Neste sistema, o nível máximo admissível para as forças atuantes no penetrador está ajustado para 5 Volts, ou seja, o fundo de escala dos conversores A/D utilizado no monitoramento das forças atuantes no penetrador é de 5 Volts.

Quando acionado, instantaneamente o módulo de proteção paralisa as mesas acionadoras do ensaio, acionando remotamente o *interlock*<sup>8</sup> do controlador de movimento (Figura 4.14). Nesta situação também é enviado um sinal ao computador gerenciador do equipamento, invocando um procedimento computacional que responde à ação de emergência, específica para o tipo de ensaio em execução.

Basicamente, o procedimento computacional invocado pelo módulo de proteção, finaliza a execução do ensaio, restaura o sistema computacional gerenciador de ensaio, fornece uma mensagem ao usuário sobre a natureza do erro ocorrido. Em seguida, desativa o módulo

---

<sup>8</sup> O sinal de *interlock* é uma interface utilitária do controlador de movimento utilizado, que possibilita remotamente que um dispositivo requerendo uma ação de emergência, pare o movimento em execução das mesas acionadoras. Quando acionado, o *interlock* inibe o fornecimento da potência aos servo-motores das mesas acionadoras, bloqueando-as instantaneamente.

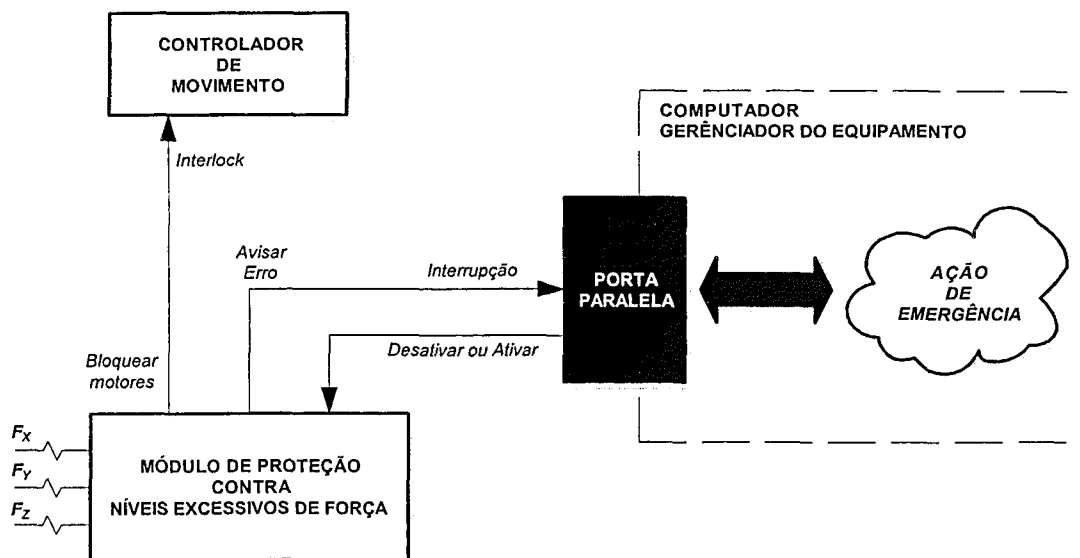


Figura 4.14- Esquema de funcionamento do sistema de proteção contra níveis excessivos de força

de proteção (inibe o *interlock*), religa a potência dos servo-motores das mesas acionadoras, movimentando-as à uma posição de segurança. Ao final, o módulo de proteção é reativado.

No protótipo desenvolvido, a versão implementada do módulo de proteção conecta-se com o computador gerenciador do equipamento através de sua porta paralela. Nesta configuração, o sinal de aviso ao computador é materializado, utilizando-se a interrupção disponível na porta paralela. A geração desta interrupção evita ao programa gerenciador de ensaios monitorar continuamente a porta paralela, verificando a ocorrência do sinal de erro e em consequência o consumo desnecessário de tempo de processamento da CPU.

A Figura 4.15 apresenta dois resultados de ensaios de indentação, executados no Macroescle-rômetro. Nestes ensaios, a penetração máxima ajustada foi inadequada. A força de penetração excedeu o nível máximo admissível no equipamento. Para evitar a danificação do mesmo, o sistema de proteção contra níveis excessivos de força acionou-se. Nestes casos, a carga máxima admissível ajustada no esclerômetro era 300 N.

O protótipo do sistema de proteção construído apresentou uma inércia de acionamento (Figura 4.15). Esta inércia é tanto maior quanto a velocidade da colisão do penetrador. Assim, para maior segurança, é adequado ajustar a carga máxima admissível no equipamento para um valor abaixo da carga limite permitida nas mesas acionadoras. Considerando-se esta inércia, 250 N é um valor conveniente para o ajuste da carga máxima admissível no equipamento.

O sistema de proteção contra níveis excessivos de força do Macroescle-rômetro garante a integridade estrutural do equipamento, imprimindo robustez, produtividade e segurança na sua utilização.

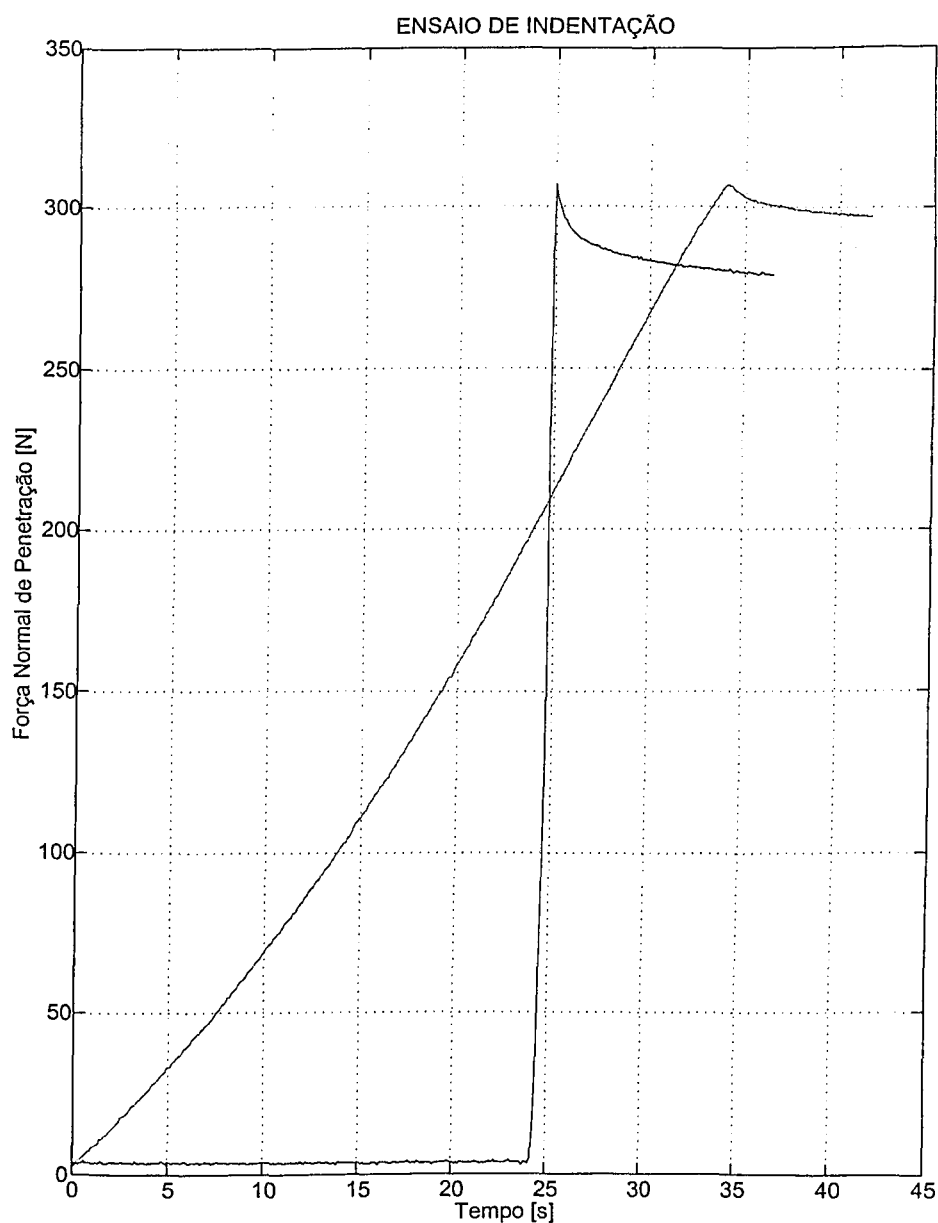


Figura 4.15- Ação do sistema de proteção contra níveis excessivos de força.

#### 4.5 Sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial

No Macroesclerômetro, este é um módulo independente, composto por uma sonda topográfica microscópica de varredura, mesas micrométricas de coordenadas  $xy$  acionadoras dos ensaios, e a interface A/D, disponível no equipamento.

A sonda utilizada no equipamento foi idealizada e construída por Sousa e Lépre, 1990. Este dispositivo apresenta boa precisão na medição de topografias superficiais e baixo custo

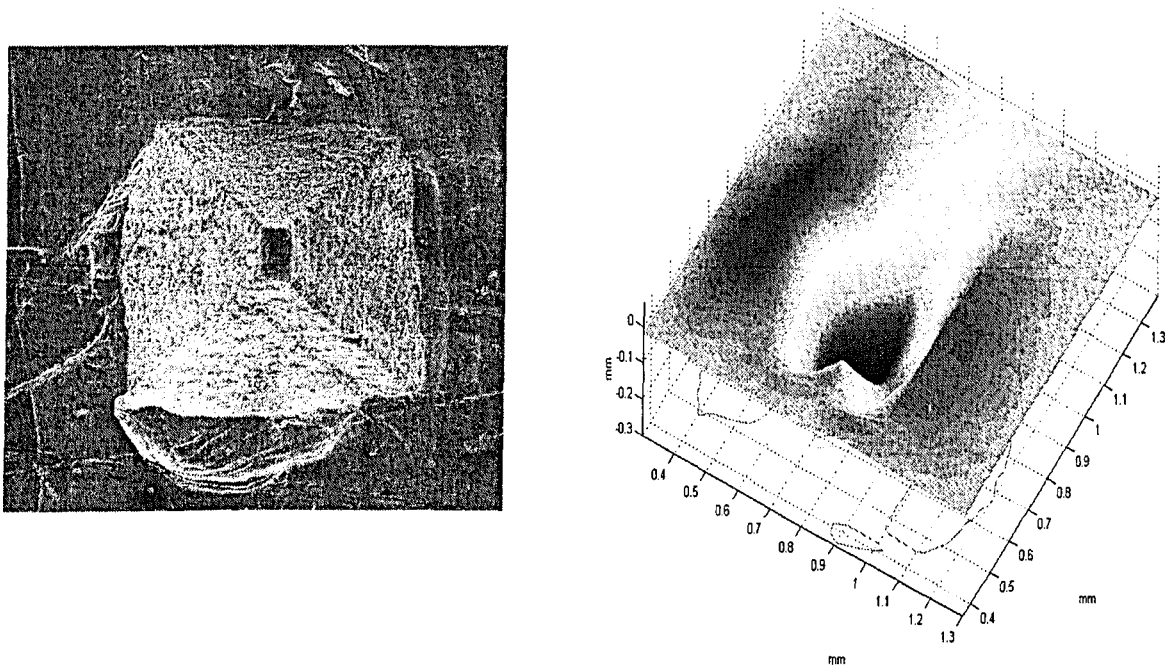


Figura 4.16- Impressão fotografada no microsscópico eletrônico de varredura (LTM-MEV), e sua correspondente topografia digitalizada obtida no Macroesclerômetro.

construtivo. Uma ponta sensora muito fina, montada na extremidade de uma balança, é mantida em contato com a superfície a ser investigada (Figura 4.17). A ponta sensora é movida lentamente através da superfície em numerosas linhas de varredura, rastreando uma área. Devido à topografia superficial, a ponta sobe e desce defletindo a balança. Esta deflexão é medida com resolução, utilizando-se um sensor óptico instalado na outra extremidade livre da balança. Os dados resultantes deste processo são continuamente monitorados e registrados pelo computador que gerencia o equipamento, através da interface A/D. Este processo possibilita a criação de uma imagem digital da estrutura superficial (CGI - *computer generation image*). Esta configuração permite a concepção da idéia básica de construção de um *microscópio mecânico de varredura*, utilizando o Macroesclerômetro (Figura 4.16).

No equipamento desenvolvido, a sonda topográfica microscópica de varredura foi instalada sobre as mesas micrométricas acionadoras dos ensaios. Desta forma, uma área da topografia superficial da amostra pode ser "scaneada", através de um rotina computacional executada pelo computador gerenciador do equipamento.

Esta combinação de digitalização de imagens e sonda microscópica de varredura abre novas possibilidades na análise quantitativa de superfícies (CSEM, 1999):

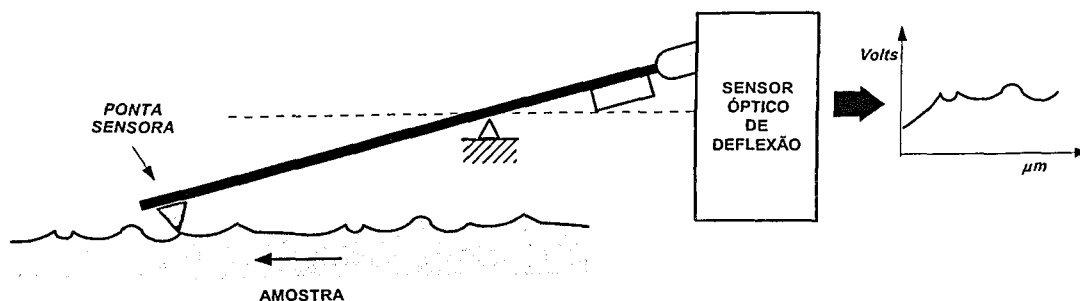


Figura 4.17- Esquema de funcionamento da sonda topográfica utilizada no equipamento desenvolvido.

- inspeção óptica de vastas áreas da amostra com a capacidade de "ZOOM" em estruturas de interesse com a resolução de microns;
- análise de micro ou nanoestruturas;
- medição de dimensões superficiais críticas;
- análise perfilométrica de sulcos, impressões, e trincas;
- análise perfilométrica de revestimentos e filmes finos;
- medição e observação de superfícies com baixo contraste óptico;
- caracterização de tecidos frágeis biológicos, assim como muitas outras aplicações em materiais e pesquisa de superfície (*Surface research*).

O acréscimo da sonda topográfica ao projeto, possibilita ao Macroesclerômetro ser utilizado como:

- Perfilômetro;
- Rugosímetro;
- Microscópio mecânico de varredura.

Medindo-se apenas uma linha sobre a superfície da amostra, o perfil superficial é extraído. Utilizando-se uma filtragem adequada, aplicada ao perfil superficial medido, a rugosidade superficial é fornecida. No caso, a extração sucessiva de vários perfis, rastreando uma área retangular desejada sobre a superfície da amostra, permite que a topografia superficial seja avaliada. Suas potencialidades ainda não foram totalmente exploradas.

A boa resolução da sonda topográfica utilizada, aliada à alta precisão das mesas acionadas dos ensaios, garantem grande precisão dimensional ao sistema de medição topográfico. A precisão da sonda topográfica depende do raio de sua ponta sensora. Esta precisão é da ordem de décimos de microns ( $\sim 0.6 \mu\text{m}$ ). Neste processo de medição topográfica superficial, o raio



da ponta sensora atua no sistema como um filtro passa-baixo, filtrando rugosidades superficiais de alta frequência.

Para avaliar as potencialidades da utilização da sonda topográfica de varredura no projeto do equipamento, foi medido a topografia superficial da calota mostrado na Figura 4.18. O resultados estão mostrados nas Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21.

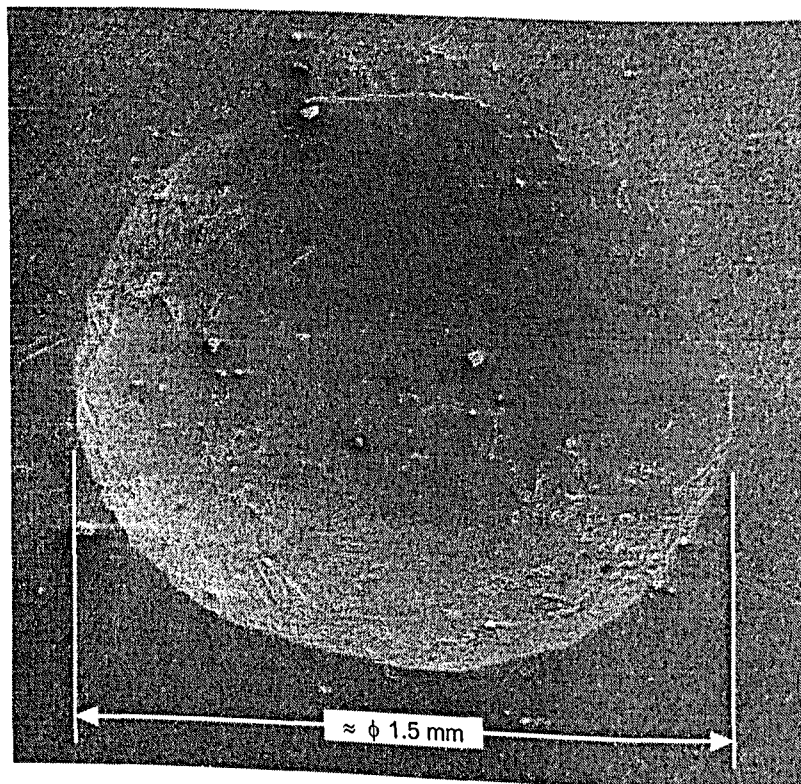


Figura 4.18- Impressão gerada em um ensaio de dureza Brinell, executado em uma amostra de alumínio (LTM-MEV).

No sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial do Macroescle-rômetro, com o objetivo de melhorar suas características, a sonda topográfica de varredura é um detalhe construtivo, que pode ser convenientemente substituído no projeto sem grandes alterações. Sondas topográficas comerciais de alta resolução estão disponíveis no mercado mundial. Há diversas configurações disponíveis utilizando princípios de medição com contato ou não:

- cantilever de contato;
- eletromagnéticas;
- eletrostáticas;
- a *laser*.

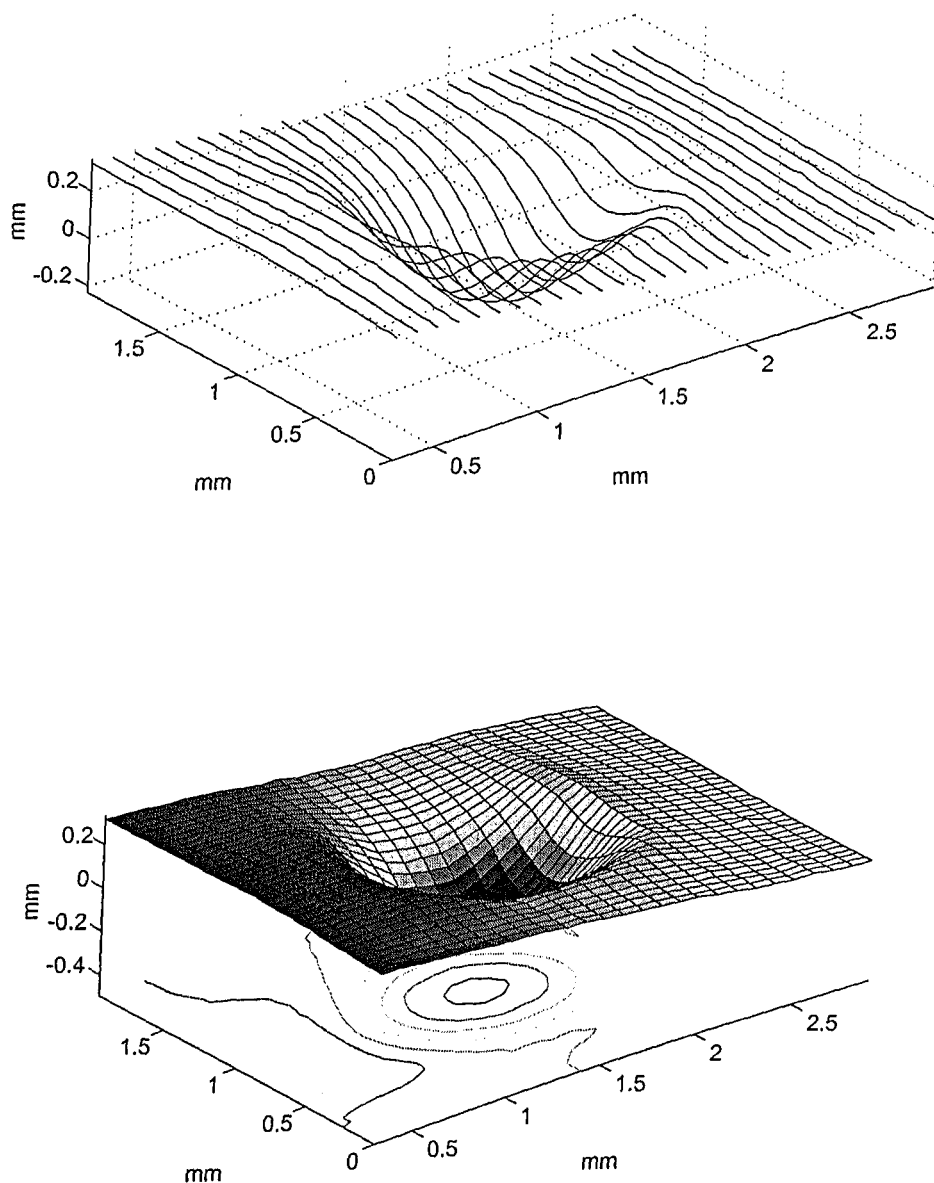


Figura 4.19- Topografia digitalizada, utilizando-se o Macrosclerômetro.

Entre estas possibilidades, as sondas topográficas comerciais a *laser* têm apresentado no mercado mundial, grandes potencialidades tecnológicas e científicas, aliando precisão e custo.

O sistema de medição de topografia permite que, após a execução dos ensaios executados no equipamento, a topografia das deformações permanentes, geradas na superfície da

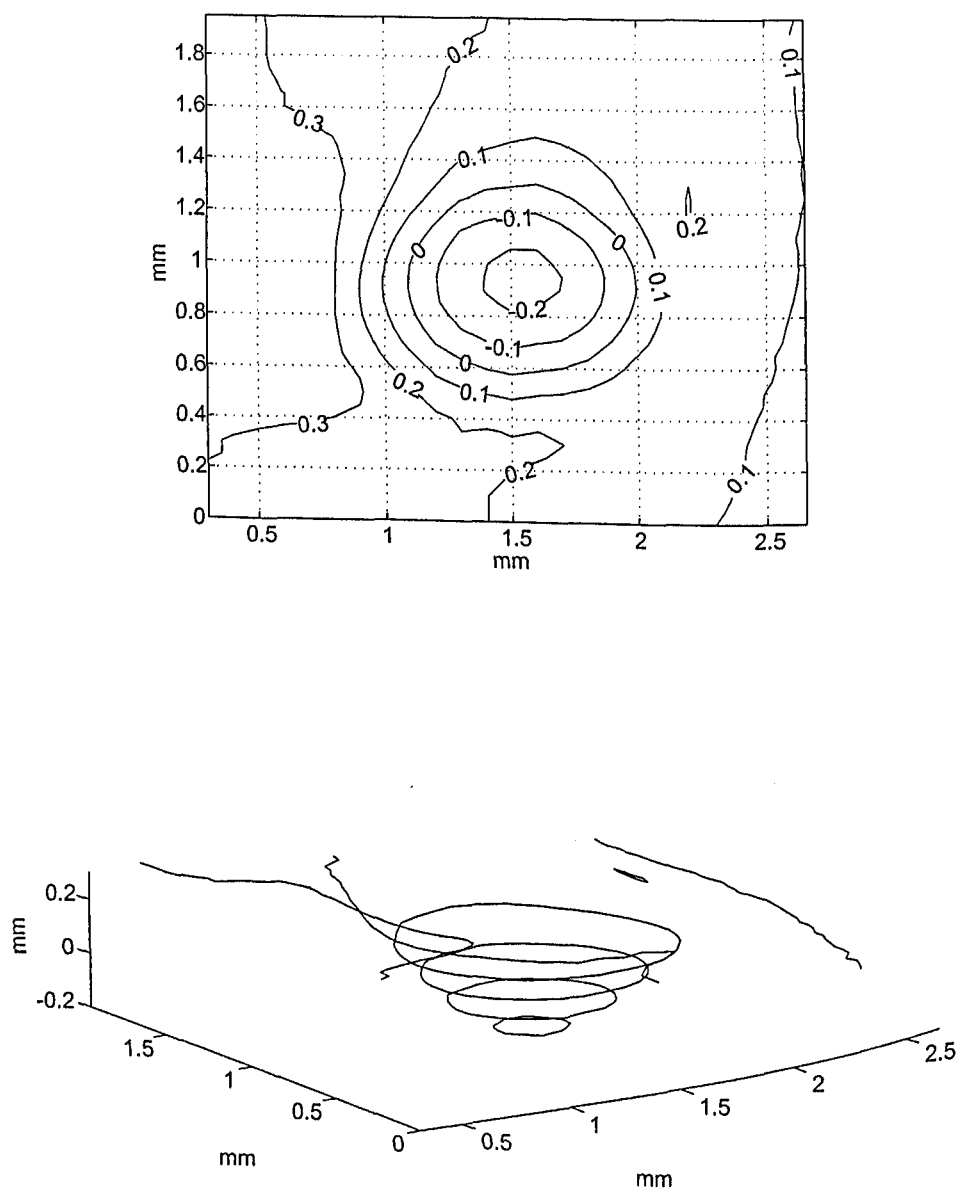


Figura 4.20- Curvas de nível da topografia digitalizada, medida no Macroesclerômetro.

amostra ensaiada, seja avaliada. Enquanto a amostra está presa nas mesas acionadoras, o programa computacional gerenciador do equipamento tem a informação exata da posição dos ensaios sobre a superfície da amostra investigada. Isto possibilitará que a topografia dos sulcos e impressões gerados nos ensaios sejam extraídas automaticamente, sem a necessidade

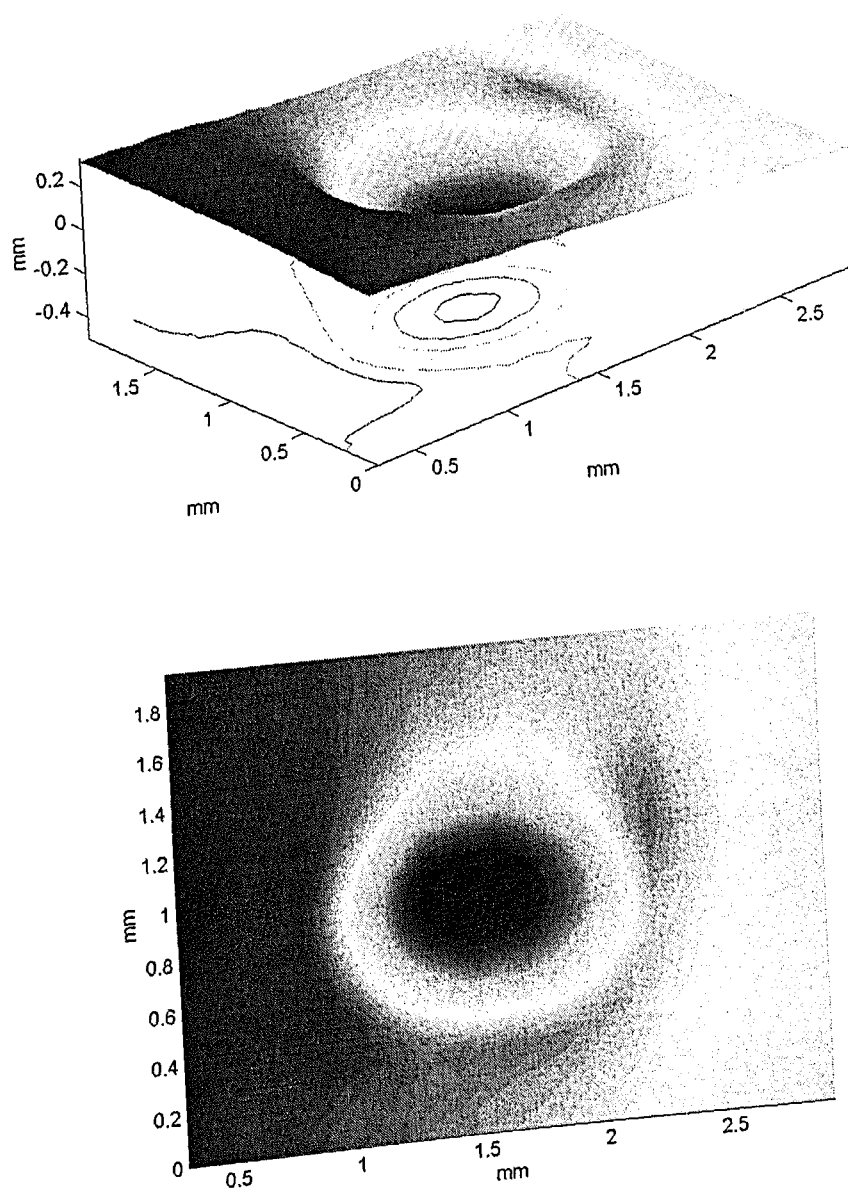


Figura 4.21- Imagem digitalizada (CGI), da impressão em teste, no Macroesclerômetro.

do posicionamento manual da ponta sensora pelo usuário, agilizando consideravelmente este processo.

No Macroesclerômetro, além do microscópio mecânico de varredura, o sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial garantem precisão e agilidade às técnicas ex-

perimentais esclerométricas e de indentação, sem acréscimos significativos no custo final do projeto.

# Capítulo 5

## Conclusões e Sugestões

O resultado final do projeto, um protótipo desenvolvido, satisfaz todas as diretrizes básicas inicialmente propostas. Com investimentos e algumas alterações, este protótipo poderá tornar-se comercialmente atraente e competitivo, atendendo de forma satisfatória às necessidades da comunidade científica e industrial.

O sucesso e o diferencial do esclerômetro construído é apresentar uma arquitetura totalmente aberta, o que garante ao equipamento proposto um baixo custo em relação a sua potencialidade.

O esclerômetro desenvolvido apresenta algumas inovações na metodologia do ensaio (preparação, execução e análise), resultado da exploração da capacidade do sistema desenvolvido. Espera-se no futuro com a interação usuário/sistema, automatizar completamente o processo experimental, imprimindo à técnica esclerométrica e de indentação maior produtividade.

O *software*, o *hardware* e principalmente o sistema de acionamento mecânico de ensaios apresentam uma técnica original para a investigação e simulação dos fenômenos de desgaste abrasivo.

A arquitetura de três mesas acionadoras controladas por controlador de movimento dedicado imprimiu ao equipamento grande flexibilidade na execução e automatização de ensaios.

O uso de uma mesa de translação micrométrica, no acionamento do penetrador, ao invés do uso direto de um atuador de força (eletromagnético, hidráulico ou pneumático), é uma contribuição original ao projeto de esclerômetros retilíneos informatizados. O uso de um atuador de posição permite que ensaios com controle de força de penetração e ensaios com controle de profundidade de penetração sejam realizados em um mesmo equipamento, o que é inviável utilizando-se apenas um atuador de força. O inconveniente desta configuração, a qualidade do controle de força comandado indiretamente através da posição, pode ser solucionado adotando-se um projeto adequado para o controlador de força.

As características técnicas do sistema mecânico de acionamento dos ensaios, a grande precisão de posição e velocidade das trajetórias geradas garantem precisão aos testes esclerométricos e de indentação, característica fundamental do equipamento desenvolvido.

O sistema de monitoramento da posição do penetrador, através de um circuito digital contador-decodificador dos sinais dos *encoders* das mesas acionadoras projetado, garante ao equipamento, a resolução máxima disponível nos *encoders* utilizados, ou seja,  $0.1 \mu\text{m}$  na direção  $x$  e  $1 \mu\text{m}$  na direção  $y$ .

O uso de células de carga tridimensionais na instrumentação das forças atuantes no penetrador simplifica muito o projeto de esclerômetros. Entretanto, esse detalhe construtivo tem o inconveniente do efeito cruzado entre os sinais medidos das forças. Tal característica de acoplamento é inerente a este tipo de célula de carga.

Os condicionadores de sinais utilizados permitem amplificação e ajustes individuais dos sinais provindos do transdutor de força. Esse detalhe construtivo capacita o equipamento com calibrações específicas. Um fundo de escala variável é uma característica conveniente em ensaios com cargas relativamente baixas. No protótipo construído, o fundo de escala pode ser ajustado na faixa de 70 a 300 N.

As características do sistema de digitalização (placa digitalizadora) utilizada e disponível fazem do sistema de monitoramento do esclerômetro desenvolvido, um sistema versátil e útil, permitindo a elaboração de novas metodologias de ensaios, atendendo a configurações experimentais futuras e específicas, disponibilizando para isso, vários canais de A/D e D/A livres.

O procedimento de calibração automatizado do equipamento desenvolvido dá agilidade e garante precisão ao sistema de monitoramento das forças atuantes no penetrador.

O sistema de proteção desenvolvido contra níveis excessivos de força, do esclerômetro proposto garante a integridade estrutural do equipamento, imprimindo robustez, produtividade e segurança na sua utilização.

A utilização de controle digital em tempo real utilizando computadores é uma estratégia interessante no controle da força de penetração em esclerômetros totalmente computadorizados, apresentando a grande vantagem de ser flexível quando comparados a sistemas dedicados de controle: sistemas analógicos e microprocessados. Essa flexibilidade é caracterizada pela possibilidade de implementação de plantas de controle mais sofisticadas; utilizando sensores e atuadores não convencionais, como as mesas acionadoras utilizadas, controladas com leis de controle mais complexas, com ajuste em tempo real dos parâmetros de controle. Atualmente a maior desvantagem da utilização do controle digital via computadores é a utilização de taxas limitadas de execução do controle, limitando sua ação a sistemas dinâmicos que respondem a baixa e média frequência. Frequências na ordem de 20 KHz são inviáveis nesta implementação. Essa limitação tem sido constantemente suprida através do desenvolvimento de novas tecnologias de *software* e de *hardware*.

O sistema computacional de controle digital da força de penetração foi desenvolvido e implementado, como sendo um módulo integrante do aplicativo computacional gerenciador de ensaios, executado no computador gerenciador do equipamento. Esta é uma ferramenta

útil e pode ser utilizada de forma geral, em problemas de controle digital em tempo real, implementados e executados em computador.

Numa avaliação preliminar, o sistema computacional de controle digital da força de penetração desenvolvido, utilizando-se um algoritmo PID, implementado no computador gerenciador do equipamento, mostrou ser um controlador digital, que apresenta potencialidades na aplicação a ensaios esclerométricos com controle de força, realizados no equipamento proposto. Aparentemente este controlador apresenta precisão, confiabilidade, repetibilidade e generalidade.

Sistemas operacionais multitarefas são muito convenientes nas aplicações práticas que utilizam controladores digitais implementados via computador. Tal característica, presente no sistema operacional utilizado, o Windows NT, permitiu ao controlador/executor de ensaios desenvolvido para o equipamento uma arquitetura mais sofisticada, realizando várias tarefas simultâneas.

Em ensaios com controle da força de penetração, além da operação de controle digital, este sistema simultaneamente monitora, visualiza, trata e armazena em disco os dados monitorados ao longo do ensaio, em tempo real durante a execução do controle, todas essas características aliadas a uma interface gráfica de alto nível, amigável com o usuário. Nesta aplicação especial, que exige o monitoramento contínuo, a multitarefa permitiu que o computador utilizado não se torne exclusivo, sendo capaz de ser usado normalmente em outras atividades.

O uso de interrupção de A/D no monitoramento das forças atuantes no penetrador e a temporização do controle digital da força de penetração implementada via *Timer* de Multimídia, disponíveis no Windows NT, é uma estratégia original e útil. Esta técnica pode ser aplicada de forma geral a sistemas mecânicos controlados a taxas diferentes de monitoramento (máximo 5 KHz) e controle (máximo 1KHz).

No projeto do equipamento, o sistema operacional foi encarado como parte integrante do sistema. A utilização do Windows NT como sistema operacional do computador gerenciador do equipamento foi de suma importância para a qualidade final do projeto. Além do aspecto da segurança, o sistema como um todo se beneficiou com uso do Windows NT, imprimindo ao equipamento, robustez, produtividade e segurança do ponto de vista do usuário.

O acréscimo da sonda topográfica ao projeto possibilita ao esclerômetro desenvolvido ser utilizado na caracterização de superfícies, como: perfilômetro, rugosímetro e microscópio mecânico de varredura.

No sistema proposto, além do microscópio mecânico de varredura, o sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial garantem precisão e agilidade às técnicas experimentais esclerométricas e de indentação, sem acréscimos significativos no custo final do projeto, possibilitando que a topografia, dos sulcos e impressões gerados nos ensaios sejam



extraídas automaticamente, sem a necessidade do posicionamento manual da ponta sensora pelo usuário, agilizando consideravelmente este processo de análise.

O equipamento desenvolvido, o *Macroesclerômetro*, possui as seguintes características técnicas:

- velocidade de translação da amostra: 0 - 40 mm/s;
- cargas aplicadas: até 300 N;
- resolução máxima de posição: 0.1  $\mu\text{m}$ ;
- utilizar qualquer tipo de penetrador;
- monitoração e registro:
  - das forças atuantes no penetrador: normal, lateral e tangencial;
  - da cinemática do penetrador;
- ajuste total das variáveis de ensaio:
  - Ampla faixa de velocidade de riscamento;
  - Comprimento de riscos variáveis;
  - Profundidade máxima de penetração;
  - Velocidade de penetração;
  - Carga máxima de penetração;
  - Taxa de aplicação da carga penetração;
  - Taxa de digitalização;
- utilizar amostras que requerem pouca ou nenhuma preparação superficial;
- automatizar os procedimentos dos ensaios esclerométricos, de indentação e de adesão revestimento-substrato.

Sendo capaz de realizar ensaios esclerométricos e de indentação com:

- controle da força de penetração;
- controle da profundidade de penetração;

Estes ensaios podem ser executados com ajuste da variável de controle com:

- perfil constante;
- perfil em rampa ascendente (ou descendente);
- perfil complexo editado pelo usuário.

O uso de esclerômetros retilíneos informatizados possibilitam a concepção da idéia básica de padronização dos ensaios esclerométricos, de indentação e de adesão revestimento-substrato.

O Macroesclerômetro apresenta grandes potencialidades comerciais, tecnológicas e industriais.

Este trabalho contribui para a aplicação de esclerômetros retilíneos totalmente computadorizados, na investigação de superfícies sujeitas à ação do desgaste abrasivo.

O Macroesclerômetro é um instrumento adequado na análise avançada de revestimentos.

Os vários procedimentos desenvolvidos nesta dissertação geraram os seguintes trabalhos científicos:

- i. Abrahão, A., De Mello, J. D. B., Lépure, F. P., 1998, "Automatização de Ensaios Esclerométricos", IV Seminário de Desgaste, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas.
- ii. Abrahão, A., Lépure, F. P., 1998, "Idealização, Projeto, Construção e Avaliação de Esclerômetros Retilíneos", V Congresso de Eng. Mecânica Norte e Nordeste.

Como considerações finais ao trabalho, sugere-se no esclerômetro construído:

- substituir o controlador de movimento;
- substituir a célula de carga;
- integrar o projeto do contador-decodificador de *encoders* ao conversores A/D;
- otimizar o projeto do pórtico do equipamento;
- utilizar um sistema de aquisição digital de imagens;
- substituir a sonda topográfica.

O controlador de movimento independente utilizado pode ser substituído por um modelo similar, porém na forma de uma interface padrão ISA, própria para ser instalada em computadores, e um módulo de potência independente. Essa configuração alternativa, é disponibilizada pelo fabricante do controlador utilizado com um custo inferior. Este novo controlador instalado no barramento do computador gerenciador do equipamento, na arquitetura atual implementada para o controle digital da força de penetração, aumenta consideravelmente a qualidade da ação de controle. Este fato se deve ao aumento da capacidade de comando do computador gerenciador de movimento no controlador de movimento, pois a comunicação entre eles é sensivelmente acelerada. Esta nova configuração, além de mais barata, é conveniente, pois não utiliza o cartão GPIB.

A célula de carga utilizada como transdutor das forças atuantes no penetrador no protótipo desenvolvido foi projetada para operar com cargas máximas de 500 N, podendo ser substituída por um modelo similar com carga máxima de 200 N, melhorando a resolução e a sensibilidade do equipamento. É importante salientar que esta troca é viável, pois foi implantado o sistema de proteção contra níveis excessivos das forças atuantes no penetrador.

As taxas de digitalização, utilizadas no equipamento, no monitoramento dos ensaios, é relativamente baixa ( $\sim 400\text{ Hz}$ ). A tecnologia envolvida na construção de sistema de aquisição de dados com estas baixas taxas de digitalização é relativamente simples. Integrar o projeto do contador-decodificador de *encoders* e o sistema de digitalização dos sinais da força é um detalhe construtivo conveniente ao equipamento desenvolvido, barateando sensivelmente o custo final do projeto.

O pórtico metálico do equipamento, onde são fixadas as mesas acionadoras dos ensaios, apresentou uma rigidez inadequada, comprometendo a precisão dos ensaios realizados no equipamento. No esclerômetro construído, sua estrutura metálica tem que ser reprojetada para aumentar sua rigidez, de modo que as deformações estruturais sejam muito menores que as deformações plásticas que ocorrem durante os ensaios.

Adaptando-se ao esclerômetro um microscópio óptico e utilizando-se um sistema de aquisição digital de imagens instalado, no computador gerenciador do equipamento, em amostras preparadas metalograficamente, pode-se automaticamente posicionar riscos ou impressões, na tela do computador, para serem executados sobre detalhes superficiais desejados na amostra em teste. Esta nova configuração possibilitará maior potencialidade e agilidade às técnicas experimentais e de análise realizadas pelo esclerômetro proposto.

Ainda no sistema de medição de rugosidade, perfil e topografia superficial do Macroesclerômetro, com o objetivo de melhorar suas características, a sonda topográfica de varredura é um detalhe construtivo, que pode ser convenientemente substituído, por sondas comerciais com maior resolução, sem grandes alterações no projeto.

Como continuação, o trabalho prosseguirá explorando basicamente duas atividades:

- o desenvolvimento de esclerômetros computadorizados;
- a análise estatística de sinais provindos do monitoramento de ensaios de desgaste abrasivo.

Na seqüência natural do projeto, em uma primeira instância, será continuado o projeto do Macroesclerômetro, no qual será trabalhado e aperfeiçoado as técnicas e metodologias propostas para o equipamento e o aprimoramento de suas técnicas experimentais. Sua aplicação tecnológica na investigação do processo abrasivo será trabalhada, explorando novas potencialidades do Macroesclerômetro.

Posteriormente, as estratégias aplicadas ao Macroesclerômetro serão extrapoladas e aplicadas no projeto e construção dos Microesclerômetros, atualmente também em desenvolvimento no LTM. Nesta etapa, principalmente as técnicas de controle e instrumentação dos ensaios serão exploradas. Ao final, pretende-se operacionalizar os três esclerômetros computadorizados em desenvolvimento, disponibilizando-os à aplicação no LTM.

O ensaios de adesão de revestimento e de indentação além de promissores, são temas que apresentam grandes potencialidades tecnológicas, assim serão motivo de especial atenção.

Nesta etapa, ainda será continuado a investigação, projeto e estratégias de controle digital aplicados ao controle da força de penetração. Pretende-se avaliar o problema de controle, agora, utilizando-se uma nova abordagem aparentemente mais adequada ao sistema: controladores robustos baseados na lógica *Fuzzy*, visto que este sistema não tem modelagem matemática disponível ou conhecida.

Os esclerômetros computadorizados, atualmente em desenvolvimento, são uma linha de pesquisa promissora, que durante vários anos ainda será motivo de orgulho e investimentos por parte da equipe do LTM.

Em uma segunda instância, paralelamente à primeira, a investigação sobre a natureza estatística dos sinais provindos de ensaios aplicados ao estudo do desgaste abrasivo será verificada. Neste contexto, as técnicas experimentais com abordagens locais e globais do fenômeno pretendem ser abordadas. Esta etapa ainda prevê o estudo da utilização do monitoramento da emissão acústica aplicado a ensaios relacionados à abrasão. Espera-se avaliar futuramente suas relações com o processo abrasivo. Este tema apresenta grandes potencialidades científicas e tecnológicas e se encontra mundialmente em aberto.

O acréscimo ao equipamento, do monitoramento da emissão acústica, tornará o equipamento uma ferramenta eficiente na análise de revestimentos. Esse detalhe, também contribuirá para uma melhor investigação da natureza dos mecanismos atuantes no desgaste abrasivo.

As possibilidades abertas no LTM com os esclerômetros computadorizados em desenvolvimento permitirão sua colocação em uma posição de destaque no cenário acadêmico-científico mundial. Com certeza, tais possibilidades serão exaustivamente trabalhadas por toda sua equipe.

# Referências Bibliográficas

- Abrahão, A., De Mello, J. D. B., Lépure, F. P., 1998, "Automatização de Ensaios Escle-rométricos", IV Seminário de Desgaste, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas
- Abrahão, A., Lépure, F. P., 1998, "Idealização, Projeto, Construção e Avaliação de Escle-rômetros Retilíneos", V Congresso de Eng. Mecânica Norte e Nordeste
- Baker, A., 1996, "The Windows NT: Device Driver Book: A guide for Programmers", 1 ed., Prentice Hall PTR
- Berveridge, J., Wiener, R., 1997, "Multithreading Applications in Win32: The complet guide to threads", A. W. Developers Press
- Custer, H., 1993, "Windows NT", São Paulo, MAKRON Books
- CSEM Instruments SA, Internet Web Site, 1999, <http://www.csem.ch/instrum/>
- De Mello, J. D. B., 1983, "Structre matallurgique et caracterization de l'abrasion des fontes blanches au chrome", Tese Doutor Engenheiro, ENSEEG-INPG, Grenoble, França
- Doebelin, E. O., 1990, "Measurement Systems: Application and Design", McGraw-Hill
- Franco, S. D., 1989, "Contribuição ao estudo do desgaste abrasivo de Materiais Polifásicos", Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG
- Franco, S. D., 1999, "Introdução à tribologia", Notas de aula, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG
- Kruglinski, D. J., Shepherd, G., Wingo, S., 1998, "Programing Microsoft Visual C++", 5 ed., Microsoft Press
- Kyowa, 1995, "Signal Conditioners CDV/CDA-700A series, Instruction Manual", Japão
- Marcato, M., 1998, "Encapsulating Windows Timers in MFC", Visual C++ developers journal,

Internet Web Site, <http://www.vcdj.com/online/articles/jan98/timer1.asp>

Mathis, M., "Track Position e Direction With CyberResearch", User Quadrature Encoder Input Boards

Microsoft, 1997, Microsoft Visual C++ 5.0 On-line Documentation

Nano Instruments, Inc., Internet Web Site, 1999, <http://www.mts.com/nano/>

Newport Corporation, 1995, "MM400 User's Manual", USA

Nogueira, R. E. F. Q., 1988, "Esclerometria Aplicada ao Estudo do Desgaste Abrasivo", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG

Nogueira, R. E. F. Q., Mello, J. D. B. d., 1989, "Esclerometria Aplicada a Estudos do Desgaste Abrasivo: Potencialidade da Técnica, Construção e Avaliação de Esclerômetros Retilíneos", 43º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais

Ogata, K., 1987, "Discrete-time control systems", Prentice-Hall, Inc

Ouadow, M., Mathia, T. G., 1991, "Fully computadorized-topometer for simulations and modelling of abrasive wear", Surface and Coatings

Randall, N., 1998, "Advanced Machanical Surface Testing Applications Bulletin", CSEM, Instruments nº7, April

Sousa, M. M., Lépure, F., P, N, 1990, "Desenvolvimento de um microscópio mecânico de varredura controlador por computador", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG

United Eletronic Industries, 1995, "User manual for WIN-30", USA

# ANEXO I

## Análise dinâmica do transdutor de força

A determinação experimental da *função de transferência dinâmica* do transdutor de força foi feita através da resposta do sistema, quando excitado por uma força impulsiva, aplicada na ponta do penetrador (Figura 6.1).

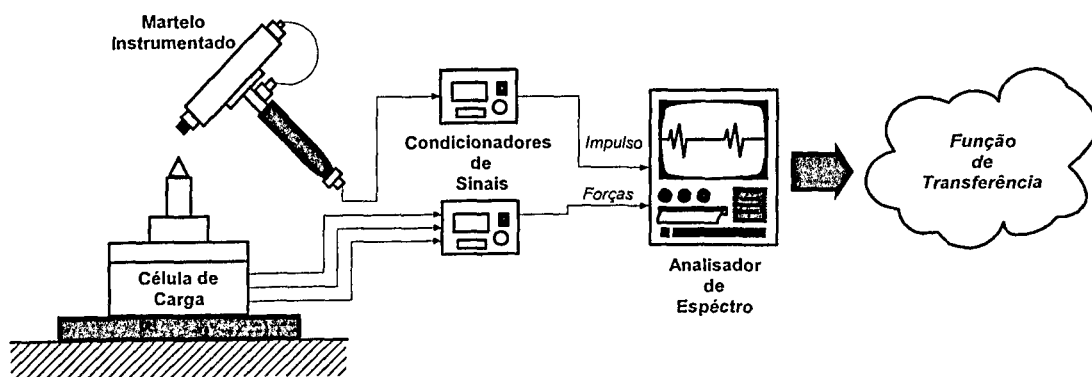


Figura 6.1- Esquema da análise dinâmica da célula de carga.

A célula de carga foi excitada por um martelo de impacto tipo 8202, da Brüel & Kjaer, com uma ponta instrumentada com uma célula de carga piezoelétrica, o sinal impulsivo gerado foi condicionado por amplificadores da carga Brüel & Kjaer tipo 2635. As funções de transferência foram obtidas através de um analisador de espectros modelo SD 380, da Scientific-Atlanta. Foi avaliada a função de transferência para as três direções principais da célula de carga  $x$ ,  $y$  e  $z$ ; e também para o efeito cruzado entre elas.

A seguir são apresentados os resultados das funções de transferência medidas. Estas funções apresentaram, para o transdutor de força utilizado no protótipo construído, um comportamento praticamente linear para as análises diretas, e baixa coerência para as análises cruzadas, ambas até a faixa de frequência de aproximadamente de 100 Hz.

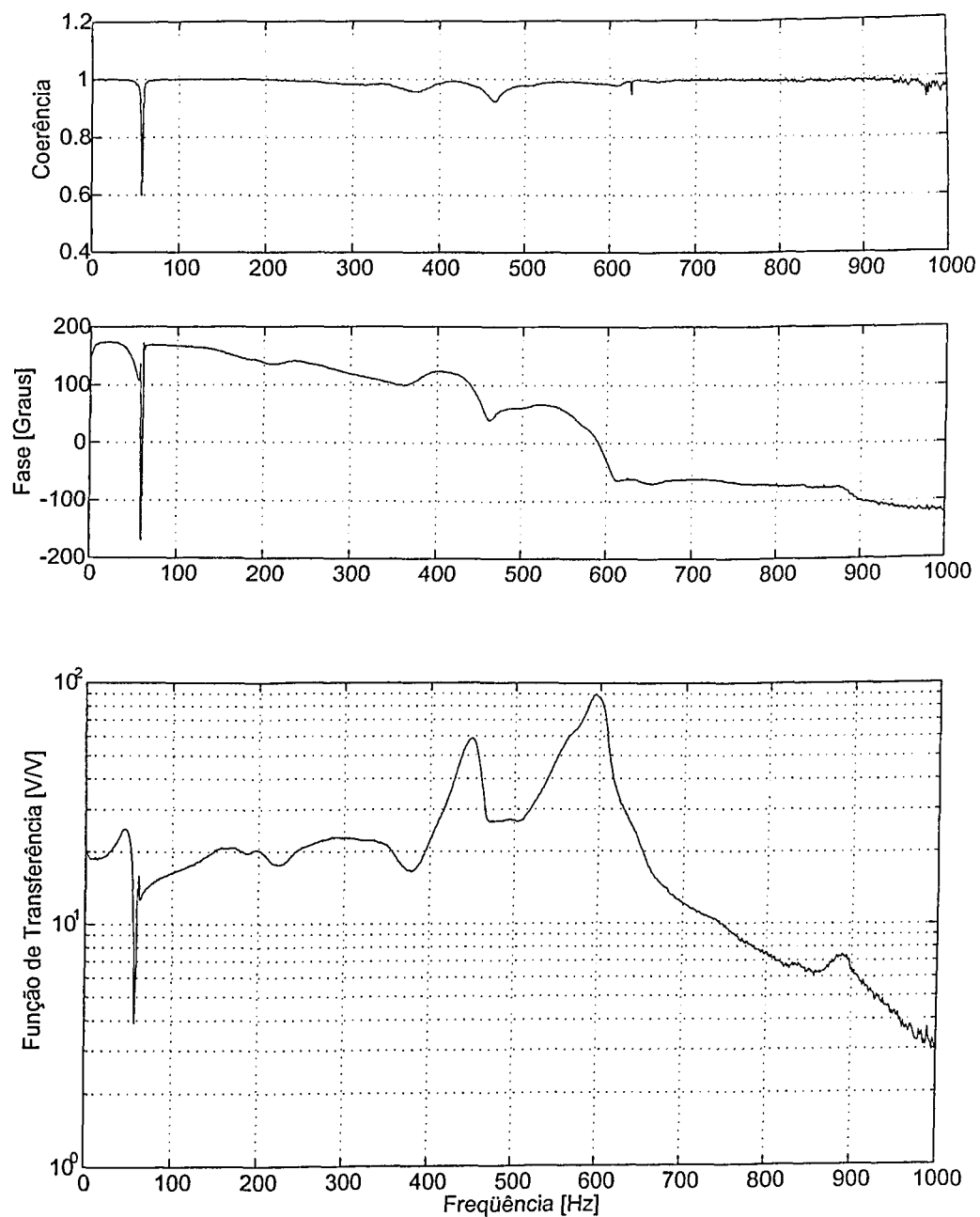


Figura 6.2- Função de transferência direta  $H_{zz}$ , excitada em  $z$  e medida em  $z$ .



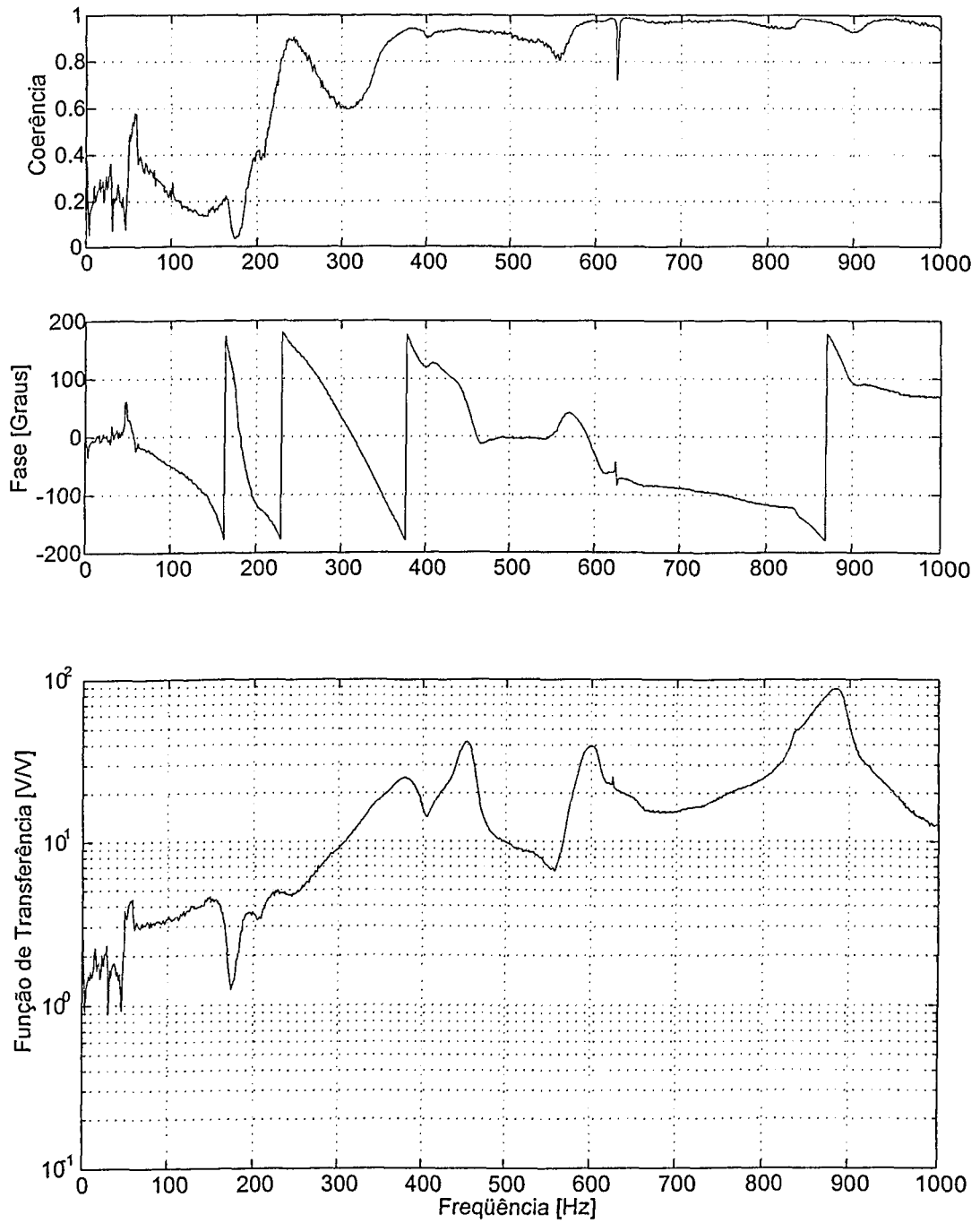


Figura 6.3- Função de transferência cruzada  $H_{zx}$ , excitada em  $z$  e medida em  $x$ .

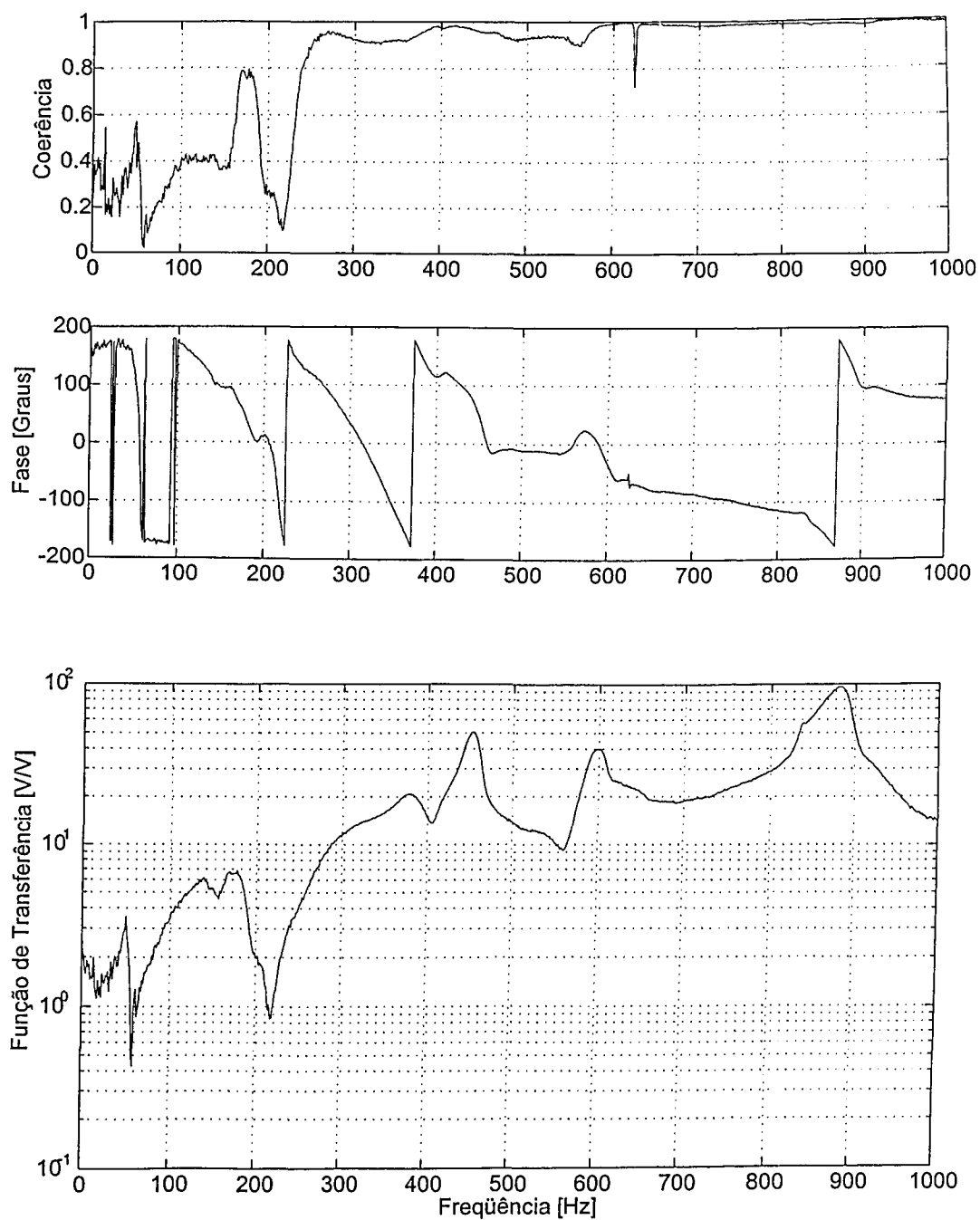


Figura 6.4- Função de transferência cruzada  $H_{zy}$ , excitada em  $z$  e medida em  $y$ .

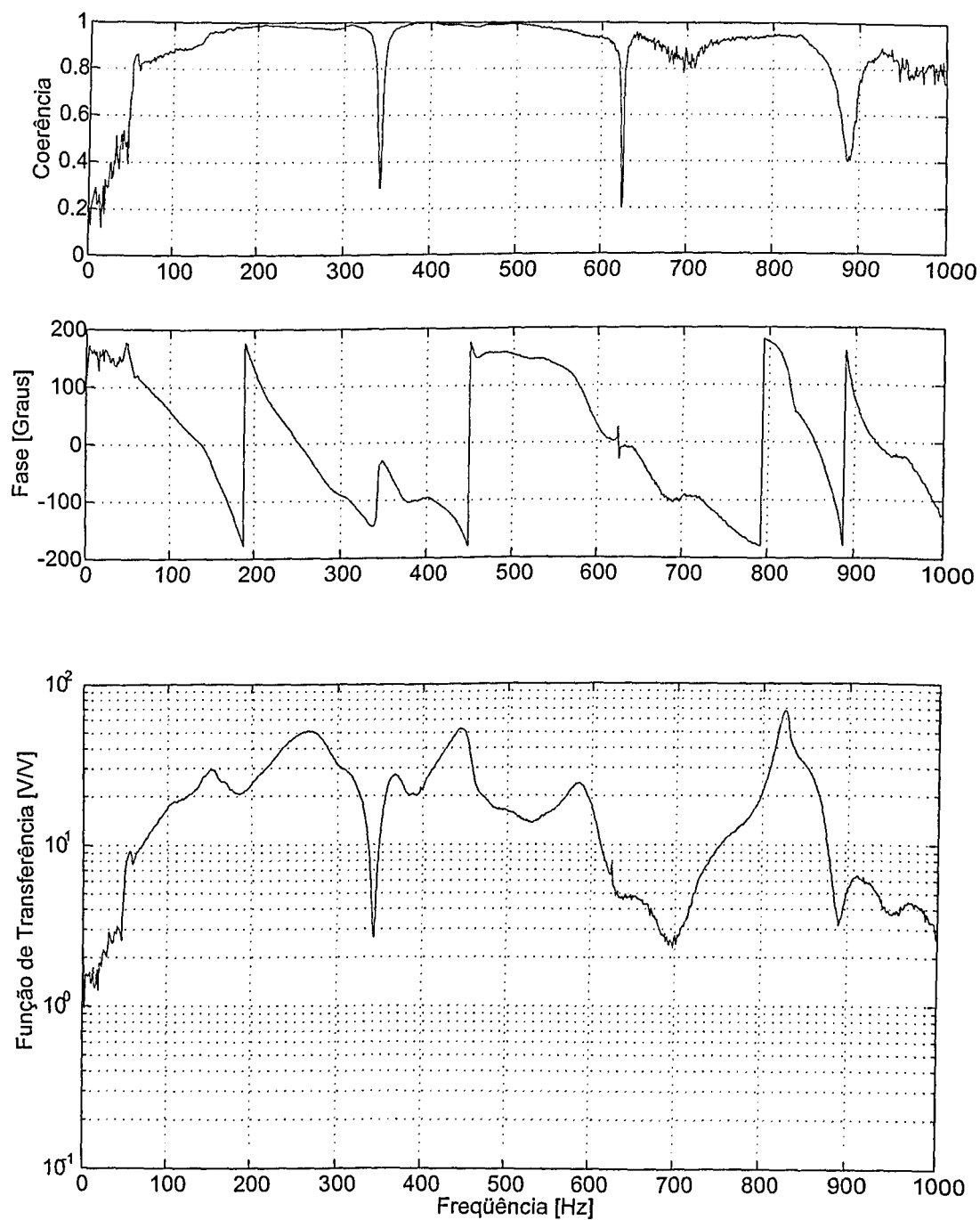


Figura 6.5- Função de transferência cruzada  $H_{xz}$ , excitada em  $x$  e medida em  $z$ .

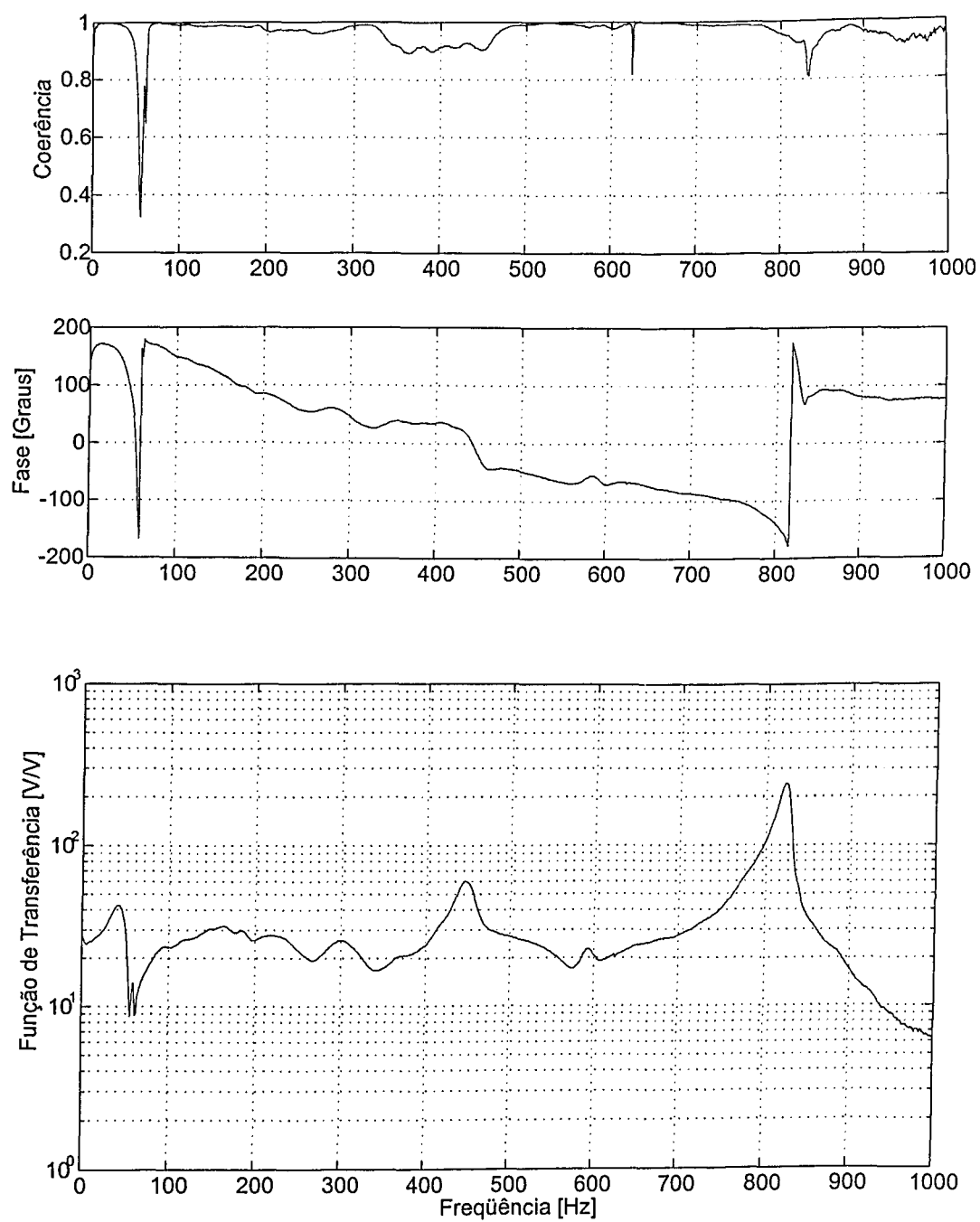


Figura 6.6- Função de transferência direta  $H_{xx}$ , excitada em  $x$  e medida em  $x$ .

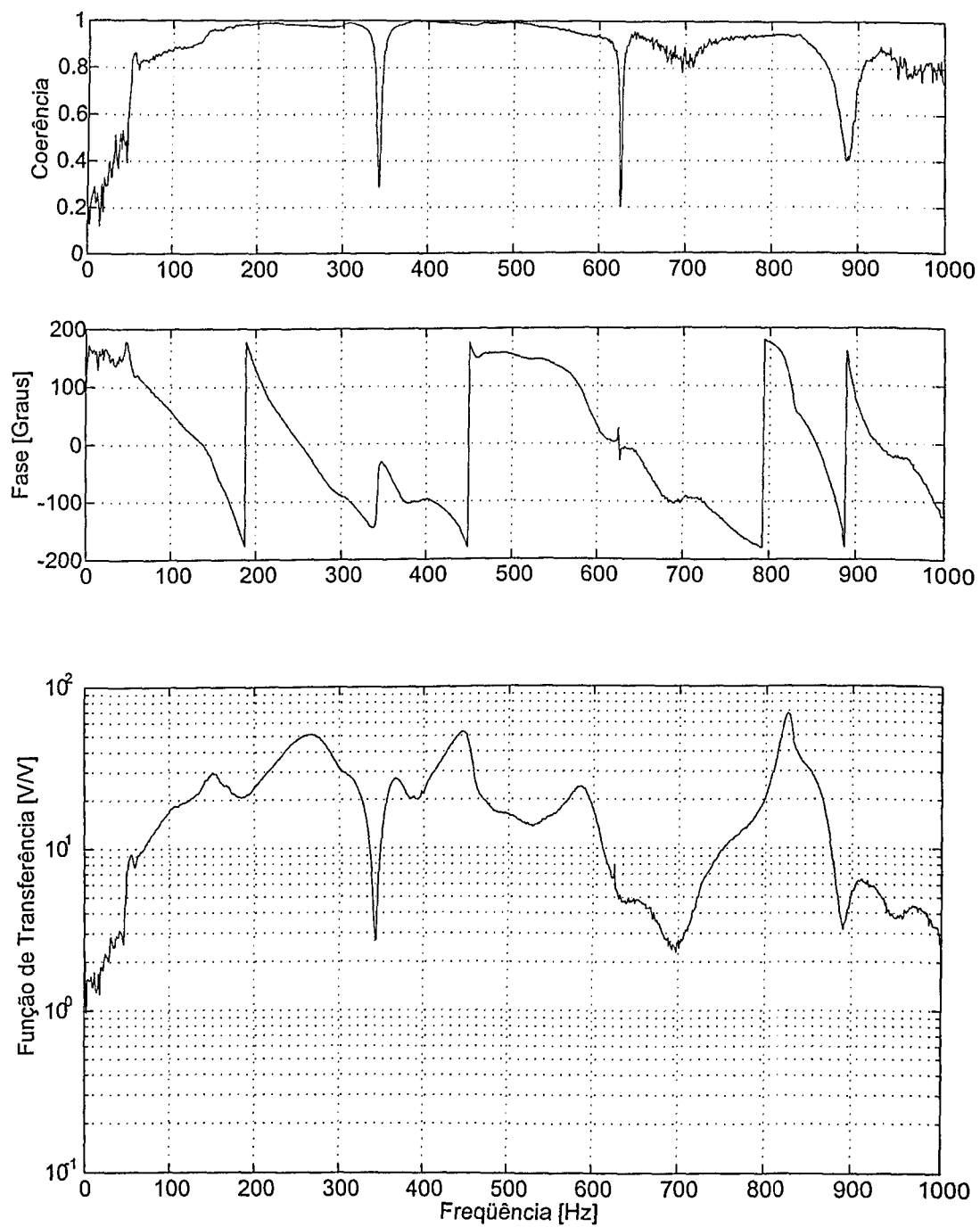


Figura 6.7- Função de transferência cruzada  $H_{xy}$ , excitada em  $x$  e medida em  $y$ .

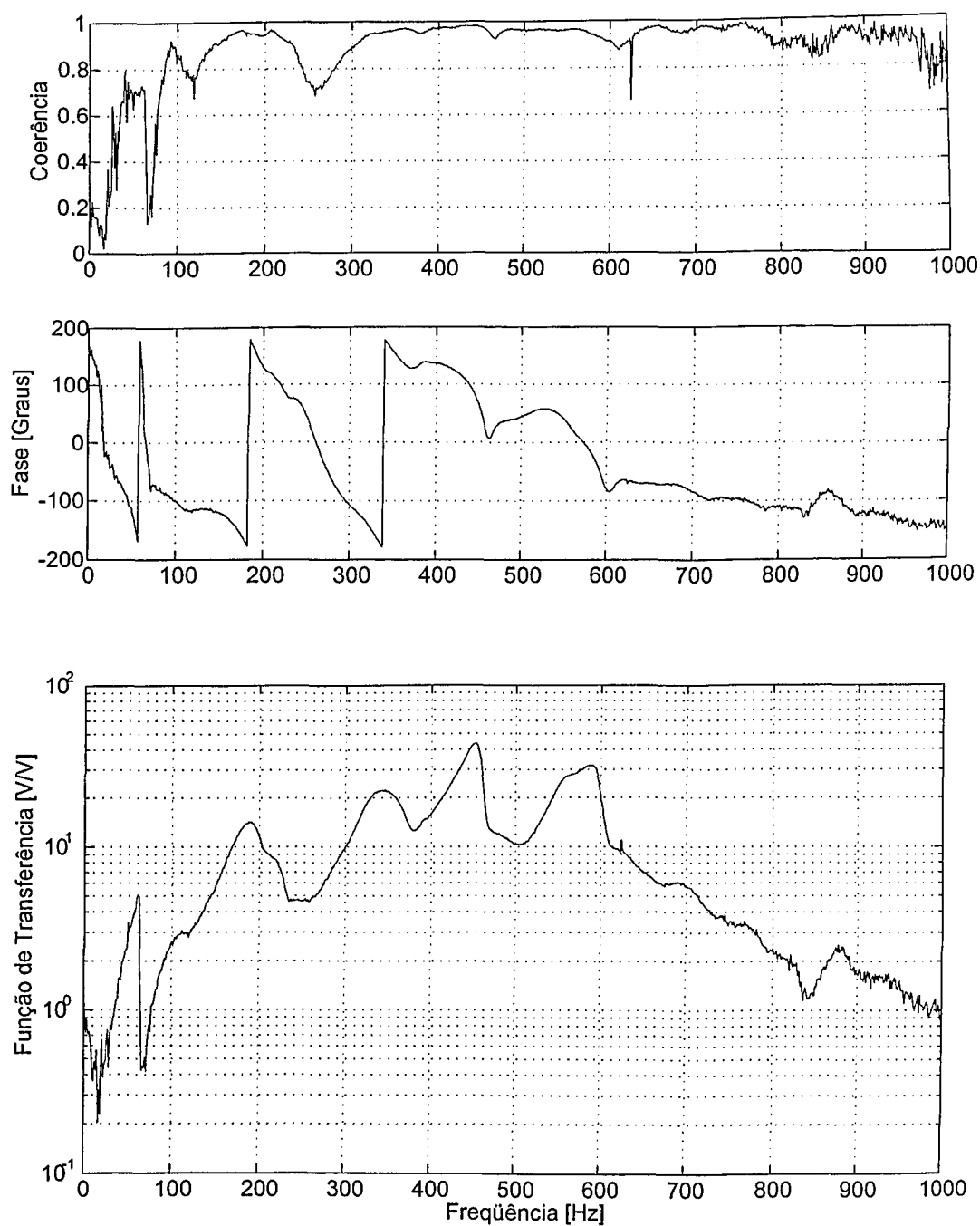


Figura 6.8- Função de transferência cruzada  $H_{yz}$ , excitada em  $y$  e medida em  $z$ .

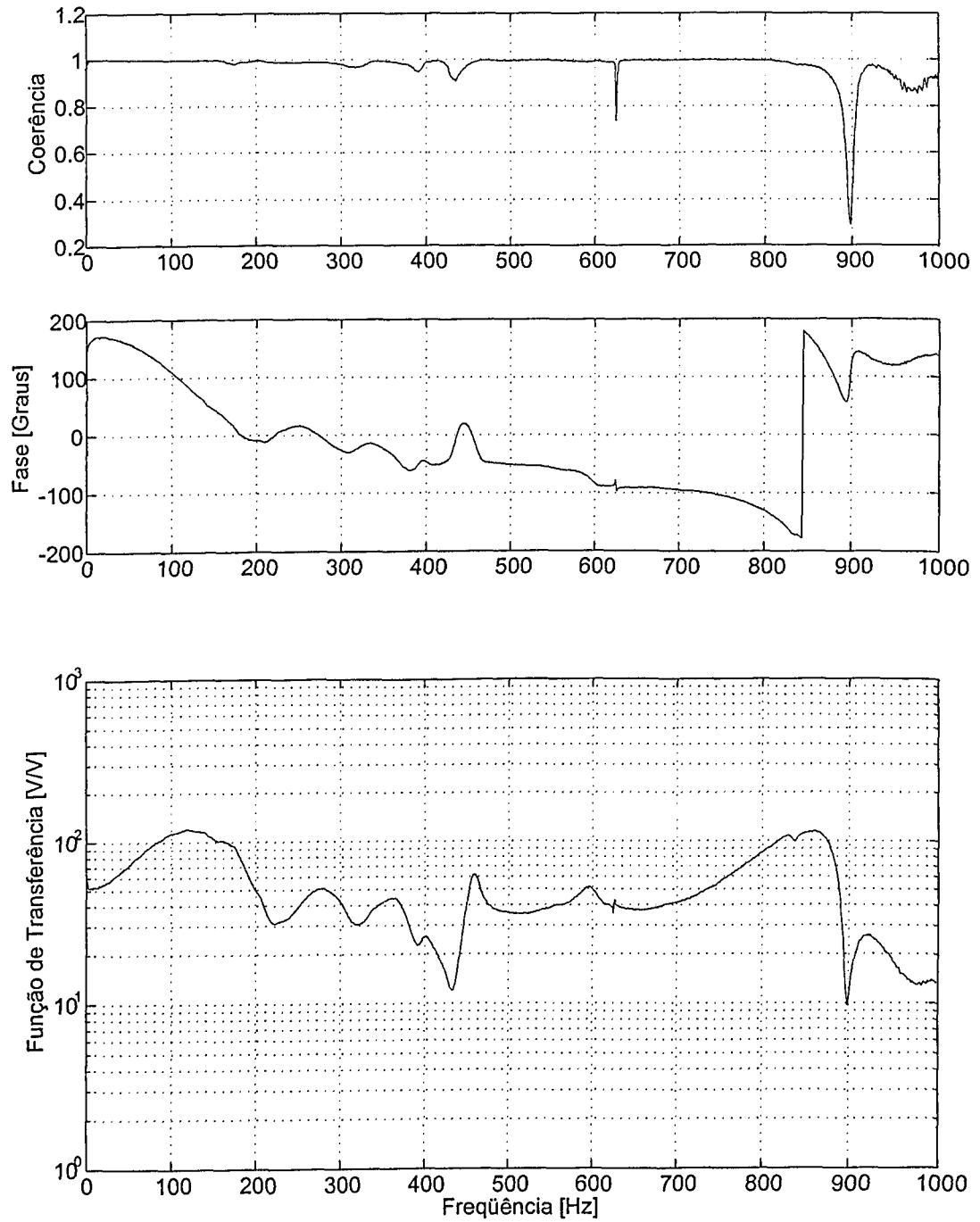


Figura 6.9- Função de transferência direta  $H_{yy}$ , excitada em  $y$  e medida em  $y$ .

## ANEXO II

### Circuitos Eletrônicos

A seguir são apresentados os desenhos esquemáticos dos circuitos eletrônicos projetados para o esclerômetro desenvolvido. A Figura 7.1 mostra o circuito de proteção contra níveis excessivos das forças atuantes no penetrador. A Figura 7.2 apresenta o circuito de monitoramento da posição do penetrador e da amostra em teste.

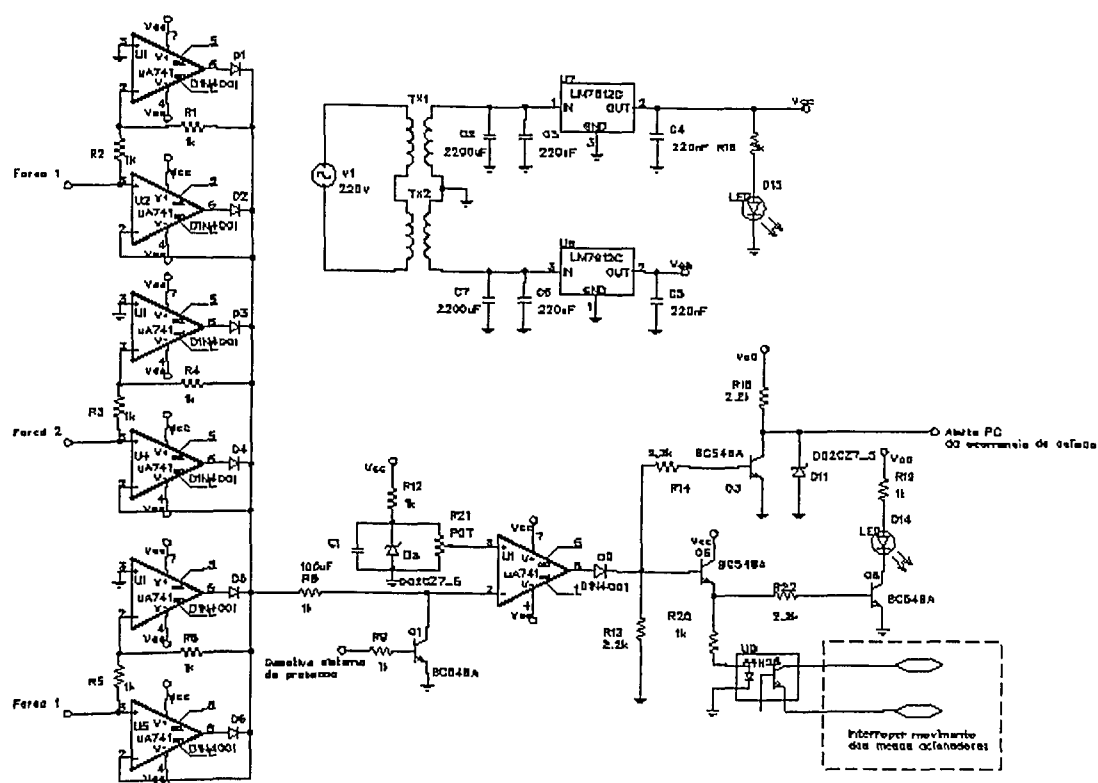


Figura 7.1- Circuito eletrônico de proteção contra níveis excessivos das forças atuantes no penetrador.





