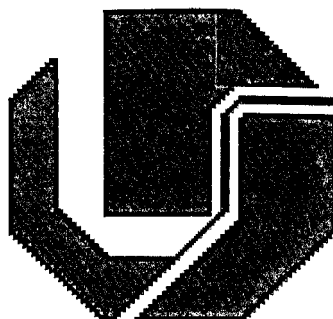


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISBI/UFU



1000228429



Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação e
Controle de um Macroindentador Portátil para
Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos

Flávia Cristina Cardoso

Maio

2004

FLÁVIA CRISTINA CARDOSO

14011
6813
CARDOSO
TES/mem

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE
INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM
MACROINDENTADOR PORTÁTIL PARA AVALIAÇÃO DE
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DUTOS**

Texto da dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a banca de examinadores abaixo, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 28 de Maio de 2004.

Área de concentração: Automação e Robótica

Orientador: Professor Alcimar Barbosa Soares, PhD.

UBERLÂNDIA-MG

2004

Flávia Cristina Cardoso[‡]

Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação e Controle de um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos.

Texto da dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Robótica.

Banca Examinadora:

Uberlândia, 28 de Maio de 2004.

Prof. Dr. Alcimar Barbosa Soares - FEELT - UFU.

Eng. Dr. Luiz Claudio Mineconi - CENPES - Petrobras.

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco - FEMEC - UFU.

Prof. Dr. Adriano Alves Pereira - FEELT - UFU.

[‡]A bolsa de estudo para esta pesquisa foi concedida pela CAPES, Brasil.

*Aos meus pais Cláudio e Aparecida,
aos meus irmãos Fernanda, Felipe e Luiz Cláudio,
e ao Leandro, pelo apoio e incentivo.*

Agradecimentos

À minha família que me incentivou.

Ao Prof. Alcimar Barbosa Soares por ter me orientado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Sinésio Domingues Franco pela coordenação da equipe de trabalho da Faculdade de Engenharia Mecânica e pelo apoio que sempre me foi dado.

À Profa. Vera Lúcia Franco e ao mestre Francisco Francelino Ramos Neto que me auxiliaram durante toda a execução deste trabalho.

Ao Marcelo Torres Piza Paes pela coordenação deste projeto.

Ao Luiz Ricardo que participou das etapas iniciais de desenvolvimento deste trabalho.

À Petrobras/CENPES que financiou este projeto de pesquisa.

À FAU/UFU pela administração financeira do projeto.

Aos amigos do BioLab: Adeilson, Prof. Adriano, Ailton, Angela, Ana Paula, Cristiano, Eduardo Manço, Eduardo Naves, Eduardo Silva, Fábio, Gláucia, Guilherme, Joaquim, José Geraldo, Kety, Laura, Lílian, Marcelle, Rogério, Sérgio, Suzi, Virgílio e Wilton, que contribuíram de maneira direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

Resumo

Cardoso, Flávia Cristina. Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação e Controle de um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos, Uberlândia, FEELT-UFU, 2004, 99p.

Macroindentação instrumentada é uma metodologia aplicada na determinação de propriedades mecânicas de materiais. A obtenção das propriedades mecânicas de dutos permite, por exemplo, que as condições de operação na presença de descontinuidades sejam definidas com mais segurança. Além disso, por se tratar de um teste não destrutivo e possibilitar avaliações *in-situ*, este tipo de ensaio surge como uma das melhores opções para avaliação de propriedades mecânicas de dutos em operação. Neste sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento capaz de realizar ensaios de macroindentação *in situ*.

O equipamento de macroindentação é dividido em três unidades principais: estruturas mecânicas, *hardware* e *software*. As estruturas mecânicas envolvem os elementos de apoio para fixação dos diversos dispositivos componentes do equipamento. O *hardware* é composto de diversas unidades que possuem a função de controlar todo o processo de indentação e de monitorar as grandezas de carga e deslocamento durante o ensaio. O *software* realiza todo o gerenciamento do processo de indentação, aquisição das grandezas de interesse do ensaio e processamento dos dados para obtenção das seguintes propriedades mecânicas: dureza, limite de escoamento, limite de resistência, expoente de encruamento, coeficiente de resistência e a curva tensão *versus* deformação. Esta dissertação engloba

os trabalhos referentes ao projeto e desenvolvimento das unidades de *hardware* e *software* necessárias para controle da instrumentação, coleta e processamento de dados.

Para avaliação do protótipo construído, foram realizados ensaios de macroindentação em laboratório para analisar os resultados obtidos pelo equipamento em ensaios com dois tipos de aço (X42 e X60). Os materiais utilizados foram também caracterizados através de ensaios convencionais de tração e dureza. As propriedades mecânicas obtidas através da macroindentação mostraram excelentes correlações com aquelas obtidas a partir dos ensaios convencionais, com erros inferiores à 10%.

Palavras-chave

Indentação instrumentada, Penetrador esférico, Propriedades mecânicas, Dutos.

Abstract

Cardoso, Flávia Cristina. The Development of the control and automation systems for a portable macroindenter used to evaluate mechanical properties of pipes, Uberlândia, FEELT-UFU, 2004, 99p.

Automated ball indentation is a non-destructive technique to obtain some important mechanical properties of metallic structures. Those properties can be used, for instance, to establish the correct operating setpoint under specific conditions. This work describes the development of a dedicated apparatus capable of performing in-situ macroindentation tests.

The system is divided into three major blocks: mechanical structure, hardware and software. A number of hardware units are used to control and monitor the indentation process. The software acts as a general manager and should define the correct operating condition for the hardware units. Besides, the software is responsible for data acquisition and processing to obtain the following mechanical properties: hardness, yield strength, ultimate tensile strength, work hardening exponent, stress coefficient and flow curve. This work depicts the development of the hardware and software units necessary for controlling the various devices, data acquisition and processing.

In order to evaluate the prototype, a number of macroindentation experiments were developed in laboratory. The experiments were based on tests with two types of steel: X42 and X60. Those materials were also evaluated by conventional tensile and hardness tests. The mechanical properties obtained by macroindentation showed excellent correlation

with those obtained by conventional tests (error below 10%).

Keywords

Instrumented ball indentation, Mechanical properties, Pipes.

Lista de Figuras

2.1	Ilustração do ensaio de tração em um corpo de prova (JUNIOR, 2003).	9
2.2	Gráfico carga <i>versus</i> alongamento de um corpo de prova metálico submetido a um ensaio de tração. Pode-se construir um gráfico através de medições da carga e do alongamento durante o ensaio (JUNIOR, 2003).	10
2.3	Gráfico tensão <i>versus</i> deformação de um corpo de prova metálico submetido a um ensaio de tração. Pode-se construir um gráfico a partir dos valores de carga e alongamento aplicados às equações de tensão e deformação (JUNIOR, 2003).	11
2.4	Tipos de penetradores utilizados em ensaios de dureza.	13
2.5	Diagrama esquemático da ferramenta de indentação (indentador ou penetrador esférico).	14
2.6	Perfil típico de indentação quando se utiliza um penetrador esférico.	15
2.7	Representação gráfica da relação carga <i>versus</i> deslocamento na indentação de múltiplos ciclos.	17
2.8	Representação esquemática das deformações elástica e plástica na indentação, (a) afundamento do material e (b) acúmulo de material (KANIA; RUSSEL; GAO, 2003).	24
2.9	SSM-B1000 TM - Equipamento com configuração para ensaios em laboratório, utilizando uma câmara de aquecimento, uma mesa posicionadora X-Y, câmara de vídeo e monitor (ATC, 2003).	26
2.10	AIS 2000 - Equipamento para macroindentação da empresa Frontics (Frontics, 2003).	28
3.1	Diagrama geral do sistema de macroindentação.	31

3.2	Desenho esquemático da bancada para acomodação de tubos de ensaio em laboratório: (1) tubo-amostra, (2) cinta em aço inoxidável 304, (3) mesa em cantoneira L50x50x4 soldada, (4) parafuso sextavado com porca e arruelas em aço inoxidável e (5) suporte em V.	32
3.3	Sistemas de fixação com a utilização de (a) bases magnéticas e (b) base com correntes metálicas.	33
3.4	Equipamento desenvolvido em uma vista geral e vista tridimensional do compartimento contendo os sensores de carga e deslocamento.	34
3.5	Diagrama de <i>hardware</i> do sistema de controle.	35
3.6	Diagrama de <i>software</i> de controle do sistema.	39
4.1	Motor de passo utilizado para deslocamento do penetrador.	43
4.2	Controlador programável para o motor de passo.	44
4.3	Diagrama esquemático do controlador do motor.	44
4.4	Redutor acoplado ao motor de passo.	45
4.5	Unidade contendo o fuso de esferas recirculantes.	46
4.6	Diagrama esquemático de uma célula de carga e a localização dos extensômetros.	47
4.7	Extensômetro metálico.	48
4.8	Diagrama esquemático de uma ponte de Wheatstone.	48
4.9	Célula de carga utilizada para medição de carga aplicada na indentação.	49
4.10	Transformador diferencial variável linear (LVDT) posicionado ao lado de uma caneta esferográfica comum.	50
4.11	Diagrama esquemático do arranjo físico de um LVDT.	51
4.12	Condicionador de sinais para os sensores de deslocamento e carga.	53
4.13	Diagrama esquemático do condicionador de sinais.	53
4.14	Unidade para pré-condicionamento do sinal do sensor de deslocamento (LVDT).	54
4.15	Macroindentador Portátil (MIP 2004).	55
4.16	Diagrama da unidade de <i>software</i> responsável pelo ensaio.	57
4.17	Diagrama da unidade de <i>software</i> responsável pelos procedimentos de análise.	58
4.18	Diagrama Labview® que realiza a inicialização da comunicação serial.	59

4.19	Diagrama Labview® que realiza a inicialização da comunicação paralela.	60
4.20	Diagrama Labview® que realiza a definição dos parâmetros de configuração do motor.	61
4.21	Diagrama Labview® que realiza a definição das configurações do condicionador/conversor de sinais.	62
4.22	Diagrama Labview® que realiza a definição das configurações dos canais do condicionador/conversor de sinais.	64
4.23	Diagrama Labview® que realiza a calibração dos sensores.	65
4.24	Diagramas Labview® que realizam os comandos de <i>setup</i> e <i>start</i> da aquisição dos sinais dos sensores.	66
4.25	Diagramas Labview® que realizam os comandos de <i>read</i> e <i>stop</i> da aquisição dos sinais dos sensores.	67
4.26	Diagrama Labview® que realiza a conversão dos sinais de tensão, lidos dos sensores, em valores de deslocamento (<i>mm</i>) e carga (<i>N</i>).	68
4.27	Disposição do sensor de deslocamento (LVDT) e do penetrador.	69
4.28	Curva característica de um ensaio de macroindentação, destacando os pontos mais importantes para início dos cálculos das propriedades mecânicas.	70
4.29	Interface final do procedimento do ensaio.	72
4.30	Interface de seleção de arquivo e exemplo de arquivo de dados do ensaio.	73
4.31	Interface do procedimento de análise - entrada de dados.	74
4.32	Interface do procedimento de análise - obtenção das propriedades.	76
5.1	Ensaio de macroindentação no aço X42 - entrada de dados para ensaio.	78
5.2	Ensaio de macroindentação no aço X42 - situação final do ensaio.	79
5.3	Ensaio de macroindentação no aço X42 - dados pré-processados para análise.	80
5.4	Ensaio de macroindentação no aço X42 - resultados do ensaio (análise completa).	80
5.5	Amostra de X42 após o ensaio IEL.	81
5.6	Ensaio de macroindentação no aço X60 - entrada de dados para ensaio.	83
5.7	Ensaio de macroindentação no aço X60 - situação final do ensaio.	84
5.8	Ensaio de macroindentação no aço X60 - dados pré-processados para análise.	84

5.9	Ensaio de macroindentação no aço X60 - resultados do ensaio (análise completa).	85
5.10	Amostra de X60 após o ensaio IEL.	86
5.11	Corpos de prova de aço X42 (a) e aço X60 (b), confeccionados segundo procedimentos estabelecidos pela norma API 5L.	87
5.12	Curvas de tensão <i>versus</i> deformação para o aço X42 (a) e para o aço X60 (b), obtidos através de ensaios de tração convencionais (deslocamento medido no comprimento útil de teste).	89
5.13	Gráfico comparativo das propriedades mecânicas (limite de escoamento e limite de resistência de engenharia) dos aços X42 e X60 obtidas através de ensaios convencionais de tração.	90
5.14	Ensaio de indentação com 8 ciclos de carregamento, realizado por Haggag (1993).	91
5.15	Ensaio de indentação com 8 ciclos de carregamento, realizado utilizando o MIP-2004.	92

Lista de Tabelas

2.1	Valores para a sensibilidade à taxa de deformação (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989).	20
2.2	Valores típicos da constante (β_m) do tipo de material (HAGGAG et al., 1990).	22
2.3	Comparação entre os modelos de Haggag <i>et al.</i> e Kwon <i>et al.</i> (KANIA; RUSSEL; GAO, 2003).	25
5.1	Resultados dos ensaios de macroindentação com o aço X42.	82
5.2	Resultados dos ensaios de macroindentação com o material X60.	86
5.3	Resultados de dureza Brinell (HB30) medidos em durômetro universal e dos limites de escoamento e de resistência (de engenharia e verdadeiro) medidos através de ensaios de tração.	88
5.4	Valores de propriedades mecânicas do aços X42 e X60, segundo a norma API 5L, para requisitos estabelecidos para o nível PSL2.	88
5.5	Comparação entre os valores médios obtidos através de macroindentação instrumentada e ensaios convencionais realizados em laboratório.	90

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC - Alternating Current

A/D - Analog to Digital

ASM - American Society for Materials

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATC - Advanced Technology Corporation

BioLab - Laboratório de Bioengenharia e Automática

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello

DC - Direct Current

FAU - Fundação de Apoio Universitário

FEELT - Faculdade de Engenharia Elétrica

FEMEC - Faculdade de Engenharia Mecânica

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

IEI - Indentação Esférico-Instrumentada

LVDT - Linear Variable Displacement Transducer

MIP - Macroindentador Portátil

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

Lista de Símbolos

F - força

l_0 - comprimento inicial do corpo de prova

A_0 - área inicial da seção transversal de um corpo de prova

l - comprimento final do corpo de prova

σ - tensão

ϵ - deformação

Δl - variação do comprimento do corpo de prova

E - módulo de elasticidade do material

σ_e - limite de escoamento

σ_r - limite de resistência

$\sigma_{rup.}$ - limite de ruptura

WC-Co - carboneto de tungstênio-cobalto

h_p - profundidade plástica

h_e - profundidade elástica

h_t - profundidade total

d_p - diâmetro plástico

σ_v - tensão verdadeira

ϵ_v - deformação verdadeira

K - coeficiente de resistência

n - expoente de encruamento

D - diâmetro da esfera

δ - parâmetro que depende da flexibilidade do material e da tensão de indentação

E_a - módulo de elasticidade do material da amostra

E_i - módulo de elasticidade do material da esfera

ϕ - constante

$\delta_{máx}$ - valor máximo para δ

τ - constante

α_m - fator de restrição, que depende da sensibilidade à taxa de deformação do material de teste

e - número de Euler = 2,71828182

d_t - diâmetro total

m - coeficiente de Meyer

A - parâmetro de teste do material

β_m - coeficiente de deformação

HB - dureza Brinell

$F_{máx}$ - força máxima

d_f - diâmetro final

K_{jlc} - índice de tenacidade à fratura

c - constante de ajuste

d - diâmetro médio do grão

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Projeto de um macroindentador portátil	3
1.3	Objetivos	4
1.4	Estrutura da dissertação	5
2	Estado da arte	7
2.1	Introdução	7
2.2	Ensaio de tração	9
2.3	Macroindentação	14
2.3.1	Técnica utilizada por Haggag <i>et al.</i> (1989 - 2001)	17
2.3.2	Técnica utilizada por Kwon <i>et al.</i> (2000 - 2003)	23
2.3.3	Equipamentos comerciais para a macroindentação <i>in situ</i>	24
2.4	Conclusão	29
3	Proposta de um sistema de controle para macroindentação instrumen-	
	tada	30
3.1	Introdução	30
3.2	Descrição geral	30
3.2.1	Estruturas mecânicas	31
3.2.2	Instrumentação e <i>hardware</i>	33
3.2.3	<i>Software</i>	38

3.3	Conclusão	40
4	MIP2004 - Descrição e funcionamento de suas unidades	41
4.1	Introdução	41
4.2	Unidades de <i>hardware</i>	41
4.2.1	Controle do processo de indentação	42
4.2.2	Monitoração das grandezas de interesse	46
4.3	Unidades de <i>software</i>	56
4.3.1	Sub-unidade ensaio	56
4.3.2	Sub-unidade análise	72
4.4	Conclusão	76
5	Ensaio IEI: resultados e avaliações	77
5.1	Introdução	77
5.1.1	Ensaio IEI em aço X42	77
5.1.2	Ensaio IEI em aço X60	82
5.2	Ensaio convencionais	87
5.3	Avaliação comparativa	89
5.4	Discussão	92
5.5	Conclusão	93
6	Conclusões e trabalhos futuros	94
6.1	Conclusões gerais	94
6.2	Trabalhos futuros	95
	Referências bibliográficas	97

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O sistema de dutos é o meio mais seguro e econômico de se transportar petróleo e seus derivados, interligando regiões produtoras, plataformas, refinarias, terminais marítimos, parques de estocagem e centros consumidores. Quase todos os dutos são construídos por tubos metálicos de aço-carbono. Estes sistemas podem ser instalados no mar ou em terra, e operam continuamente (Petrobras, 2003).

O sistema de transporte por dutos contribui ainda para aumentar a segurança em rodovias e diminuir a poluição causada pelo tráfego pesado das carretas: o oleoduto para Belo Horizonte, por exemplo, possibilitou retirar das estradas aproximadamente 1000 carretas por dia (Petrobras, 2003). Portanto, investir na ampliação, modernização e confiabilidade operacional da malha dutoviária é fundamental para atender às necessidades e exigências cada vez maiores da população.

A estrutura de abastecimento de petróleo e derivados interliga, através de várias modalidades de transporte, três pontos distintos: fontes de produção, refinarias e centros de consumo, sendo que apenas a posição das refinarias pode ser variada, levando-se em consideração principalmente, os custos do transporte do petróleo até as refinarias e dos derivados aos centros consumidores.

Os oleodutos tornaram-se, dentre os meios de transporte utilizados, o preferencial

tanto para atender ao abastecimento das refinarias como para suprir a necessidade dos grandes centros de consumo de derivados (Petrobras, 2003).

A primeira linha brasileira que se tem registro foi construída na Bahia, com diâmetro de 2 polegadas e 1km de extensão, com início de operação em maio de 1942 (Petrobras, 2003). Esta linha recebia o petróleo dos "Saveiros-Tanques" vindos dos campos de Itaparica e Joanes, ligando o Porto de Santa Luzia a Refinaria Experimental de Aratu.

Estima-se que a malha nacional passe de 12.000 km (dado de 1997) para 21.000 km até o fim de 2004, considerando os dutos que estão em fase de construção e outros projetos que já estão sendo implantados (Petrobras, 2003).

Adequar a tecnologia na área de dutos aos objetivos estratégicos da Petrobras e elevá-la aos níveis requeridos pelos novos desafios é agora fundamental para esta atividade. Deste modo, o Programa Tecnológico de Dutos da Petrobras tem hoje os seguintes desafios:

- Aumentar a confiabilidade operacional dos dutos,
- Aumentar a vida útil da malha de dutos existentes,
- Aumentar a capacidade operacional dos dutos,
- Minimizar o risco de vazamentos,
- Minimizar os custos operacionais e investimentos,
- Reduzir o tempo de reparo,
- Reduzir o impacto de vazamentos no meio ambiente.

Observa-se que a maior parte destes itens está intimamente relacionada à garantia da integridade mecânica dos dutos. A determinação da integridade de qualquer estrutura metálica é importante tanto para garantir que descontinuidades não se propagarão durante a sua utilização quanto para avaliar o tempo de vida da estrutura e suas condições de operação. Avaliar a integridade destas estruturas implica no conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais e do tamanho e da extensão dos efeitos induzidos tais como os provocados durante a execução de soldas (HAGGAG et al., 1990).

Várias metodologias, como por exemplo ensaios de tração, podem ser empregadas para determinação de propriedades mecânicas de materiais. Contudo, alguns processos, como o citado, são destrutivos e portanto não apropriados para as aplicações citadas anteriormente.

Assim, o objetivo a ser alcançado é obter as propriedades mecânicas de materiais de dutos que se encontram em operação, de maneira não-destrutiva, a partir de ensaios realizados na própria estrutura (*in situ*), sem interrupção do fluxo de produto nas linhas de transmissão.

1.2 Projeto de um macroindentador portátil

Em meados de 2001 grupos de pesquisa das faculdades de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, celebraram um acordo com a Petrobras/CENPES (co-financiado pela FINEP) para construção do primeiro equipamento nacional portátil para realizar macroindentações instrumentadas para determinação de propriedades mecânicas de dutos em operação na área de petróleo e gás. Para tanto, o projeto foi dividido nas seguintes etapas:

1. Estudo do estado da arte e avaliação de tecnologias disponíveis.
2. Desenvolvimento, projeto e construção de um macroindentador instrumentado portátil: aquisição de componentes nacionais e importados, desenvolvimento de desenhos técnicos do equipamento, projeto, construção e montagem dos componentes mecânicos.
3. Desenvolvimento de *hardware* para controle e aquisição de sinais: projeto dos circuitos eletrônicos de controle, condicionadores de sinais e aquisição de dados, confecção e montagem de placas de circuito impresso, integração das unidades de *hardware*, avaliação e testes dos circuitos eletrônicos.
4. Desenvolvimento de *software* dedicado para aquisição e processamento de dados: definição das funcionalidades requeridas, projeto e desenvolvimento das interfaces

com o usuário, desenvolvimento das unidades de controle do *hardware*, desenvolvimento das unidades que realizarão os testes de indentação, desenvolvimento das unidades para processamento de dados.

5. Realização de ensaios mecânicos de tração uniaxial: realização de ensaios de tração em amostras de aço-carbono e aço ligados empregados na construção de dutos.
6. Realização de ensaios metalográficos: caracterização metalográfica dos materiais a serem testados em laboratório.
7. Realização de ensaios de indentação em laboratório: realização de ensaios de indentação para obtenção do limite de escoamento, limite de resistência a tração etc e comparação dos resultados obtidos nos testes de tração e indentação.
8. Realização de ensaios em campo.
9. Aprimoramentos do protótipo após sua avaliação *in situ*: ajustes finais no *hardware* e no *software* do equipamento.

Por se tratar de um projeto altamente complexo e multidisciplinar a equipe de desenvolvimento decidiu subdividi-lo entre suas áreas de conhecimento (Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica e de Computação). Este texto refere-se principalmente aos trabalhos realizados pela autora, em conjunto com a equipe de Engenharia Elétrica e de Computação (estudo do estado da arte, desenvolvimento do *hardware* e do *software* e realização dos ensaios de laboratório). As demais etapas foram desenvolvidas pela equipe da Faculdade de Engenharia Mecânica (UFU).

1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho, que representa uma parte do projeto de um macroindentador portátil, são:

- Propor um modelo de controle para determinação não-destrutiva de propriedades mecânicas de materiais.

- Propor, implementar e avaliar um sistema de *hardware* e *software* para controle de um macroindentador portátil.

Para possibilitar o desenvolvimento da instrumentação e controle associados ao equipamento, bem como para a realização dos cálculos das propriedades mecânicas, foram propostas as principais metas para este trabalho:

- Investigar o estado da arte das possíveis metodologias a serem utilizadas para determinação de propriedades mecânicas de materiais de maneira não-destrutiva.
- Definir um modelo de controle para determinação não-destrutiva de propriedades mecânicas de materiais com base no estado da arte.
- Especificar e projetar um sistema de *hardware* e *software* para controle de um macroindentador portátil.
- Implementar um modelo matemático para obtenção das propriedades mecânicas.
- Desenvolver um protótipo e avaliar suas condições de operação.
- Realizar ensaios para validação do método de controle e da solução matemática implementada.

1.4 Estrutura da dissertação

As etapas para se atingir os objetivos acima estão descritas em cada um dos capítulos deste trabalho. Estruturalmente esta dissertação está dividida da seguinte forma:

- Capítulo 1: Apresentação da motivação, dos objetivos e da estrutura do trabalho.
- Capítulo 2: Estudo do estado da arte da técnica a ser aplicada para obtenção das propriedades mecânicas de materiais.
- Capítulo 3: Proposta de um modelo do sistema de controle (*hardware/software*) e suas especificações para a realização de ensaios para determinação das propriedades mecânicas de materiais.

- Capítulo 4: Desenvolvimento do sistema proposto, detalhando o funcionamento do *hardware* e todas as etapas do *software*.
- Capítulo 5: Avaliação do protótipo, onde são descritos os resultados obtidos com a utilização do equipamento, que são também confrontados com resultados obtidos de ensaios de tração.
- Capítulo 6: São expostas as conclusões finais desse trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever os principais mecanismos para determinação de propriedades mecânicas de materiais de forma destrutiva e não-destrutiva. Maior ênfase é dada a ensaios de tração e de macroindentação, por se tratarem das técnicas básicas associadas a este trabalho.

Propriedades mecânicas dos materiais

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais é, convencionalmente, efetuada por meio de ensaios mecânicos, tais como: tração, fadiga, dureza, fluência etc. Contudo, a melhor maneira de avaliar o desempenho de um material é colocá-lo sob condições reais de operação. Infelizmente, tais ensaios são, em grande parte, impraticáveis devido ao custo elevado e ao tempo gasto. Desta maneira, é importante que existam formas mais rápidas, menos onerosas de se avaliar da melhor maneira possível o comportamento daqueles materiais em condições reais de operação.

Os diversos ensaios normalmente não determinam propriedades de uma maneira absoluta, no sentido de que os valores obtidos sejam imutáveis e determinem totalmente o comportamento das peças em serviço. E ainda, apesar do objetivo principal ser a de-

terminação de propriedades, os materiais são analisados visando também, dentre outros aspectos, a substituição e a melhoria de componentes e valores para projeto.

Como nem sempre é possível realizar o ensaio em toda a peça ou estrutura, este é efetuado em uma parte da mesma ou em partes dos materiais com que foi fabricada. Estas amostras, que terão formas e dimensões padronizadas, recebem o nome de corpos de prova. A padronização para obtenção dos corpos de prova é definida por normas técnicas editadas por entidades tais como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *American Society for Materials* (ASM).

Os ensaios podem ser classificados de vários modos (RASLAN, 1982). Quanto à destruição do material, estes subdividem-se em:

- Destrutivos: implicam na inutilização da peça (tração, fadiga, etc).
- Não destrutivos: não afetam o desempenho das peças (ensaios de raios-x, ultra-som, indentação, etc).

Quanto à velocidade de aplicação de carga, um ensaio pode ser classificado como:

- Estático: quando a carga é aplicada durante um tempo relativamente curto, mas de maneira suficientemente lenta, de tal forma que a velocidade de aplicação de carga torna-se desprezível (ensaios de tração, indentação, etc).
- Dinâmico: quando a carga é aplicada tão rapidamente ou então ciclicamente, de maneira que surgem respostas associadas à inércia e ao tempo de ensaio (ensaios de impacto, fadiga, etc).

Um dos ensaios mecânicos mais usuais e importantes é o de tração, pois permite fornecer informações sobre a resistência dos materiais e pode definir critérios de aceitação para especificação de materiais, controlar os métodos de fabricação, auxiliar no desenvolvimento de novos materiais e avaliar as propriedades mecânicas para uso em projetos.

2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova padronizado a esforços de tração na direção axial, de maneira progressiva, resultando numa deformação do material na direção do esforço, até a sua ruptura (RASLAN, 1982). Algumas das mais importantes propriedades mecânicas dos materiais são obtidas através deste ensaio.

A figura 2.1 representa um corpo de prova submetido ao ensaio de tração, onde F é a força aplicada, l_0 e A_0 são respectivamente o comprimento inicial e a área inicial e l o comprimento final do mesmo.

Com a aplicação dos esforços, o material se alonga e podemos traçar um diagrama de carga *versus* alongamento ($F \times \Delta l$).

Muitas vezes as máquinas para ensaio dispõem de dispositivos para este fim. O aspecto de uma curva resultante do ensaio de tração é mostrado na figura 2.2.

A força de tração aplicada durante o ensaio atua sobre a área da seção transversal do material. A resistência interna do corpo de prova à esta força, por unidade de área, é denominada tensão (σ). A variação de uma dimensão qualquer do corpo, por unidade da mesma dimensão, é denominada deformação (ϵ).

Matematicamente define-se tensão (σ) como sendo o quociente do esforço aplicado pela área da seção transversal do corpo de prova (equação 2.1) e a variação do comprimento por unidade de comprimento como deformação (ϵ) (equação 2.2).

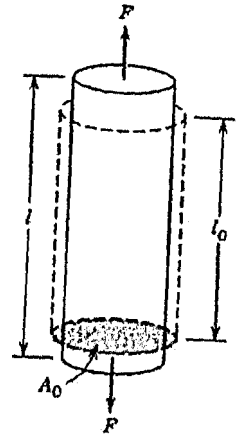


Figura 2.1: Ilustração do ensaio de tração em um corpo de prova (JUNIOR, 2003).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

As grandezas F , A_0 e l_0 estão representadas na figura 2.1 e Δl é obtido pela diferença

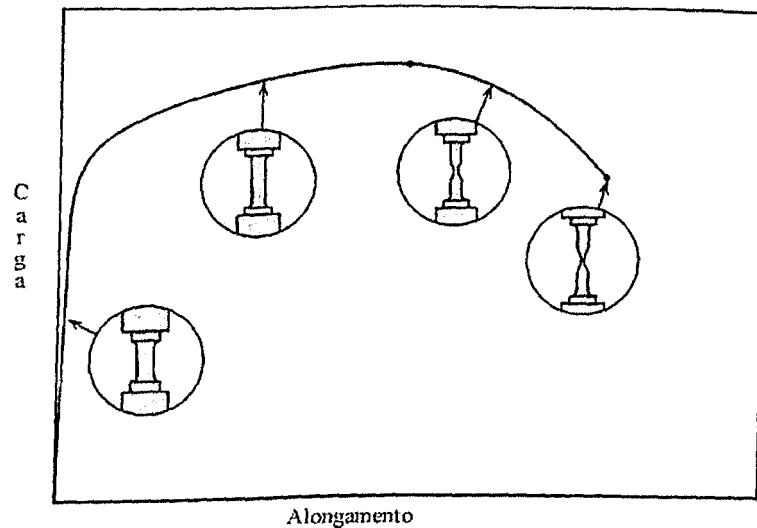


Figura 2.2: Gráfico carga *versus* alongamento de um corpo de prova metálico submetido a um ensaio de tração. Pode-se construir um gráfico através de medições da carga e do alongamento durante o ensaio (JUNIOR, 2003).

entre l e l_0 . O valor de σ é dado em Kgf/mm^2 e o de ϵ em $\%$. Com os valores de carga e alongamento medidos durante o ensaio podemos obter o diagrama tensão *versus* deformação, mostrado na figura 2.3.

A forma e a magnitude desta curva dependem: da composição do material, do tratamento térmico, da deformação plástica anterior, da taxa de deformação e da temperatura.

No diagrama tensão *versus* deformação pode-se distinguir duas regiões: elástica (0-A) e plástica (A-B).

1. Região elástica

Caso o esforço aplicado seja retirado na etapa elástica do ensaio, o corpo de prova retorna às suas dimensões originais. Esta propriedade de um material é denominada elasticidade. Alguns materiais, como os aços, apresentam uma região elástica relativamente grande, enquanto em materiais como o ferro fundido esta região é bastante reduzida.

Nesta fase, as tensões são proporcionais às deformações, ou seja, o material obedece à

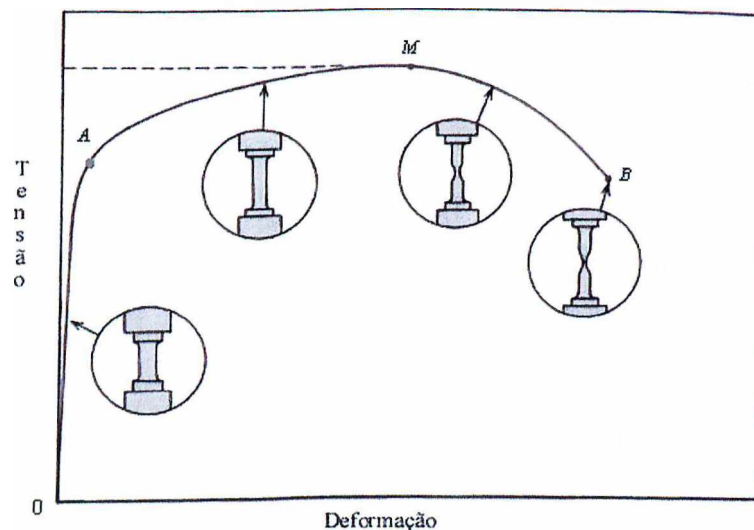


Figura 2.3: Gráfico tensão *versus* deformação de um corpo de prova metálico submetido a um ensaio de tração. Pode-se construir um gráfico a partir dos valores de carga e alongamento aplicados às equações de tensão e deformação (JUNIOR, 2003).

Lei de Hooke (equação 2.3):

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.3)$$

onde E é uma constante que recebe a denominação de módulo de elasticidade e é dada pela inclinação da reta aproximada $0A$ (figura 2.3). Esta propriedade do material indica a medida de rigidez do mesmo, ou seja, a capacidade do material resistir às deformações na fase elástica. Portanto, quanto maior o módulo de elasticidade de um material mais rígido ele será.

Outra propriedade que caracteriza um material é o limite de elasticidade. Esta é definida como a tensão máxima para a qual, cessados os esforços aplicados, o corpo de prova volta a apresentar as dimensões primitivas.

2. Região plástica

Nesta região a propriedade mais importante a ser avaliada é o limite de escoamento

(σ_e), que é definido como a tensão a partir da qual há grandes acréscimos de deformação.

Para certos materiais, como os aços de baixo teor de carbono, o limite de escoamento é bem definido e corresponde a tensão aplicada quando tem-se 0,2% de deformação do corpo de prova (JUNIOR, 2003).

Na região plástica, quando retira-se a carga em qualquer ponto, o material não retorna às suas dimensões originais, ou seja, ocorrem deformações permanentes.

O ponto M da figura 2.3 estabelece o valor de outra propriedade que caracteriza um material: o limite de resistência (σ_r), definido como a tensão máxima que o material pode suportar antes de sua ruptura. A tensão na qual o material rompe-se é denominada limite de ruptura ($\sigma_{rup.}$) e corresponde ao ponto B da mesma figura.

Por ser destrutivo este ensaio não é apropriado para a determinação *in situ* de propriedades mecânicas e, portanto, deve ser realizado em um corpo de prova confeccionado com o mesmo material que compõe a peça, com tamanho e forma definidos por norma.

Contudo, existem diversas situações em que necessita-se conhecer as propriedades mecânicas de uma dada peça, mas não se pode coletar amostras diretamente da mesma ou realizar ensaios destrutivos (como no caso de dutos em operação). Para estas situações podemos utilizar os chamados ensaios de indentação.

Ensaio de indentação como alternativa para os ensaios de tração

Ensaio de macro e microindentação em laboratório já são conhecidos desde 1957, tendo sido utilizados principalmente para medição de tenacidade à fratura de materiais cerâmicos (ZUM-GAHR, 1987). A avaliação de propriedades mecânicas tais como o limite de escoamento, de resistência à tração, dentre outras, via indentação instrumentada, tem sido realizada nos últimos anos através de modernos ensaios de macroindentação instrumentada no próprio duto, de forma não-destrutiva e sem a necessidade de paralisar o processo (HAGGAG, 2001).

A escala da impressão deixada na superfície ensaiada define ainda uma sub-divisão dos ensaios de indentação em nano, micro ou macro. A impressão deixada por uma

nanoindentação só poderia ser vista utilizando-se, por exemplo, um microscópio eletrônico de varredura. Para a visualização da impressão de uma microindentação basta utilizar um microscópio óptico, enquanto a impressão de uma macroindentação pode ser vista à olho nu.

Os objetos de penetração (indentação) mais utilizados em ensaios de dureza são mostrados na figura 2.4. Tais ensaios deram origem aos ensaios de macroindentação. Nota-se que a geometria dos penetradores de diamante, tanto o piramidal quanto o cônico, possuem características de ângulo que dificultam o processo de fabricação dos mesmos. Além disso, estes tipos de penetradores podem causar um trincamento do material na região indentada. Uma solução para estas dificuldades é a utilização de penetradores esféricos.

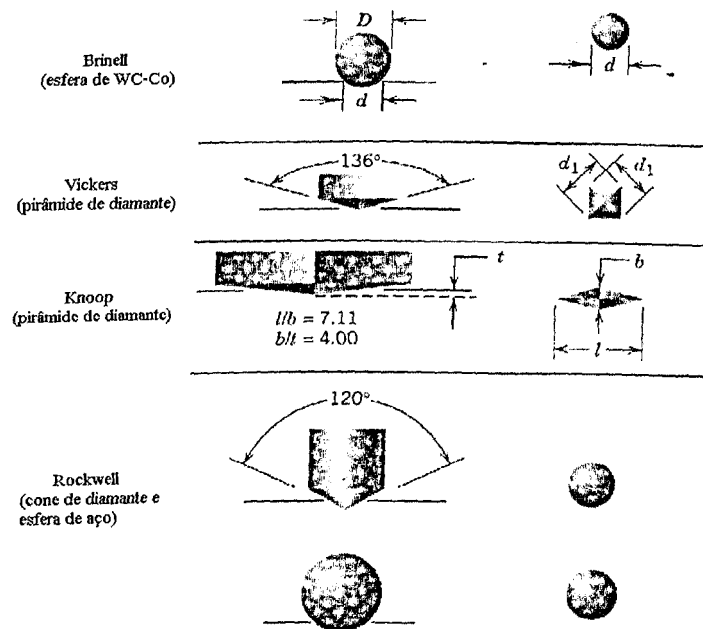


Figura 2.4: Tipos de penetradores utilizados em ensaios de dureza.

Um diagrama esquemático de uma ferramenta de indentação pode ser visto na figura 2.5, que é composta pela esfera, porta esfera e haste. Para simplificação, este conjunto será doravante denominado indentador ou penetrador esférico.

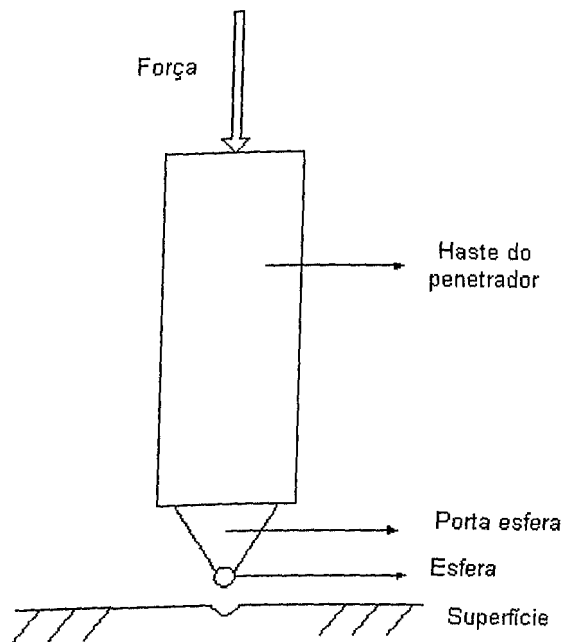


Figura 2.5: Diagrama esquemático da ferramenta de indentação (indentador ou penetrador esférico).

2.3 Macroindentação

A macroindentação foi desenvolvida a partir da técnica do ensaio convencional de dureza. O ensaio de macroindentação é baseado na indentação progressiva, com descarregamentos parciais intermediários, até que a profundidade máxima requerida (carga máxima) seja alcançada, quando o indentador é totalmente recolhido. Durante o ensaio, os valores de carga e profundidade de indentação, grandezas fundamentais para obtenção das propriedades, devem ser coletados continuamente (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989).

Tabor (1951) foi o primeiro a relacionar a dureza e a deformação próxima à penetradores esféricos, com os testes de tração uniaxial. Estas correlações são baseadas em três premissas:

1. as curvas monotônicas de tensão *versus* deformação verdadeiras, obtidas do ensaio de tração e compressão, são razoavelmente semelhantes;

2. a deformação da indentação correlaciona-se com a deformação plástica verdadeira em um teste de tração uniaxial;
3. a pressão média da indentação esférica correlaciona-se com a tensão de escoamento no teste uniaxial de tração.

Estas premissas são bem estabelecidas para vários materiais (HAGGAG; SERVER, 1993). Nota-se que, para a primeira premissa, as curvas de tensão *versus* deformação (de engenharia) correlacionam-se somente até o limite de resistência, desde que não haja mudança na área da seção transversal do corpo de prova.

Segundo Neto e Franco (2002), um ensaio de indentação realizado com penetradores esféricos e monitoramento das grandezas de deslocamento e carga é definido como uma Indentação Esférico-Instrumentada (IEI). A técnica para levantamento das características do material, através de tal ensaio, é baseada em múltiplas indentações no mesmo local de penetração na superfície metálica. Para tanto, é utilizada uma esfera de Carboneto de Tungstênio-Cobalto (WC-Co) como penetrador, pois este material possui alta dureza se comparado aos tipos de aços a serem ensaiados.

Na figura 2.6 estão representadas as profundidades plástica (h_p), elástica (h_e) e total (h_t) do material durante e depois de um ensaio típico. O diâmetro plástico (d_p) pode ser determinado a partir de h_p se não há ocorrência pronunciada de material acumulado ou deslocado em torno da indentação.

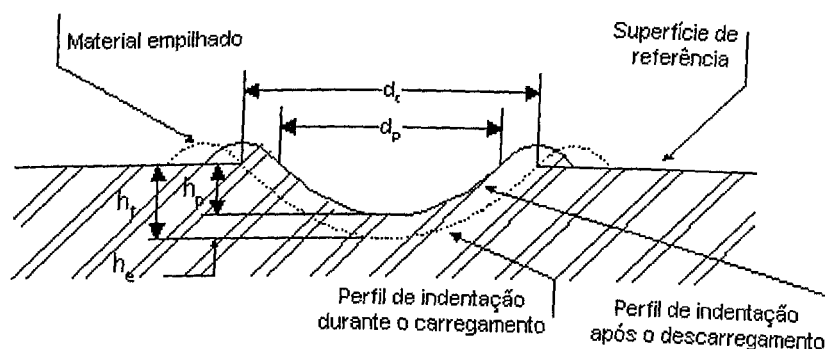


Figura 2.6: Perfil típico de indentação quando se utiliza um penetrador esférico.

Em um ensaio de tração padrão, a deformação uniaxial é quase confinada a um volume constante da seção da amostra. Inicialmente, o material é deformado elasticamente seguido do escoamento e do início do encruamento - estes processos continuam homogeneamente até a estrição. Em contraste, no ensaio IEI, as deformações elásticas e plásticas não são distinguidas. Com o incremento da profundidade de penetração, um volume crescente do material de teste é forçado a fluir sob tensões multiaxiais de compressão gerados pelo avanço do penetrador. Conseqüentemente, em uma IEI, ambas as deformações elásticas e plásticas ocorrem simultaneamente durante todo o curso do teste. Uma determinação precisa do limite de escoamento poderia então ser baseada em toda extensão da curva carga *versus* profundidade obtida pela IEI.

Nos múltiplos ciclos de indentação ocorrem processos consecutivos de encruamento, tanto do material anteriormente deformado quanto do material novo. Conseqüentemente, a análise do limite de escoamento é realizada tomando-se ocorrências simultâneas de escoamento e encruamento do material sob condições de compressão multiaxial. Se por um lado o volume de material deformado aumenta com o incremento da profundidade devido à geometria da esfera, por outro, o material sofre encruamento e dificulta este avanço. Por esta razão, os ensaios IEI não apresentam as duas fases características do ensaio de tração (linear elástica e não linear com encruamento do material). Portanto, os gráficos carga *versus* profundidade normalmente apresentam-se como porções que podem ser aproximadas por polinômios de primeiro grau. A partir destas curvas determinam-se os valores da força máxima (F) e das profundidades plástica (h_p), elástica (h_e) e máxima (h_t) de cada ciclo, conforme representado na figura 2.7. Estes valores serão utilizados para cálculo das propriedades mecânicas do material ensaiado, conforme o equacionamento a ser apresentado nos itens subseqüentes.

A revisão da literatura disponível sobre este assunto mostra duas técnicas distintas para determinação das propriedades mecânicas de um material, a partir de ensaios de macroindentação.

2.3.1 Técnica utilizada por Haggag *et al.* (1989 - 2001)

Os dados de carga e profundidade (figura 2.7) são usados para calcular os valores incrementais de tensão *versus* deformação a partir da combinação de teorias de elasticidade e plasticidade e relações semi-empíricas que governam o comportamento do material sob carregamentos multiaxiais de indentação. Através da análise da curva de escoamento, parâmetros como o limite de escoamento, limite de ruptura e de resistência, coeficiente de encruamento, tenacidade à fratura e outros podem ser avaliados (MATHEW *et al.*, 1999).

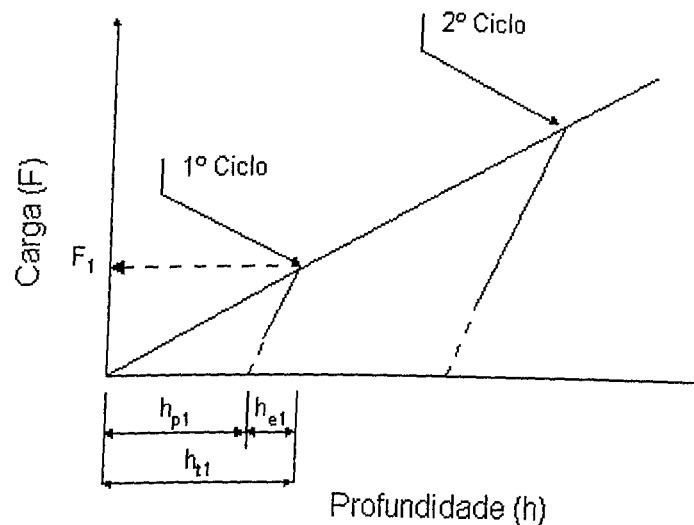


Figura 2.7: Representação gráfica da relação carga *versus* deslocamento na indentação de múltiplos ciclos.

1. Deformação verdadeira e tensão verdadeira

A porção de escoamento plástico da curva de tensão verdadeira (σ_v) *versus* deformação plástica verdadeira (ϵ_v), pode ser representada pela seguinte função de potência (RAMBERG; OSGOOD, 1943):

$$\sigma_v = K \cdot \epsilon_v^n \quad (2.4)$$

onde:

K - coeficiente de resistência

n - expoente de encruamento

σ_v - tensão verdadeira na região plástica

ϵ_v - deformação plástica verdadeira

Como os valores de K e n são incógnitas para esta equação, buscou-se outra forma de se calcular σ_v e ϵ_v , utilizando os dados do ensaio de indentação.

Tabor (1951) estabeleceu a relação entre a deformação plástica verdadeira (ϵ_v) em um teste de tração uniaxial e a deformação de indentação (d_p/D) a partir do ensaio de indentação (MATHEW et al., 1999). A deformação verdadeira e a tensão verdadeira podem ser resolvidas a partir das equações 2.5 e 2.6, respectivamente.

$$\epsilon_v = 0,2 \cdot \frac{d_p}{D} \quad (2.5)$$

$$\sigma_v = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_p^2 \cdot \delta} \quad (2.6)$$

onde:

F - carga de indentação

d_p - diâmetro plástico da impressão

D - diâmetro da esfera

δ - parâmetro que depende da flexibilidade do material e da tensão de indentação

A máxima deformação que pode ser medida através da IEI é de 20%, de acordo com a equação 2.5, quando $d_p = D$. Usando a equação de Hertz (HAGGAG et al., 1989), a profundidade plástica (h_p) pode ser estimada a partir do descarregamento total da amostra e então convertida em diâmetro plástico da indentação (d_p) usando a equação 2.7. A teoria de Hertz para contato normal elástico entre dois sólidos, é usada na análise

da deformação que ocorre no início do teste de indentação (TIMOSHENKO; GOODIER, 1970).

O cálculo do diâmetro plástico d_p , que é uma incógnita para as equações 2.5 e 2.6, é dado pela equação:

$$d_p = \sqrt[3]{2,735 \cdot F \cdot D \cdot \left(\frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_i}\right) \cdot \left(\frac{h_p^2 + 0,25 \cdot d_p^2}{h_p^2 + 0,25 \cdot d_p^2 - h_p \cdot D}\right)} \quad (2.7)$$

onde:

E_a - módulo de elasticidade do material da amostra

E_i - módulo de elasticidade do material da esfera

h_p - profundidade plástica da impressão

Para obter a tensão verdadeira (equação 2.6) é preciso conhecer o valor de δ , que pode ser dado por:

$$\delta = \begin{cases} 1,12, & \text{se } \phi \leq 1; \\ 1,12 + \tau \cdot \ln \phi, & \text{se } 1 < \phi \leq 27; \\ \delta_{máx}, & \text{se } \phi > 27. \end{cases} \quad (2.8)$$

Como se observa, δ depende dos valores de ϕ , $\delta_{máx}$ e τ , que são determinados pelas equações 2.9, 2.10 e 2.11, respectivamente.

$$\phi = \frac{\epsilon_v \cdot E_a}{0,43 \cdot \sigma_v} \quad (2.9)$$

$$\delta_{máx} = 2,87 \cdot \alpha_m \quad (2.10)$$

$$\tau = \frac{\delta_{máx} - 1,12}{\ln 27} \quad (2.11)$$

onde

Tabela 2.1: Valores para a sensibilidade à taxa de deformação (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989).

Sensibilidade à taxa de deformação	α_m
Baixa	1,0
Média	$0,5 < \alpha_m < 1,0$
Alta	$\alpha_m < 0,5$

α_m - fator de restrição, que depende da sensibilidade à taxa de deformação do material de teste (tabela 2.1).

Segundo Haggag (1989), os valores propostos para α_m estão dentro do intervalo de 0,5 e 1,0 conforme apresenta a tabela 2.1. Mathew (1999) propõe que o valor da sensibilidade à taxa de deformação esteja entre 0,9 e 1,25 e que um valor típico para materiais com baixa sensibilidade é igual a 1,0.

Com relação às equações anteriores, observa-se ainda que o valor de d_p a ser calculado pela equação 2.7 depende de seu próprio valor; isso sugere uma solução através de métodos computacionais iterativos. Note que as equações 2.6, 2.8 e 2.9 também devem ser resolvidas por iteração, uma vez que σ_v depende de δ , o qual depende de ϕ , que por sua vez depende de σ_v .

Os valores calculados através das equações 2.5 e 2.6 devem então ser ajustados à equação 2.4 através de uma regressão, para se obter os valores do expoente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K).

2. Limite de resistência

Outra propriedade importante é o limite de resistência de engenharia, calculado a partir da equação 2.12 (HAGGAG, 1993):

$$\sigma_r = K \cdot \left(\frac{n}{e}\right)^n \quad (2.12)$$

onde e - número de Euler = 2,71828182.

3. Limite de escoamento

A informação obtida do teste IEI (h_t) pode ser utilizada para obter o limite de escoamento (equação 2.15) do material testado, através do cálculo de d_t . Para cada ciclo do ensaio de indentação, a profundidade de penetração total (h_t) é medida enquanto a carga é aplicada e, usando a relação de área projetada do indentador esférico, o diâmetro total (d_t) pode ser calculado (equação 2.13):

$$d_t = 2 \cdot \sqrt{(h_t \cdot D - h_t^2)} \quad (2.13)$$

Desta forma, os pontos de todos os ciclos de carregamento até $d_t/D = 1,0$ são ajustados a seguinte relação:

$$\frac{F}{d_t^2} = A \cdot \left(\frac{d_t}{D}\right)^{(m-2)} \quad (2.14)$$

onde:

F - carga aplicada

m - coeficiente de Meyer

A - parâmetro de teste do material

Os valores de A e m são obtidos a partir da regressão dos dados de d_t/D versus F/d_t^2 de cada ciclo. O parâmetro de teste do material (A) pode então ser usado para calcular o limite de escoamento (σ_e) do material através da seguinte relação:

$$\sigma_e = \beta_m \cdot A \quad (2.15)$$

onde β_m - coeficiente de deformação, uma constante dependente do tipo de material.

Tabela 2.2: Valores típicos da constante (β_m) do tipo de material (HAGGAG et al., 1990).

Material	β_m
Aços-Inoxidáveis	0,1910
Aços-Carbono (todos)	0,2285

O valor de β_m para cada classe ou tipo de material é determinado a partir de regressões de análises de vários valores do limite de escoamento (medidos através do ensaio de tração de amostras com diferentes tratamentos térmicos, propriedades de escoamento e trabalhadas em diferentes orientações). Os valores usados na literatura para dois tipos de aço são apresentados na tabela 2.2.

Esta aproximação mais simplificada para obtenção do limite de escoamento elimina a determinação do material empilhado (figura 2.6), exceto para avaliação das tensões residuais, reduzindo significativamente o tempo e o custo do teste (HAGGAG et al., 1990).

4. Dureza Brinell

A dureza Brinell (HB) também pode ser determinada a partir do ensaio de indentação instrumentada com penetrador esférico. O cálculo é feito usando a carga máxima ($F_{máx}$ em Kgf), o diâmetro final da impressão (d_f em mm) e o diâmetro da esfera (D em mm) usando a seguinte equação (proveniente do ensaio de dureza Brinell padronizado - ASTM E 10-84):

$$HB = \frac{2 \cdot F_{máx}}{\pi \cdot D \cdot (D - (D^2 - d_f^2)^{0,5})} \quad (2.16)$$

onde:

$F_{máx}$ - carga máxima [kgf]

D - diâmetro da esfera [mm]

d_f - diâmetro final da impressão [mm]

O valor de $F_{máx}$ equivale a carga máxima aplicada durante o ensaio e o diâmetro final da impressão pode ser substituído pelo diâmetro plástico referente ao último ciclo de descarregamento.

5. Tenacidade à fratura

Além das propriedades de escoamento do material, uma estimativa empírica também pode ser feita para a tenacidade à fratura, proposta por Haggag *et al.* (1989):

$$K_{jlc} = c \cdot (K \cdot d \cdot n \cdot \sigma_e) \quad (2.17)$$

onde:

K_{jlc} - índice de tenacidade à fratura

c - constante de ajuste

K - coeficiente de resistência

d - diâmetro médio do grão

n - expoente de encruamento

σ_e - limite de escoamento

2.3.2 Técnica utilizada por Kwon *et al.* (2000 - 2003)

Esta técnica será apresentada apenas em caráter comparativo, uma vez que o foco deste trabalho é a utilização da técnica proposta por Haggag (1989 - 2001). Para maiores detalhes com relação ao equacionamento proposto por Kwon (2000 - 2003) devem ser consultadas as referências (AHN; CHOI; KWON, 2000), (AHN; CHOI; KWON, 2000), (AHN; KWON, 2001) e (LEE, 2001).

Como alternativa à proposta de Haggag, Kwon e co-autores apresentaram um modelo, no qual a tensão verdadeira e a deformação verdadeira são calculadas tomando-se por base

parâmetros do contato na indentação, tais como: profundidade do contato, geometria do penetrador e morfologia da superfície deformada no ensaio (AHN; CHOI; KWON, 2000; AHN; KWON, 2001). As propriedades reais do contato são determinadas considerando tanto a deflexão elástica quanto o empilhamento de material na região de indentação, como mostrado na figura 2.8. A determinação destes parâmetros é essencial quando aplicado este procedimento.

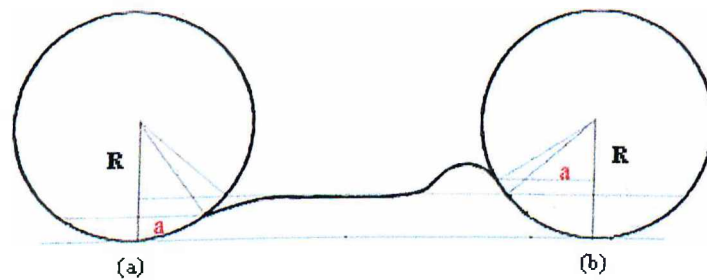


Figura 2.8: Representação esquemática das deformações elástica e plástica na indentação, (a) afundamento do material e (b) acúmulo de material (KANIA; RUSSEL; GAO, 2003).

Uma curva de tensão *versus* deformação é estabelecida considerando-se os parâmetros citados e ajustada usando uma função de potência do tipo Hollomon, que expressa o encruamento do material (LEE, 2001). Desta forma, pode-se calcular o limite de escoamento através da extrapolação da deformação a baixos valores na equação de regressão.

O limite de resistência é calculado assumindo-se que o alongamento uniforme equivale-se ao expoente de encruamento, que é basicamente o mesmo método usado por Haggag e co-autores. Uma comparação entre os dois métodos é apresentada na tabela 2.3.

2.3.3 Equipamentos comerciais para a macroindentação *in situ*

Atualmente, estão sendo comercializados mundialmente dois equipamentos para realização de macroindentação *in situ*: o SSM-M1000 da empresa norte americana Advanced Technology Corporation e o AIS2000 da empresa coreana Frontics.

Tabela 2.3: Comparação entre os modelos de Haggag *et al.* e Kwon *et al.* (KANIA; RUSSEL; GAO, 2003).

Item	Haggag	Kwon
Efeito Acúmulo/Afundamento	Não considerado	Analisado quantitativa-mente
Definição de de- formação	$\epsilon_R = 0, 2.d_p/D$	$\epsilon_R = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a/R)^2}} \frac{a}{R}$ onde α é uma constante, a e R estão representados na figura 2.8
Análise da curva de descarregamento	Supõe curva de descarregamento linear	Supõe curva segundo lei de potência
Procedimento de análise	Requer entrada de parâmetros: δ , α_m , β_m e m	Utiliza relação de Hollomon; não necessita de entrada de parâmetros

SSM-M1000TM, SSM-B1000TM e SSM-B4000TM - ATC

Estes equipamentos foram desenvolvidos utilizando-se o modelo proposto por Haggag, descrito anteriormente. O SSM-M1000TM é um modelo em tamanho reduzido (portátil) para realização de testes a temperatura ambiente em estruturas metálicas localizadas em campo. O sistema é energizado através de um pacote portátil de baterias.

Este equipamento realiza testes não destrutivos e os resultados são obtidos imediatamente após o teste. A força de indentação máxima é de 4,5 kN. Para dutos e vasos de pressão, são utilizadas bases magnéticas elétricas para montar o equipamento sobre a superfície. Um computador portátil, juntamente com o sistema de *software*, é o responsável pelo controle completo do equipamento.

O modelo SSM-B1000TM possui capacidade de carga similar ao SSM-M1000 e o modelo SSM-B4000TM é capaz de trabalhar com cargas de até 17,8 kN.



Figura 2.9: SSM-B1000TM - Equipamento com configuração para ensaios em laboratório, utilizando uma câmara de aquecimento, uma mesa posicionadora X-Y, câmera de vídeo e monitor (ATC, 2003).

Com a configuração mostrada na figura 2.9, estes equipamentos podem realizar testes em amostras a temperaturas entre -157° a $+427^{\circ}\text{C}$.

O *software* utilizado para a realização dos testes é comum a todos os modelos de equipamento. Além desse *software*, outro programa é fornecido para posicionamento do indentador para testes em amostras.

O pacote de *software* fornecido pela ATC para a realização dos ensaios foi desenvolvido utilizando a linguagem gráfica LabView[®] e possui as seguintes características:

- controle do sistema de indentação, que opera em malha fechada tanto para carga quanto para deslocamento,
- verifica se as grandezas de deslocamento máximo e carga máxima não ultrapassam os limites de operação, de modo a prevenir a danificação dos sensores (célula de carga, transdutor de deslocamento), da amostra ou da estrutura de teste e do indentador,
- controle completo das movimentações do motor e descarregamento total no final do teste,
- taxa máxima de aquisição de dados de 500 amostras por segundo,

- *display* gráfico, atualizado em tempo real, dos sinais de carga e deslocamento durante o teste,
- arquivos de resultados do ensaio podem ser impressos ou armazenados no computador.

O módulo de indentação esférica automatizada realiza testes com um ou mais ciclos de indentação, e determina:

- o limite de escoamento,
- os pares de dados tensão verdadeira e deformação verdadeira até 20% de deformação,
- o ajuste das propriedades de escoamento à função de potência, de modo a calcular o expoente de encruamento e o coeficiente de resistência,
- uma estimativa do limite de resistência a partir do ajuste dos resultados à uma função de potência,
- a dureza Brinell para o tamanho de esfera utilizado.

AIS2000 - Frontics

Este equipamento foi implementado utilizando-se o modelo de Kwon, descrito anteriormente, e pode ser visto na figura 2.10.

Este é um sistema portátil de indentação *in situ*, com avaliação não-destrutiva das propriedades de tração e de dureza. Este equipamento obtém continuamente os dados de carga e deslocamento. A curva de indentação carga *versus* profundidade pode ser convertida em várias propriedades de tração como curva de escoamento, limite de escoamento, limite de resistência, expoente de encruamento, coeficiente de resistência e dureza Vickers, Rockwell e Brinell. Os procedimentos necessários para obtenção destes dados são realizados por um *software* dedicado instalado no computador.

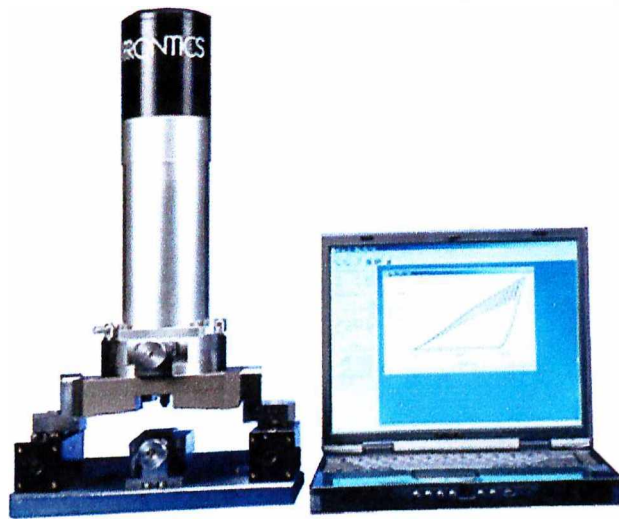


Figura 2.10: AIS 2000 - Equipamento para macroindentação da empresa Frontics (Frontics, 2003).

Algumas das vantagens deste equipamento são a não necessidade de entrada de dados (constantes empíricas definidas por Haggag) para que seja realizado o ensaio e a existência de vários sistemas de fixação para teste *in situ* de materiais em operação.

O *hardware* principal possui as seguintes características:

- carga máxima: 300 *Kgf*
- resolução de carga: 0,3 *Kgf*
- taxa de carregamento (velocidade): 0,09 a 6 *mm/min*
- sensores limitadores
- profundidade máxima (operacional): 3 *mm*
- máxima faixa de deslocamento do indentador: 20 *mm*

Além disso, o *hardware* deste equipamento possui controles de velocidade, carga e profundidade. Utiliza ainda um LVDT para medição de posição e permite vários tipos

de indentadores (mini esfera, Rockwell, Vickers), em uma única peça, e esferas de vários diâmetros (0,5 a 1 *mm*).

As características principais do *software* de operação do equipamento são:

- condições de testes ajustáveis;
- sobreposição de curvas para comparação;
- avaliação de vários tipos de dureza: Brinell, Rockwell e Vickers.

2.4 Conclusão

Este capítulo apresentou o atual estado da arte da metodologia para macroindentação e as técnicas e equipamentos utilizados para determinação de propriedades mecânicas de materiais submetidos a este ensaio. No próximo capítulo será proposto um sistema para a realização da macroindentação utilizando a técnica de Haggag e co-autores.

Capítulo 3

Proposta de um sistema de controle para macroindentação instrumentada

3.1 Introdução

Uma vez definida a macroindentação como a metodologia mais apropriada para determinação *in situ* de propriedades mecânicas em dutos, este trabalho propõe um sistema de controle *hardware/software* que seja capaz de realizar este ensaio, de acordo com as necessidades específicas do projeto mencionadas no capítulo 1.

O ensaio de macroindentação consiste em deslocar um penetrador esférico na direção perpendicular à amostra de material, de maneira a indentar sua superfície com múltiplos ciclos de carregamento e descarregamento em um mesmo ponto de ensaio. As cargas aplicadas e as respectivas profundidades de penetração são grandezas fundamentais para análise do ensaio e devem ser monitoradas durante a realização do mesmo.

3.2 Descrição geral

O sistema de controle do equipamento de macroindentação pode ser dividido em três unidades: (1) estruturas mecânicas, (2) instrumentação e *hardware* de controle e (3) *software* de controle, aquisição e processamento dos dados. É importante observar a in-

terligação destas unidades, conforme mostra a figura 3.1. As setas indicam a direção em que ocorre a troca de dados entre os dispositivos.

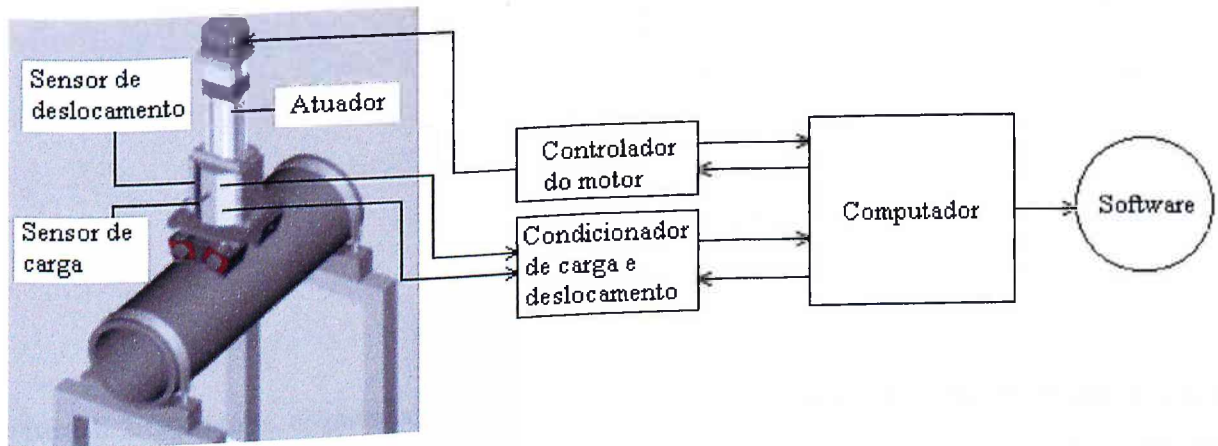


Figura 3.1: Diagrama geral do sistema de macroindentação.

3.2.1 Estruturas mecânicas

Conforme descrito no capítulo 1, estas unidades foram desenvolvidas pela equipe da Faculdade de Engenharia Mecânica (UFU), coordenada pelo Prof. Sinésio Domingues Franco.

Bancada porta-tubos

Uma vez que nas fases de construção, avaliação e validação do equipamento seriam necessárias diversas simulações e ensaios em laboratório, decidiu-se desenvolver uma bancada de teste que permitisse a realização de ensaios de indentação em diferentes posições, variando a inclinação do equipamento de 0 a 360°. A bancada (figura 3.2) foi projetada de forma que ensaios pudessem ser realizados em qualquer posição. Girando-se o indentador sobre o duto pode-se realizar ensaios em praticamente toda a superfície do mesmo. Além disso, dentro de certos limites, é possível a realização de ensaios em dutos com diferentes diâmetros.

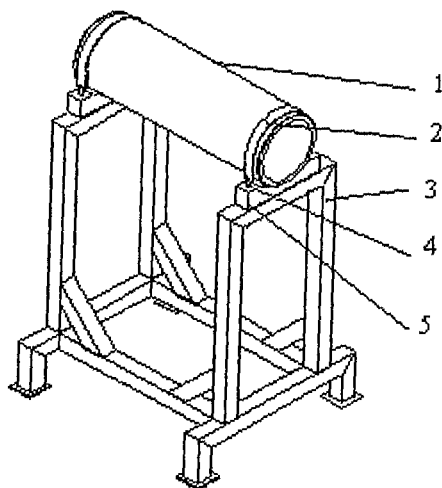


Figura 3.2: Desenho esquemático da bancada para acomodação de tubos de ensaio em laboratório: (1) tubo-amostra, (2) cinta em aço inoxidável 304, (3) mesa em cantoneira L50x50x4 soldada, (4) parafuso sextavado com porca e arruelas em aço inoxidável e (5) suporte em V.

Fixação do equipamento à superfície de teste

Por se tratar de um equipamento portátil, a ser utilizado em diferentes locais de trabalho, procurou-se adotar um sistema de fixação que fosse de fácil montagem. Desta forma, optou-se inicialmente pela utilização de bases magnéticas (figura 3.3a) para fixação da unidade de teste ao duto.

Contudo, um segundo mecanismo de fixação foi desenvolvido, com base em cintas metálicas envolvendo o duto (figura 3.3b), resultando em uma maior estabilidade nos casos de ensaios a serem realizados na posição horizontal e em dutos irregulares e de pequenas dimensões. A versão desenvolvida com bases magnéticas foi constituída de 4 bases com botão rotativo liga-desliga e capacidade de carga nominal de 98 *Kgf*. Como a capacidade de carga normal de cada uma dessas bases é de 98 *Kgf*, estabeleceu-se como limite de trabalho para o equipamento, com fixação por bases magnéticas, uma carga de 300 *Kgf*.

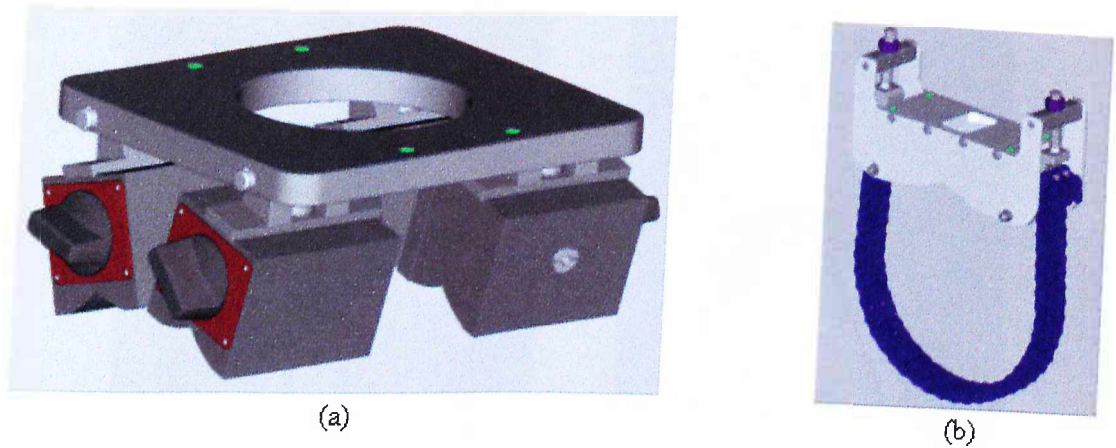


Figura 3.3: Sistemas de fixação com a utilização de (a) bases magnéticas e (b) base com correntes metálicas.

Projeto mecânico do equipamento

A figura 3.4 apresenta uma vista geral do projeto desenvolvido para o equipamento e uma vista do compartimento contendo os sensores de carga e deslocamento. Essas perspectivas foram obtidas através de desenhos confeccionados em AutoCad2000®. Os níveis de deformação dos diferentes componentes foram projetados e avaliados através de programas de elementos finitos, tais como Ansys®. Nesta figura são apresentados os detalhes construtivos do equipamento. Um dos destaques desta configuração é sua simplicidade, tornando o equipamento menos susceptível a erros de montagem e de usinagem.

Na extremidade do fuso é fixado o sensor de carga, e, acoplada a esta, uma haste com um braço responsável pelo suporte do sensor de deslocamento. A medida em que o ensaio é executado, a profundidade de indentação é determinada pela diferença de deslocamento entre a extremidade da haste (esfera) e a extremidade do sensor de deslocamento.

3.2.2 Instrumentação e *hardware*

Um diagrama de blocos simplificado proposto para o sistema de *hardware* está representado na figura 3.5.

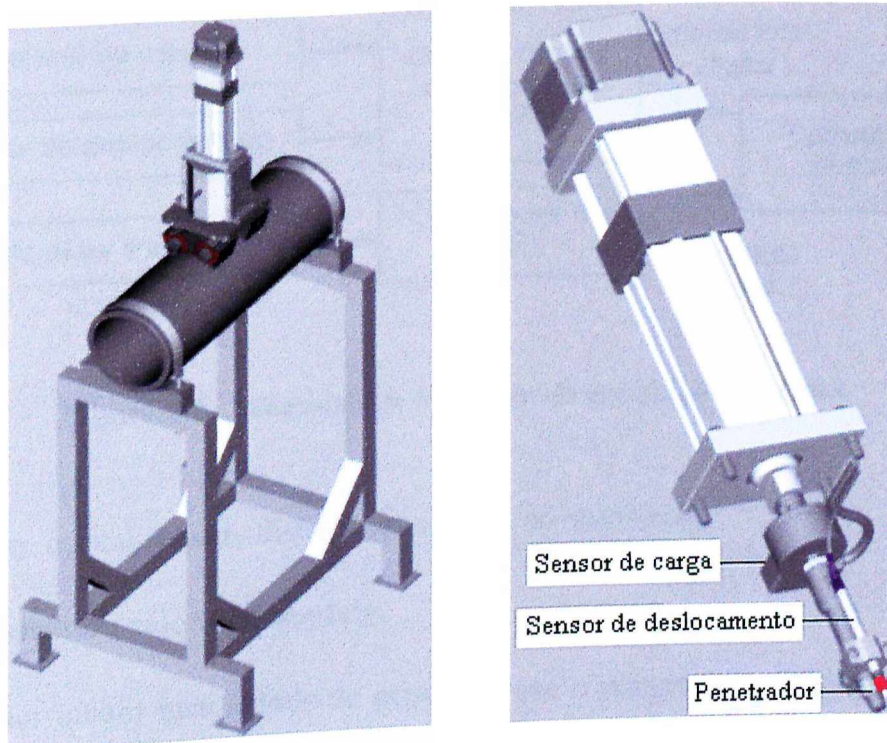


Figura 3.4: Equipamento desenvolvido em uma vista geral e vista tridimensional do compartimento contendo os sensores de carga e deslocamento.

Sensores de deslocamento e carga

A monitoração da carga aplicada e da profundidade de indentação, deve ser realizada através de transdutores específicos para tal. Estes dispositivos podem ser do tipo mecânico, pneumático, hidráulico, elétrico, eletrônico ou uma combinação de quaisquer duas ou mais formas básicas. Entretanto, os sensores a serem utilizados devem ser elétricos pois o objetivo é realizar o ensaio de maneira automatizada, ou seja, estes sensores devem gerar sinais elétricos, passíveis de condicionamento e digitalização eletrônica, que representem fidedignamente as grandezas de interesse.

A escolha dos tipos de instrumentos para medição a serem utilizados depende principalmente dos seguintes parâmetros:

- precisão: número de casas decimais ou quantidade de bits disponíveis para representar o sinal,

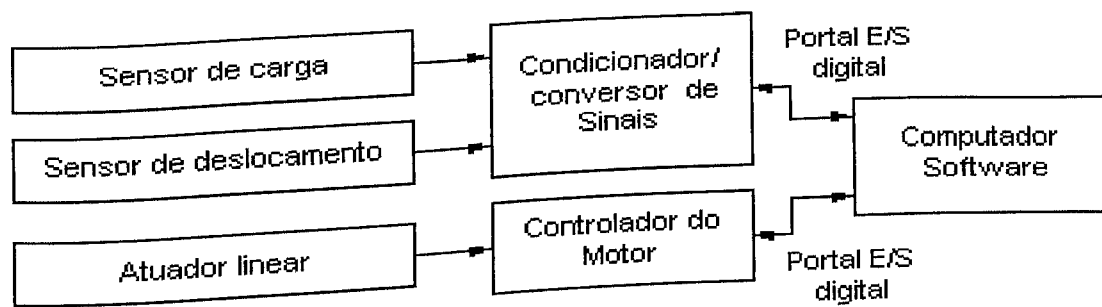


Figura 3.5: Diagrama de *hardware* do sistema de controle.

- exatidão: o quanto a medição se aproxima do valor real,
- erro: desvio do valor real medido,
- resolução: menor quantidade da grandeza que o transdutor pode determinar,
- faixa de operação: expressão da extensão total dos possíveis valores de medição,
- repetibilidade: capacidade do dispositivo de emitir o mesmo valor sempre que colocado numa mesma situação específica.

Para a medição do deslocamento linear do penetrador, durante o ensaio de indentação, será necessário um sensor de deslocamento com as seguintes especificações:

- resolução melhor ou igual a $0,2 \mu m$,
- faixa de operação (fundo de escala) de $\pm 2 mm$,
- precisão melhor que $0,1 \mu m$,
- exatidão melhor que 99,5 %,
- erro menor que 0,5 %,
- erro de repetibilidade menor que 0,5 %.

O sensor de carga, a ser escolhido para monitoramento da carga aplicada na superfície de ensaio, deve satisfazer as seguintes especificações principais:

- resolução melhor ou igual a 0,5 % do fundo de escala,
- faixa de operação entre 0 e 5000 N ,
- precisão melhor que 0,1 N ,
- exatidão melhor que 99 %,
- erro menor que 1 %,
- erro repetibilidade menor que 0,5 %.

Condicionador/conversor de sinais

Para que o computador seja capaz de receber e processar os sinais elétricos analógicos provenientes dos sensores, estes devem ser propriamente condicionados e digitalizados. O processo de condicionamento dos sinais é composto basicamente pelas etapas de amplificação e filtragem.

Todo este processo de condicionamento e digitalização dos sinais provenientes dos sensores será realizado por um dispositivo denominado condicionador/conversor de sinais (figura 3.5). Este mesmo dispositivo também é responsável pelo envio dos dados digitais para o computador, ou seja, para um de seus portais de entrada/saída digital, utilizando um protocolo de comunicação adequado.

Como a resolução do sensor de deslocamento deve ser de no mínimo $0,2 \mu m$ e sua faixa de operação deve ser de $4 mm$, dividindo-se o valor da faixa de operação pela resolução obtemos uma quantidade de níveis de quantização igual a 20000. Este valor implica numa digitalização em 15 bits, o que equivale a 32768 níveis de quantização. Porém, como neste caso deseja-se uma resolução melhor ou igual a esta, a digitalização deverá ser feita por um conversor A/D de 16 bits. Este mesmo conversor terá resolução suficiente para as medições de carga, uma vez que para uma faixa de operação de 5000 N e resolução de 25 N são necessários 200 níveis de quantização.

Além disso, o condicionador/conversor de sinais deve ser compatível com os tipos dos sensores, ou seja, esta unidade deve ser capaz de excitar os sensores com sinais de tensão compatíveis em amplitude e frequência, receber e processar os sinais dos sensores mantendo suas respectivas características de amplitude e frequência.

Atuador linear

Outra etapa do sistema consiste em realizar o deslocamento do indentador na direção perpendicular à superfície analisada. Para isso será empregado um motor associado a um fuso. Este conjunto, denominado atuador linear, realizará a conversão do movimento de rotação do motor para um movimento de deslocamento linear do penetrador.

O atuador linear a ser utilizado deve possuir as seguintes características principais:

- ser programável,
- possuir alta repetibilidade de posicionamento,
- alta durabilidade,
- sem folgas,
- capacidade de carga de até 5000 N ,
- velocidade (mínima) de deslocamento vertical do penetrador de aproximadamente 0,76 mm/min ,
- deslocamento linear com resolução de 0,1 μm ,
- curso de aproximadamente 30 mm ,
- possuir sensores fim de curso para posicionamento e proteção.

Controlador do motor

Como o deslocamento do penetrador deve seguir as características do ensaio e o teste deve ser automatizado, deve ser utilizada uma unidade programável de comando para o motor. Esta unidade, denominada controlador do motor, realizará o interfaceamento entre o computador e o motor. Portanto, esta deve estabelecer uma comunicação com um portal de entrada/saída de dados do computador utilizando um protocolo de comunicação específico. O computador deverá então enviar três tipos de comando para o controlador do motor: configuração, controle e requisição de status. Assim, o controlador do motor deve possuir as seguintes especificações:

- ser programável,
- possuir entradas para sensores fim de curso,
- comunicação com um portal de entrada/saída digital do computador.

3.2.3 *Software*

O diagrama resumido do sistema de *software* a ser desenvolvido para a automatização do processo de macroindentação está representado na figura 3.6.

O processo inicia-se com o teste de comunicação com as unidades de condicionamento de sinais e de controle do motor. O programa só irá continuar se todas as unidades estiverem corretamente conectadas ao computador e energizadas.

Uma vez completadas as verificações iniciais, o procedimento de ensaio tem seu início. O atuador linear deve deslocar o penetrador com uma velocidade e passos pré-definidos. Durante a penetração o deslocamento do penetrador e a carga aplicada devem ser coletados continuamente e em tempo real. Caso ocorra algum erro de leitura dos sensores ou o valor de carga exceda um limite pré-determinado o ensaio deverá ser finalizado.

Os valores de carga e deslocamento coletados deverão então ser utilizados na etapa de tratamento e análise, que consiste na extração dos principais pontos da curva característica

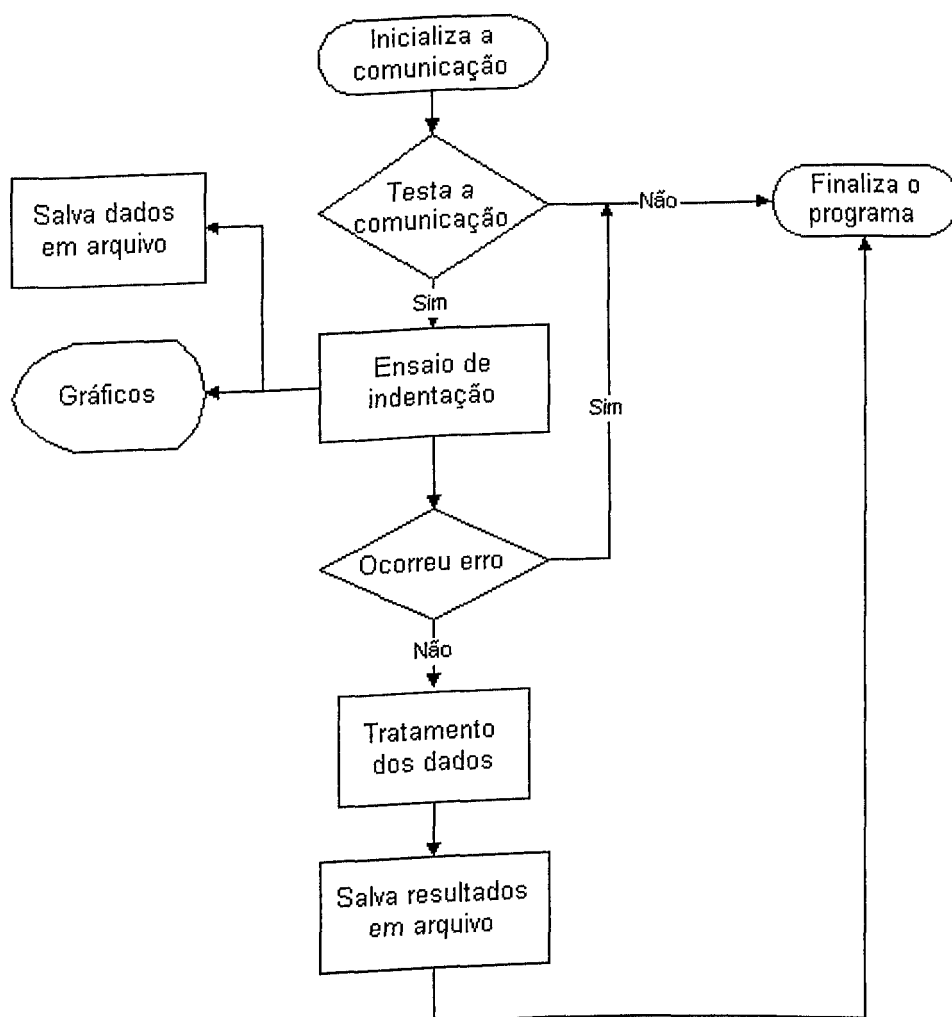


Figura 3.6: Diagrama de *software* de controle do sistema.

de carga *versus* deslocamento e na aplicação dos mesmos em equações-modelo para a obtenção das propriedades mecânicas do material ensaiado.

Em todas as etapas do *software*, devem ser verificadas as condições de segurança para a realização do ensaio, de modo que os equipamentos utilizados não sejam danificados e seja garantida a integridade da estrutura ensaiada.

Além de controlar todo o processo, o *software* deve possuir uma interface homem/máquina agradável e realizar a aquisição dos dados em tempo real, para posterior armazenamento.

3.3 Conclusão

Neste capítulo foram descritas as especificações básicas para os sistemas de *software* e *hardware* que devem compor o equipamento de macroindentação em questão. No próximo capítulo serão detalhados o projeto e o funcionamento do *hardware* utilizado e todo o processo de desenvolvimento do *software*.

Capítulo 4

MIP2004 - Descrição e funcionamento de suas unidades

4.1 Introdução

Neste capítulo serão descritas as etapas de desenvolvimento do sistema de macroindentação, os equipamentos e as estratégias utilizadas para atingir os objetivos propostos.

Conforme descrito no capítulo anterior, o sistema proposto foi dividido em três unidades principais: estruturas mecânicas, *hardware* e *software*. As estruturas mecânicas envolvem os elementos de apoio para fixação dos diversos dispositivos componentes do equipamento. O *hardware* possui a função de controle do processo de indentação e de monitoração das grandezas de carga e deslocamento durante todo o processo de ensaio. Por sua vez, o *software* deve realizar todo o gerenciamento do processo de indentação, aquisição das grandezas de interesse do ensaio e processamento dos dados para obtenção das propriedades mecânicas.

4.2 Unidades de *hardware*

As unidades de *hardware* do sistema são compostas pelos seguintes elementos:

- controle do processo de indentação:

- motor,
 - controlador deste motor,
 - redutor,
 - fuso,
 - indentador.
- monitoração das grandezas de interesse:
 - sensor de deslocamento,
 - sensor de carga,
 - condicionador e digitalizador do sinal destes sensores.

4.2.1 Controle do processo de indentação

A - Motor

Conforme mostrado nos capítulos anteriores, o equipamento desenvolvido tem o objetivo de realizar testes de indentação, conforme as características próprias deste ensaio. Para isso, é necessária a utilização de um motor que promova o deslocamento do indentador em direção à superfície de ensaio.

Os tipos disponíveis de motor são: motor AC/DC, servo motor e motor de passo. Entretanto, optou-se pela utilização de um motor de passo (figura 4.1). Esta escolha foi definida pela necessidade de portabilidade (peso e dimensões reduzidos) e controle preciso e instantâneo da posição do motor. O motor escolhido possui as seguintes características:

- tensão de alimentação: 12 V
- corrente de alimentação: 2,5 A
- número de passos por revolução: 50800

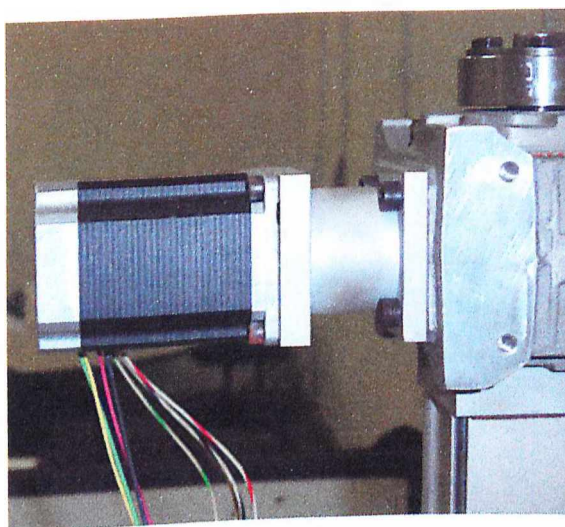


Figura 4.1: Motor de passo utilizado para deslocamento do penetrador.

- dimensões: 10 x 8 x 8 cm
- peso: 1 kg

B - Controlador do motor

De maneira a configurar diversos parâmetros do motor tais como corrente, velocidade e aceleração, e também controlar sua movimentação, deve-se utilizar uma unidade de *hardware* para tal fim, aqui denominada de controlador do motor. Esta unidade deve possuir entrada para sensores, ser programável de maneira que o computador possa enviar à mesma comandos e receber dados de status do motor. Dentre as opções existentes no mercado optou-se pelo modelo comercial e mostrado na figura 4.2.

No diagrama esquemático de controlador do motor (figura 4.3) destaca-se a existência de vários módulos, tais como entradas para sensores de fim de curso, circuitos de potência para alimentação do motor, comunicação e programação via computador, saídas digitais e circuitos capazes de controlar o motor através de micropassos. O seqüenciador de micropassos controla com precisão a quantidade de corrente em cada fase para cada posição, de maneira a realizar eletronicamente sucessivas divisões de passos, possibilitando

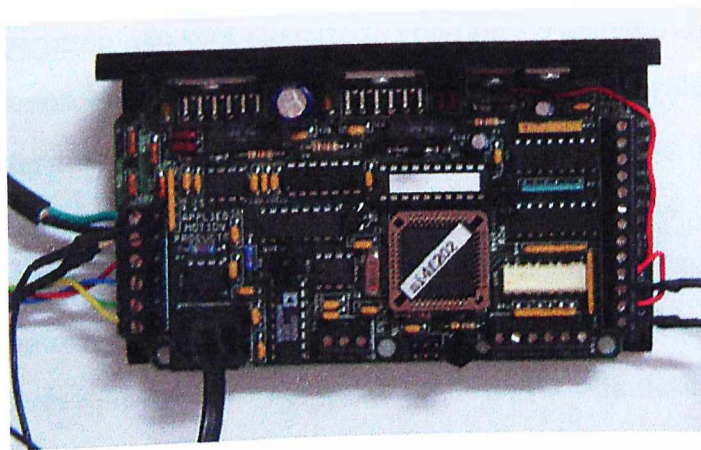


Figura 4.2: Controlador programável para o motor de passo.

a escolha de várias resoluções, melhorando ainda mais a resolução de posicionamento do motor. Os sensores fim de curso devem ser utilizados para assegurar limites para deslocamento do indentador, e assim evitar danos ao equipamento.

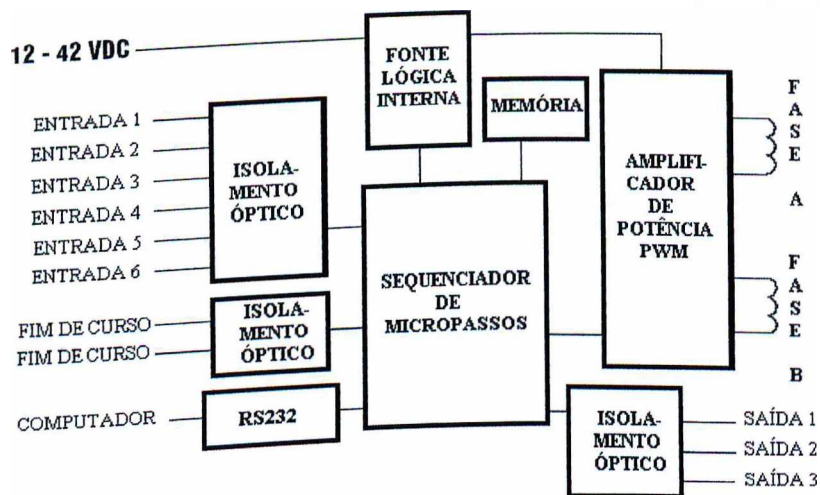


Figura 4.3: Diagrama esquemático do controlador do motor.

A comunicação entre o controlador do motor e o computador é realizada através de comandos que estão relacionados às configurações das entradas, aos parâmetros de controle de movimentação, informações de status e modos de operação. Existem dois tipos básicos de comandos: armazenados e imediatos. Os comandos armazenados são executados um de

cada vez, ou seja, o segundo não será executado enquanto o primeiro não for concluído. Os demais comandos, denominados imediatos, são executados em paralelo com os comandos armazenados. Isto permite, por exemplo, que se verifique o status do motor enquanto o mesmo está em movimento.

Alguns comandos transferem informações para o controlador para serem utilizadas posteriormente. Estas informações são armazenadas em registradores e mantidas até que um novo comando altere seu valor ou até que o controlador seja desligado. Existem ainda registradores para armazenamento da velocidade, aceleração, desaceleração, distância de movimento, definição de sensores de limite, corrente do motor, resolução e posição.

C - Redutor

Após a realização dos primeiros testes com o sistema motor/controlador, verificou-se a necessidade de reduzir a velocidade de ensaio e também diminuir o deslocamento linear referente a um micropasso no motor. Para tal um redutor de 10:1, foi acoplado ao eixo do motor, conforme mostrado na figura 4.4.

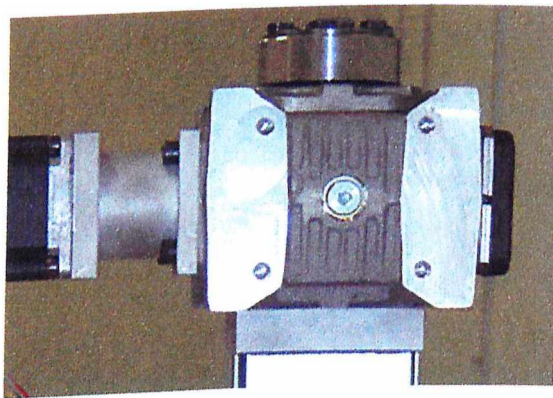


Figura 4.4: Redutor acoplado ao motor de passo.

D - Fuso

O fuso é utilizado para que o movimento de rotação do motor de passo promova um deslocamento linear do indentador. Com a rotação do motor, seu eixo aciona um conjunto

de engrenagens que projeta o fuso (e conseqüentemente sua carga) para uma posição desejada. Dentre as possibilidades pesquisadas, a que melhor se adaptou às necessidades do projeto baseia-se em fusos com esferas pré-carregadas. Tal arranjo possibilita o posicionamento mais preciso, repetitivo, de alto rendimento e sem folgas. Em fusos de esferas recirculantes as esferas "rolam" por pistas de alta dureza e retornam ao ponto inicial, por meio de sistemas de recirculação (externos ou internos). O fuso utilizado foi adaptado ao redutor e encapsulado em uma estrutura de alumínio, conforme mostra a figura 4.5.

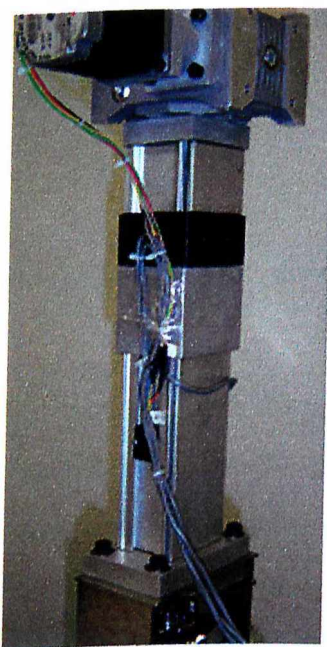


Figura 4.5: Unidade contendo o fuso de esferas recirculantes.

4.2.2 Monitoração das grandezas de interesse

A - Sensor de carga

Para obtenção das propriedades mecânicas do material em ensaio, deve-se monitorar continuamente a carga que está sendo aplicada sobre a superfície. Existem vários dispositivos capazes de medir cargas. Entretanto, para esta aplicação necessita-se de um sensor

preciso, de grande resolução e alta repetibilidade. Tais características são possíveis de se obter através do uso de células de carga extensométricas.

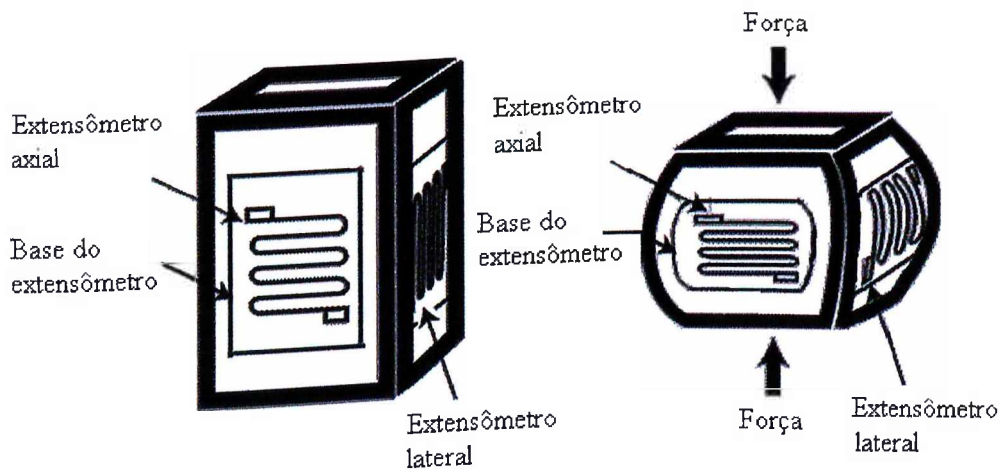


Figura 4.6: Diagrama esquemático de uma célula de carga e a localização dos extensômetros.

O funcionamento de uma célula de carga parte do princípio de que quando uma carga é imposta sobre um objeto (figura 4.6), o material do mesmo se expande ou contrai. Se um extensômetro com características de resistência selecionadas for fixada ao objeto, teoricamente se alongará ou será comprimido exatamente como a superfície à qual está fixado (SOISSON, 1995). Deste modo, quando um extensômetro de resistência metálica (figura 4.7) está fixado ao corpo de uma célula de carga e a mesma está sujeita a um esforço de tensão ou compressão, ocorrerá uma variação na resistência do extensômetro, proporcionalmente à intensidade do esforço aplicado.

A medição de deformação com um extensômetro de resistência requer uma medição muito precisa da variação de resistência. O circuito elétrico mais comumente utilizado para tal aplicação é a ponte de Wheatstone (figura 4.8). Usando-se uma fonte de tensão constante, o potencial na carga de saída é zero para uma ponte equilibrada, mas tem amplitude previsível e mensurável quando um braço da ponte altera sua resistência de uma quantidade conhecida. Como é possível relacionar a variação de resistência com a deformação aplicada, a tensão de saída também pode ser relacionada com a deformação. A relação entre a tensão e a deformação pode ser mantida linear pela escolha adequada

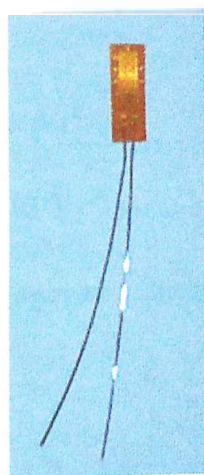


Figura 4.7: Extensômetro metálico.

dos limites operacionais. A tensão de saída é, em geral, da ordem de alguns milivolts, o que torna necessário o uso de detectores de alta sensibilidade de modo a obterem-se níveis satisfatórios de sinal para registro. A razão entre a tensão de saída e a tensão de excitação, expressa em mV/V , é uma medida da sensibilidade do transdutor de força.

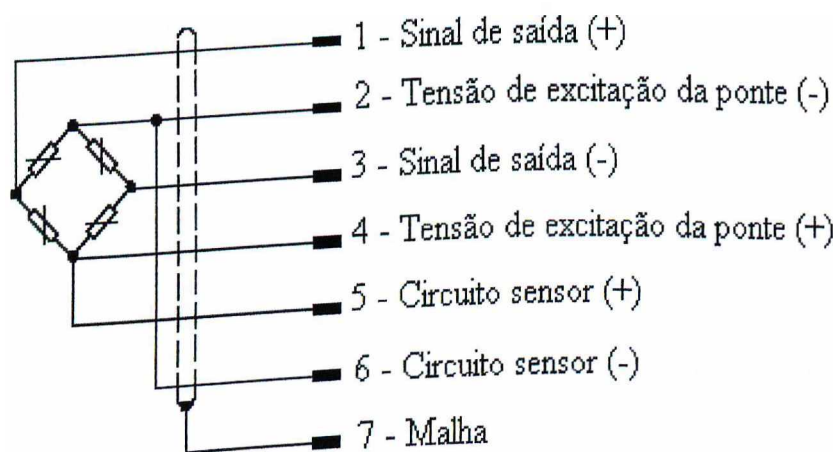


Figura 4.8: Diagrama esquemático de uma ponte de Wheatstone.

A célula de carga utilizada é mostrada na figura 4.9 e suas características são apresentadas a seguir:

- resolução de 0,5 % do fundo de escala (25 N),

- sensibilidade de 2 mV/V ,
- faixa de operação entre 0 e 5000 N ,
- tensão de excitação entre 0,5 e 12 V ,
- precisão de $0,1 \%$ em 2 mV/V (aproximadamente 3 casas decimais),
- exatidão maior que $0,5 \%$,
- erro menor que $0,5 \%$,
- erro repetibilidade de $0,05 \%$.

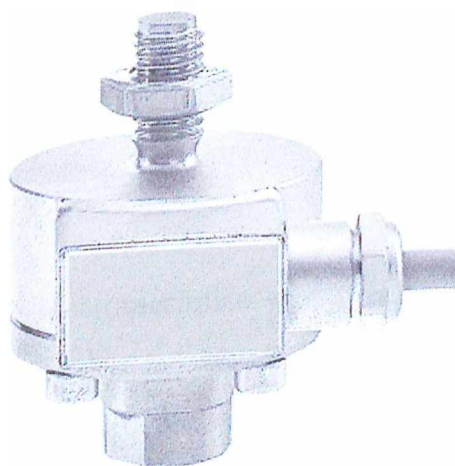


Figura 4.9: Célula de carga utilizada para medição de carga aplicada na indentação.

B - Sensor de deslocamento

Com o objetivo de monitorar o deslocamento linear do penetrador durante o ensaio de indentação, buscou-se no mercado um sensor que atendesse às especificações citadas no capítulo anterior. O sensor escolhido para medição de deslocamento linear foi o transformador diferencial variável linear (LVDT) mostrado na figura 4.10. Este sensor caracteriza-

se por ser capaz de acompanhar rápidas mudanças de deslocamento pois possui uma pequena massa do núcleo, pela ausência de atrito e força desprezível de atuação. Além disso, esse tipo de sensor possui uma resolução infinitesimal de deslocamento.

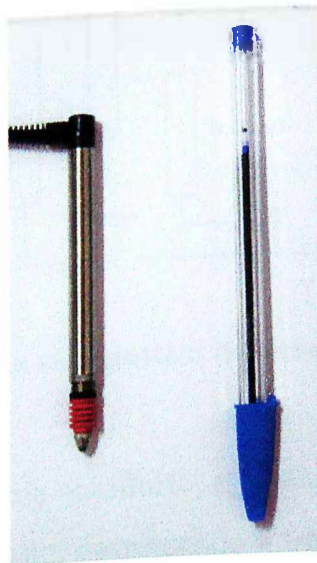


Figura 4.10: Transformador diferencial variável linear (LVDT) posicionado ao lado de uma caneta esferográfica comum.

O LVDT é um transdutor eletromecânico que produz uma saída elétrica proporcional ao deslocamento de um núcleo móvel. A figura 4.11 mostra o arranjo físico de um LVDT. Três bobinas estão igualmente espaçadas sobre uma forma cilíndrica. Um núcleo magnético em forma de haste é colocado axialmente no interior deste conjunto, orientando a trajetória do fluxo magnético. As setas indicam o sentido de deslocamento do núcleo.

Energizando-se o centro ou a bobina primária, entre os pontos 1 e 4, com corrente alternada, é induzida uma tensão nas duas bobinas externas. Na configuração do transformador, as bobinas externas ou secundárias são conectadas opostas em série de modo que as duas tensões induzidas sejam de fases opostas. Assim, a saída resultante do transformador, medida entre os pontos 2 e 3, é a diferença entre essas duas tensões. Para uma posição central do núcleo em forma de haste a tensão de saída é nula. Esta é a posição nula ou ponto de equilíbrio.

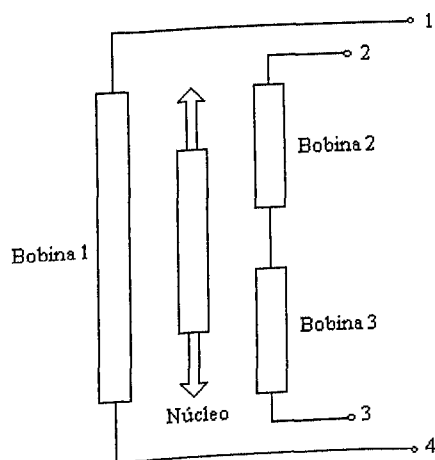


Figura 4.11: Diagrama esquemático do arranjo físico de um LVDT.

Tirando-se o núcleo do ponto de equilíbrio, a tensão induzida aumenta na bobina em cuja direção o núcleo é movimentado, decrescendo a tensão na bobina oposta, produzindo uma tensão diferencial. Com um projeto adequado esta tensão pode variar linearmente com a posição do núcleo. O movimento do núcleo em sentido oposto, além do ponto de equilíbrio, produz uma característica semelhante de tensão linear com a fase deslocada de 180° .

A sensibilidade nominal de um LVDT é geralmente dada em termos da tensão de saída (mV) por tensão de entrada (V) por unidade de deslocamento de núcleo (μm), ou seja, $mV/V/\mu m$. A tensão de saída real para um dado deslocamento do núcleo é determinada multiplicando-se a sensibilidade pelo deslocamento e então multiplicando-se este produto pela tensão de entrada.

O sensor de deslocamento adquirido possui as seguintes características:

- resolução de $0,1 \mu m$,
- faixa de operação (fundo de escala) de $\pm 2 mm$,
- sensibilidade de $192 mV/V/mm$,
- tensão de excitação de $5 V_{rms}$,

- frequência da portadora de 19,4 kHz,
- precisão de 0,0067 % (aproximadamente 4 casas decimais),
- exatidão maior que 0,3 %,
- erro menor que 0,3 %,
- erro de repetibilidade de 0,1 μm .

C - Condicionador de sinais

Após definidos os sensores mais adequados para fornecer sinais elétricos proporcionais às grandezas de carga e deslocamento, a próxima etapa consiste no condicionamento e digitalização daqueles sinais. O processo de condicionamento é composto basicamente pelas etapas de amplificação e filtragem. A amplificação é necessária pois o sinal de saída dos sensores possui uma amplitude muito baixa. Porém, juntamente com o sinal dos sensores poderão existir sinais indesejáveis, como ruídos e interferências. A etapa de filtragem é responsável pela eliminação das componentes espectrais indesejáveis do sinal. A etapa seguinte consiste na digitalização dos sinais dos sensores para que estes estejam prontos para serem recebidos pelo computador.

Após uma busca por opções fornecidas pelo mercado, que possuísse as especificações citadas no capítulo anterior, encontrou-se um condicionador/conversor de sinais capaz de realizar todo o condicionamento do sinal - excitação para transdutores passivos, amplificação, filtragem, digitalização e interface para o computador via porta paralela, em que todos os ajustes necessários são realizados pelo computador através de comandos específicos. O condicionador utilizado está mostrado na figura 4.12.

Um diagrama esquemático do processo de medição utilizado no condicionador de sinais pode ser visto na figura 4.13. Este dispositivo contém quatro amplificadores digitais com frequência portadora em 4.8 kHz para extensômetros (*strain gauges*), transdutores indutivos ou sinais de -10V a +10V para os canais de 0 a 3. Cada canal trabalha com um



Figura 4.12: Condicionador de sinais para os sensores de deslocamento e carga.

conversor A/D separadamente, o que permite a amostragem de até 9600 amostras/segundo em 16 bits. Os conversores A/D são sincronizados para garantir que as medições em todos os canais sejam simultâneas.

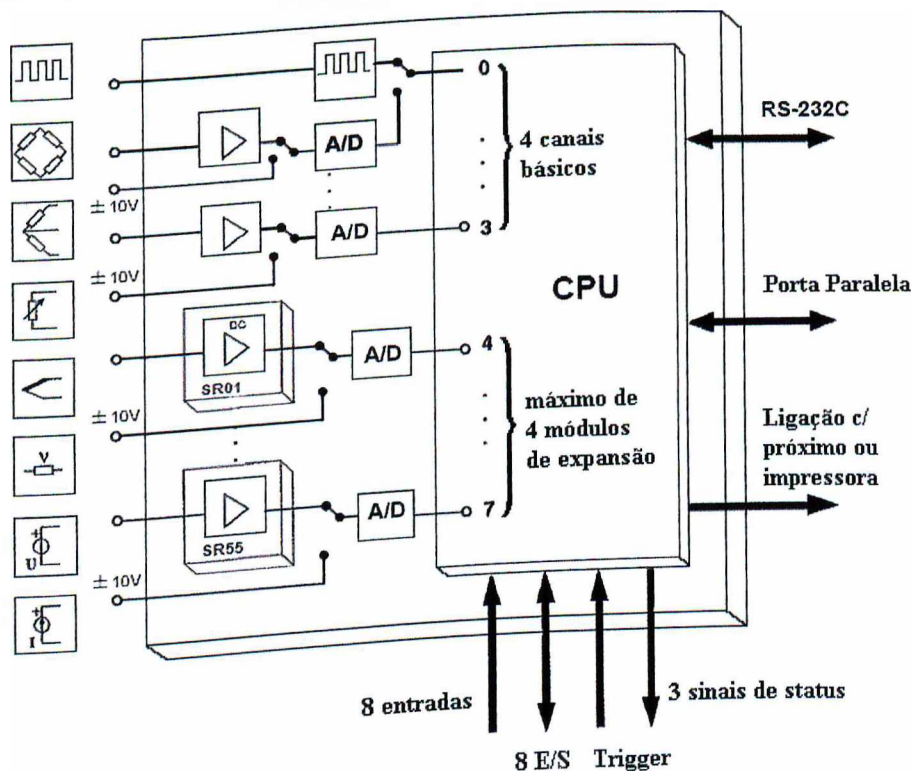


Figura 4.13: Diagrama esquemático do condicionador de sinais.

A célula de carga adquirida pode ser facilmente conectada ao condicionador de sinais pois o mesmo é compatível com sensores resistivos ligados em ponte completa, como pode ser visto no diagrama da figura 4.13. Entretanto, o sinal de saída e a frequência da tensão de excitação do sensor de deslocamento (LVDT) não são compatíveis com este condicionador. A solução encontrada foi utilizar um dispositivo que realize um pré-

condicionamento do sinal do LVDT para que o mesmo seja ajustado aos padrões dos sinais de entrada do condicionador.

A figura 4.14 mostra o pré-condicionador selecionado que realiza a amplificação e a filtragem do sinal do LVDT. A saída deste dispositivo (contínua de 0 a 10 V) é proporcional ao deslocamento detectado e, portanto pode ser ligada diretamente ao condicionador de sinais em sua entrada de $\pm 10 V$.



Figura 4.14: Unidade para pré-condicionamento do sinal do sensor de deslocamento (LVDT).

A comunicação do condicionador de sinais com o computador permite a configuração dos parâmetros dos canais dos transdutores tais como tipos do transdutor, faixas de medição, e valores de calibração; e também configurar os vários parâmetros do condicionador tais como taxas de amostragem, tipos do filtro e frequências de corte. Além disso, a leitura dos sensores pode ser realizada continuamente ou pode ser estabelecida uma quantidade desejada de amostras a cada varredura.

Com estas unidades de condicionamento de sinais pode-se determinar as resoluções efetivas dos sensores de deslocamento e de carga. O sinal do sensor de deslocamento (LVDT) é pré-condicionado e o sinal resultante varia de 9,450 V a 1,465 V (7,985 V), uma vez que a faixa de operação efetiva do sensor é de -2,264 mm a 2,150 mm (4,414 mm). Desta maneira, como a entrada do condicionador de sinais varia de $\pm 10 V$ em 2^{16} níveis de quantização, pode-se estimar uma quantidade efetiva de níveis para o sinal do LVDT igual a 26165. Então, a resolução efetiva para este sinal é obtida dividindo-se 4,414 mm por 26165, o que resulta em $0,1687 \mu m$.

A sensibilidade da célula de carga é de 2 mV/V , porém a entrada do condicionador de sinais é de 3 mV/V em 2^{16} níveis de quantização, que implica numa quantidade efetiva de 43690 níveis. Então, a resolução efetiva para este sinal é obtida dividindo-se 2 mV/V por 43690, o que resulta em $45,78 \mu\text{V/V}$. Como o fundo de escala deste sensor é de 5 kN , então o processo de conversão é capaz de obter uma resolução de $0,114 \text{ N}$. Entretanto, pode-se observar que a resolução da célula de carga é limitada em $0,5 \%$, o que equivale a 25 N .

A figura 4.15 mostra o conjunto completo das unidades de *hardware*.

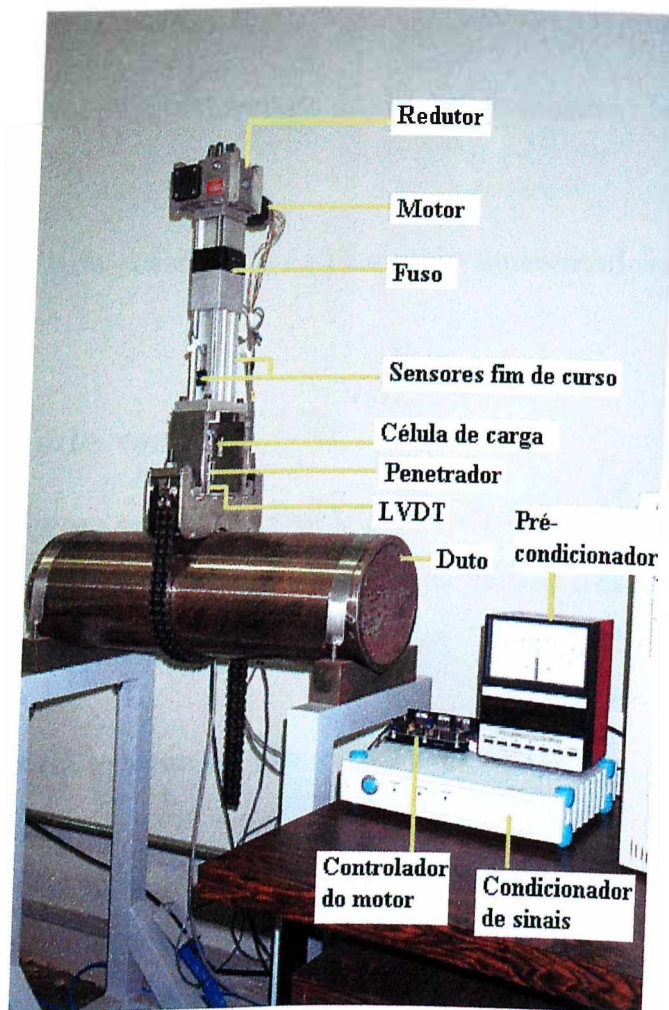


Figura 4.15: Macroindentador Portátil (MIP 2004).

4.3 Unidades de *software*

O Labview 6.0® da *National Instruments* foi escolhido para o desenvolvimento do *software*. Esta ferramenta fornece facilidades na criação de aplicativos de comunicação entre o computador e os dispositivos de *hardware* externos e foi especificamente projetada para criação de aplicativos destinados a controle e interfaceamento de instrumentos.

O aplicativo de *software* foi dividido em duas sub-unidades:

- ensaio, responsável pelo controle do deslocamento do penetrador e aquisição de dados de carga e deslocamento,
- análise, responsável pelo tratamento dos dados do ensaio e obtenção das propriedades mecânicas.

Os diagramas gerais de ensaio e de análise estão apresentados nas figuras 4.16 e 4.17, respectivamente.

4.3.1 Sub-unidade ensaio

Para a realização de um ensaio é necessário o estabelecimento da comunicação com os dispositivos de *hardware*, configurá-los, e definir os parâmetros para o deslocamento do motor e leitura dos sensores.

I - Estabelecimento da comunicação serial e paralela

Conforme descrito anteriormente a unidade de controle do motor comunica-se com o computador através da interface serial e a unidade de condicionamento/conversão de dados dos sinais de carga e deslocamento comunica-se com o computador através da interface paralela. Para que a comunicação possa ser realizada é necessário que o *software* configure corretamente os portais em questão.

A inicialização da porta serial consiste em definir parâmetros como quantidade de bits de dados, taxa de transferência (baud rate), quantidade de bits de parada (stop bits) e

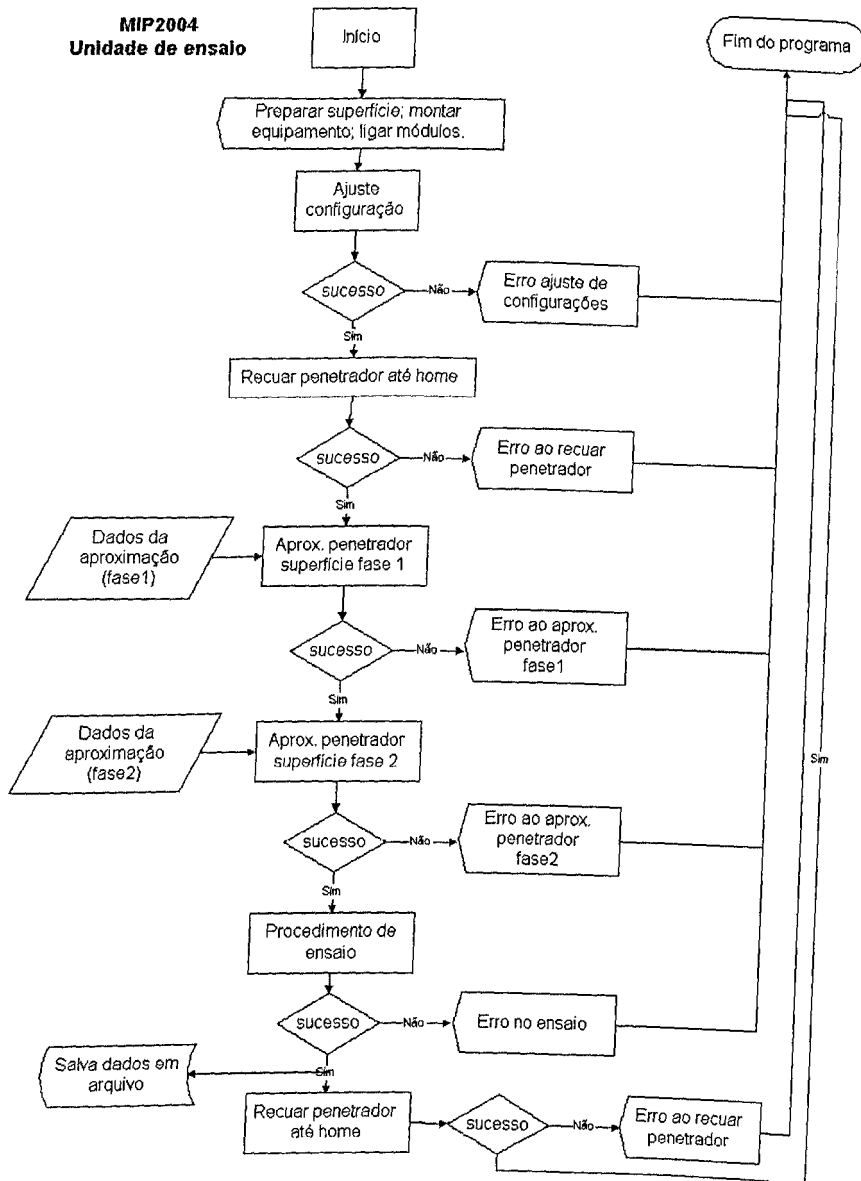


Figura 4.16: Diagrama da unidade de *software* responsável pelo ensaio.

paridade. Estes dados devem ser especificados pelo fabricante do controlador do motor para que seja estabelecida a comunicação entre este e o computador. A figura 4.18 mostra o diagrama Labview[®] responsável para esta tarefa.

Os valores *default* estabelecidos na variável *Dados* são:

- Porta serial: COM1
- Tamanho do *buffer*: 255

**MIP2004
Análise de dados
(Resultados do ensaio)**

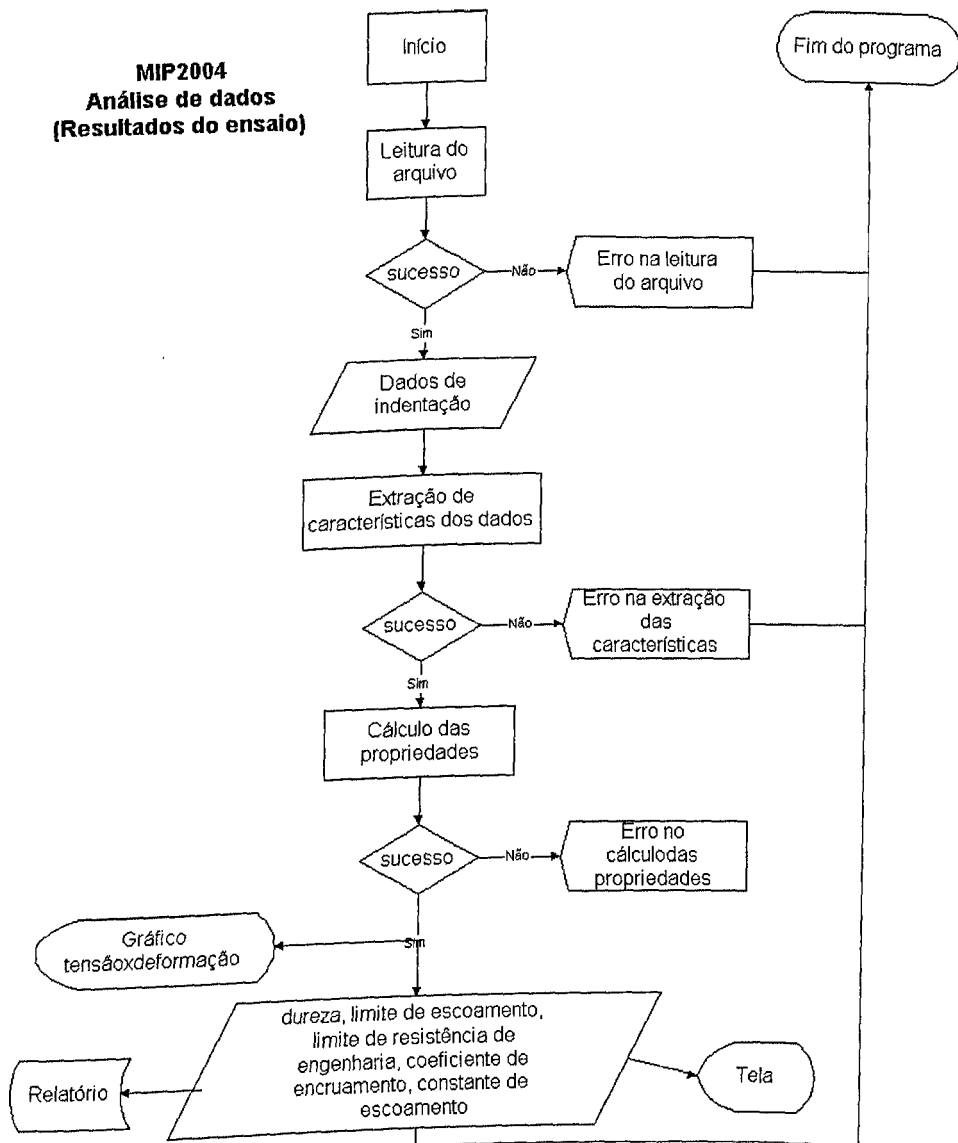


Figura 4.17: Diagrama da unidade de *software* responsável pelos procedimentos de análise.

- Quantidade de bits de dados: 8
- Taxa de transmissão: 9600 baud
- Quantidade de bits de parada: 1
- Paridade: não

Utilizando-se a biblioteca de acesso ao condicionador de sinais fornecida pelo fabricante, é possível inicializar a porta paralela através da função:

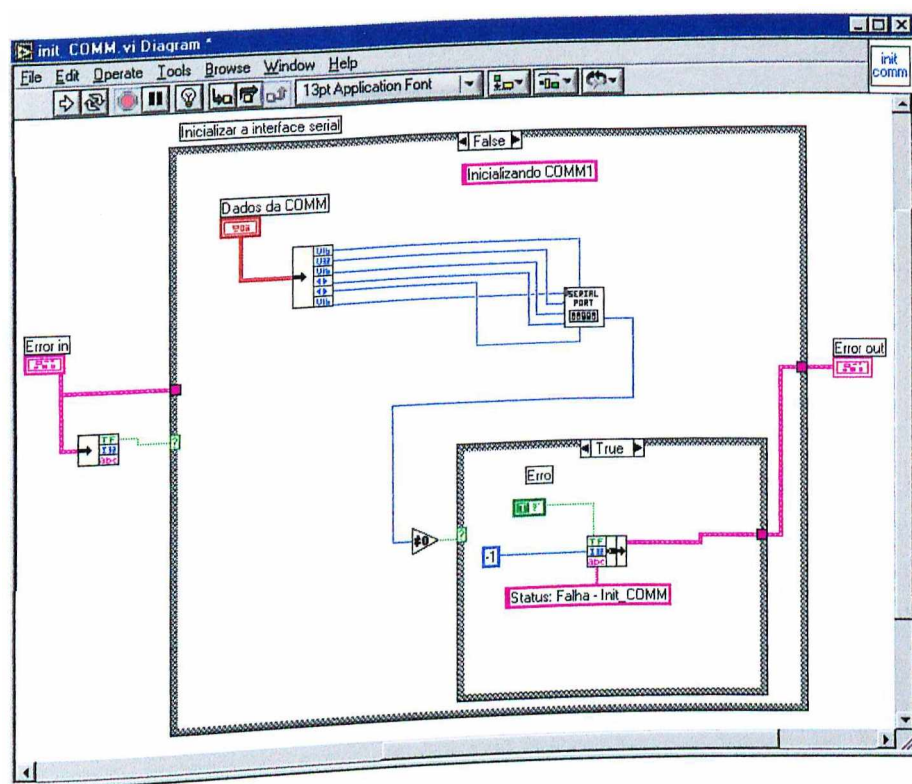


Figura 4.18: Diagrama Labview[®] que realiza a inicialização da comunicação serial.

$$result = InitAll (Port, Mode).$$

O parâmetro de entrada *Port* é definido como LPT1 e o modo de comunicação como EPP (figura 4.19). Se o parâmetro de saída *result* for diferente de zero significa que ocorreu um erro na execução da função.

II - Definição de parâmetros para o motor

Existem vários parâmetros que podem ser definidos para o motor através do envio de seus respectivos comandos via porta serial (figura 4.20).

Alguns dos principais comandos e seus valores *default* para recuo do motor até *home*, por exemplo, são:

- corrente: 2,5 A,
- passos por revolução: 50800,

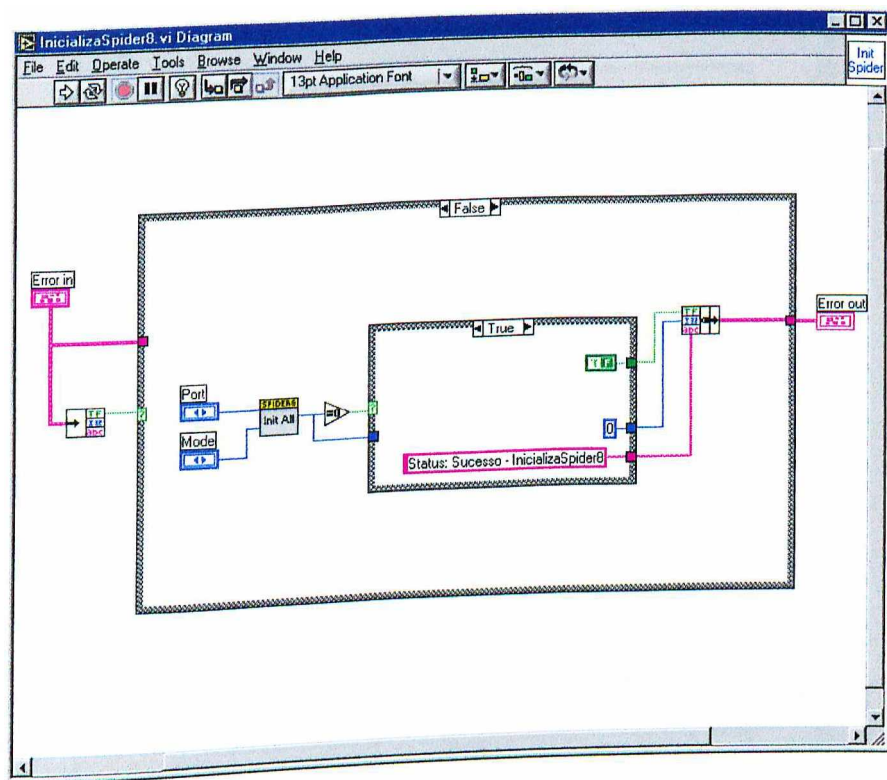


Figura 4.19: Diagrama Labview[®] que realiza a inicialização da comunicação paralela.

- velocidade: $304,8 \text{ mm/min}$,
- aceleração: 182880 mm/min^2 ,
- desaceleração: 182880 mm/min^2 ,
- distância: 30 mm ,
- sensores fim de curso: ativados,
- sentido de movimento: subir.

III - Configuração do condicionador de sinais

Para a configuração do módulo é preciso enviar dois comandos:

$$\text{result} = \text{SetDevSettings}(\text{What}, *Value)$$

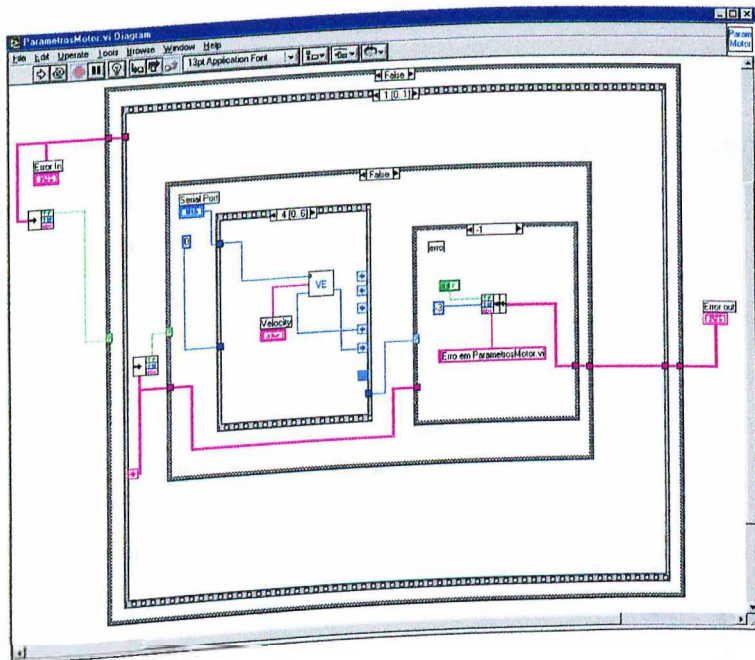
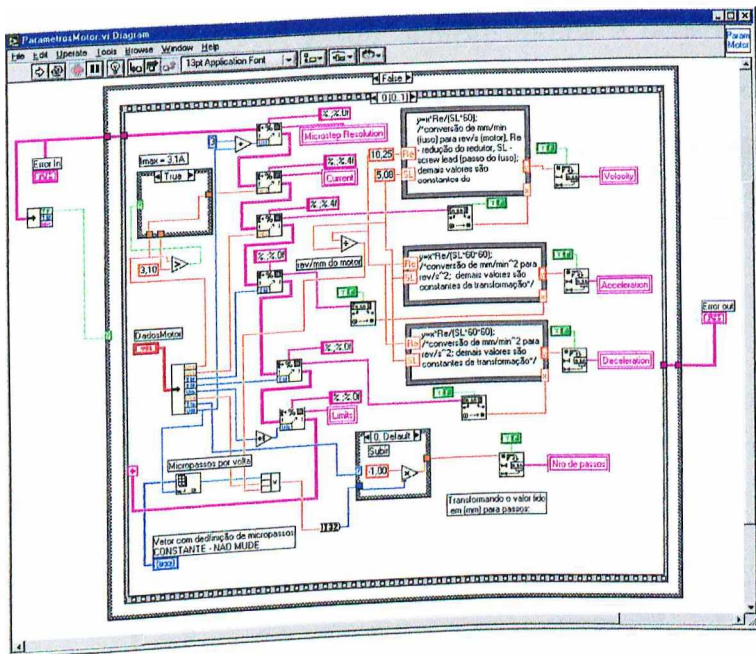


Figura 4.20: Diagrama Labview[®] que realiza a definição dos parâmetros de configuração do motor.

$$result = SaveDevSettings(What).$$

A variável *What* representa qual parâmetro de configuração deve ser definido ou salvo (número de canais, taxa de amostragem, tipo do filtro, frequência do filtro, número, versão e nome do dispositivo). Os valores a serem atribuídos à esta estrutura de dados

estão contidos em *Value*. A variável *result* sempre indica a ocorrência de erro. Estes comandos estão apresentados na figura 4.21 na forma de diagramas do Labview®.

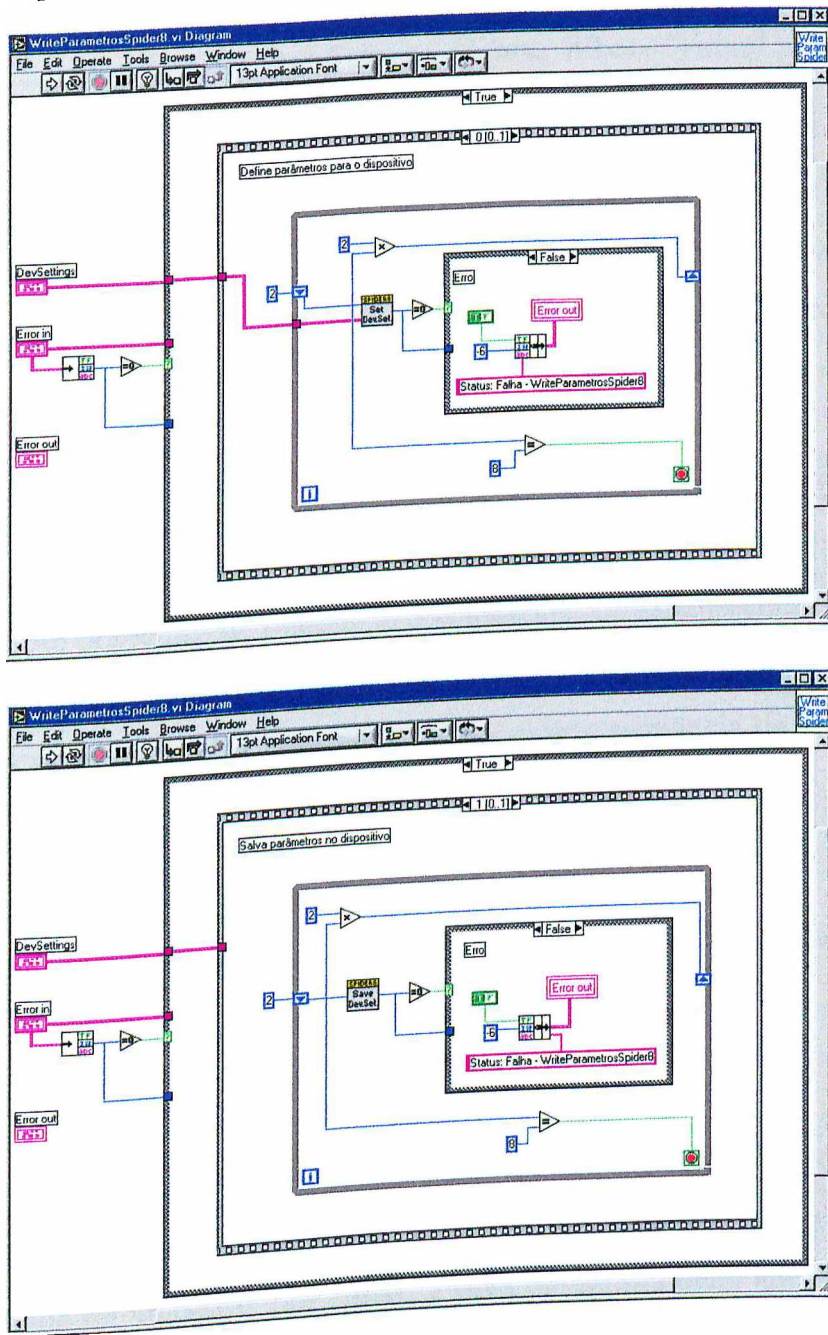


Figura 4.21: Diagrama Labview® que realiza a definição das configurações do condicionador/conversor de sinais.

A função *SetDevSettings* apenas redefine os valores a serem atribuídos à estrutura de parâmetros do módulo. Os dados só são transferidos para o condicionador de sinais

quando o comando *SaveDevSettings* é executado.

De maneira similar, na configuração dos canais utilizam-se as funções:

$$\begin{aligned} result &= SetChanSettings (Chan, What, *Value) \\ result &= SaveChanSettings (Chan, What). \end{aligned}$$

O parâmetro *Chan* define o número do canal a ser configurado, *What* representa qual parâmetro a ser definido (faixa de medição, tipo de canal, nome, canal ativo ou passivo, valor medido, tara e seleção de filtro). Os valores atribuídos aos parâmetros estão contidos em *Value*. Estes comandos estão apresentados na figura 4.22 na forma de diagramas do Labview®.

Para que seja feita uma leitura correta dos sensores é preciso calibrá-los. Isto é feito através do comando $result = DoTara()$ que está apresentado na figura 4.23. Este comando realizará a aquisição dos sinais de referência dos sensores, ou seja, os sinais correspondentes a carga e deslocamento nulos.

A leitura dos sensores é feita utilizando-se a seguinte sequência de comandos (figuras 4.24 e 4.25):

$$\begin{aligned} result &= ACQSetup (*Chan) \\ result &= ACQStart (Num, MeasRate, TrgMode, TrgChan, TrgLevel, TrgEdge, PreTrg) \\ result &= ACQRead (Num, Timeout, *MWBuf) \\ result &= ACQStop(). \end{aligned}$$

A configuração do módulo para aquisição consiste na definição da lista de canais que se desejam ativar para a medição de sinais. Para iniciar o processo de aquisição precisa-se definir a quantidade de amostras por canal, a taxa de amostragem em Hz e as condições para o trigger. É realizada a leitura da quantidade de amostras por canal e os valores são armazenados em uma estrutura. Para finalizar a aquisição utiliza-se a função *ACQStop*. Em cada leitura do sensor são adquiridas 30 amostras e é calculado o valor médio.

Este valor, que representa um sinal de tensão, deve ser convertido para a grandeza física medida. No caso da célula de carga, no qual o sinal é medido em mV/V e deseja-se saber

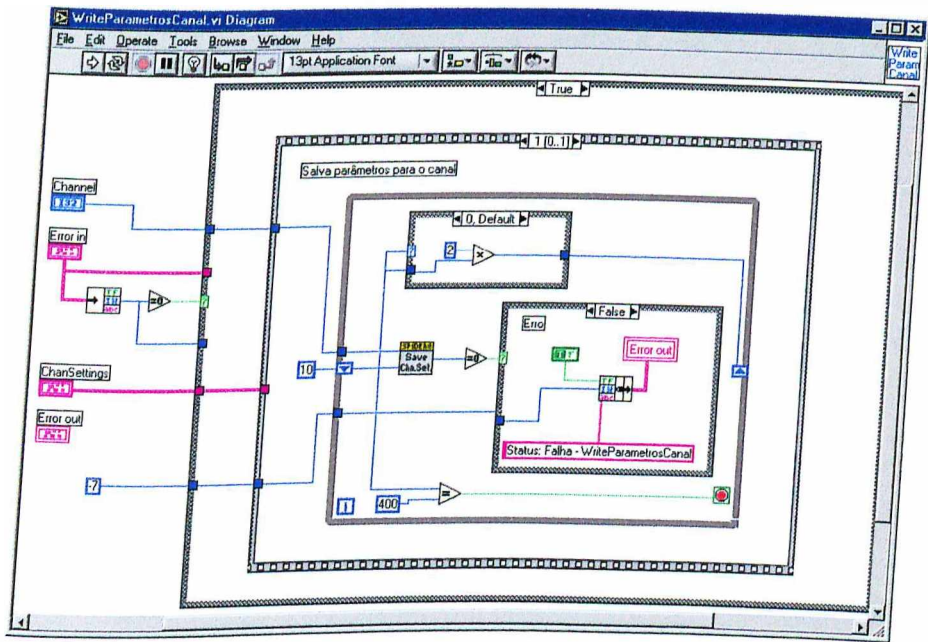
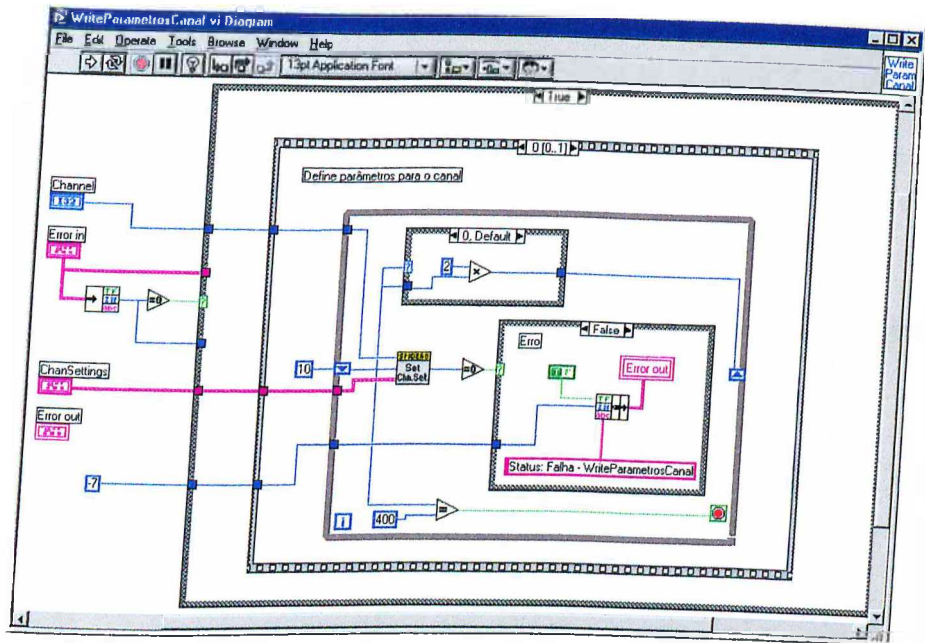


Figura 4.22: Diagrama Labview[®] que realiza a definição das configurações dos canais do condicionador/conversor de sinais.

o valor correspondente em Newton, aplica-se a seguinte regra de três simples (figura 4.26):

$$\text{sensibilidade (mV/V)} \longleftrightarrow \text{fundo de escala (N)}$$

$$\text{valor lido (mV/V)} \longleftrightarrow \text{valor de carga (N)}$$

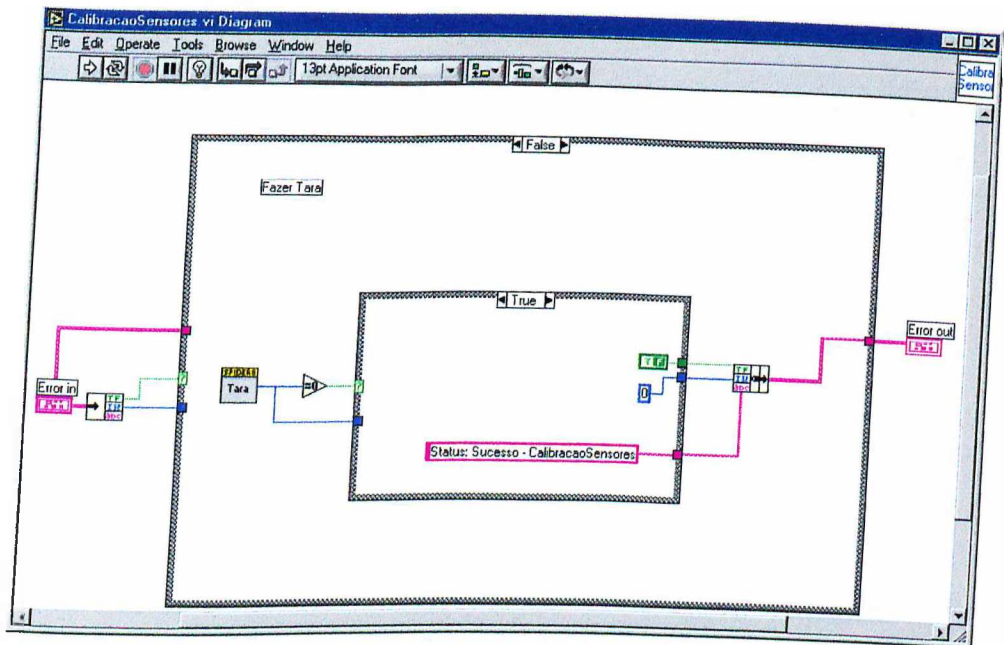


Figura 4.23: Diagrama Labview® que realiza a calibração dos sensores.

Para o sensor de deslocamento, no qual o sinal de saída é medido em V, a regra de três é a seguinte (figura 4.26):

$$\begin{aligned} \text{sensibilidade (V)} &\longleftrightarrow \text{fundo de escala (mm)} \\ \text{valor lido (V)} &\longleftrightarrow \text{valor de deslocamento (mm)} \end{aligned}$$

IV - Sequência de ensaio de macroindentação

A - Instruções iniciais

O ensaio é iniciado com algumas instruções e procedimentos que o operador deve seguir tais como preparar a superfície de ensaio, verificar se as unidades de *hardware* estão energizadas e conectadas ao computador e dar início ao ensaio.

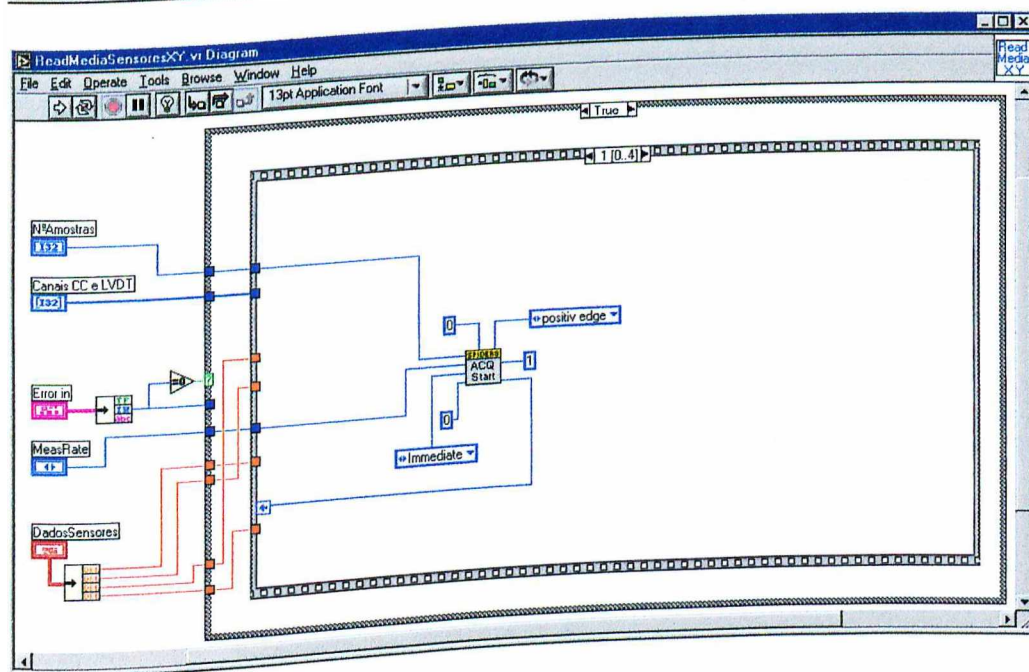
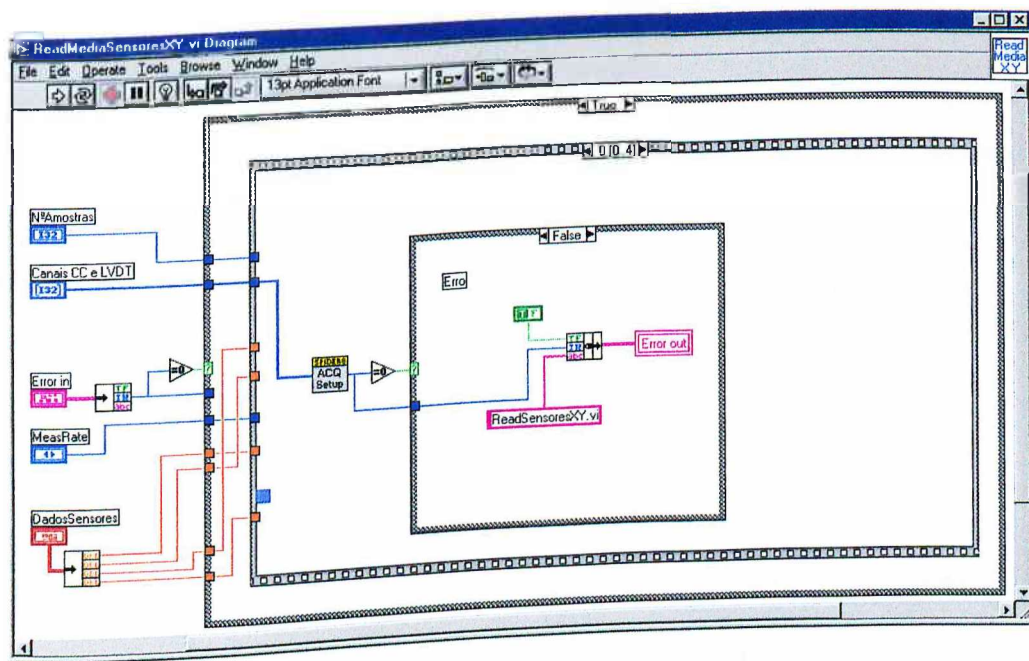


Figura 4.24: Diagramas Labview[®] que realizam os comandos de *setup* e *start* da aquisição dos sinais dos sensores.

B - Ajuste das configurações

O ajuste das configurações das unidades de *hardware* é composto pelas seguintes etapas:

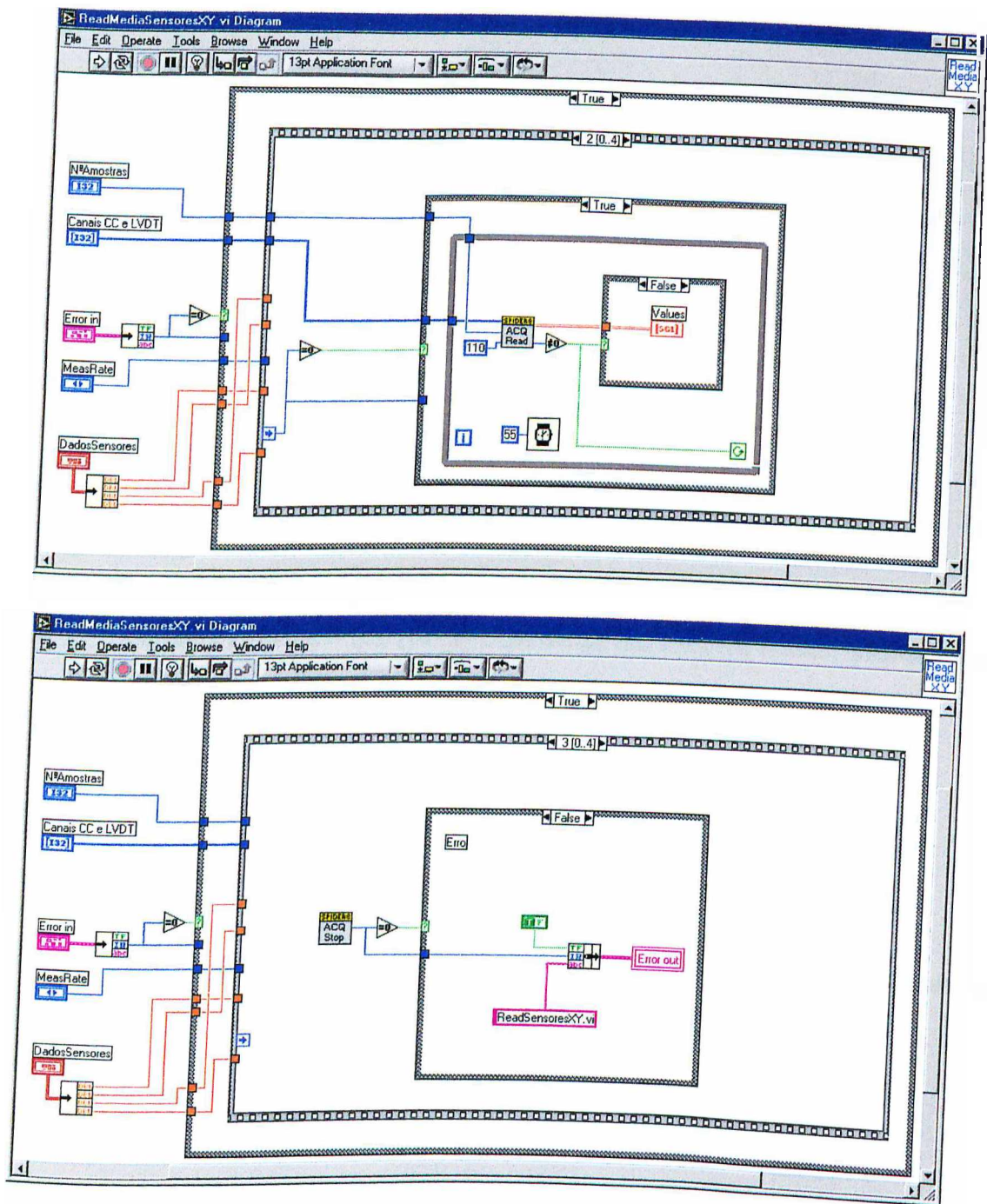


Figura 4.25: Diagramas Labview® que realizam os comandos de *read* e *stop* da aquisição dos sinais dos sensores.

- inicialização da comunicação serial e paralela,
- ajuste de parâmetros iniciais para o motor,

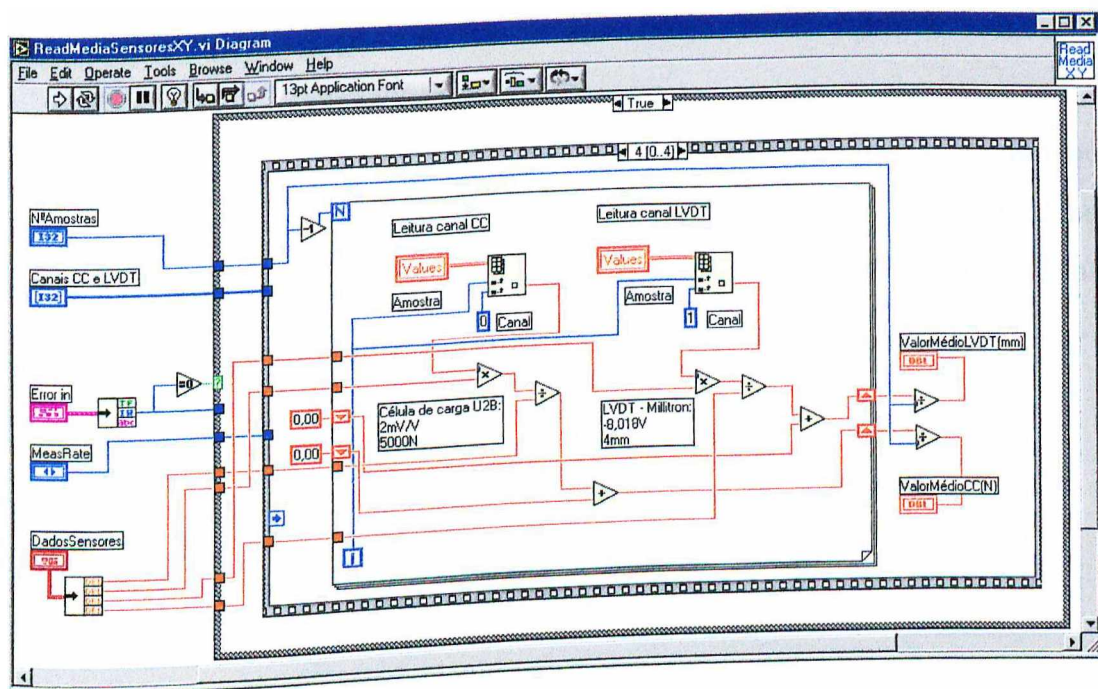


Figura 4.26: Diagrama Labview® que realiza a conversão dos sinais de tensão, lidos dos sensores, em valores de deslocamento (mm) e carga (N).

- configurações dos canais do condicionador de sinais,
- calibração dos sensores.

Para facilitar a operação do equipamento, esta configuração pode ser realizada automaticamente, com parâmetros pré-estabelecidos (*default*).

C - Recuar Penetrador até home

O penetrador é deslocado para a posição "home", o que equivale ao atuador linear totalmente recuado até atingir o fim de curso superior. Este procedimento é realizado para se definir a posição inicial de referência para o ensaio.

D - Detecção da superfície

O processo de detecção da superfície ocorre em 2 fases distintas. Como pode ser visto na figura 4.27, existe uma distância de $1,5\text{ mm}$ entre a ponta do penetrador e a ponta do LVDT. Esta montagem faz com que o LVDT sempre toque a superfície antes do indentador. Assim a aproximação da superfície pode ser feita conforme descrito a seguir.

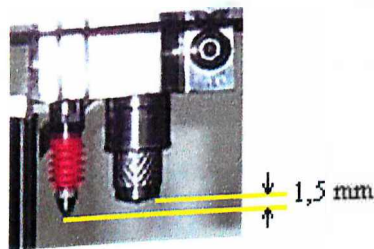


Figura 4.27: Disposição do sensor de deslocamento (LVDT) e do penetrador.

D1 - Fase 1 de aproximação

Nesta etapa, o penetrador é deslocado a uma velocidade de 300 mm/min , em passos de $0,75\text{ mm}$, até que o sensor de deslocamento (LVDT) toque a superfície. Este toque é detectado através do monitoramento do deslocamento. Este deslocamento de $0,75\text{ mm}$, igual a metade da "folga" entre a ponta do LVDT e o penetrador, evita que seja realizado qualquer indentação nesta fase.

D2 - Fase 2 de aproximação

Nesta segunda fase de aproximação o penetrador é deslocado com uma velocidade de 100 mm/min e com passos de $0,001\text{ mm}$, até que o mesmo toque a superfície. Este toque é detectado através do monitoramento da carga. Esta resolução de passos foi definida considerando que ao aproximar o penetrador da superfície, o mesmo poderá indentar o material com uma profundidade de no máximo $0,001\text{ mm}$.

E - O ensaio

E1 - Ajuste dos parâmetros do motor

A subrotina de ajuste de configurações é responsável pela inicialização da porta serial e do controlador do motor, e ajuste dos valores iniciais para os parâmetros do motor (velocidade, aceleração, desaceleração, corrente, definição de micropassos por revolução) e inicialização da porta paralela e configuração do condicionador/conversor de sinais.

E2 - Execução

i - Definição do ponto inicial

Os valores lidos dos sensores, na situação de repouso após os processos acima, com a fase 2 de aproximação completada, serão então utilizados para definir os valores de "zero" para deslocamento e carga.

Estes valores são armazenados nas variáveis *posição inicial* e *carga inicial*, respectivamente, e que definem o ponto inicial P_{t0} da curva carga *versus* deslocamento (figura 4.28).

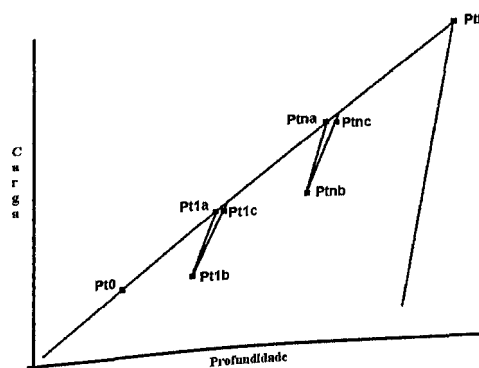


Figura 4.28: Curva característica de um ensaio de macroindentação, destacando os pontos mais importantes para início dos cálculos das propriedades mecânicas.

ii - Carregamento de um ciclo

O carregamento se inicia a partir do ponto P_{t0} da curva da figura 4.28. O motor se movimenta em direção à superfície e se detecta um crescente aumento na carga aplicada e na profundidade de indentação. Estes valores são lidos e o carregamento é interrompido quando a carga aplicada atingir o valor máximo para o ciclo em questão (P_{t1a}).

iii - Descarregamento de um ciclo

O descarregamento se inicia a partir do ponto P_{t1a} da curva da figura 4.28. O motor movimenta-se no sentido contrário, no momento em que detecta-se a diminuição dos valores de carga e deslocamento. Estes valores são lidos durante todo o processo e o mesmo é finalizado quando se atinge a porcentagem de descarregamento desejada (P_{t1b}).

iv - Recarregamento

As seqüências de carregamento de um ciclo (ii) e de descarregamento de um ciclo (iii) repetem-se até que se complete a quantidade de ciclos definida.

v - Descarregamento final

O descarregamento final tem seu início no ponto P_{tf} da figura 4.28. O motor é recuado até que o valor de carga lido aproxime-se de zero (P_{t0}). Ao término do ensaio a interface mostrada na figura 4.29 conterà o gráfico carga *versus* deslocamento completo.

F - Recuo do penetrador

O motor é deslocado para a sua posição inicial (home).

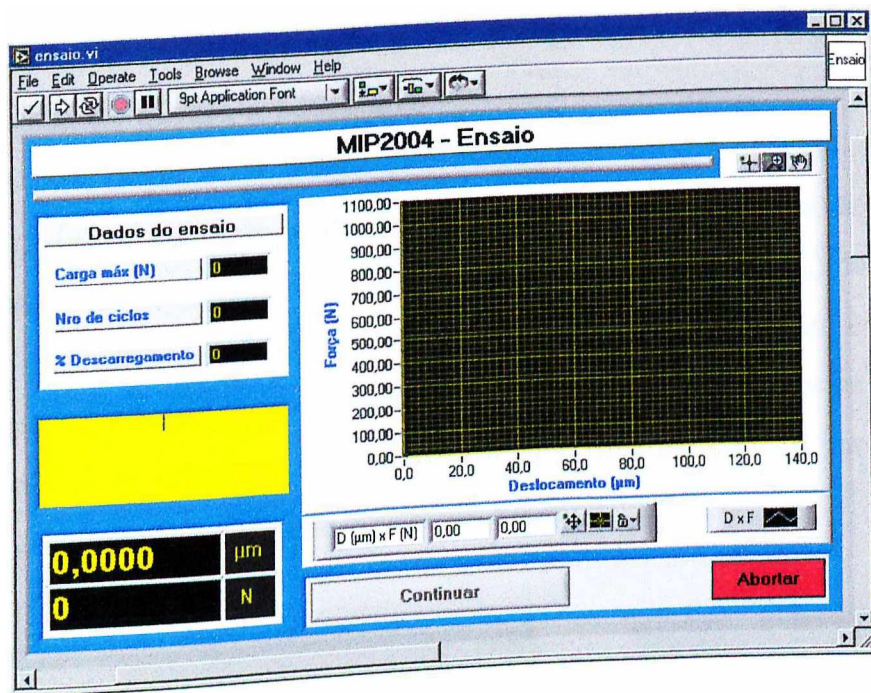


Figura 4.29: Interface final do procedimento do ensaio.

G - Armazenamento dos dados

Os dados armazenados em arquivo, após o ensaio ser completado, são: todos os valores de carga e deslocamento adquiridos durante o ensaio, os pontos nos quais ocorrem inversão do movimento e os dados gerais do ensaio (descrição, data, operador etc).

4.3.2 Sub-unidade análise

Esta sub-unidade realiza a análise dos dados de um ensaio armazenados em arquivo. Esta interface possui dois *tabs*: entrada de dados e análise (figura 4.31).

I - Entrada de dados

A interface de diálogo para seleção do arquivo de dados pode ser vista na figura 4.30. Os dados são lidos do arquivo escolhido e os campos mostrados na interface da figura 4.31 são preenchidos. O gráfico de carga *versus* deslocamento é mostrado novamente e

seus pontos principais de inversão de movimento são extraídos para definir as retas de linearização, conforme mostra a figura 4.28.

A partir da intersecção entre a reta de carregamento total e uma reta de descarregamento/rearregamento referente a um certo ciclo, obtém-se os valores de carga máxima (F) e de profundidade total (h_t). O valor de profundidade plástica (h_p) de um dado ciclo é obtido substituindo-se o valor de carga igual a zero na equação da reta de indentação é obtido substituindo-se o valor de carga igual a zero na equação da reta de indentação para todos os ciclos de indentação serão obtidos os pontos necessários para o cálculo das propriedades mecânicas, conforme apresentado no capítulo 2.

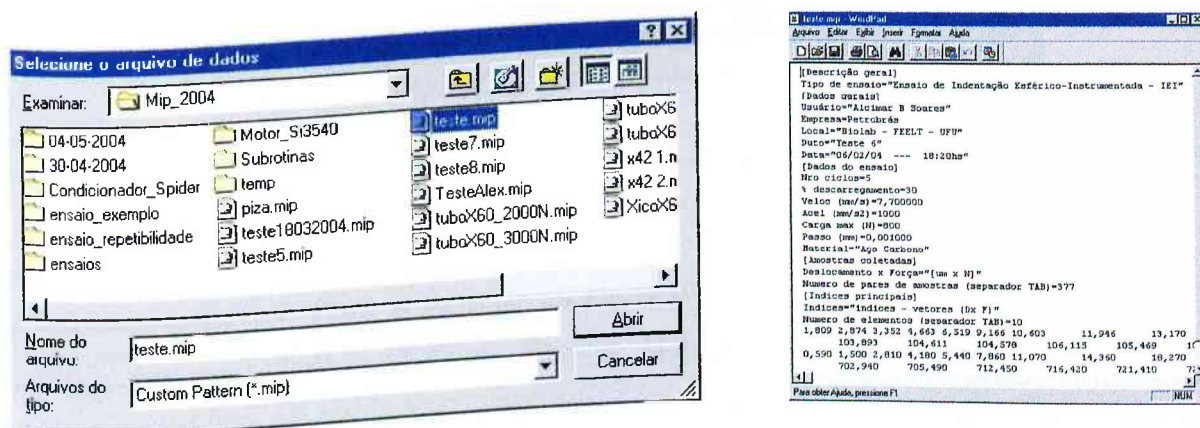


Figura 4.30: Interface de seleção de arquivo e exemplo de arquivo de dados do ensaio.

II - Análise

A definição das constantes a serem utilizadas para os cálculos das propriedades mecânicas deve ser realizada antes do cálculo das mesmas. Os valores a serem definidos são: módulo de elasticidade da amostra, módulo de elasticidade da esfera, diâmetro da esfera, sensibilidade à taxa de deformação e coeficiente de deformação do material.

As equações para cálculo das propriedades mecânicas estão descritas no capítulo 2. Neste aplicativo as subrotinas de análise são responsáveis pelo cálculo de cada uma das propriedades mecânicas. A primeira a ser calculada é a deformação verdadeira, descrita no capítulo 2 pela equação 2.5. Como pode ser visto, esta propriedade depende do valor

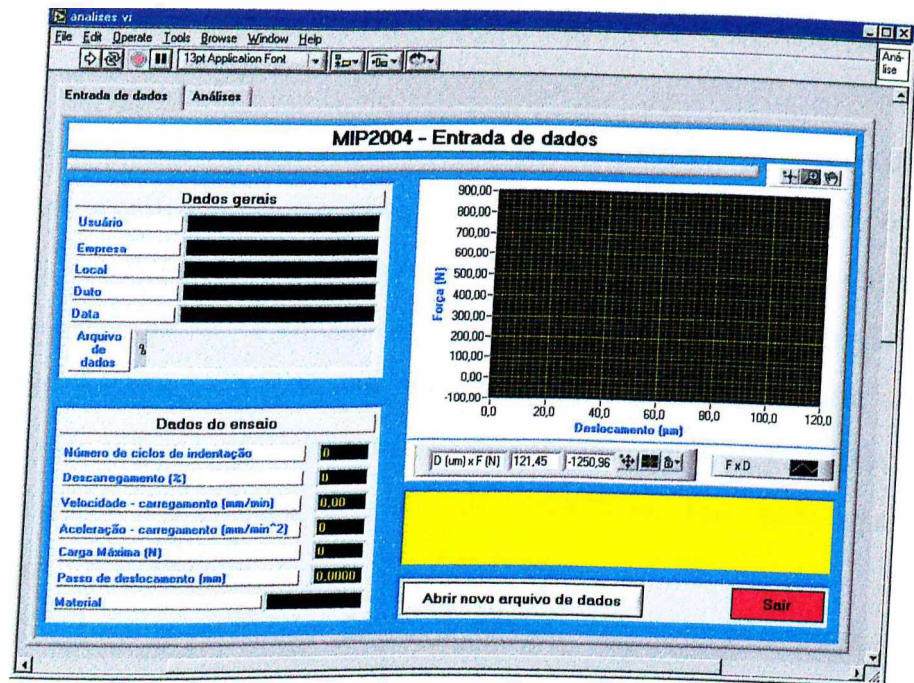


Figura 4.31: Interface do procedimento de análise - entrada de dados.

do diâmetro plástico. Para a solução da equação 2.7 necessita-se empregar um método numérico (iterativo). O método de Newton Raphson foi escolhido para calcular todas as raízes da equação que estiverem dentro de um intervalo selecionado. Para cada valor de carga máxima (F) e profundidade plástica (h_p), referente a um ciclo de indentação, obtém-se um valor para o diâmetro plástico (d_p). As demais variáveis são fornecidas pelo usuário. Então deve-se obter o valor da deformação para cada valor de diâmetro plástico.

A tensão verdadeira é calculada a partir da equação 2.6. Além dos valores conhecidos de diâmetro plástico e força máxima, para cada ciclo do ensaio, necessita-se do valor de δ , um parâmetro que depende da compliância do equipamento e da tensão de indentação. O cálculo de δ (equação 2.8), por sua vez, depende do cálculo de τ (equação 2.11), δ_{max} (equação 2.10) e ϕ (equação 2.9), e este último depende do valor de tensão verdadeira. A estratégia utilizada foi estimar um valor inicial para δ e assim calcular o valor inicial de tensão, para então calcular ϕ , levando-se em consideração a tensão encontrada; com este valor pode-se obter o novo valor de δ , que é comparado com a estimativa inicial. Caso o erro entre estes valores seja menor do que uma tolerância (0,0001), a iteração é

finalizada e o valor final será o valor da tensão verdadeira. Caso contrário, inicia-se uma nova iteração.

Os cálculos descritos resultam, para cada ciclo de indentação, em valores de tensão verdadeira e de deformação verdadeira, o que possibilita a construção do gráfico tensão *versus* deformação. Esta curva segue a equação 2.4, da qual podem-se obter os valores do coeficiente de resistência (K) e do expoente de encruamento (n). Aplicando-se o logaritmo em ambos lados da equação 2.4, ou seja, linearizando-a, podem-se ajustar os pontos $\log \sigma_v$ e $\log \epsilon_v$ a uma reta cujos coeficientes serão a intersecção $\log K$ e a inclinação n .

O próximo passo é o cálculo do limite de resistência, dado pela equação 2.12, que depende apenas dos valores de K e n já encontrados.

O limite de escoamento (início da curva tensão *versus* deformação) é descrito pela equação 2.15, que tem como incógnita o valor do parâmetro de teste do material (A). Este parâmetro pode ser encontrado a partir da equação 2.14, mas primeiramente é necessário obter o diâmetro total para cada valor de profundidade total (equação 2.13). Com os pontos de carga máxima (F) e diâmetro total (d_t) pode-se linearizar a equação 2.14. Aplicando-se um algoritmo de ajuste de pontos a uma reta, podem-se ajustar os pontos $\log \left(\frac{F}{d_t^2} \right)$ e $\log \left(\frac{d_t}{D} \right)$ e obter os coeficientes de intersecção $\log A$ e inclinação $m-2$. Assim, substituindo o valor de A na equação 2.15, obtém-se o limite de escoamento.

O cálculo da dureza Brinell depende da carga máxima aplicada durante o ensaio e do diâmetro final da impressão. Entretanto, este último valor pode ser substituído pelo diâmetro plástico referente ao último ciclo de descarregamento.

Observa-se assim que a partir dos valores obtidos no ensaio (todos os valores de carga e deslocamento, carga máxima, deslocamento máximo e deslocamento mínimo para cada ciclo) o aplicativo em questão é capaz de calcular as propriedades mecânicas do material ensaiado (limite de escoamento, limite de resistência, dureza, expoente de encruamento e coeficiente de resistência). Os resultados são mostrados na interface de análise (figura 4.32).

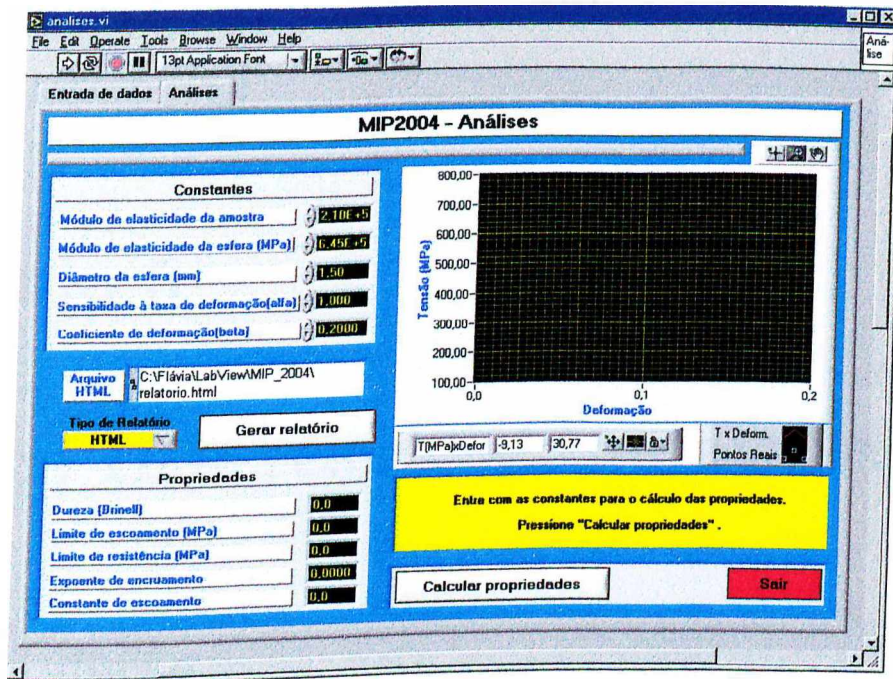


Figura 4.32: Interface do procedimento de análise - obtenção das propriedades.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a descrição do sistema de *hardware* utilizado e o desenvolvimento do sistema de *software* para o equipamento de macroindentação instrumentada. Foram detalhadas as subrotinas que compõem o processo de ensaio e de análise dos dados obtidos. Com o equipamento desenvolvido, foram realizados ensaios em diferentes amostras de materiais. Os resultados gráficos e as propriedades encontradas são descritos no capítulo seguinte.

Capítulo 5

Ensaaios IEI: resultados e avaliações

5.1 Introdução

Concluídas todas as etapas de projeto, construção e avaliações preliminares, iniciou-se o ciclo de ensaios IEI em laboratório para analisar os resultados obtidos pelo equipamento na avaliação de dois tipos de aço, e assim validar a metodologia adotada no desenvolvimento deste projeto. Os materiais utilizados foram caracterizados através do uso de técnicas tradicionais, conforme descrito no item 5.2. Os resultados de ensaios de dureza e de tração em amostras daqueles materiais serão utilizados para avaliar de maneira comparativa os resultados obtidos através de ensaios IEI.

Esta fase de experimentos utilizou os seguintes materiais: aço X42 e aço X60. Estes são os materiais que compõem as amostras de dutos fornecidas pela Petrobras. A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios dos mesmos e, conforme descrito, estes serão confrontados com os valores obtidos em ensaios de tração.

5.1.1 Ensaio IEI em aço X42

A figura 5.1 mostra a etapa de configuração dos parâmetros utilizados para ensaio de uma amostra de aço X42.

O ensaio foi realizado conforme descrito no capítulo 4. Os parâmetros definidos para o mesmo foram:

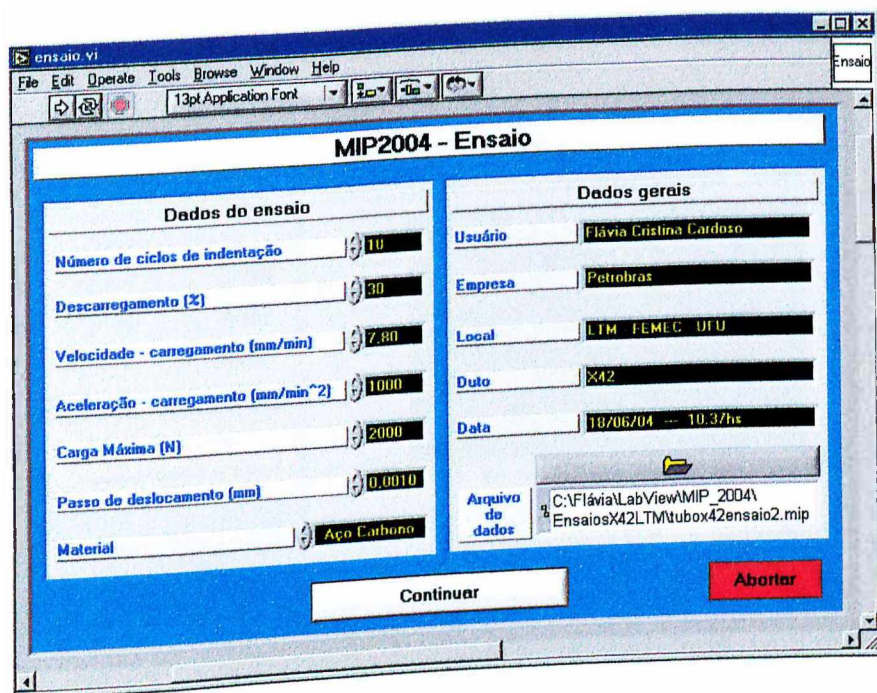


Figura 5.1: Ensaio de macroindentação no aço X42 - entrada de dados para ensaio.

- número de ciclos de indentação: 10
- porcentagem de descarregamento: 30
- velocidade de carregamento: $7,8 \text{ mm/min}$
- aceleração de carregamento: 1000 mm/min^2
- carga máxima: 2000 N
- passo de deslocamento: $0,001 \text{ mm}$
- dados gerais do ensaio: nome, empresa, local, duto, data e arquivo onde serão gravados os dados.

A figura 5.2 mostra a situação final do ensaio. A curva reflete corretamente a resposta esperada para o experimento, com um aumento linear na força de reação do material à medida que a profundidade de indentação aumenta. Os ciclos de descarregamento/re-carregamento também mostram uma boa linearidade, com a quase inexistência de histerese.

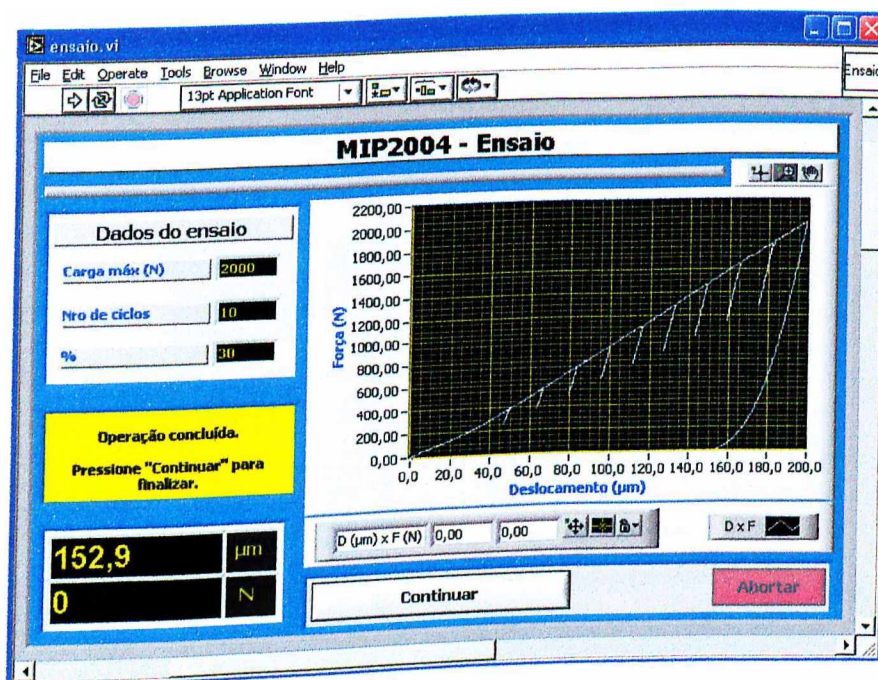


Figura 5.2: Ensaio de macroindentação no aço X42 - situação final do ensaio.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram as interfaces de análises dos dados obtidos do ensaio. Na figura 5.5 pode ser vista a amostra de aço X42 após vários ensaios de macroindentação.

A figura 5.3 mostra o gráfico de carga *versus* deslocamento juntamente com seu ajuste de retas, tanto para o carregamento total quanto para os descarregamentos. As constantes atribuídas para cálculo das propriedades mecânicas deste material foram:

- módulo de elasticidade do material: 210.000 MPa
- módulo de elasticidade da esfera: 650.000 MPa
- sensibilidade à taxa de deformação: 1,2
- coeficiente de deformação: 0,2285

A figura 5.4 mostra estas constantes (dados de entrada), o gráfico de tensão *versus* deformação e as propriedades mecânicas obtidas:

- Dureza Brinell: 213

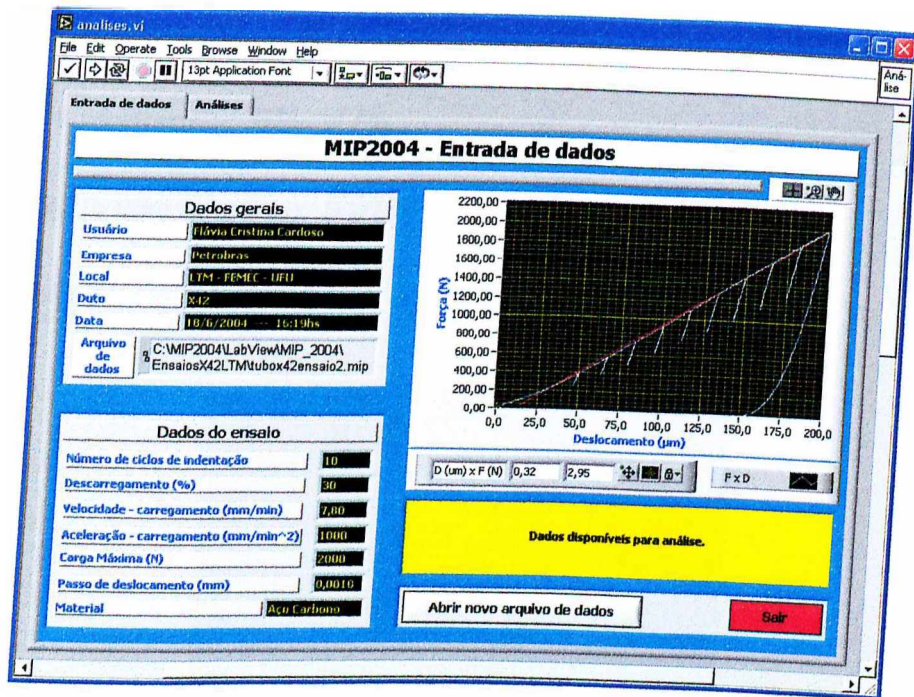


Figura 5.3: Ensaio de macroindentação no aço X42 - dados pré-processados para análise.

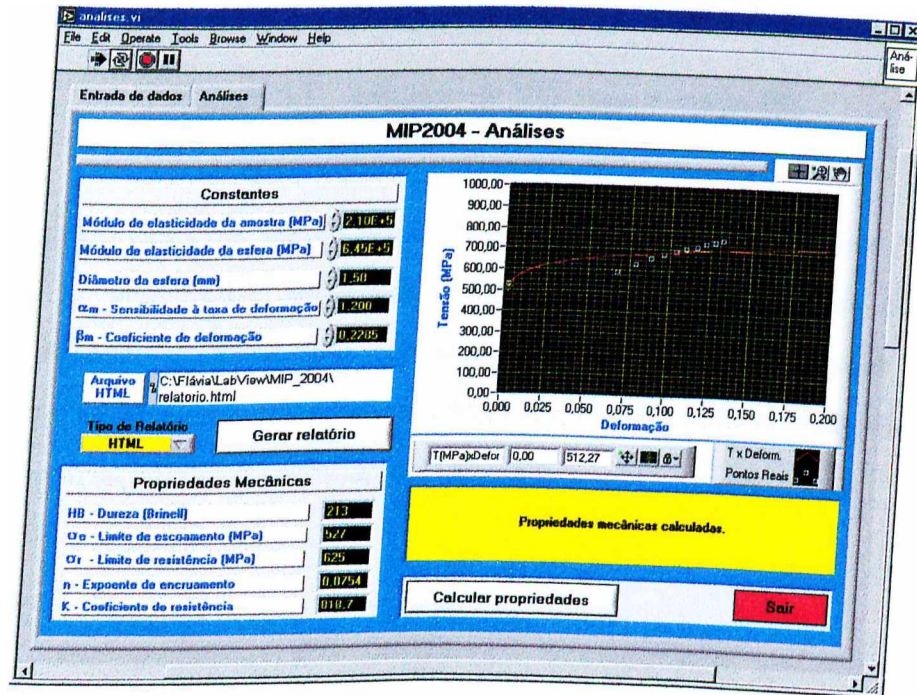


Figura 5.4: Ensaio de macroindentação no aço X42 - resultados do ensaio (análise completa).

- Limite de escoamento: 527 *MPa*
- Limite de resistência: 625 *MPa*
- Expoente de encruamento: 0,0754
- Coeficiente de resistência: 818,7 *MPa*

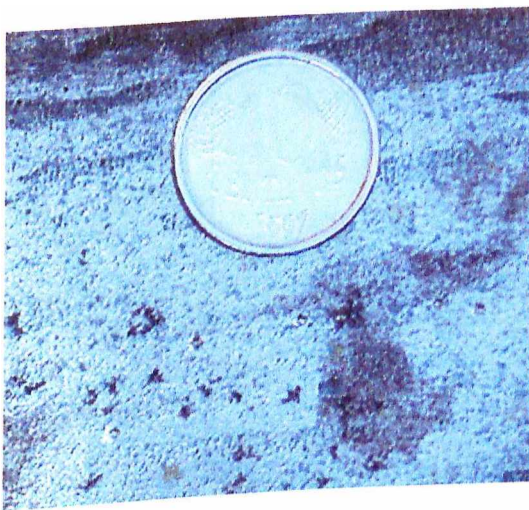


Figura 5.5: Amostra de X42 após o ensaio IEI.

Além do ensaio descrito, foram ainda realizados mais quatro ensaios com as mesmas características de velocidade, quantidade de passos de deslocamento, porcentagem de deslocamento e carga máxima. As constantes adotadas também foram as mesmas do ensaio anterior e as propriedades obtidas para cada ensaio, suas médias, desvios padrão e coeficientes de variação são mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de macroindentação com o aço X42.

Propriedades	Dureza	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência de engenharia [MPa]	Expoente de Encruamento (n)	Coefficiente de Resistência (K) [MPa]
X42	213	527	625	0,0754	818,7
	211	530	618	0,0717	801,4
	214	531	628	0,0753	823,2
	214	518	631	0,0821	840,9
	211	514	630	0,0838	842,4
	Média	213	524	626	0,0776
Desvio Padrão	1,5	7,6	5,2	0,0051	17,0
Coef. Variação	0,0071	0,0155	0,0083	0,0757	0,0226

5.1.2 Ensaio IEI em aço X60

A figura 5.6 mostra a interface de configuração dos parâmetros utilizados para ensaio de uma amostra de aço X60.

O ensaio foi realizado conforme descrito no capítulo 4. Os parâmetros definidos para o mesmo foram:

- número de ciclos de indentação: 10
- porcentagem de descarregamento: 30
- velocidade de carregamento: $7,8 \text{ mm/min}$
- aceleração de carregamento: 1000 mm/min^2
- carga máxima: 2000 N
- passo de deslocamento: $0,001 \text{ mm}$

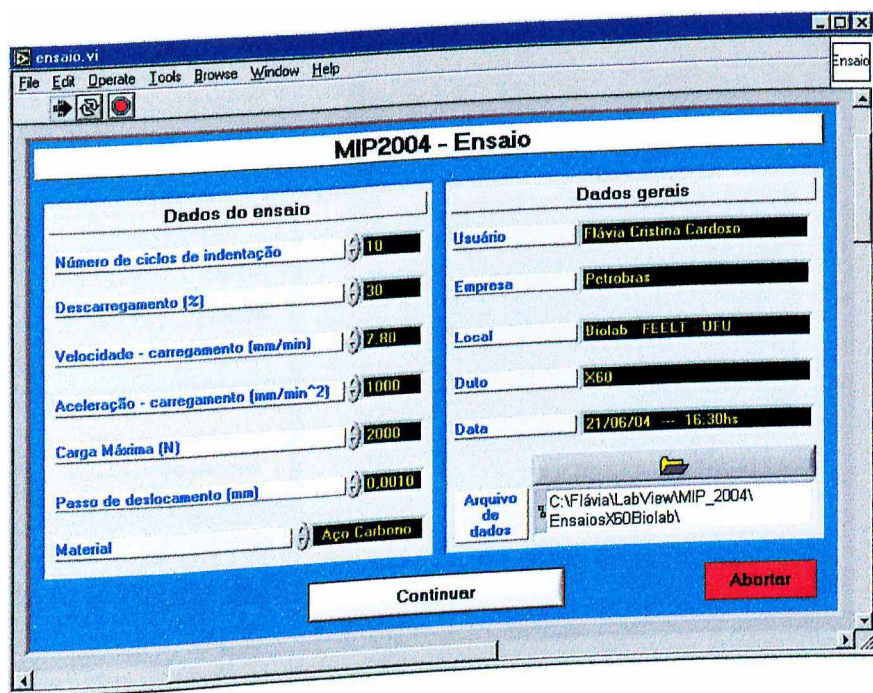


Figura 5.6: Ensaio de macroindentação no aço X60 - entrada de dados para ensaio.

- dados gerais do ensaio: nome, empresa, local, duto, data e arquivo onde são gravados os dados.

A figura 5.7 mostra a situação final do ensaio. A curva reflete corretamente a resposta esperada para o experimento, com um aumento linear na força de reação do material à medida que a profundidade de indentação aumenta. Os ciclos de descarregamento/re-carregamento também mostram uma boa linearidade, com a quase inexistência de histerese.

As figuras 5.8 e 5.9 mostram as interfaces de análises dos dados obtidos do ensaio. Na figura 5.10 pode ser vista a amostra de aço X60 após vários ensaios de macroindentação.

A figura 5.8 mostra o gráfico de carga *versus* deslocamento juntamente com seu ajuste de retas, tanto para o carregamento total quanto para os descarregamentos. As constantes atribuídas para cálculo das propriedades mecânicas deste material foram:

- módulo de elasticidade do material: 210.000 MPa
- módulo de elasticidade da esfera: 650.000 MPa

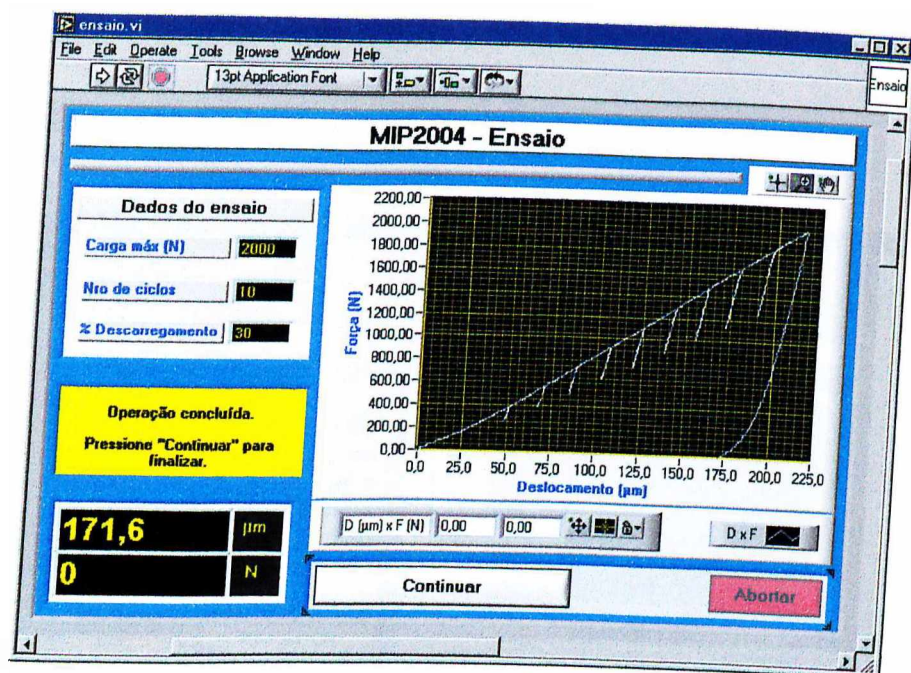


Figura 5.7: Ensaio de macroindentação no aço X60 - situação final do ensaio.

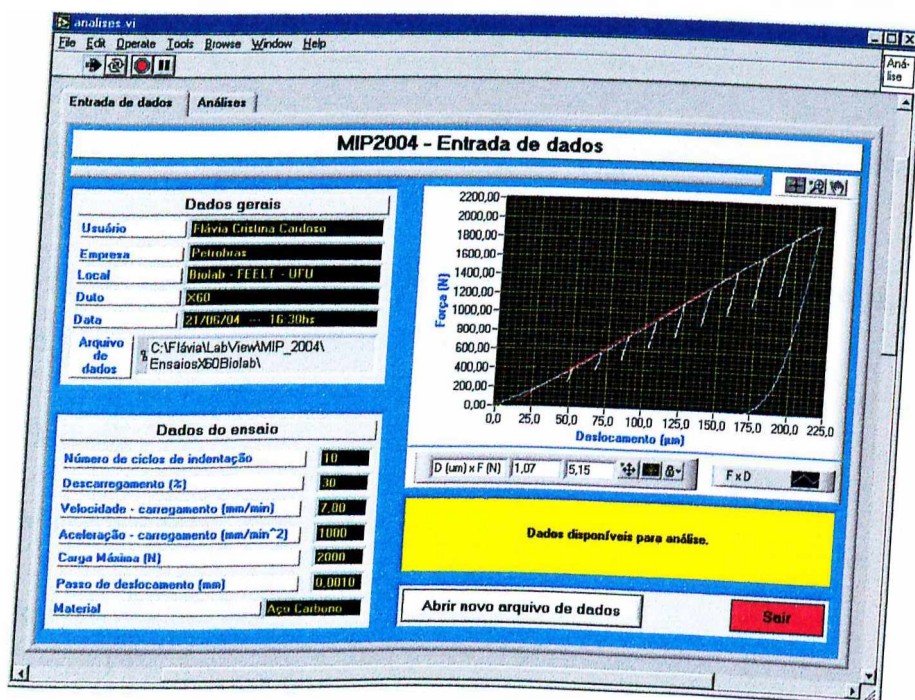


Figura 5.8: Ensaio de macroindentação no aço X60 - dados pré-processados para análise.

- sensibilidade à taxa de deformação: 1,2
- coeficiente de deformação: 0,2285



Figura 5.9: Ensaio de macroindentação no aço X60 - resultados do ensaio (análise completa).

Na figura 5.9 são mostradas estas constantes, o gráfico de tensão *versus* deformação e também as propriedades mecânicas obtidas:

- Dureza Brinell: 196
- Limite de escoamento: 476 MPa
- Limite de resistência: 580 MPa
- Expoente de encruamento: 0,0819
- Coeficiente de resistência: 772,8 MPa

Além do ensaio descrito, foram ainda realizados mais quatro ensaios com as mesmas características de velocidade, quantidade de passos de deslocamento, porcentagem de



Figura 5.10: Amostra de X60 após o ensaio IEL.

deslocamento e carga máxima. As constantes adotadas também foram as mesmas do ensaio anterior e as propriedades obtidas para cada ensaio, suas médias, desvios padrão e coeficientes de variação são mostradas na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados dos ensaios de macroindentação com o material X60.

Propriedades	Dureza	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência de engenharia [MPa]	Expoente de Encruamento (n)	Coefficiente de Resistência (K) [MPa]
X60	197	475	584	0,0837	780,7
	196	476	580	0,0819	772,8
	199	474	591	0,0870	796,5
	205	492	606	0,0837	811,1
	198	477	590	0,0850	792,1
	Média	199	479	590	0,0843
Desvio Padrão	3,5	7,5	9,9	0,0019	14,8
Coef. Variação	0,0177	0,0156	0,0168	0,0224	0,0187

5.2 Ensaaios convencionais

Amostras dos materiais ensaiados com o equipamento de macroindentação construído foram também submetidos a ensaios de tração uniaxial e de dureza, ambos realizados nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. A amostra de duto aço X60 com diâmetro de 200 mm e espessura de 13 mm foi fornecida pela Petrobras. A figura 5.11 apresenta um dos 5 corpos de prova retirados da amostra, seguindo os procedimentos e dimensões estabelecidas pela norma API 5L (API-5L, 2000). Ressalta-se ainda que outros segmentos foram retirados para a realização de ensaios de indentação, metalográficos e de composição química.

Além do X60, 5 amostras foram retiradas de dutos confeccionados no aço X42 que também foram testadas. Estes dutos possuem espessura de 8 mm e diâmetro de 508 mm. Como neste caso, o duto tinha parede menos espessa, foram confeccionados corpos de prova de seção retangular, obedecendo também à norma API 5L (figura 5.11).

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios de tração, com capacidade 250 kN. Os ensaios de macrodureza foram realizados em um durômetro universal com carga de 30 Kgf. A composição química foi analisada através de espectroscopia de absorção atômica.

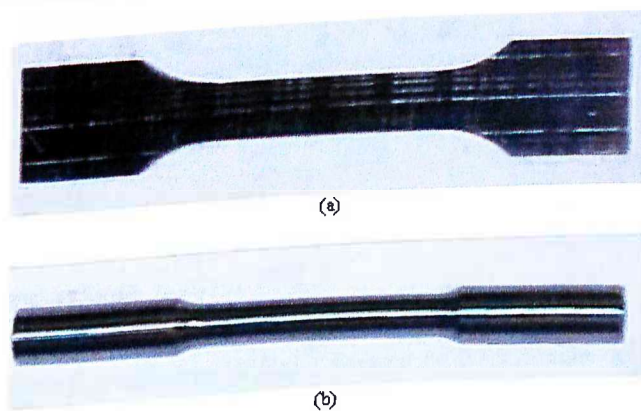


Figura 5.11: Corpos de prova de aço X42 (a) e aço X60 (b), confeccionados segundo procedimentos estabelecidos pela norma API 5L.

Todas as amostras foram submetidas a ensaios de dureza e os valores médios obtidos

são apresentados na tabela 5.3. O valor médio encontrado para o aço X42 foi de 193HB30 com desvio padrão de 3, e para o aço X60 foi obtido um valor médio de 188HB30 com desvio padrão de 16.

Os resultados de tração das 5 amostras dos dois tipos de materiais são apresentados na figura 5.12. Os aços estudados apresentam limites de escoamento definido e deformação plástica significativa até a ruptura. Os valores de limite de escoamento e limite resistência plástica significativa até a ruptura. Os valores de limite de escoamento e limite resistência obtidos para os aços X42 e X60 estão apresentados na tabela 5.3. Esses valores de propriedades mecânicas são considerados aceitáveis para os aços em questão, pois os intervalos tolerados para essas propriedades são relativamente amplos, segundo a norma API 5L (tabela 5.4).

Tabela 5.3: Resultados de dureza Brinell (HB30) medidos em durômetro universal e dos limites de escoamento e de resistência (de engenharia e verdadeiro) medidos através de ensaios de tração.

Material	Dureza Brinell		Limite de Escoamento [MPa]		Limite de Resistência de engenharia [MPa]		Limite de Resistência verdadeiro [MPa]	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
X42	193	3	490	12	595	13	720	28
X60	188	16	481	9	573	6	656	14

Tabela 5.4: Valores de propriedades mecânicas do aços X42 e X60, segundo a norma API 5L, para requisitos estabelecidos para o nível PSL2.

Material	Limite de Escoamento [MPa]		Limite de Resistência de engenharia [MPa]	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
X42	290	496	414	758
X60	414	565	517	758

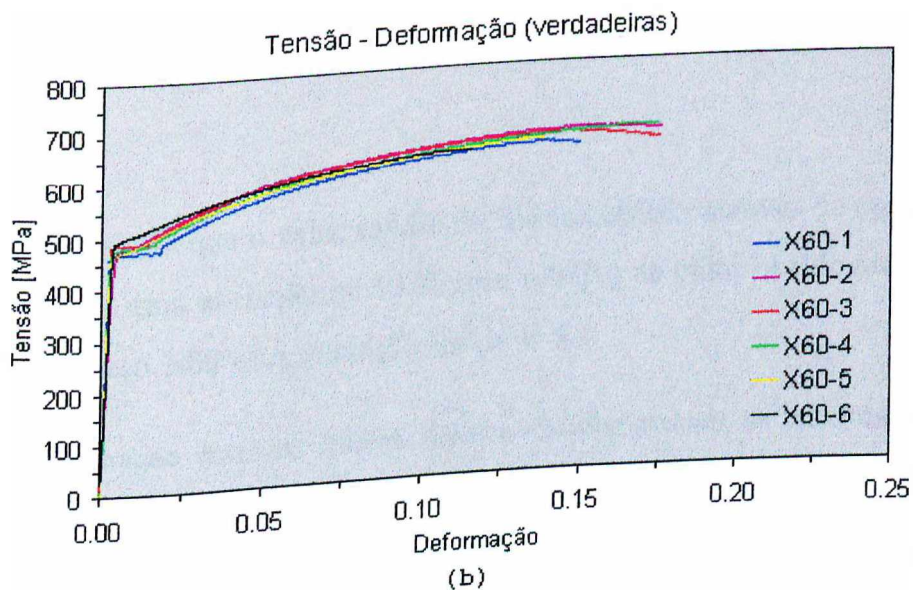
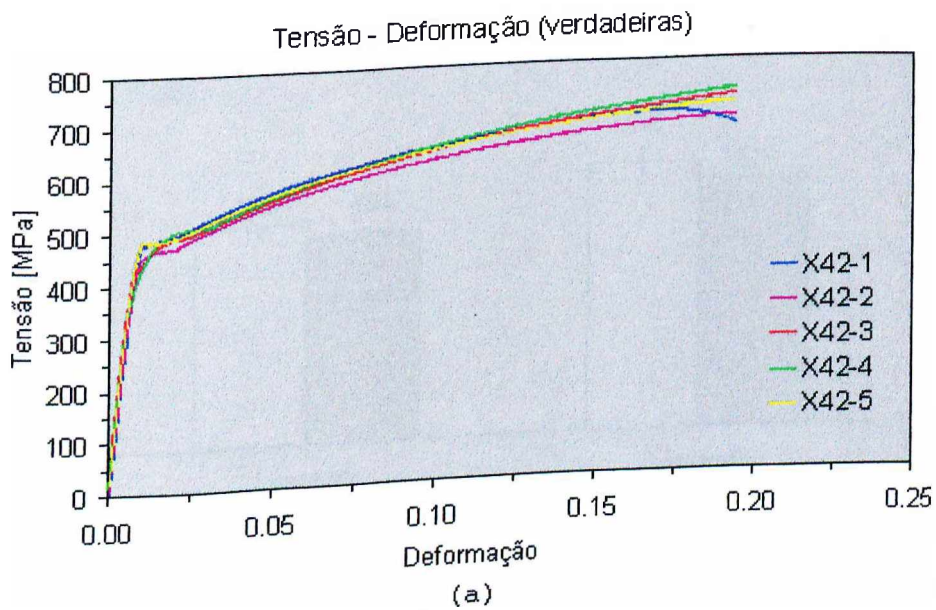


Figura 5.12: Curvas de tensão *versus* deformação para o aço X42 (a) e para o aço X60 (b), obtidos através de ensaios de tração convencionais (deslocamento medido no comprimento útil de teste).

5.3 Avaliação comparativa

A tabela 5.5 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através de macroindentação instrumentada e os ensaios de dureza e de tração convencionais para o aço X42

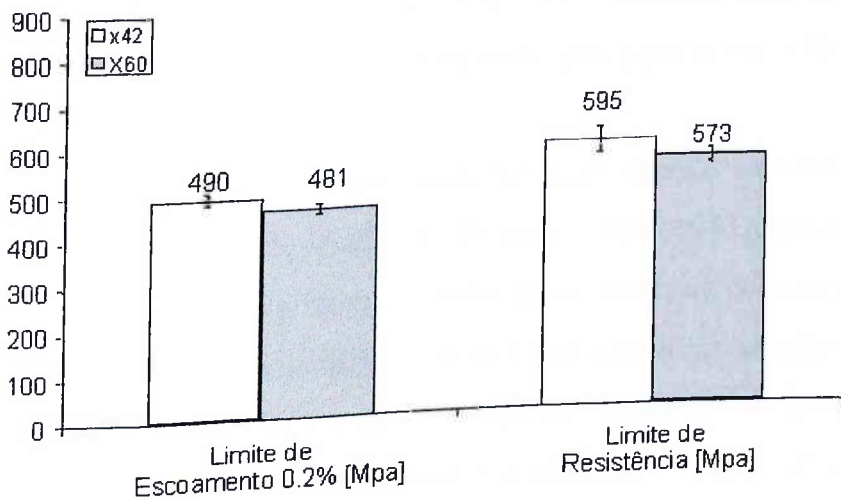


Figura 5.13: Gráfico comparativo das propriedades mecânicas (limite de escoamento e limite de resistência de engenharia) dos aços X42 e X60 obtidas através de ensaios convencionais de tração.

e para o aço X60.

Nota-se nesta tabela que o valor médio de dureza obtido através de ensaios IEI para o aço X42 apresentou uma variação de 10 % com relação ao valor obtido através de ensaios de dureza. Para o aço X60 esta variação foi de 6 %.

Tabela 5.5: Comparação entre os valores médios obtidos através de macroindentação instrumentada e ensaios convencionais realizados em laboratório.

Material	Dureza Brinell [Kgf/mm ²]		Limite de Escoamento [MPa]		Limite de Resistência de engenharia [MPa]	
	Ensaio durômetro	IEI	Ensaio tração	IEI	Ensaio tração	IEI
X42	193	213	490	524	595	626
X60	188	199	481	479	573	590

O valor do limite de escoamento medido através de macroindentação no aço X42 é cerca de 7 % maior do que o medido através de ensaios de tração. O limite de escoamento do aço X60 difere de 0,4 % do valor obtido no ensaio de tração.

O limite de resistência de engenharia para o aço X42 obtido através de IEI é 5 % maior do que o valor obtido no ensaio de tração, enquanto que para o aço X60 esta diferença é de 3 %.

Tais discrepâncias são provavelmente causadas pela técnica utilizada no modelo de cálculo das propriedades mecânicas criado por Haggag (1989 - 2001), que depende de algumas constantes determinadas experimentalmente. Para otimizar os resultados, necessita-se portanto que os diversos materiais utilizados na confecção de dutos sejam caracterizados corretamente para que se possa determinar suas propriedades com o macroindentador.

Realizando uma comparação qualitativa entre os gráficos de carga *versus* profundidade de indentação obtidos por Haggag (1993) (figura 5.14) e pelo macroindentador portátil (figura 5.15) nota-se que estes possuem características semelhantes. Apesar de se tratarem de ensaios em materiais diferentes e com a aplicação de cargas diferentes, ambos possuem a mesma linearidade tanto em relação ao carregamento total quanto aos descarregamentos/rearregamentos parciais.

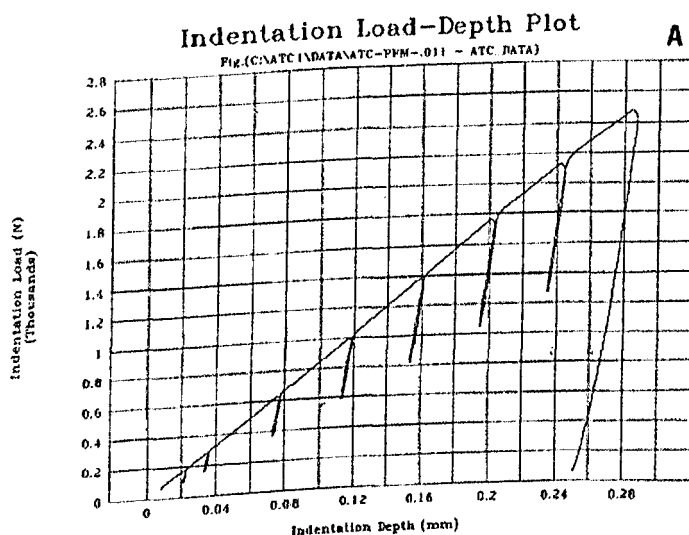


Figura 5.14: Ensaio de indentação com 8 ciclos de carregamento, realizado por Haggag (1993).

As propriedades mecânicas obtidas em ensaios realizados por Haggag (1999) não são mostrados neste documento pois não é possível traçarmos comparações entre estes resultados e os obtidos pelo MIP-2004, uma vez que o autor não descreve os valores atribuídos

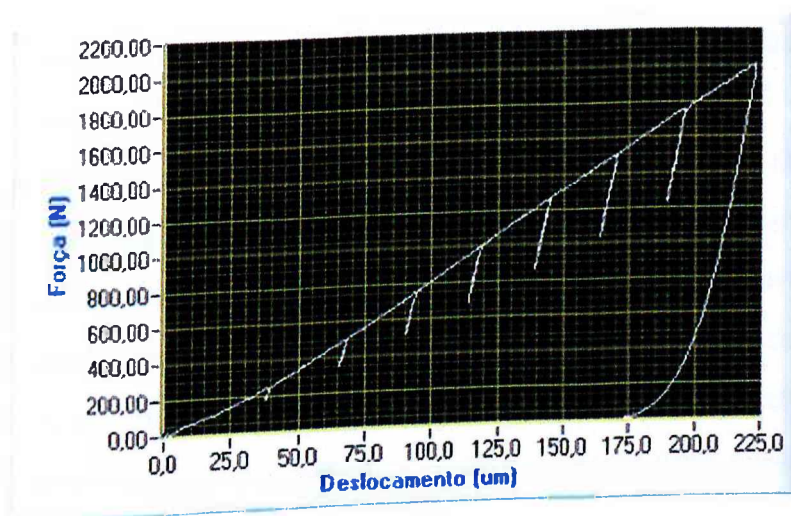


Figura 5.15: Ensaio de indentação com 8 ciclos de carregamento, realizado utilizando o MIP-2004.

às constantes de cálculo das propriedades, que afetam profundamente os resultados, conforme verificado em ensaios com o equipamento descrito neste trabalho.

5.4 Discussão

Uma das grandes vantagens de se utilizar a macroindentação instrumentada para avaliação de propriedades mecânicas de dutos em operação é que o ensaio não é destrutivo. Suas propriedades podem ser obtidas na própria estrutura do duto sem a necessidade da confecção de corpos de prova. Além disso, não é necessário interromper a transmissão de produto.

O equipamento desenvolvido é portátil, facilitando o seu deslocamento até o local do duto que se deseja avaliar. Este pode ser facilmente acoplado à superfície de dutos de vários diâmetros, com opções de fixação através de bases magnéticas ou correntes.

Outra característica deste equipamento é a sua simplicidade de operação. As interfaces com o usuário foram criadas de maneira a tornar o ensaio simples e em poucas etapas. Através da utilização de mensagens, todos os passos a serem seguidos são indicados ao usuário. Valores típicos de velocidade, quantidade de ciclos de indentação, carga máxima,

passo de deslocamento, dentre outros, são definidos ao se iniciar um ensaio, facilitando a execução do mesmo.

Os resultados médios de dureza, limite de escoamento e limite de resistência obtidos dos diversos ensaios de macroindentação realizados com o equipamento desenvolvido apresentaram certas divergências em relação aos valores obtidos através de ensaios convencionais de dureza e tração. Conforme mencionadas, tais divergências eram esperadas posto que o modelo matemático adotado requer o uso de constantes cujos valores devem ser ajustados empiricamente, tornando-se necessário realizar mais ensaios.

5.5 Conclusão

Neste capítulo foram descritos os resultados dos ensaios de indentação e de tração em dois tipos de aço. As propriedades obtidas com os ensaios IEI foram comparadas com os valores obtidos dos ensaios convencionais de dureza e de tração apenas para avaliações preliminares do equipamento, que se mostraram bastante satisfatórias nesta fase do projeto.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões gerais

Este trabalho realizado, em conjunto com a Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, resultou no primeiro equipamento nacional destinado a ensaios de macroindetação *in situ* para levantamento de propriedades mecânicas de dutos na área de petróleo e gás. O protótipo se mostrou eficiente e simples de manusear, bastando ao operador seguir apenas alguns passos simples para a realização completa de um ensaio, que por sua vez é totalmente automatizado.

O protótipo desenvolvido mostrou-se capaz de realizar ensaios com múltiplos ciclos de indentação totalmente controlados. Os gráficos de carga aplicada *versus* profundidade de indentação obtidos possuem características semelhantes aos obtidos por outros sistemas encontrados na literatura.

Os métodos utilizados para implementação dos cálculos das propriedades mecânicas mostraram-se capazes de obter valores coerentes para as propriedades mecânicas quando comparados com os dados existentes na literatura e também aqueles obtidos através de ensaios convencionais.

Através de ensaios realizados em um mesmo tipo de material, mantendo-se tanto as características de velocidade, carga máxima, porcentagem de descarregamento, quantidade de ciclos de indentação e passos de deslocamento, quanto as constantes atribuídas

ao material, foram obtidas propriedades com um desvio padrão mínimo, o que atesta a boa repetibilidade do sistema.

Os resultados de dureza, limites de resistência e limites de escoamento obtidos através da macroindentação apresentaram diferenças com relação aos valores medidos nos ensaios convencionais. Essa discrepância é natural, pois o modelo de cálculo das propriedades mecânicas depende dos valores das constantes do material analisado, que devem ser determinados experimentalmente, o que exigiria a realização de vários ensaios, até que se encontre os valores mais adequados para cada tipo de material.

Ao final deste trabalho verifica-se que os objetivos propostos foram alcançados. Foram realizados estudos do estado da arte das possíveis metodologias a serem utilizadas para determinação de propriedades mecânicas de materiais de maneira não-destrutiva. Um modelo de controle para determinação não-destrutiva de propriedades mecânicas de materiais foi proposto e avaliado. O modelo matemático para obtenção das propriedades mecânicas foi implementado e um protótipo de um sistema de instrumentação e controle de um macroindentador portátil, desenvolvido com o apoio da Petrobras, foi construído. As condições de operação do equipamento foram avaliadas e diversos ensaios para validação do método de controle e da solução matemática implementada foram realizados apresentando excelentes resultados.

6.2 Trabalhos futuros

A determinação da integridade de estruturas metálicas não depende apenas das propriedades determinadas neste trabalho. Existem outras propriedades igualmente importantes para a avaliação de dutos, tais como a tenacidade e as tensões residuais ou pré-existent. Propõe-se, como trabalho futuro, a implementação de um modelo matemático e sua respectiva rotina computacional para estimar os níveis de tensões residuais através de macroindentação. Outra proposta consiste no desenvolvimento de correlações preliminares entre ensaios de indentação e obtenção da tenacidade à fratura.

A implementação do modelo descrito por Russel (2003) e Ahn (2000; 2001) é também

interessante pois assim torna-se possível comparar os resultados deste modelo com os obtidos utilizando o modelo proposto por Haggag (1989).

Além disso, é necessária a realização de vários ensaios em campo para a caracterização de propriedades mecânicas de dutos em operação e verificar se ocorrem alterações nos resultados.

Referências bibliográficas

AHN, J.; CHOI, Y.; KWON, D. Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials Through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve. **Journal of the Korean Institute of Metal and Materials**, [S.l.], v.38, p.1606–1611, 2000.

AHN, J.; KWON, D. Derivation of Plastic Stress-Strain Relationship from Ball Indentation: examination of strain pileup effect. **J. Mater. Res.**, [S.l.], v.16, p.3170–3178, 2001.

API-5L, N. Specification for Line Pipe Edition. **American Petroleum Institute**, [S.l.], 2000.

ATC. **Products**. Disponível em: <<http://www.atc-ssm.com/products.html>>. Acesso em: março 2004.

Frontics. **Frontics - General Introduction**. Disponível em: <http://www.frontics.com/2Ais2000_1_e.htm>. Acesso em: março 2004.

HAGGAG, F. Nondestructive Determination of Yield Strength and Stress-Strain Curves of In-Service Transmission Pipelines Using Innovative Stress-Strain Microprobe Technology. **Advanced Technology Corporation**, [S.l.], 1999.

HAGGAG, F. M. In-situ Measurements of Mechanical Properties using Novel Automated Ball Indentation System. **American Society for Testing and Materials**, [S.l.], v.STP 1204, p.27–44, 1993.

- HAGGAG, F. M. In-situ Nondestructive Measurements of key Mechanical Properties of Oil and Gas Pipelines. **American Society of Mechanical Engineers**, [S.l.], v.PVP-Vol. 429, p.99–104, 2001.
- HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K. Estimating Fracture Toughness Using Tension or Ball Indentation Tests and a Modified Critical Strain Model. **The American Society for Mechanical Engineers**, [S.l.], p.41–45, 1989.
- HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; BRASKI, D. N. Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Microprobe. **American Society of Mechanical Engineers**, [S.l.], v.PVP-Vol. 170, p.101–107, 1989.
- HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; HUTTON, J. T.; THOMAS, D. L.; SWAIN, R. L. Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials. **American Society for Testing and Materials**, [S.l.], p.188–208, 1990.
- HAGGAG, F. M.; SERVER, W. Small Specimen Test Technique Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension. **American Society for Testing and Materials**, [S.l.], p.27, 1993.
- HAGGAG, F.; NANSTAD, R.; MARRIOT, I. D.; MAGER, T.; BANFORD, W. Innovative Approaches to Irradiation Damage and Failure Analyses. **American Society for Mechanical Engineers**, [S.l.], v.170, p.101–107, 1989.
- JUNIOR, W. D. C. **Materials Science and Engineering**: an introduction. 6th.ed. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc., 2003.
- KANIA, R.; RUSSEL, A.; GAO, M. Advanced Indentation Systems for Tensile Properties Evaluation of In-Service Pipelines. **Congreso Internacional de Ductos**, [S.l.], Novembro 2003.
- LEE, Y.-H. Evaluation of deformation properties of API X65 steel welding for pipeline. **OMAE - ASME**, [S.l.], p.1–6, 2001.

- MATHEW, M.; LIETZAN, L.; MURTY, K.; SHAH, V. Low Temperature Aging Embrittlement of CF-8 Stainless Steel. **Materials Science and Engineering A269**, [S.l.], p.186–196, 1999.
- MATHEW, M.; MURTY, K.; RAO, K.; MANNAN, S. Ball Indentation studies on the effect of aging on mechanical behaviour of alloy 625. **Materials Science and Engineering A264**, [S.l.], p.159–166, 1999.
- NETO, F. F. R.; FRANCO, S. D. Avaliação de Propriedades Mecânica em Dutos Através de Ensaio de Macroindentação Instrumentada. **Anais do V Seminário de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia**, [S.l.], 2002.
- Petrobras. **Programa Tecnológico Produt.** Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/portal/tecnologia.htm>>. Acesso em: março 2004.
- RAMBERG, W.; OSGOOD, W. R. **Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters**. [S.l.]: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943. (Technical Note 902).
- RASLAN, A. A. **Introdução à ciência dos materiais**. [S.l.]: Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia - UFU, 1982.
- SOISSON, H. **Instrumentação Industrial: sistemas e técnicas de medição e controle operacional**. [S.l.]: Hemus, 1995.
- TABOR, D. **The Hardness of Metals**. [S.l.]: Oxford University Press, 1951.
- TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 3rd.ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1970.
- ZUM-GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. [S.l.]: North-Holland, 1987.