

IVAN BERGANTINI BURJAILI

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE - LABVIEW
PARA CONTROLE E EXECUÇÃO DE ENSAIOS DE
INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

IVAN BERGANTINI BURJAILI

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE - LABVIEW PARA CONTROLE E
EXECUÇÃO DE ENSAIOS DE INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **ENGENHEIRO MECATRÔNICO**.

Área de Concentração: Instrumentação e automação industrial.

Orientadora: Profa. Dr.-Ing. Vera Lúcia D. S. Franco

UBERLÂNDIA – MG

2017

Dedico este trabalho a minha família, pela minha vida e pelo apoio incondicional, à minha namorada pela compreensão de minha ausência, aos amigos que traçaram comigo este trajeto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família, que é a base de tudo o que aprendi e me tornei, pelo seu apoio, dedicação e carinho em todas as horas.

À minha namorada Anna Flávia Simões Pastore, que me apoiou nos momentos difíceis e suportou minha infindável ausência durante o curso.

Ao meu primo Bernardo Bergantini Botamede, que me inspirou na escolha da profissão de Engenheiro Mecatrônico.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica por oferecer o curso de Engenharia Mecatrônica e me dar a oportunidade de cursá-lo.

Ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), por abrir as portas para mim, e fornecer as ferramentas necessárias para que pudesse realizar este trabalho.

À minha orientadora e professora Vera Lúcia D. Sousa Franco, pela garra com que defende os seus alunos, pela orientação durante este trabalho e pela disposição de ajudar em todas as horas como orientadora, professora e coordenadora.

Ao engenheiro Denis Soares de Freitas, pela disponibilidade, atenção, paciência e ensinamentos ao me orientar durante a execução deste trabalho.

Aos meus companheiros de curso que me ajudaram com conhecimento, conselhos e companheirismo desde o início desta jornada.

*“Toda adversidade, toda circunstancia desagradável,
todo fracasso e toda dor física carregam consigo a
semente de um benefício equivalente”.*

(Napoleão Hill)

Resumo

O bom funcionamento dos oleodutos e gasodutos é de fundamental importância para o país, já que os derivados de petróleo movem nosso cotidiano e economia. Existem milhares de quilômetros destas estruturas feitas de dutos metálicos espalhadas no Brasil, algumas destas, devido à idade, já perderam as especificações. No caso de defeito, um possível reparo se torna difícil sem o conhecimento das propriedades do material do duto, deste modo um método para verificar as propriedades mecânicas destes dutos para auxiliar numa possível manutenção é o método da Macroindentação Instrumentada. A Macroindentação Instrumentada é uma boa opção neste cenário, pois consegue determinar as propriedades mecânicas do material analisado sem causar danos significativos no mesmo, e permite ainda a realização do teste em campo, ou seja, na própria estrutura (*in-situ*). No Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) foi desenvolvido um macroindentador para realização de ensaio de indentação instrumentada. Esta monografia descreve o desenvolvimento de um programa com base no LabVIEW® para monitoramento e realização de ensaio neste macroindentador utilizando um computador pessoal, um condicionador de sinais Spider8®, um motor de passo e seu respectivo *driver*. Para validação do programa inicialmente foram feitos ensaios de indentação instrumentada em borracha como corpo de prova. Após os testes em borracha apresentarem bons resultados, o teste em aço foi realizado com sucesso.

Palavras chave: Indentação Instrumentada. Propriedades mecânicas. Instrumentação. Macroindentação. Dutos.

Abstract

The proper functioning of oil and gas pipelines is of fundamental importance for the country, since oil products move our daily life and economy. There are thousands of kilometers of these structures made of metal ducts spread in Brazil, some of these, due to age, have already lost their specifications. In the case of a defect, a possible repair becomes difficult without the knowledge of the properties of the duct material, so a method to verify the mechanical properties of these ducts to assist in a possible maintenance is the method of Instrumented Macroindentation. The Instrumented Macroindentation is a good option in this scenario, since it can determine the mechanical properties of the analyzed material without causing significant damage to it, and also allows the field test to be performed, ie in-situ. In the Laboratory of Technology at Friction and Wear (LTAD) a macroindentador was developed to perform an instrumented indentation test. This monograph describes the development of a LabVIEW®-based program for monitoring and performing this macroindentator using a personal computer, a Spider8® signal conditioner, a stepper motor, and its driver. For the validation of the program, rubber instrumented indentation tests were initially performed. After the rubber tests showed good results, the steel test was performed successfully.

Keywords: Instrumented Indentation. Mechanical properties. Instrumentation.
Macroindentation. Ducts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura, ponto F. CALLISTER, 1991.
- Figura 2.2 Ilustração de um perfil típico de indentação antes e depois da aplicação de carga (material empilhado está exagerado). HAGGAG, 1993.
- Figura 2.3 Gráfico de carga aplicada versus profundidade de penetração. DE SOUZA, 2008.
- Figura 2.4 Representação gráfica de um equipamento padrão para realização de EII. SOUZA, 2011.
- Figura 2.5 Montagem padrão de um sensor LVDT. NATIONAL INSTRUMENTS, 2017a.
- Figura 2.6 Célula de carga HBM modelo U2B. HBM, 2017a.
- Figura 2.7 Ponte de Wheatstone, no detalhe a representação de um *strain gauge*. www.allaboutcircuits.com, 2017.
- Figura 2.8 Foto do equipamento Spider8®. HBM, 2017c.
- Figura 2.9 Parte posterior do Spider8 com os cabos de comunicação com sensores e PC e cabo de alimentação.
- Figura 2.10 Processo de transmissão de dados de um circuito A a um circuito B, de forma (a) paralela e (b) serial. TOCCI, WIDMER, 1998.
- Figura 2.11 Posição dos pinos do cabo RS-232 e porta onde o cabo é conectado no equipamento. HBM SPIDER8® MANUAL, 2005.
- Figura 2.12 Exemplo de programação por fluxo de dados. NATIONAL INSTRUMENTS, 2017b.
- Figura 3.1 Equipamento de indentação instrumentada do LTAD.
- Figura 3.2 Equipamento utilizado no LTAD para realização de EEI, imagem mostrando os LVDTs e o porta penetrador.

- Figura 3.3 Diagrama representativo do fluxo de dados entre os equipamentos.
- Figura 3.4 Diagrama da lógica de funcionamento do programa.
- Figura 3.5 Perfil característico de um ensaio de indentação instrumentada em aço, gráfico de carga *versus* profundidade de penetração. DE SOUZA, 2008.
- Figura 3.6 Função de inicialização de comunicação serial VISA. NATIONAL INSTRUMENTS, 2017c.
- Figura 3.7 Função VISA *write*. NATIONAL INSTRUMENTS, 2017c.
- Figura 3.8 Diagrama esquemático da função para movimentação do motor.
- Figura 3.9 Diagrama de funcionamento do módulo de controle dos sensores.
- Figura 3.10 Diagrama esquemático de funcionamento da aquisição de dados.
- Figura 3.11 Diagrama da lógica de funcionamento do bloco de controle do motor.
- Figura 3.12 Diagrama simplificado do funcionamento do módulo de ensaio.
- Figura 3.13 Diagrama do procedimento de ensaio.
- Figura 3.14 Painel frontal do programa na aba configurações.
- Figura 3.15 Painel frontal do programa na aba de movimentação manual.
- Figura 3.16 Janela de ajuda da aba de controle do ensaio.
- Figura 3.17 Aba referente a movimentação manual do programa.
- Figura 3.18 Aba de realização do ensaio (Propinsitu).
- Figura 3.19 Aba de configuração do programa.
- Figura 3.20 Teste do usando borracha como corpo de prova.
- Figura 3.21 Resultado do ensaio com corpo de prova de borracha.

- Figura 3.22 Arquivo Dados.txt. referente ao ensaio com borracha, primeira coluna é o tempo medido em segundos, segunda coluna é a carga medida em Newtons, terceira a quinta coluna é a penetração medida pelos LVDTs em milímetros.
- Figura 4.1 Foto do ensaio com aço como corpo de prova.
- Figura 4.2 Resultado do ensaio com aço como corpo de prova.
- Figura 4.3 Arquivo Dados.txt. referente ao ensaio com aço.
- Figura 4.4 Arquivo Dados.txt. referente ao ensaio com aço, primeira coluna é o tempo medido em segundos, segunda coluna é a carga medida em Newtons, terceira a quinta coluna é a penetração medida pelos LVDTs em micrometros.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Atribuições dos pinos presentes no RS-232. Manual Spider8®, 2005.

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Deformação de engenharia
σ	Tensão de engenharia
σ_r	Tensão de resistência a tração

LISTA DE ABREVIATURAS

ASCII	Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação
CC	Célula de carga
DCE	<i>Data Circuit-terminating Equipment</i>
DTE	<i>Data Terminal Equipment</i>
EII	Ensaio de Indentação Instrumentada
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IEI	Indentação Esférico-Instrumentada
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
LVDT	<i>Linear variable displacement transformer</i>
N	Newton
PC	Computador Pessoal
RS-232	<i>Recommended Standard-232</i>
SCL	<i>Script Command Language</i>
SG	<i>Strain Gage</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V	Volts
VI	Instrumento Virtual
VISA	<i>Virtual Instrument Software Architecture</i>
WC-Co	Carboneto de Tungstênio

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Justificativa	16
 CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Propriedades Mecânicas	17
2.2 Ensaio de Tração	18
2.3 Ensaio de Indentação	20
2.4 Equipamento Padrão para Indentação Instrumentada	22
2.4.1 <i>Driver</i> 3540i, Hub444 e Script Command Language.....	23
2.4.2 Transdutor Linear de Deslocamento (LVDT)	24
2.4.3 Célula de carga (CC)	25
2.4.4 Condicionador de sinais Spider8®	27
2.4.5 Tipos de comunicação	28
2.4.5.1 <i>Comunicação serial</i>	30
2.4.5.2 <i>Cabo RS-232</i>	30
2.4.6 LabVIEW®	32
 CAPÍTULO III - DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	33
3.1 Equipamento de Indentação Utilizado (<i>propinsitu</i>).....	33
3.2 Projeto do <i>Software</i>.....	35

3.3 Desenvolvimento	36
3.3.1 Funções de comunicação com sensores e motor	38
3.3.1.1 Abertura da porta serial.....	39
3.3.1.2 Aquisição de dados.....	40
3.3.1.3 Movimentação do motor.....	40
3.3.2 Módulo de controle dos sensores.....	41
3.3.3 Módulo de controle do motor de passo	43
3.3.4 Módulo de controle do ensaio	44
3.3.5 Módulo de controle auxiliar	48
3.3.6 Controle de erro	49
3.3.7 O painel frontal.....	49
3.3.7.1 Aba referente a movimentação manual.....	52
3.3.7.2 Aba referente ao ensaio (<i>propinsitu</i>).....	52
3.3.7.3 Aba referente a configuração do programa.....	53
3.4 Realização do Ensaio em Borracha.....	54
 CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1 Fluidez e Segurança do <i>Software</i>	57
4.2 Realização do Ensaio em Aço	57
 CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	61
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os dutos metálicos são amplamente utilizados para transporte de uma variedade de produtos de forma rápida na indústria. O emprego destes vem associado a um alto investimento e necessidade de uso ininterrupto. Na indústria petrolífera estes dutos são usados para transporte de petróleo e seus derivados. Devido à sua idade, muitos dutos já perderam suas especificações, portanto como existe risco associado a vazamentos, uma alta necessidade destes bens pela sociedade e ao seu uso contínuo, é de fundamental importância a análise das propriedades mecânicas, vida-útil e integridade estrutural dos dutos evitando que os mesmos tenham seu uso interrompido devido a acidentes.

De acordo com Cardoso (2004), 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, e podem ser instalados no mar ou em terra, operando continuamente.

A obtenção das propriedades mecânicas em dutos de condução de gás natural e óleo, que não possuem documentação ou histórico, é de fundamental importância tanto para a caracterização do material quanto para a otimização de sua utilização (aumento na pressão de transmissão) (HAGGAG, 2001).

A operação de terminais e oleodutos é um importante elo na cadeia logística de abastecimento do Sistema Petrobras. Dos campos de produção, o petróleo é transportado por oleodutos ou por navios, para os terminais da Transpetro e de lá até as refinarias. Após o refino, os derivados são novamente escoados por dutos aos terminais para serem entregues às companhias distribuidoras, que abastecem os mercados nacional e internacional. Mais de 7500 km de oleodutos estão ramificados por todo o País (TRANSPETRO, 2017).

A determinação da integridade de qualquer estrutura metálica é importante tanto para garantir que não ocorrerão falhas durante a vida de seus componentes, quanto para avaliar o tempo de vida da estrutura. De maneira a obter a integridade destas estruturas submetidas a acidentes ou condições de serviço severas, é requerido o conhecimento das propriedades mecânicas do material para avaliação (NETO e FRANCO, 2002).

Por meio de ensaios de tração é possível a obtenção das propriedades mecânicas de um material, porém o ensaio é destrutivo e não é apropriado para as aplicações citadas anteriormente. Todavia, uma forma de se obter as propriedades mecânicas de um material, de maneira não destrutiva, é utilizando a metodologia da macroindentação. Dada a configuração do ensaio e a reduzida região perturbada durante a indentação, os ensaios podem ser realizados na própria estrutura da peça (HAGGAG, 1993).

O Ensaio de Indentação Instrumentada (EII) é um método que utiliza sensores de deslocamento e de carga, de alta precisão, associados a um penetrador esférico para construção de uma curva carga *versus* profundidade de penetração. A partir desta curva é possível calcular as principais propriedades mecânicas do material ensaiado como elasticidade, ductilidade, fluência, fadiga, dureza e tenacidade.

Neste contexto, a macroindentação se destaca como uma solução eficaz. Sua confiabilidade para determinar as propriedades mecânicas se equipara aos métodos tradicionais, como o ensaio de tração. Este método pode também ser empregado na própria estrutura, visto que um equipamento portátil pode ser utilizado para a realização do ensaio e este não danifica a peça ensaiada, ou seja, a macroindentação é um método não destrutivo.

1.1 Objetivos

Desenvolver um *software* em plataforma LabVIEW® capaz de realizar o monitoramento e controle de ensaios de macroindentação instrumentada de fácil operação utilizando o equipamento de indentação disponível no LTAD. Este equipamento é composto por um motor de passo, dois LVDTs, uma célula de carga, módulo de aquisição de dados Spider8®, um hub e um *driver* para o motor. O *software* deve conter restrições de segurança para evitar danos ao material ensaiado, ao indentador e a toda instrumentação associada.

1.2 Justificativa

Um programa desenvolvido em LabVIEW[®] para execução de Indentação Instrumentada já havia sido implementado no LTAD, porém este programa fora realizado antes de 2006 em versões mais antigas do LabVIEW[®]. Visando atualizar o código para versões mais recentes, implementando novas funcionalidades, rotinas de segurança (não existentes anteriormente) e desenvolvendo um painel de controle amigável para fácil utilização, este projeto foi idealizado para a formulação de um programa totalmente novo.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propriedades Mecânicas

A determinação das propriedades mecânicas de materiais é fundamental para vários processos, pois, a partir desta propriedade, é possível definir a forma e quantidade de carga que uma estrutura pode suportar, bem como analisar se a mesma necessita de manutenção. Neste contexto, devido à idade dos dutos, a avaliação das suas propriedades é importante para garantir que o transporte de óleo e gás seja feito de forma segura.

Um dos ensaios mecânicos mais usuais e importantes é o de tração, pois permite obter informações sobre a resistência dos materiais e pode definir critérios de aceitação para especificação de materiais, controle dos métodos de fabricação, auxílio no desenvolvimento de novos materiais e avaliação das propriedades mecânicas para uso em projetos (CARDOSO, 2004).

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais (DALCIN, 2007), porém este torna-se inviável para a aplicação desejada visto que é um ensaio destrutivo e difícil de se reproduzir em campo.

Com a melhoria da instrumentação e equipamentos eletrônicos, o ensaio de indentação instrumentada aparece como uma ótima opção. O ensaio de indentação baseia-se em relações físicas e matemáticas bem demonstradas e aceitas que regem o comportamento do metal sob carregamento axial (HAGGAG, 1993).

Assim, visto que o EII fornece resultados muito próximos dos obtidos pelo ensaio de tração e não é destrutivo, este torna-se uma alternativa confiável e apropriada para realizar ensaios na própria estrutura (*in-situ*).

Segundo (RASLAN, 1982), os ensaios mecânicos seguem a seguinte classificação.

Quanto à integridade do material:

- **Destrutivos:** implicam na inutilização parcial ou total da peça (tração, fadiga, dureza, fluência, torção, tenacidade à fratura, etc.).
- **Não destrutivos:** não comprometem a integridade da peça (raios-x, ultrassom, microdureza, indentação, etc.).

Quanto à velocidade de aplicação de carga:

- **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, mantendo-se os estados de equilíbrio (tração, compressão, flexão, dureza, indentação, etc.).
- **Dinâmico:** quando a carga é aplicada rapidamente ou então ciclicamente, de maneira que surgem respostas associadas à inércia e ao tempo de ensaio (impacto, fadiga, etc.).
- **Carga Constante:** quando a carga é aplicada durante um longo período (fluência, etc.)

2.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. O aumento da carga é feito de maneira relativamente lenta, para que esta possa se propagar de forma homogênea pelo corpo de prova.

Corpo-de-prova é, usualmente, obtido pela usinagem de uma amostra do produto ou obtido por forjamento ou fundição. Entretanto, produtos de seção constante (barras, fios, etc.) e também

corpos-de-prova fundidos (ferro fundido maleável, ferro fundido branco) podem ser ensaiados sem ser usinados (ABNT 6892, 2002).

Durante o ensaio, são medidos a força aplicada e o alongamento da amostra, constrói-se então um gráfico força *versus* alongamento. Como as dimensões do corpo de prova implicam na sua deformação, a curva de força e alongamento é ajustada para tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia. Esta curva é ilustrada na Fig. 2.1. A tensão de engenharia (σ) é a resistência do corpo de prova à força aplicada por unidade de área da seção transversal da amostra, e a deformação de engenharia (ϵ) é a variação de uma dimensão qualquer do corpo por unidade da mesma dimensão (PADILHA, 1997). O limite de resistência à tração, σ_r , está indicado no ponto M. Os detalhes nos círculos representam a geometria do corpo de prova deformado em vários pontos ao longo da curva.

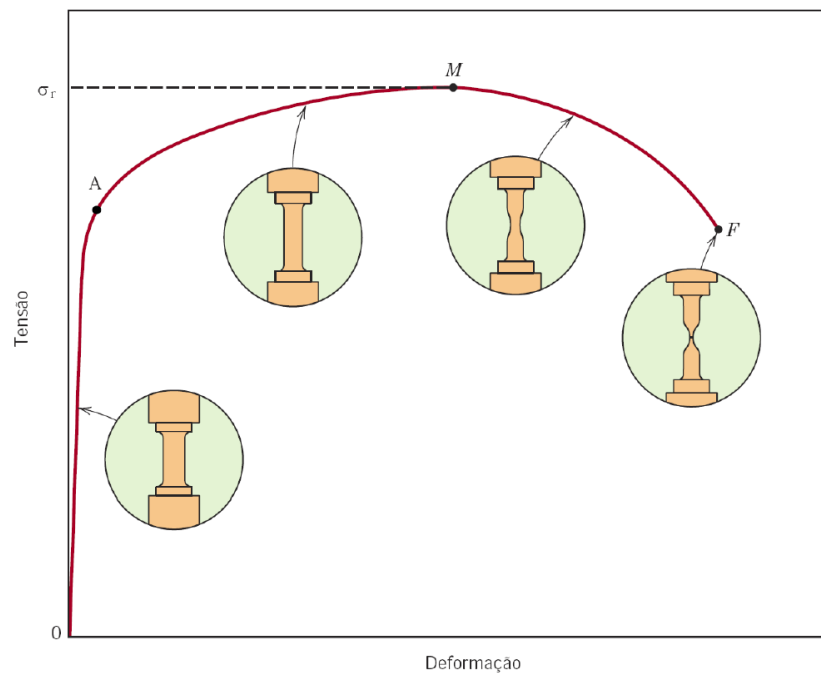


Figura 2.1 – Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura, ponto F (CALLISTER, 1991).

Observando o gráfico, tem-se dois tipos de deformação, de 0 até A tem-se a deformação elástica e de A até F tem-se a deformação plástica. Na deformação elástica, o corpo volta ao seu estado original após a retirada da tensão, desde que esta não ultrapasse a tensão de escoamento do

material, neste estado o corpo sofre uma deformação proporcional (lei de Hooke). Na deformação plástica, a tensão aplicada é maior do que a de escoamento, fazendo com que o material sofra uma deformação permanente.

O **limite de escoamento** (A), é o ponto correspondente à tensão máxima que um corpo pode suportar sem sofrer deformação permanente após a retirada da carga.

A **tensão de resistência à tração** (σ_r) é a tensão no ponto máximo da curva tensão *versus* deformação de engenharia, ponto M. Este corresponde à tensão máxima que o material sob tração pode suportar antes de sua ruptura, ou seja, se essa tensão for aplicada e mantida, o resultado será uma fratura. Quando a tensão aplicada atinge o valor dessa tensão máxima, uma pequena constrição (afinamento), começa a se formar em algum ponto da região estreita do corpo de prova, e toda a deformação subsequente fica confinada nesta, como indicado pelas representações esquemáticas do corpo de prova mostradas nos detalhes da Figura 2.1. Esse fenômeno é conhecido por “estricção”, onde ao final ocorrerá a fratura (CALLISTER, 1991).

O **ponto de ruptura** (F) é o ponto correspondente a tensão a que o corpo está submetido no instante de sua ruptura, também chamado de resistência à fratura.

Por meio do ensaio de tração, estas importantes propriedades mecânicas podem ser facilmente determinadas através da análise do gráfico. Porém, esta opção pode se tornar inviável (física e financeiramente) em diversas situações, visto que é um ensaio destrutivo e que pode ser demasiadamente complicado ou impossível de se extrair um corpo de prova do material analisado sem danificar a estrutura à qual pertence. A questão da realização do ensaio *in-situ* também deve ser levada em conta pois a natureza do ensaio de tração dificulta sua execução em campo. Em vista destes problemas busca-se outra forma de se fazer análise de propriedades mecânicas, uma forma não destrutiva, que possa ser “portátil” para realização de ensaio *in-situ* e obtenha resultados confiáveis.

2.3 Ensaio de Indentação

Os ensaios de indentação, ou penetração, são outra forma de determinar as propriedades mecânicas de materiais, sendo conhecidos na literatura desde 1943 e utilizados principalmente para

a medição da dureza e da tenacidade à fratura (ZUM GAHR, 1987). A macroindentação é um ensaio que visa medir a resistência à penetração de um material. Quando o ensaio é realizado com o monitoramento das variáveis (deslocamento e carga), diz-se Macroindentação Instrumentada (HAGGAG; NANSTAD e BRASKI, 1989a).

A norma ISO/DIS 14577, que regulamenta os ensaios de indentação instrumentada, para a obtenção da dureza e outros parâmetros, como o módulo de elasticidade, em materiais metálicos, classifica os ensaios de acordo com a escala da impressão deixada pelo indentador, subdividindo-os em:

- i. Macro: para as cargas aplicadas entre 2 N e 30 kN;
- ii. Micro: para forças de teste menores que 2 N e profundidade de penetração maior que 200 nm; e
- iii. Nano: para profundidades de penetração menores ou iguais a 200 nm.

A partir da utilização de penetradores esféricos, Ramos Neto et al. (1989) definem o ensaio como Indentação Esférico-Instrumentada (IEI). Assim, o ensaio é baseado em múltiplas indentações (ciclos de indentação) no mesmo local de penetração na superfície metálica utilizando uma esfera de WCCo (Carboneto de Tungstênio-Cobalto) como objeto de penetração. Na Fig. 2.2 estão representadas as deformações plásticas (h_p), elástica (h_e) e total (h_t) do material durante e depois do carregamento.

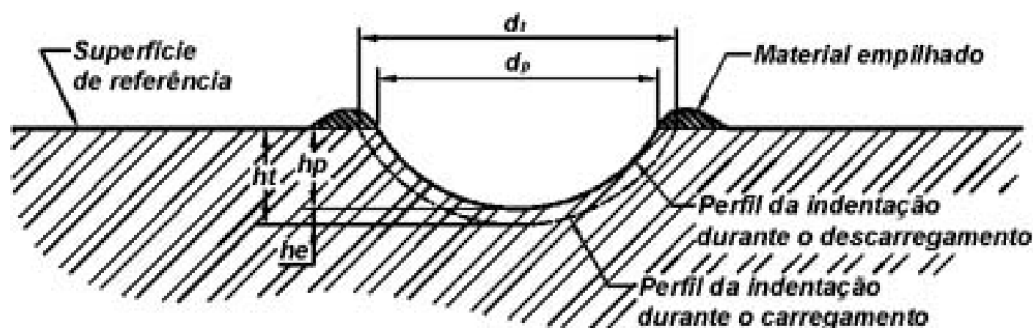


Figura 2.2 - Ilustração de um perfil típico de indentação antes e depois da aplicação de carga (material empilhado está exagerado) (HAGGAG, 1993).

A partir deste ensaio é obtida uma curva de deslocamento por carga aplicada, ilustrada na Fig. 2.3. Através da correlação entre tensão-deformação induzida e equações modelo, pode-se determinar propriedades mecânicas do material analisado, tais como: limite de escoamento, limite de resistência, dureza, tensões residuais, além de curvas de tensão-deformação (HAGGAG; WONG et al, 1989 e HAGGAG; NANSTAD e BRASKI, 1989 e HAGGAG; NANSTAD e HUTTON, 1990).

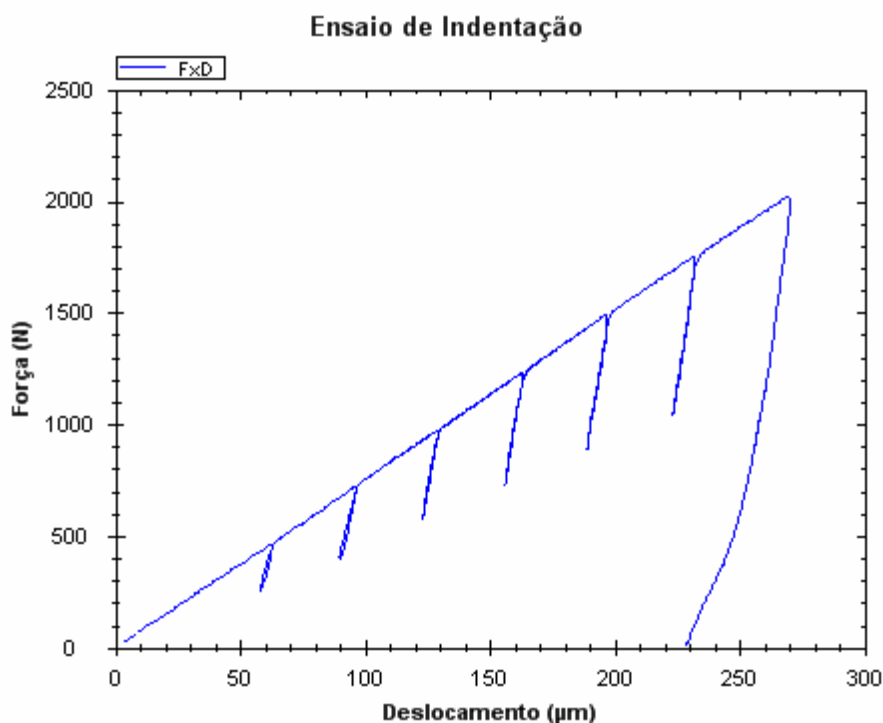


Figura 2.3 – Gráfico de carga aplicada *versus* profundidade de penetração (DE SOUZA, 2008).

2.4 Equipamento Padrão para Indentação Instrumentada

Um macroindentador padrão, representado na Fig. 2.4 projetado para fazer ensaio de indentação instrumentada, é composto por instrumentação de alta precisão (melhor que um micrometro) para supervisão das variáveis de ensaio e motor de passo de alta precisão (movimentação menor que um micrometro) para aplicação de carga. Estes equipamentos são acoplados a uma estrutura que suporte os esforços advindos do ensaio e conectados à um computador para controle.

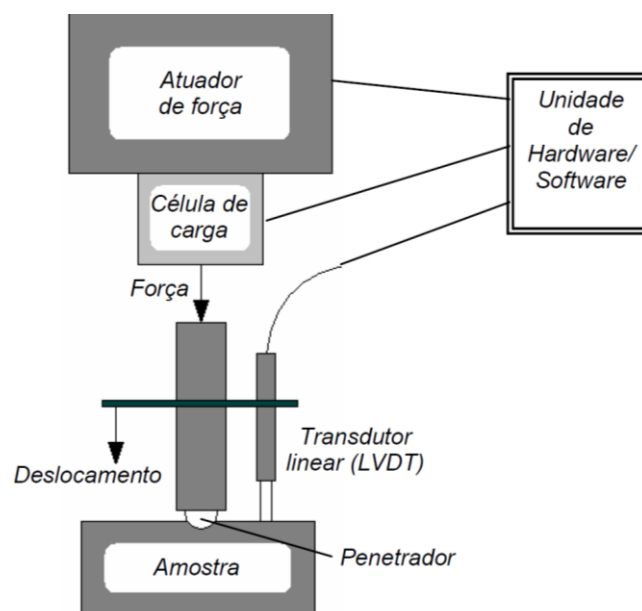


Figura 2.4 – Representação gráfica de um equipamento padrão para realização de EII (SOUZA, 2014).

O atuador de força é responsável pela aplicação de carga na amostra, a célula de carga faz a medição da carga sendo aplicada, à medida que o penetrador avança, o Transdutor Linear de Deslocamento (LVDT) faz a leitura do deslocamento. Estes são controlados por unidades de *hardware* e *software* que têm como função controlar o ensaio, gerar uma curva de carga *versus* profundidade e armazenar os dados para posterior análise.

2.4.1 Driver 3540i, SiNet Hub444 e Script Command Language

Para fazer a comunicação com o motor, é usada a *Si™ Command Language (SCL)* que é uma linguagem de programação compatível com o driver 3540i, da Applied Motion e com o SiNet Hub 444. Esta linguagem provê uma maneira de controlar o motor a partir do computador. A SCL permite que o programa comande o driver para que este execute uma variedade de tarefas. O *buffer* de comandos aceita 128 caracteres. Assim é possível enfileirar comandos enquanto outros estão sendo executados. Por outro lado, alguns comandos são de execução imediata. Portanto, não esperam na fila. Todos os comandos começam com dois caracteres maiúsculos do Código Padrão

Americano para o Intercâmbio de Informação (ASCII), e diversos aceitam números para configurações quantitativas.

O Hub444 funciona como um roteador, enviando os comandos para o driver apropriado e retornando as informações requisitadas a cada *driver*, sendo que 4 *drivers* são suportados. Como apenas um motor é utilizado neste projeto não seria necessária a utilização do hub, porém, para possíveis futuras implementações ele já é utilizado. Já o driver permite um controle mais otimizado do motor, pois este faz a conversão dos comandos em SCL para movimentação. A conexão é feita através de comunicação serial por cabo *Recommended Standard - 232* (RS-232).

2.4.2 Transdutor linear de deslocamento (LVDT)

O LVDT é um sensor de posição que mede o deslocamento relativo de um objeto em uma coordenada e o sentido do movimento. Este sensor opera segundo o princípio de um transformador, ele consiste da montagem de três bobinas e um núcleo, onde a bobina do meio é o primário e as outras são o secundário. O núcleo fica no meio destas bobinas e é composto de um material de alta permeabilidade magnética que desliza livremente. O primário é excitado por uma fonte alternada produzindo um fluxo magnético que induz uma voltagem alternada nas bobinas secundárias, a voltagem em cada uma das bobinas secundárias é diferente de acordo com a posição do núcleo, por essa diferença podemos determinar o deslocamento e a direção do movimento executado. A Fig. 2.5 mostra a montagem padrão de um sensor LVDT.

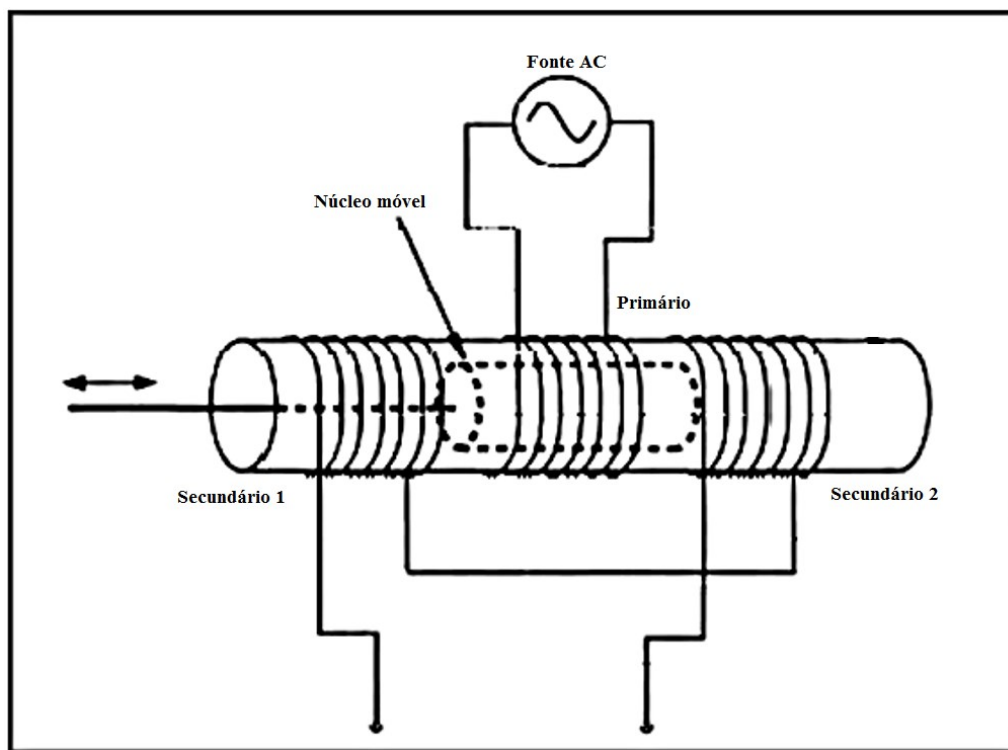


Figura 2.5 – Montagem padrão de um sensor LVDT (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017a)

A maior vantagem deste sensor em relação aos outros é o alto grau de robustez, pois o desgaste no elemento de medição (núcleo) é desprezível. Como o LVDT usa campo magnético, sua resolução é infinita. Assim ela fica limitada à resolução do equipamento de aquisição de sinal.

2.4.3 Célula de carga (CC)

As células de carga consistem de um elemento de medição onde os *strain gages* são fixados. Este elemento é geralmente feito de aço ou alumínio. Isso significa que é muito resistente, mas também possui uma elasticidade mesmo que mínima. O aço ou alumínio é levemente deformado sob o efeito da carga, com uma resposta elástica. Estas mudanças extremamente pequenas (micro deformações) podem ser medidas pelos *strain gages* (SG). Então finalmente a deformação do SG é interpretada pela eletrônica (amplificador) que permite assim, determinar a força (HBM, 2017b). A Fig. 2.6 mostra a célula de carga modelo U2B.



Figura 2.6 – Célula de carga HBM modelo U2B (HBM, 2017a).

A célula de carga usa uma configuração de ponte de Wheatstone representada na Fig. 2.7. As resistências são *strain gages* que são firmemente acoplados a uma estrutura, que sofrerá a deformação, através de filme (ex: Constantan ou Ni-Cr). Quando a carga é aplicada na célula, a deformação alonga ou encurta os *strain gages*, mudando o valor de sua resistência. Assim a diferença de potencial medida na ponte muda de acordo com a carga aplicada.

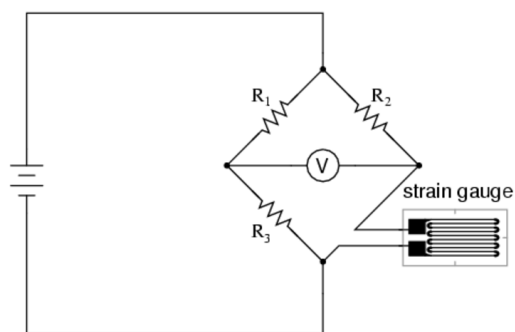


Figura 2.7 – Ponte de Wheatstone, no detalhe a representação de um *strain gauge* (www.allaboutcircuits.com, 2017).

Esta diferença de potencial é enviada a um amplificador e o sinal deve ser condicionado para que possa ser usado. Assim esse sinal pode ser convertido para unidades padrão de força, como o Newton (N).

2.4.4 Condicionador de sinais Spider8®

O Spider8® é um sistema eletrônico de medição para computadores pessoais (PCs) e é usado para medição elétrica de variáveis mecânicas tais como tensão, força, pressão, percurso, aceleração e temperaturas, a Fig. 2.8 mostra a parte frontal do equipamento.



Figura 2.8 – Foto do equipamento Spider8® (HBM, 2017c)

A conexão com o computador é feita através da porta de impressora ou por meio de uma interface *Recommended Standart* (RS-232). Todo o comando é realizado por meio de funções pelo PC, portanto, não há no equipamento potenciômetros, botões, interruptores ou circuitos de ponte. Neste projeto a comunicação é feita através da interface serial RS-232 (cabo D), ilustrado na Fig. 2.9. A entrada 4 (F) é para sensor de temperatura que não é usada, as 1 e 2 (A e B) são para receber dados dos LVDTs, a 3 (C) é para ler os dados enviados pela célula de carga e a alimentação é de 13 Volts de corrente contínua do sistema (cabo E).



Figura 2.9 – Parte posterior do Spider8 com os cabos de comunicação com sensores e PC e cabo de alimentação.

O manual de operação do Spider8® descreve as funções para comunicação. Estas são compostas de três caracteres maiúsculos, podendo ser seguidos de ponto de interrogação para

comandos de requisição de *status*. O objetivo destes comandos é ativar canais de dados, uso de filtros, amplificação de sinal, fundo de escala, definir os parâmetros de comunicação serial, requisitar erros e velocidade de aquisição entre outros, são 38 comandos no total.

O aparelho possui as seguintes características e conexões:

- Canal de 0 a 7 são entradas para transdutor,
- PC/Master é um soquete de 25 pinos (IEEE1284) que faz a conexão para o PC ou para outro Spider8®,
- Digital I/O é um soquete de 25 pinos (IEEE1284), que possui 8 entradas digitais e 8 entradas/saídas digitais,
- RS-232-C é um soquete de 9 pinos usado para fazer a conexão com o PC,
- 12V DC IN é um soquete de 4 pinos que é a entrada de alimentação do aparelho que pode vir de uma fonte de potência ou bateria. Uma fonte de alimentação externa é fornecida pelo próprio fabricante,
- Possui 4 amplificadores digitais completos com tecnologia de frequência portadora de 4,8 kHz para os canais de 0 a 3,
- Cada canal funciona com um conversor A/D separado que permite taxas de medida de 1 a 9600 bits/s.
- Os conversores A/D estão sincronizados para garantir a medição simultânea em todos os canais.

2.4.5 Tipos de comunicação

Dois tipos de comunicação são utilizados para transferência de dados digitais, a serial e a paralela. A transmissão serial transmite a mensagem bit por bit por um mesmo cabo em um determinado espaço de tempo enquanto a conexão paralela usa vários cabos para transmitir mais dados de uma só vez, transmitindo cada bit de uma palavra separadamente. A Fig. 2.10 ilustra como é realizada cada uma das duas conexões.

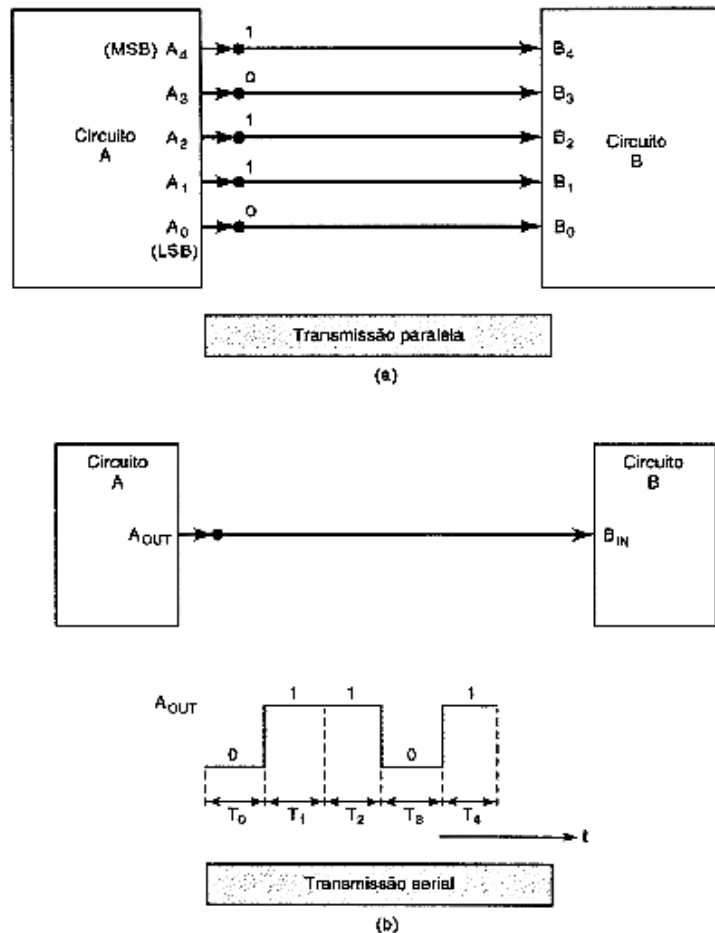


Figura 2.10 – Processo de transmissão de dados de um circuito A a um circuito B, de forma (a) paralela e (b) serial (TOCCI; WIDMER,1998).

A principal diferença entre as duas comunicações é a velocidade na transmissão. a paralela é mais veloz, pois transmite mais bits em um único intervalo de tempo. Já a comunicação serial é mais lenta por transmitir todos os bits em um mesmo canal. Porém, por usar menos linhas de transmissão, a complexidade da conexão serial é mais simples, sendo mais amplamente adotada. Neste projeto foi utilizada a comunicação serial usando o cabo RS-232 com duas linhas de transmissão onde uma é para transferência de dados e outra para leitura de dados tanto com o hub quanto com o Spider8[®].

2.4.5.1 Comunicação serial

Um protocolo de comunicação, é basicamente um acordo entre as partes que se comunicam, estabelecendo como se dará a comunicação. É composto de um conjunto de regras que devem ser seguidas para se estabelecer a comunicação entre dois sistemas. Caso o protocolo seja violado, a comunicação será dificultada, se não se tornar completamente impossível (TANEMBAUM, 2003).

Para que ambas as partes possam entender o envio de sinal, alguns parâmetros são configurados para o envio da mensagem, estes foram utilizados tanto para a comunicação com Spider8[®] quanto com o motor, são estes:

- *Baud rate* é a velocidade em que a transmissão ocorre, ela é determinada pela quantidade de bits por segundo enviados na mensagem. O *baud rate* utilizado para comunicação com motor é 9600 bits/s e Spider8[®] é 38400 bits/s.
- Bit de paridade é uma forma de detecção de erros na mensagem, o bit de paridade indica se o número de bits 1 na mensagem é par ou ímpar, assim se o número de bits "1" da mensagem for ímpar adiciona-se um "1" no final da mensagem, se o número de bits "1" da mensagem for par é adicionado um "0" no final da mensagem. Utiliza-se paridade par neste projeto.
- Bit de parada é o que marca o final da transmissão da mensagem em sistemas que não usam sinal de clock associado a transmissão (assíncronos), neste trabalho foi utilizado 1 bit de parada, que é o mais comumente utilizado.
- Número de bits de dados é a quantidade de bits da mensagem que contém dados (não considera bit de parada e de paridade por exemplo), utilizou-se 8 bits de mensagem para a comunicação neste trabalho.
- Delimitadores são bytes usados para finalizar uma mensagem, neste trabalho são usados tanto o *Line Feed* quanto o *Carriage Return*, que são padronizados pela codificação ASCII.

2.4.5.2 Cabo RS-232

O cabo RS-232 é uma porta de interface serial que faz a comunicação do PC com o Spider8[®] e o hub. Este cabo pode fazer uma ligação de até 20 metros e possui nove pinos. A Tab. 2.1 a seguir

mostra a configuração dos pinos da interface, onde o pino 2 é a saída, o 3 é a entrada de dados e o 5 é o terra.

Tabela 2.1 – Atribuições dos pinos presentes no RS-232 (HBM SPIDER8[®] MANUAL, 2005).

Pino	Atribuição
1	Livre
2	TD
3	RD
4	Livre
5	Terra
6	DTR
7	CTS
8	RTS
9	Livre
Caixa do soquete	Terra de proteção

A conexão de forma mais simples utiliza apenas os pinos 2, 3 e 5. No caso o Spider8[®] é um *Data Communications Equipment* (DCE), isto é, o pino 2 é de entrada de dados e o 3 é de saída. A Fig. 2.11 mostra o posicionamento dos pinos na entrada do equipamento.

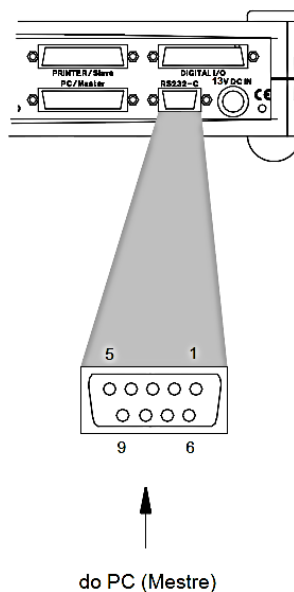


Figura 2.11 – Posição dos pinos do cabo RS-232 e porta onde o cabo é conectado no equipamento (HBM SPIDER8[®] MANUAL, 2005).

2.4.6 Software LabVIEW®

O LabVIEW® é um *software* de engenharia de sistemas criado especificamente para aplicações que envolvam teste, medição e controle, com rápido acesso ao *hardware* e a informações obtidas a partir dos dados. LabVIEW® simplifica a integração do *hardware*, para que se possa rapidamente adquirir e visualizar conjuntos de dados a partir de virtualmente qualquer dispositivo de E/S, seja da NI ou de outros fornecedores. Combinado com uma sintaxe de programação gráfica que reduz o tempo de programação, o LabVIEW® agiliza o projeto de sistemas complexos com ferramentas e códigos que estão na vanguarda da tecnologia atual (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017a).

Este *software* utiliza linguagem gráfica, usando blocos de função para facilitar a programação de sistemas. Além da fácil integração com instrumentos, especialmente da National Instruments, ele disponibiliza um painel frontal para controle da execução de programas que é facilmente programado, formando uma interface amigável para o usuário do *software* desenvolvido. Existe uma grande gama de blocos de funções para o programador utilizar, incluído a parte matemática, criação de gráficos, aquisição de dados, manipulação de arquivos, manipulação de vetores e matrizes entre outros.

Os *softwares* desenvolvidos no LabVIEW® são chamados Instrumentos Virtuais (VIs). A execução de VIs segue um modelo de fluxo de dados, um nó do diagrama de blocos é executado assim que recebe todas as entradas de que se necessita. Quando um nó é executado, ele produz dados, que são enviados ao próximo nó do fluxo de dados. A movimentação dos dados pelos nós determina a ordem na qual os VIs e funções são executados no diagrama de blocos. A Fig. 2.12 mostra um exemplo simples de programação por fluxo de dados, onde dois números são somados, do resultado é subtraído o valor 50 e o valor final é armazenado na variável *result*.

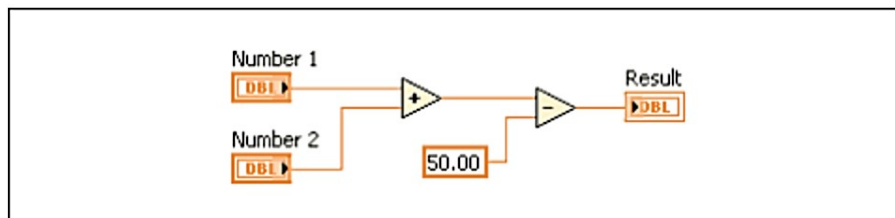


Figura 2.12 – Exemplo de programação gráfica (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017b).

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Este capítulo descreve o projeto, começando pelas funções base para comunicação com os sensores e o motor que serão usadas para a programação do ensaio de indentação. Em seguida é mostrada e explicada a estrutura geral de programação do *software* e cada uma de suas partes são explicadas mais detalhadamente.

3.1 Equipamento de Indentação Utilizado (*Propinsitu*)

O equipamento do LTAD, denominado *Propinsitu*, mostrado na Fig. 3.1 é composto por um motor de passo conectado a um redutor responsável por acionar um atuador linear (fuso de esferas recirculantes sem folga axial), que faz o deslocamento do penetrador. Sensores de fim de curso delimitam a movimentação do sistema. Na extremidade do atuador é acoplada uma célula de carga e uma haste com o porta-penetrador. Os LVDTs são encaixados paralelos à esta haste, ficando com suas extremidades próximas ao penetrador. A opção de usar 2 LVDTs visa obter uma melhor precisão no cálculo da profundidade de penetração. A Fig. 3.2 mostra os dois LVDTs, um de cada lado do penetrador e a célula de carga que é o componente cilíndrico posicionado na parte superior da figura.

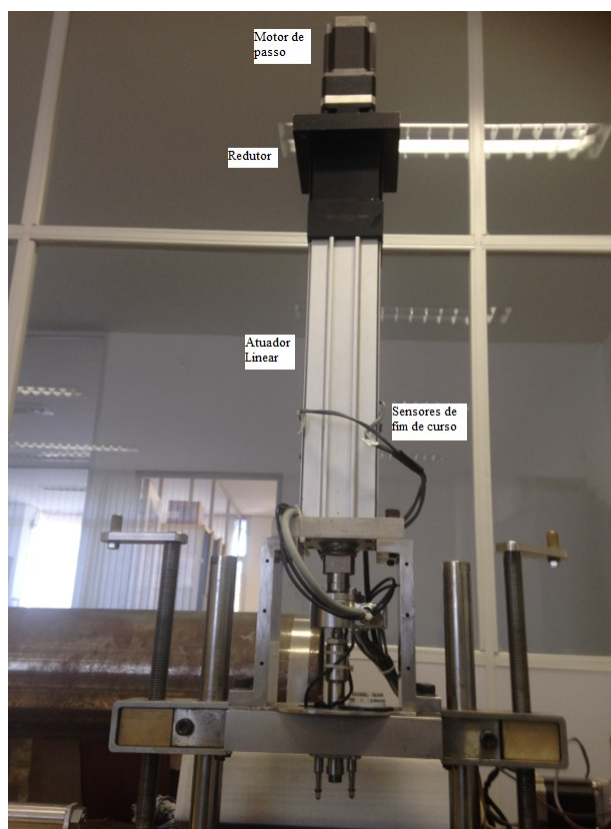


Figura 3.1 – Equipamento de indentação instrumentada do LTAD.

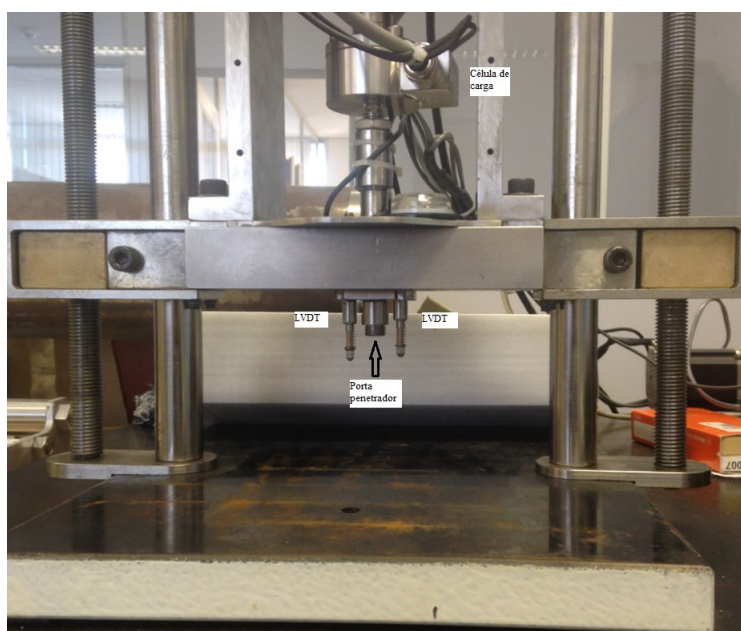


Figura 3.2 – Equipamento utilizado no LTAD para realização de EII, imagem mostrando os LVDTs e o porta penetrador.

Atuador de força: Este é composto por um motor de passo com passo de $0,8^\circ$ e um fuso de esferas recirculantes que redireciona a aplicação da força para o eixo do penetrador. O conjunto consegue fornecer um passo de deslocamento (resolução) de $0,1\mu\text{m}$. Para controle do motor é utilizado um driver 3540i, da Applied Motion, de linguagem *script command language (SCL)*. O hub utilizado é o SiNet Hub 444 também da Applied Motion.

Célula de carga: Este dispositivo é utilizado para que se possa medir a carga que está sendo aplicada ao sistema. Este sensor é da marca HBM, seu modelo é U2B e sua montagem é em “Full Bridge” a seleção deste baseou-se na força máxima de indentação, que é de 2 kN, sua faixa de medição é entre -2000 N e 2000 N.

Sensores de posição LVDT: Estes sensores são responsáveis por medir a profundidade de penetração da indentação. São eles da marca HBM, modelo WI/2mm-T e WI/5mm, sua montagem é em “Half Bridge” e suas faixas de medição são de $\pm 1\text{mm}$ e $\pm 5\text{mm}$.

Condicionador de Sinais: O aparelho utilizado é da marca HBM, modelo Spider8[®]. Este equipamento faz a leitura dos valores obtidos pelos LVDTs e pela célula de carga e converte estes valores em variáveis discretas de acordo com a configuração feita pelo usuário. O Spider8[®] leva em conta a forma de montagem e corrente usadas no sensor, a sensibilidade de cada sensor também pode ser modificada.

3.2 Projeto do *Software*

O *software* a ser desenvolvido tem por função controlar os atuadores, monitorar os sensores, controlar a aplicação, armazenar dados obtidos e conduzir o procedimento de ensaio. O programa deve ser de fácil operação, bem como conter rotinas de segurança para evitar eventuais acidentes na operação do macroindentador. A Fig. 3.3 representa o fluxo de dados da comunicação do sistema, onde os sensores apenas enviam dados e o motor apenas recebe instruções. Os outros equipamentos recebem instruções de atuação e configuração bem como respondem pedidos de status da sua operação.

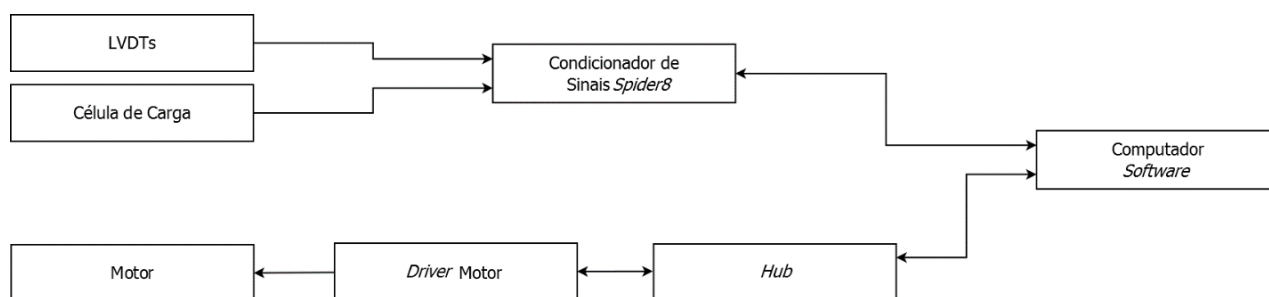


Figura 3.3 – Diagrama representativo do fluxo de dados entre os equipamentos.

Para desenvolver um programa eficiente, foi determinado que este deve conter ou executar os seguintes requisitos:

- Fornecer uma curva de carga vs profundidade para acompanhamento do ensaio;
- Painel de controle simples, de fácil operação, com uma interface amigável;
- Calcular os limites de operação do equipamento e evitar que ensaios sejam realizados fora destes limites, garantindo a segurança do equipamento e confiabilidade no ensaio;
- Realizar o armazenamento dos dados obtidos no ensaio de forma otimizada, para posterior análise, e armazenar os dados de entrada do ensaio como temperatura, nome do operador, diâmetro e material do penetrador e configuração dos sensores entre outros;
- Desenvolver artifícios de controle do equipamento de forma manual (fora do ensaio);
- Garantir o bom funcionamento do programa, mesmo em situações adversas, como falha de comunicação e erro ao salvar os dados.

3.3 Desenvolvimento

Na Fig. 3.4, tem-se o diagrama da lógica de funcionamento do programa como um todo. Primeiramente, as portas seriais são inicializadas e a comunicação inicial com motor de passo e sensores é estabelecida. Em caso de erro, o programa continuará tentando comunicar com os sensores e o motor. Após ter-se todas as comunicações estabelecidas, o sistema entra em estado de espera onde pode-se fazer a movimentação do penetrador de forma manual. O usuário pode então

escolher as configurações referentes ao ensaio, quando este é executado. Se não houver erro, os dados são salvos e o programa volta ao estado de espera, caso contrário, o erro é reportado ao usuário e o ensaio é abortado.

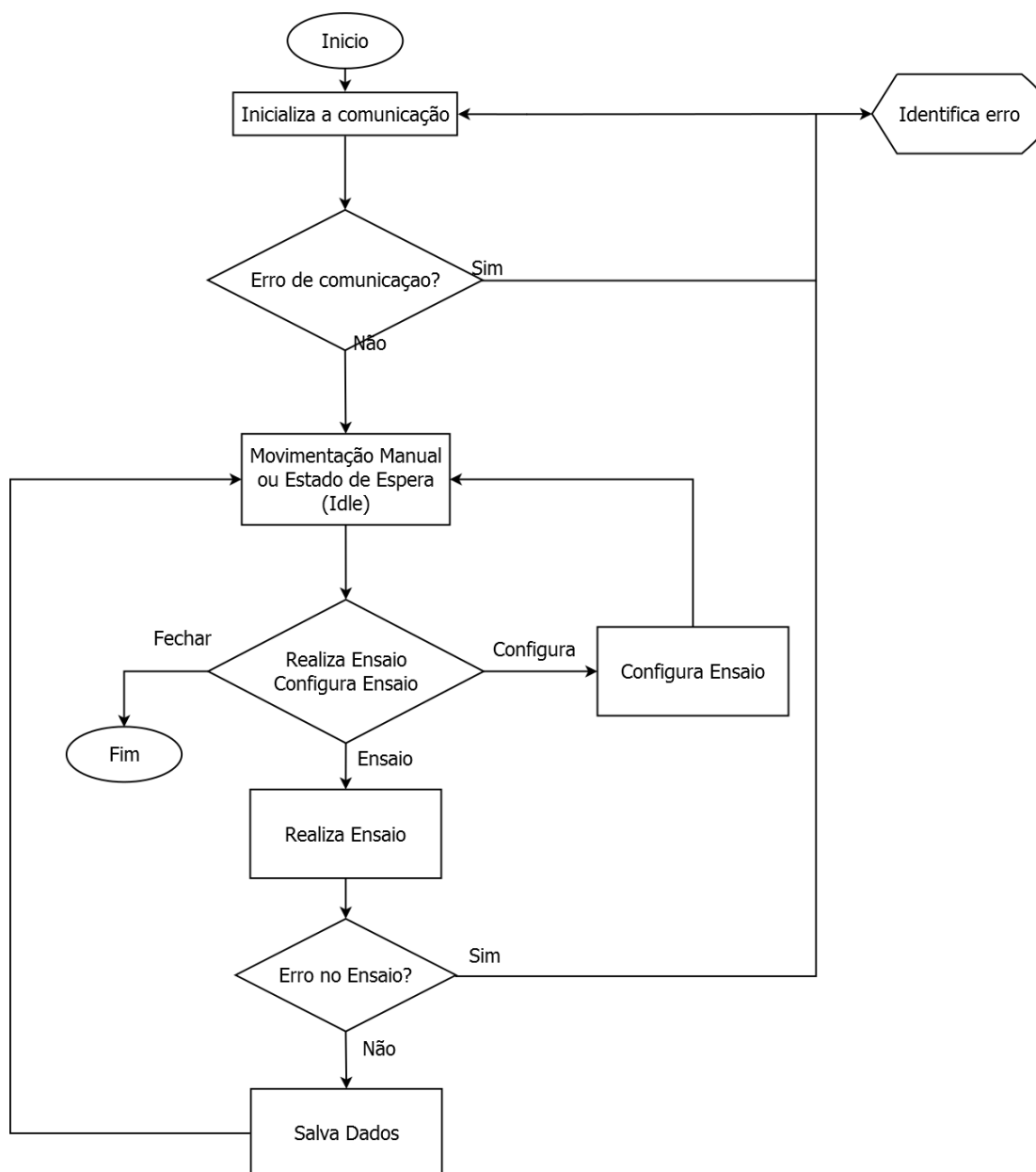


Figura 3.4 – Diagrama da lógica de funcionamento do programa.

Em qualquer ponto da execução do ensaio, a presença de erro de qualquer fonte aborta o ensaio e retorna o penetrador para a sua posição inicial (posição segura). Durante o ensaio, o motor, os sensores e o armazenamento de dados são monitorados, os valores dos sensores são mostrados

no painel frontal e um gráfico de carga *versus* profundidade de penetração é exibido em tempo real. Ter este gráfico durante o ensaio é importante para que o operador possa ver se o procedimento está sendo bem realizado, visto que os ensaios de indentação em aço tem um perfil bem característico, mostrado na Fig. 3.5.

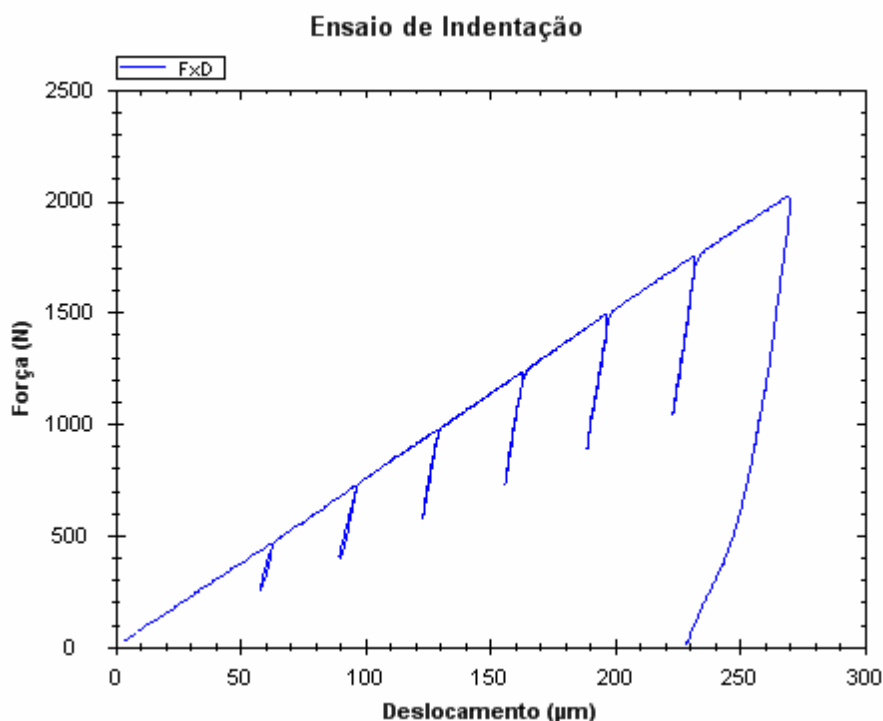


Figura 3.5 – Perfil característico de um ensaio de indentação instrumentada em aço, gráfico de carga *versus* profundidade de penetração (DE SOUZA, 2008).

Para execução do programa, este foi dividido em quatro módulos de programação que são executados de forma paralela. São estes o módulo de controle e configuração dos sensores, controle e configuração do motor, de controle do procedimento de ensaio e módulo auxiliar. Antes de começar a programação destes módulos, no entanto, são necessárias funções para comunicação e configuração dos sensores e motor, que servirão de base para os módulos mais complexos.

3.3.1 Funções de comunicação com sensores e motor

A primeira parte do projeto se compõe da programação das funções base para comunicação com

o motor e com os sensores. O objetivo destas é configurar as portas seriais que serão usadas, enviar comandos de atuação, requisitar o *status* do sistema e mudar configurações.

Uma porta serial é aberta para comunicação dos sensores e outra para comunicação do motor, ou seja, uma conexão com o Spider8® e outra com o Hub444. Estas portas devem ser abertas no início do programa e encerradas em sua finalização. Portanto, elas são as primeiras e últimas funções a ser chamadas.

3.3.1.1 Abertura da porta serial

A abertura da porta serial é o primeiro passo para comunicação com o motor ou o Spider8®. Esta função deve fazer a inicialização da porta, configurando os parâmetros de comunicação serial, *baud rate*, bit de paridade, quantidade de bits de dados e bit de parada, e associar uma porta do computador a essa comunicação. O LabVIEW® disponibiliza uma série de funções específicas para comunicação serial. Estas são chamadas *Virtual Instrument Software Architecture* (VISA). A função de inicialização da porta serial é ilustrada na Fig. 3.6, onde o *VISA resource name* é a porta do PC que será usada e as outras entradas são os parâmetros de configuração da comunicação da porta serial.

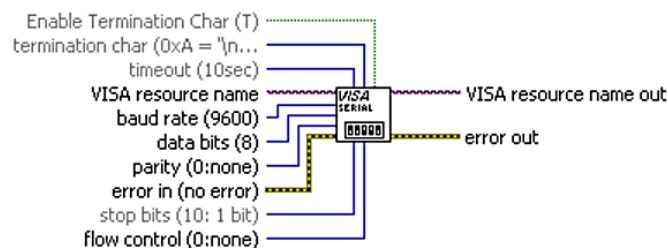


Figura 3.6 – Função de inicialização de comunicação serial VISA (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017c).

A VISA é um padrão para configurar, programar e solucionar problemas de sistemas de instrumentação que incluam interfaces GPIB, VXI, PXI, Serial, Ethernet e USB. O VISA fornece a interface de programação entre o *hardware* e os ambientes de desenvolvimento (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017c).

Com a comunicação inicializada e uma porta do PC associada a esta interface, as outras funções VISA podem ser chamadas para envio e recebimento de informações. Nas funções base para comunicação com Spider8® e motor são usados a função *write* (escrita) e *read* (leitura). Desta forma, seguindo o padrão de linguagem estabelecido nos manuais de SCL e de operação do Spider8® podem ser enviados comandos e requisições para os equipamentos. A Fig. 3.7 mostra o funcionamento da função *write*, onde o *visa resource name* é a porta do PC onde se deseja enviar a mensagem e *write buffer* é onde deve-se escrever a mensagem.



Figura 3.7 – Função VISA *write* (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017c).

3.3.1.2 Aquisição de dados

Para realizar a aquisição de dados, uma função que requisita os valores dos dois LVDTs e da célula de carga foi construída. Esta função basicamente envia uma requisição para o Spider8, através da função *write* e este retorna os valores dos sensores, que são lidos através da função *read*.

A cada dez valores lidos, é feita uma média destes, que é enviada ao módulo de controle dos sensores. Como a taxa de aquisição de dados é bem mais alta que a taxa de execução do ensaio, este procedimento não prejudica o andamento do programa e diminui a interferência de ruídos no ensaio.

3.3.1.3 Movimentação do motor

Para realizar a movimentação do motor, diversas funções relativas a cada comando em linguagem SCL foram feitas. Estas permitem a modificação dos parâmetros de movimentação do motor, como velocidade, distância e sentido de deslocamento. Também são usadas funções para verificar o *status* do motor (em movimento, parado, com erro), para limpar a fila de comandos em espera a serem executados e para mudar a corrente de alimentação.

Estes comandos são enviados pela função *write* e nos comandos que possuem requisição, a resposta do driver pode ser lida com a função *read*. Para realizar a movimentação, são enviados para o motor comandos que definem a velocidade (comando VE), a distância de deslocamento e sentido (comando DI), e, em seguida, um comando para movimentar o motor (comando FL). A Fig. 3.8 mostra o diagrama esquemático para movimentação do motor. Distância positiva move o motor em sentido horário e negativa em anti-horário. O programa espera que cada movimento seja concluído através do comando *Request Status* (RS), que informa se o motor ainda se encontra em movimento, antes que prossiga para uma próxima etapa.

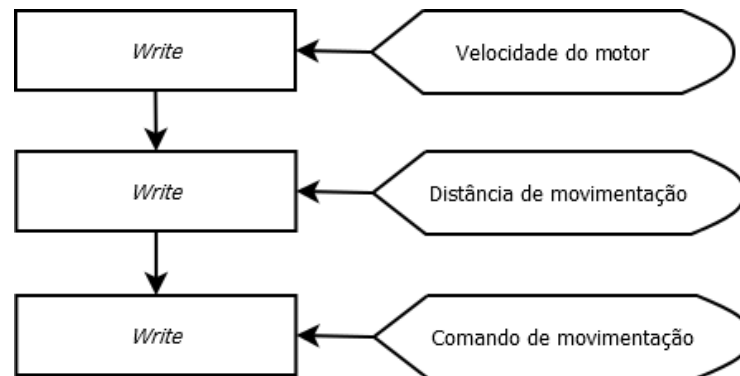


Figura 3.8 – Diagrama esquemático da função para movimentação do motor.

Durante o ensaio, o motor é alimentado com uma corrente de 2,5 A. Enquanto o sistema está em espera ou na movimentação manual, é enviado 1 A de alimentação. Isto evita que haja aquecimento sem necessidade. Em casos em que o movimento deve ser interrompido, seja por requisição do usuário ou por algum tipo de erro, o comando *stop and kill buffer* (SK) é utilizado para parar imediatamente o motor e excluir todos os comandos na fila de espera.

3.3.2 Módulo controle dos sensores

Este módulo é responsável por configurar e monitorar os sensores do equipamento. Logo no início do programa, a porta de comunicação serial é inicializada usando os comandos VISA. Em seguida, a comunicação com o Spider8[®] é inicializada usando as funções EST?, ICR e ASF, que fazem a requisição de erro, configuração da taxa de amostragem e do filtro, respectivamente. Os sensores são configurados de acordo com seu fundo de escala e tipo de sensor, filtro utilizado

e, em seguida, seu canal é ativado. Os comandos usados são ASA, AFS e ACT, respectivamente. A aquisição começa a ser feita com o comando MSV.

Após este período de configuração, o módulo entra em um loop de aquisição de dados. Este *loop* basicamente envia o comando OMB que é para leitura das variáveis medidas. Caso ocorra algum erro, o módulo encerra a comunicação, fecha a porta serial e recomeça sua execução do começo. No painel frontal um led é responsável por informar o usuário se os sensores estão em bom funcionamento.

O diagrama da Fig. 3.9 representa o funcionamento do módulo dos sensores. Quando o sistema está em bom funcionamento, ele entra em um loop de leitura de dados que dura até que algum erro ocorra ou que o programa seja encerrado.

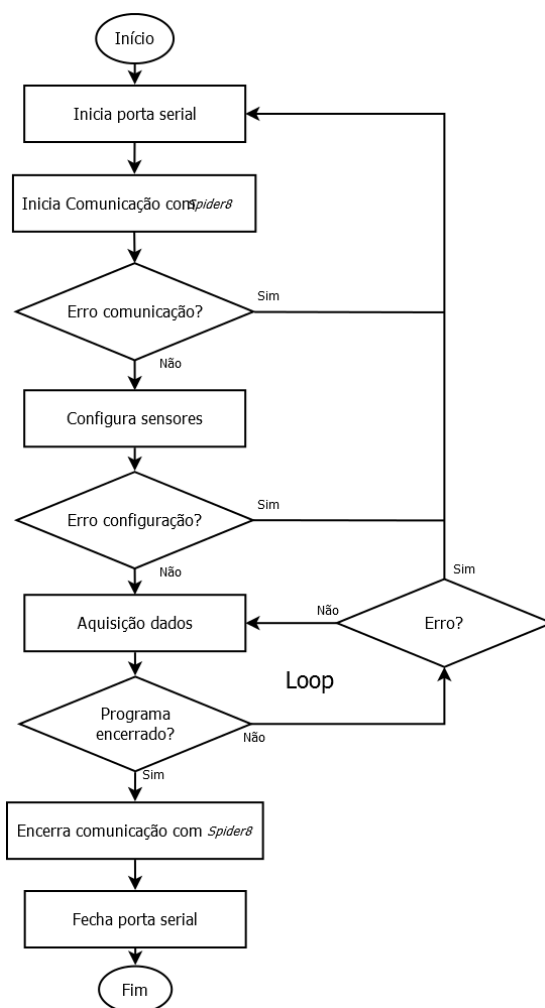


Figura 3.9 – Diagrama de funcionamento do módulo de controle dos sensores

O diagrama esquemático de aquisição de dados pode ser visualizado na Fig. 3.10, onde os valores lidos dos sensores são armazenados em variáveis locais que são usadas pelo módulo de controle do ensaio para sua execução. Como esta aquisição está posicionada dentro de um *loop*, os dados são lidos e atualizados a todo momento.

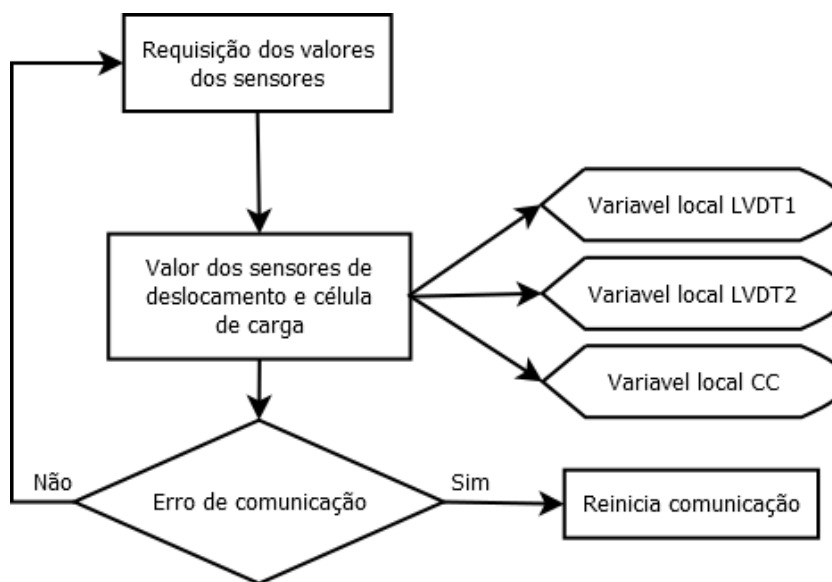


Figura 3.10 – Diagrama esquemático de funcionamento da aquisição de dados.

3.3.3 Módulo controle do motor de passo

O módulo de controle do motor é bem simples, devido ao fato de a configuração de movimento e movimentação não ser feita neste módulo. É função deste bloco de programação inicializar a comunicação serial, fazer a primeira configuração de resolução e alimentação, monitorar o status de funcionamento do motor e encerrar a comunicação.

A inicialização das portas seriais é feita usando as funções VISA, já descritas, e o monitoramento é feito através do *loop* indicado na Fig. 3.11. Deste modo, quando um erro acontece, a comunicação com o motor é reiniciada. O loop que confere o status do motor só é encerrado na presença de erro ou no encerramento do programa.

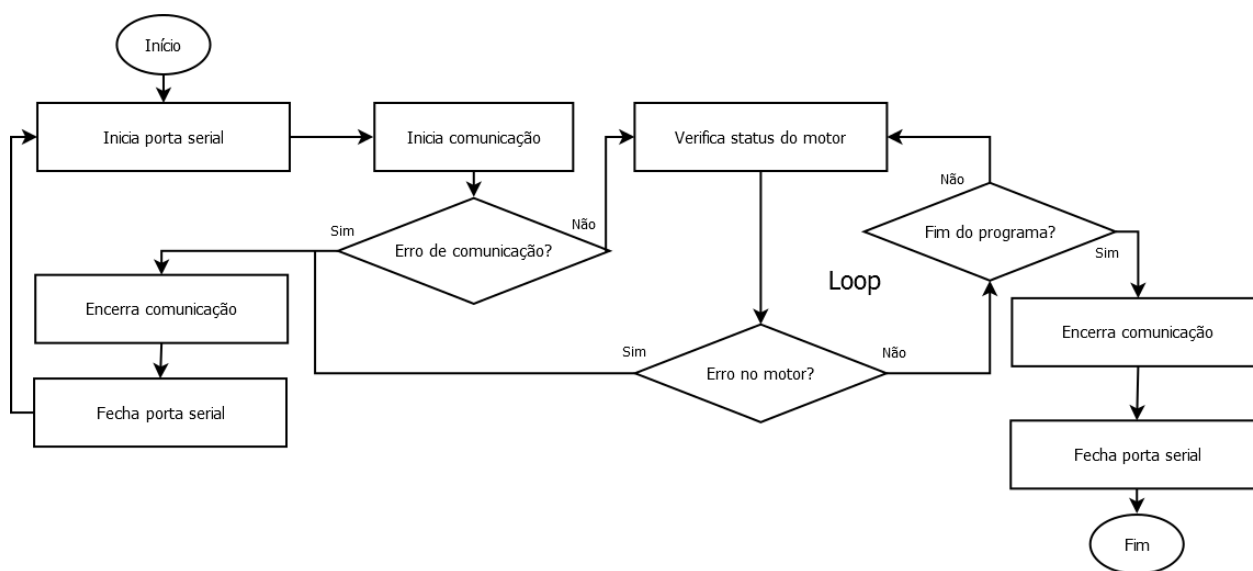


Figura 3.11 – Diagrama da lógica de funcionamento do bloco de controle do motor

3.3.4 Módulo controle do ensaio

Este módulo é o mais complexo. Ele tem a função de comandar o ensaio, salvar os dados, plotar o gráfico e garantir que o equipamento funcione dentro dos limites de utilização dos sensores. Além destas funções, este módulo também faz o controle da parte relativa à movimentação manual do penetrador.

Enquanto nenhum ensaio está sendo realizado, o programa fica esperando uma movimentação manual do penetrador ou que o botão iniciar ensaio seja apertado. Na Fig. 3.12 é descrito o funcionamento bem simplificado deste módulo.

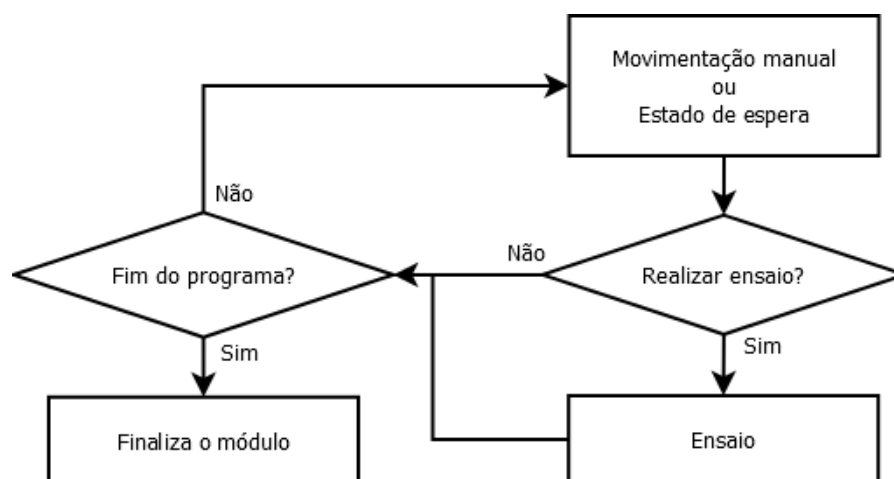


Figura 3.12 – Diagrama simplificado do funcionamento do módulo de ensaio.

A movimentação manual possui dois modos de operação. No primeiro o operador escolhe a distância e a velocidade do movimento e aperta o botão subir ou o descer. No segundo, é escolhida uma velocidade e o botão subir ou descer é pressionado, fazendo com que o motor se mova continuamente na direção desejada.

O *driver* do motor de passo impede que movimentações fora do curso do penetrador sejam feitas através de sensores de fim de curso. O programa impede uma possível colisão, parando o penetrador, caso este encoste em algum objeto e o botão abortar movimento pára imediatamente qualquer ação do motor. Há também a opção de recuar o penetrador, onde ao apertar este botão, o penetrador vai para sua posição mais recuada.

O programa fica na área de movimentação manual até que o botão “iniciar ensaio” seja apertado ou que o programa seja encerrado. Ao se iniciar o ensaio, o bloco de movimento manual é desabilitado e o procedimento de ensaio é ativado.

O ensaio é composto da parte de salvar os dados do ensaio, salvar os dados relativos à curva carga *versus* profundidade de penetração, procedimento de aproximação do penetrador, de aplicação de pré-carga e de aplicação dos ciclos de carga (ensaio propriamente dito), plotagem do gráfico carga *versus* profundidade de penetração e encerramento do ensaio. Todas estas funções são executadas de forma seriada, exceto pelo gráfico que é executado de forma paralela.

Após o operador iniciar o ensaio, começa o processo de salvamento dos dados de entrada do ensaio, seguido pelo procedimento de aproximação do penetrador e aplicação de pré-carga. Quando o penetrador encosta no corpo de prova, inicia-se a aplicação dos ciclos de carga, salvamento valores dos sensores e plotagem do gráfico. Quando o ensaio chega ao fim, o penetrador é recuado, encerra-se a atualização do gráfico e o programa retorna para o estado de espera ou movimentação manual.

A Fig. 3.13 descreve o funcionamento do ensaio desde o salvamento de dados até o encerramento do procedimento. Para simplificar o diagrama, não foi incluído o tratamento de erros, porém, se qualquer erro ocorrer, é declarado fim do ensaio e o mesmo é encerrado.

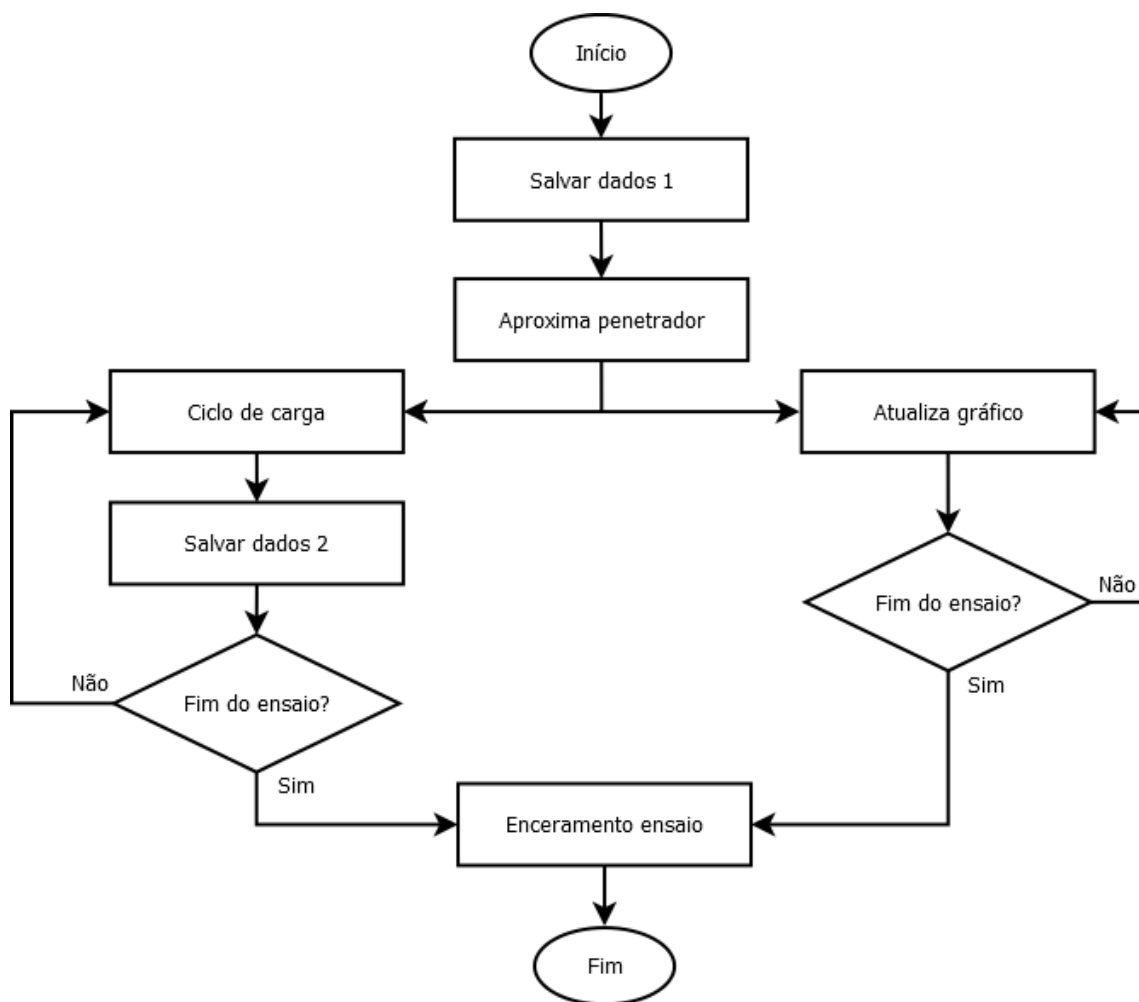


Figura 3.13 – Diagrama do procedimento de ensaio.

Salvar dados 1: Neste bloco, são salvos os dados relativos às condições do ensaio. São estes a temperatura do ambiente, hora e dia, nome do operador, diâmetro do penetrador, estado de configuração dos sensores, e cabeçalho para entendimento dos dados salvos no bloco salvar dados 2. Caso o operador tente salvar o arquivo em uma pasta já existente, o programa requisita que outro nome de pasta seja escolhido, evitando assim erro no salvamento e perda de dados.

São utilizadas as funções de entrada e saída de dados para criar uma pasta (*open folder*) em determinado diretório escolhido pelo usuário, criar um arquivo de leitura e escrita (*create folder*), fazer a escrita neste arquivo (*write to text file*), e fechar o arquivo (*close file*). Antes de realizar este procedimento, porém, o diretório escolhido pelo usuário é verificado (*check if the file or folder exists*) para que duas pastas com o mesmo nome não sejam criadas.

Aproximação do penetrador e carga de identificação da superfície: Para fazer a aproximação do penetrador de forma mais rápida, esta etapa foi dividida em duas fases, a aproximação e a carga de identificação. A aproximação é uma movimentação mais rápida que leva o penetrador para perto da superfície do corpo de prova e para aplicar a carga de identificação, avança-se o penetrador de forma lenta até que este aplique uma carga mínima escolhida pelo usuário. No fim da aplicação da carga de identificação, o ensaio começa a ser executado e o gráfico começa a ser plotado.

Ciclo de carga: Para evitar que um ensaio inválido seja executado, é verificado se este está dentro dos limites de movimentação do penetrador e de medição dos LVDTs. É calculado em que pontos ocorrerão os ciclos de carga. O penetrador então avança de maneira lenta e gradual até que o primeiro ciclo é alcançado. Em seguida, a carga aplicada é reduzida em certa porcentagem escolhida pelo operador. Após a carga ser diminuída o suficiente, o sistema volta a aplicar carga até o próximo ciclo. O final do ensaio é o último ciclo, onde a carga é reduzida aproximadamente para zero e o ensaio termina. É neste momento que o gráfico para de plotar e as informações do ensaio deixam de ser salvas.

Salvar dados 2: O salvamento de dados é acoplado a todos os movimentos realizados no ciclo de carga. Assim, todos os pontos de movimentação são armazenados. Os dados são registrados em um arquivo de texto com colunas referentes ao tempo, carga aplicada, média da medição dos LVDTs e a medição de cada LVDT. O usuário tem a opção de definir o diretório onde

esses arquivos serão armazenados. Neste caso, foi utilizada a função de escrita em formato de planilha em arquivo, que escreve os dados já com a tabulação correta separando-os.

Gráfico: Como o processamento entre o gráfico e o ciclo de carga é paralelo, o gráfico acaba sendo atualizado muito rapidamente após cada avanço do penetrador. Isto é importante para que o operador saiba a situação do ensaio e possa abortá-lo, caso este esteja ruim. O gráfico é feito a partir da construção de dois vetores, um armazena os valores de profundidade de penetração e outro os de carga, em micrometros e Newtons respectivamente.

Encerramento do ensaio: Após terminado o ciclo de carga, o gráfico é encerrado, as variáveis de controle do ensaio são restauradas para sua configuração inicial. O penetrador retorna a sua posição de repouso e o programa volta para o bloco de espera ou movimentação manual.

3.3.5 Módulo controle auxiliar

Este módulo é o mais simples, porém não menos importante. Ele faz o controle de várias ferramentas do painel frontal como botões, abas, janelas de ajuda, janelas de erro, faz o encerramento do programa e para a execução do motor caso o programa seja encerrado ou o ensaio seja abortado. Ele é um loop contínuo que atualiza a posição dos botões, determina qual aba está ativa e mostra as janelas de ajuda e erro quando necessário.

As janelas de ajuda e erro são mostradas através de uma função que as torna visíveis ou não. Assim quando um erro é detectado, este módulo torna a janela relativa a este erro visível, informando ao usuário o que está errado. Da mesma forma, quando um botão de ajuda é pressionado, a janela referente a este se torna visível. Quando o erro termina, ou o botão de ajuda é pressionado novamente, essas janelas se tornam invisíveis ao usuário novamente. Este artifício também é usado para impedir que botões sejam pressionados em momentos indevidos. Isto é feito criando uma janela invisível que cobre o botão que não deve ser usado, evitando que este seja pressionado várias vezes ou que o programa seja fechado durante o ensaio.

Caso o ensaio seja abortado ou aconteça um erro, é necessário que o motor pare de se movimentar imediatamente. Isso é feito através do comando *Stop and Kill Buffer* (SK), que para o comando que está sendo executado imediatamente e elimina todos os comandos na fila de espera.

O penetrador é recuado lentamente até desencostar da amostra e rapidamente até sua posição mais recuada.

Quando o usuário aperta o botão para fechar o programa, este módulo espera o término de todos os outros, garantindo que as comunicações sejam encerradas e as portas seriais fechadas, então ele fecha o programa.

3.3.6 Controle de erro

Em todos os módulos e funções do programa, existe a análise e tratamento de erro. A maior parte das funções disponíveis no LabVIEW® contém uma saída que informa se houve erro ou não. Essas saídas são utilizadas para controle do programa. Assim quando um erro é identificado, a ação mais correta é tomada.

Um erro na comunicação, configuração ou leitura dos sensores faz com que o módulo de controle dos sensores seja reinicializado. Um erro proveniente de algum comando do motor ou de falha na comunicação faz com que o módulo de controle do motor seja reinicializado. Um erro no armazenamento de dados gera uma janela avisando ao usuário que os dados não foram salvos corretamente e que o ensaio deve ser refeito.

Além dos erros padrões, foi feito um controle das configurações que o usuário pode fazer, evitando assim que comandos inválidos sejam enviados, que o equipamento se comporte de maneira não planejada ou que os sensores sejam danificados devido à execução de ensaios fora dos limites permitidos. Este controle inclui a limitação dos dados de entrada do ensaio, permitindo apenas valores plausíveis com o objetivo do equipamento e análise das informações de entrada para verificar se em algum ponto pode haver falha no ensaio.

3.3.7 O painel frontal

Um dos objetivos do projeto é que o programa seja de fácil execução e entendimento para o usuário. Por isto, um painel frontal simples foi desenvolvido. Neste não há informações excessivas, não há letras ou imagens rebuscadas, as cores são neutras e as diferentes abas estão bem definidas e descritas, botões de ajuda informam o usuário a função de cada aba em caso de

dúvidas. No canto esquerdo é fixado um painel de controle que atualiza em tempo real o valor dos sensores, o *status* atual de funcionamento do Spider8® e do motor e se o ensaio está em andamento. A aba denominada Punch é reservada para futura implementação de um outro tipo de ensaio.

A Fig. 3.14 mostra o painel frontal na aba configurações. O botão de ajuda no canto direito superior mostra diferentes informações dependendo da aba em que o usuário se encontra. O painel de controle do lado esquerdo é fixo, independente da aba que está sendo usada. Os leds no canto esquerdo verdes indicam que o motor e o Spider8® estão em bom funcionamento. Quando ocorre algum erro, estes leds se tornam vermelhos e uma janela de erro aparece no canto direito superior do painel. O led denominado ensaio indica se o procedimento de ensaio está em andamento. A barra denominada de posição do penetrador mostra a posição absoluta deste em relação a seus limites mínimo e máximo de posicionamento.

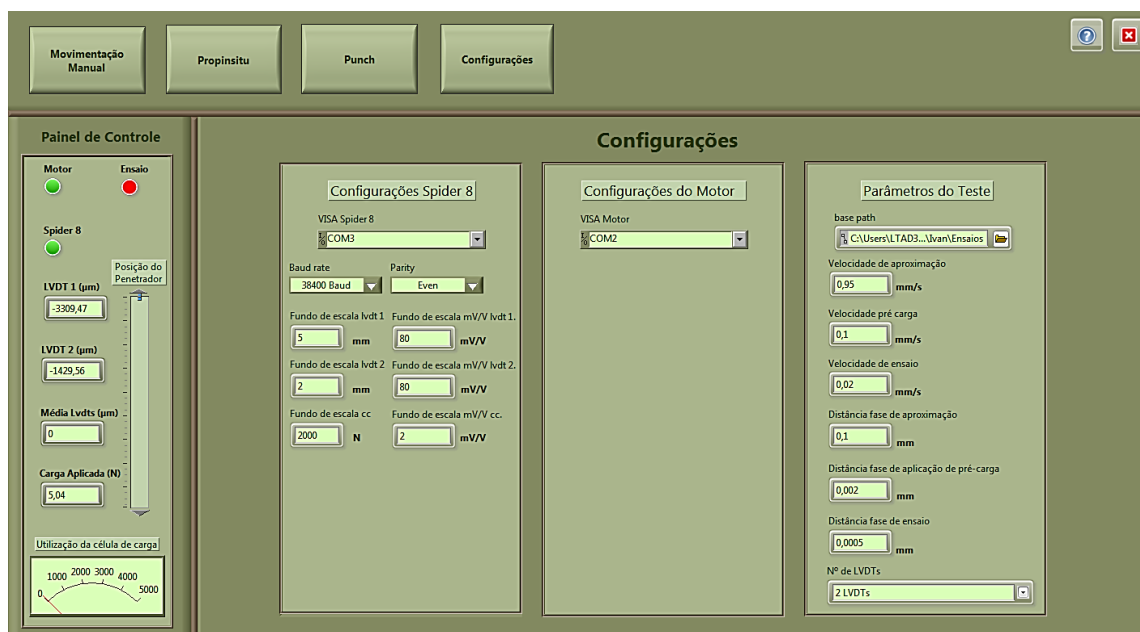


Figura 3.14 – Painel frontal do programa na aba configurações.

Na Fig. 3.15 tem-se o painel frontal do programa. A aba que está à mostra é a de movimentação manual do penetrador. Pode-se observar a janela de erro ativa, na cor rosa, indicando que o motor não está em funcionamento. Já a Fig. 3.16 exibe a janela de ajuda da aba de ensaio, que aparece no centro do painel frontal quando o botão de ajuda é pressionado.



Figura 3.15 – Painel frontal do programa na aba de movimentação manual.

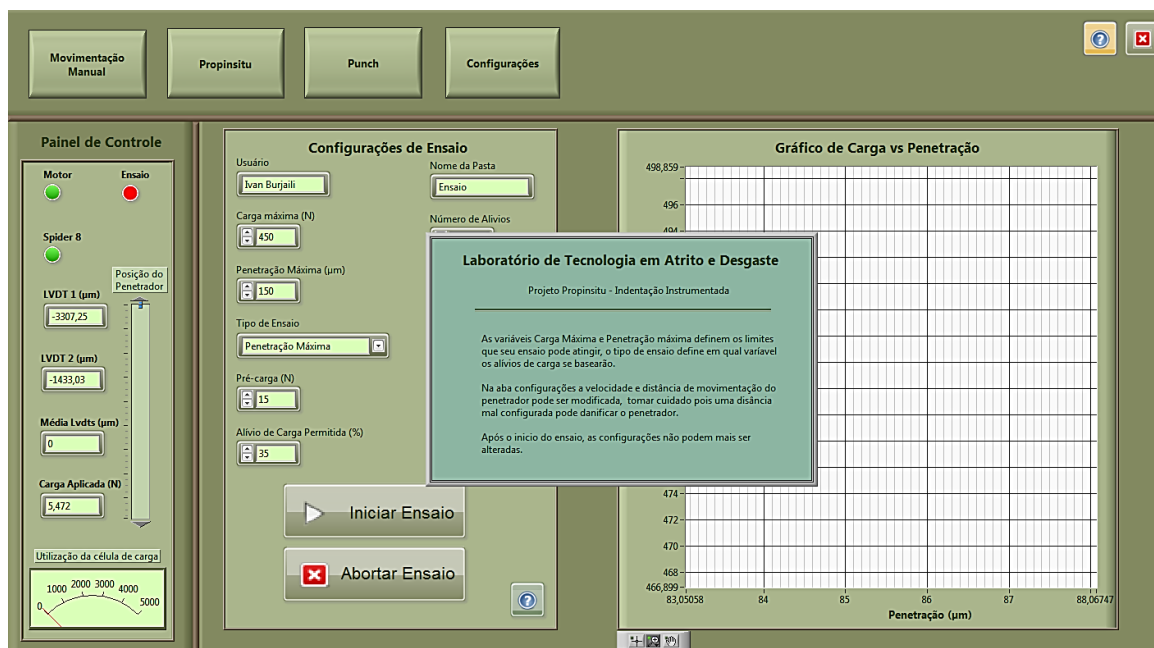


Figura 3.16 – Janela de ajuda da aba de controle do ensaio.

3.3.7.1 Aba referente à movimentação manual

A Fig. 3.17 mostra o painel frontal na aba de movimentação manual. Para realizar a movimentação do penetrador existem duas opções. Na primeira (mais a cima) é necessário escolher uma velocidade em milímetros por segundo e apertar e segurar o botão subir ou descer, resultando em uma movimentação contínua. Na segunda opção, basta escolher a distância em milímetros, a velocidade em milímetros por segundo e apertar o botão subir ou descer apenas uma vez, dependendo do sentido que se deseja fazer a movimentação.



Figura 3.17 – Aba referente a movimentação manual do programa.

3.3.7.2 Aba referente ao ensaio (propinsitu)

A Fig. 3.18 mostra a aba de realização do ensaio, é nesta área que o operador monitora o ensaio e escolhe os parâmetros a serem usados neste. As informações inseridas aqui são armazenadas em um arquivo info.txt que armazena os parâmetros utilizados no ensaio. A carga máxima é limitada em 95% do valor máximo de trabalho da célula de carga. Caso o nome da pasta a ser criada já exista, o ensaio é encerrado e é requisitado a troca do diretório. O número de alívios

corresponde ao número de ciclos de carga e descarga a serem executados, o descarregamento final é um ciclo. Portanto, o valor mínimo a ser inserido é 1.

O gráfico de carga *versus* penetração está posicionado na direita da figura. Como cada ensaio possui diferentes valores de carga e penetração, as escalas dos eixos são atualizadas a cada valor inserido, mantendo todas as informações devidamente mostradas em uma escala conveniente e de fácil entendimento.

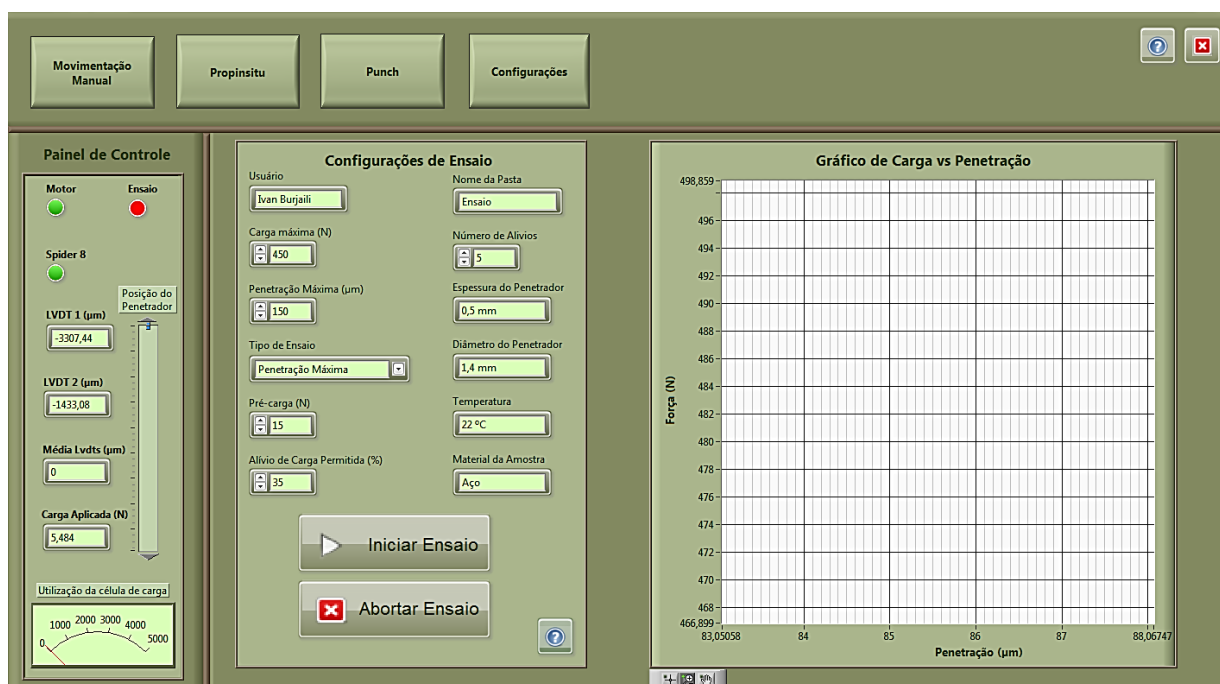


Figura 3.18 – Aba de realização do ensaio (*Propinsitu*).

3.3.7.3 Aba referente à configuração do programa

Nesta aba são configurados os parâmetros mais avançados do ensaio e da configuração dos equipamentos. Na área de configuração dos sensores é possível mudar a velocidade de comunicação, a paridade, a porta usada na comunicação e parâmetros de sensibilidade dos sensores. Estas informações dificilmente necessitam de alteração e o usuário do programa não deve se preocupar com elas, exceto em situações muito específicas como a substituição de um sensor.

A área de parâmetros de teste configura informações importantes na realização do ensaio. O *base path* é o diretório onde os dados serão salvos e o número de LVDTs determina quais LVDTs

serão usados no ensaio, o esquerdo, o direito ou os dois. A velocidade e a distância de aproximação determinam a movimentação do penetrador até que os LVDTs entrem na sua faixa de medição. Após o toque, o penetrador se movimenta de acordo com os parâmetros de pré-carga. Quando o penetrador encosta no corpo de prova, a velocidade e a distância de ensaio passam a determinar a movimentação. Deve-se ter muito cuidado na configuração destes parâmetros visto que em material de alta dureza, uma pequena penetração gera grandes esforços. Para minimizar o risco de configuração errada, os valores são limitados em intervalos mais comumente usados. A Fig. 3.19 ilustra a aba de configuração.

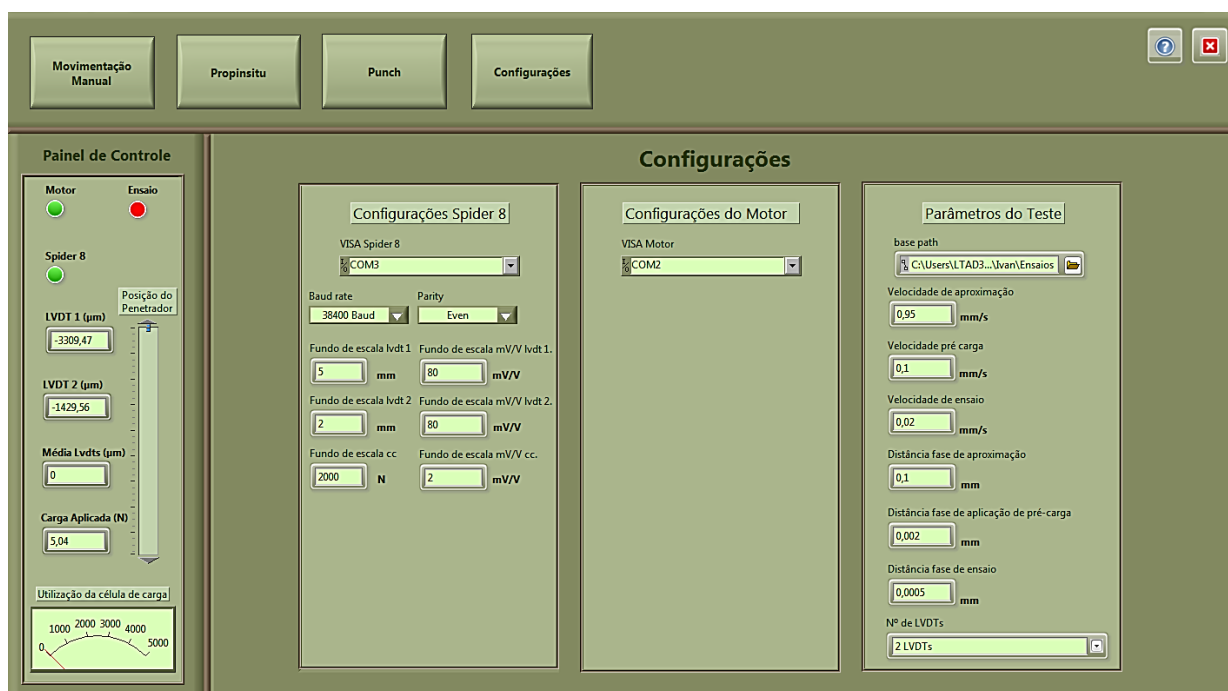


Figura 3.19 – Aba de configuração do programa.

3.4 Realização do Ensaio em Borracha

Para testar o programa, o corpo de prova usado foi uma borracha. Desta forma possíveis danos ao penetrador esféricos são evitados. A Fig. 3.20 mostra o ensaio realizado. Os parâmetros usados foram uma carga máxima de 230 N, uma penetração máxima de 3 milímetros, 7 ciclos de carga, um alívio de carga de 30% em cada ciclo e passo de penetração de 0,01 milímetros. A Fig. 3.21 mostra o painel frontal em desenvolvimento e o resultado do ensaio.



Figura 3.20 – Teste do usando borracha como corpo de prova, sem penetrador.

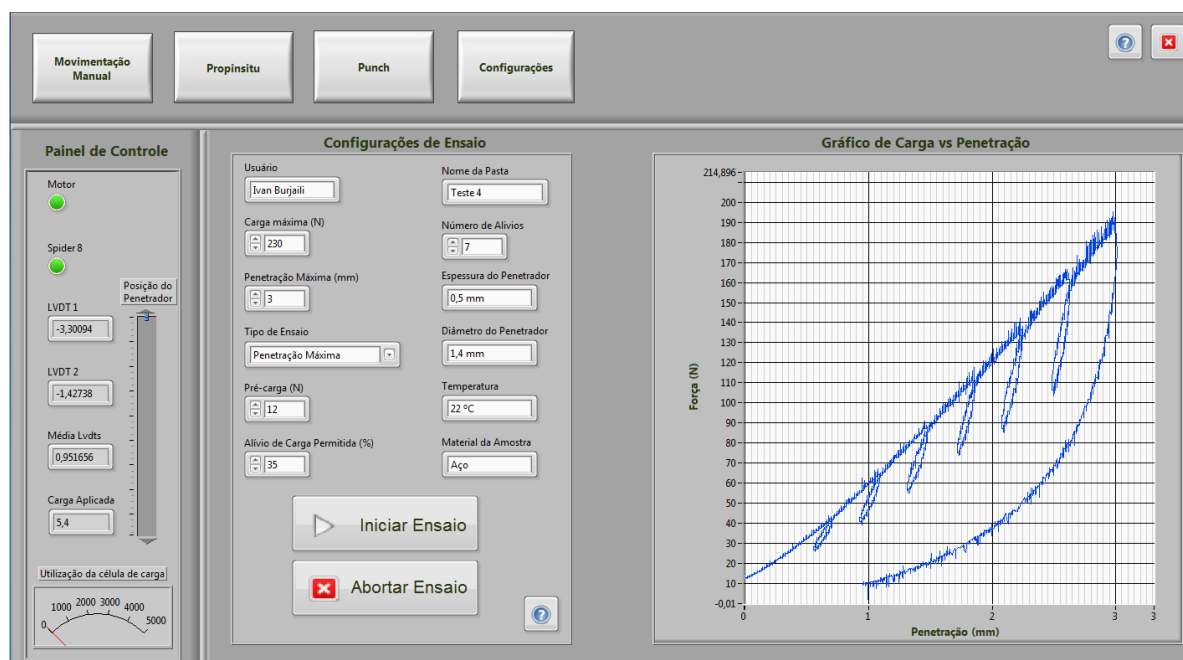
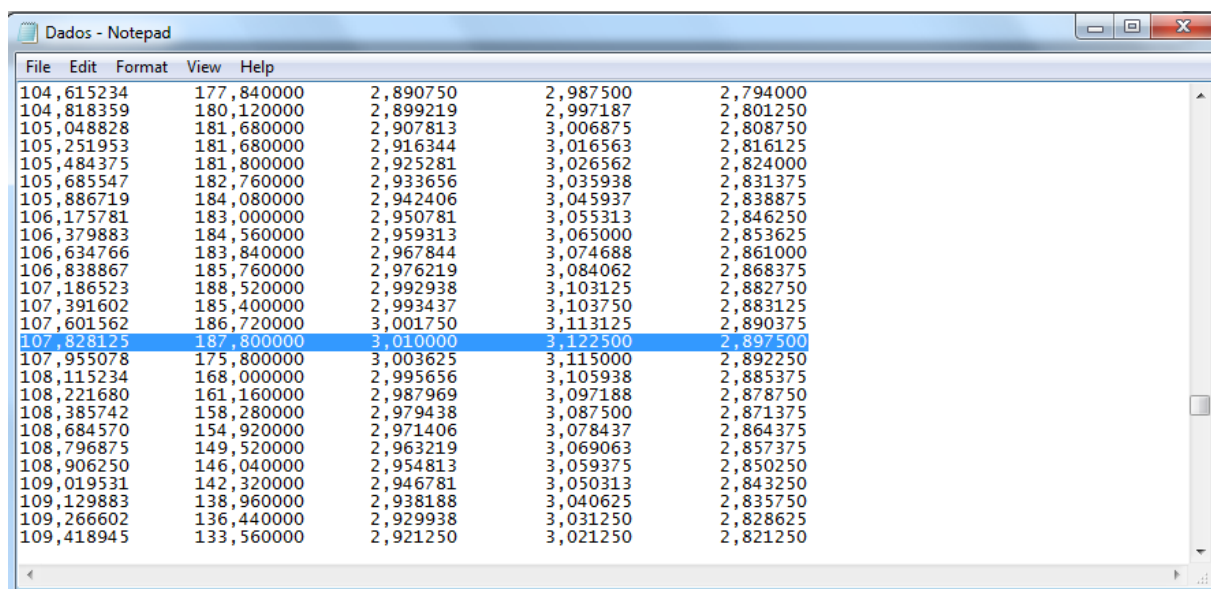


Figura 3.21 – Resultado do ensaio com corpo de prova de borracha.

Os resultados deste teste podem ser melhor analisados usando os arquivos armazenados. A Fig. 3.22 é a Dados.txt que armazena os valores dos sensores e célula de carga durante o ensaio. Pode-se observar na linha grifada do arquivo dados o momento em que a profundidade de penetração passa dos 3 milímetros e o descarregamento começa.



File	Edit	Format	View	Help
104,615234	177,840000	2,890750	2,987500	2,794000
104,818359	180,120000	2,899219	2,997187	2,801250
105,048828	181,680000	2,907813	3,006875	2,808750
105,251953	181,680000	2,916344	3,016563	2,816125
105,484375	181,800000	2,925281	3,026562	2,824000
105,685547	182,760000	2,933656	3,035938	2,831375
105,886719	184,080000	2,942406	3,045937	2,838875
106,175781	183,000000	2,950781	3,055313	2,846250
106,379883	184,560000	2,959313	3,065000	2,853625
106,634766	183,840000	2,967844	3,074688	2,861000
106,838867	185,760000	2,976219	3,084062	2,868375
107,186523	188,520000	2,992938	3,103125	2,882750
107,391602	185,400000	2,993437	3,103750	2,883125
107,601562	186,720000	3,001750	3,113125	2,890375
107,828125	187,800000	3,010000	3,122500	2,897500
107,955078	175,800000	3,003625	3,115000	2,892250
108,115234	168,000000	2,995656	3,105938	2,885375
108,221680	161,160000	2,987969	3,097188	2,878750
108,385742	158,280000	2,979438	3,087500	2,871375
108,684570	154,920000	2,971406	3,078437	2,864375
108,796875	149,520000	2,963219	3,069063	2,857375
108,906250	146,040000	2,954813	3,059375	2,850250
109,019531	142,320000	2,946781	3,050313	2,843250
109,129883	138,960000	2,938188	3,040625	2,835750
109,266602	136,440000	2,929938	3,031250	2,828625
109,418945	133,560000	2,921250	3,021250	2,821250

Figura 3.22 – Arquivo Dados.txt. referente ao ensaio com borracha, primeira coluna é o tempo medido em segundos, segunda coluna é a carga medida em Newtons, terceira a quinta coluna é a penetração medida pelos LVDTs em milímetros.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fluidez e Segurança do *Software*

Para que não se encontre dificuldades no uso do *software* é fundamental que este seja rápido e não trave, mesmo quando o usuário não o opera de maneira correta. Foi constatado durante os vários testes que o programa continua a funcionar e se recupera bem de erros comuns como a desconexão de um cabo ou o desligamento do Spider[®]. Nos casos em que o motor precisa parar imediatamente, o comando de parar a tarefa atual e eliminar todas as tarefas da fila é executado muito rapidamente, evitando que movimentos errados ou situações não adequadas ocorram.

Todos os problemas que ocorrem na execução do *software* são prontamente reportados ao usuário, garantindo que este saiba o que está errado e tome providências para consertar o erro. Após o início do ensaio, é garantido que nenhuma variável possa ser alterada e as outras abas e o botão de fechar o *software* são desabilitados. Isto aumenta a confiabilidade do ensaio e caso este tenha que ser interrompido, basta pressionar o botão abortar, que para a movimentação do motor imediatamente.

4.2 Realização do Ensaio em Aço

O ensaio utilizando aço como corpo de prova foi o último dos procedimentos realizados. A Fig. 4.1 mostra o posicionamento da amostra sob o penetrador, enquanto a Fig. 4.2 mostra o gráfico gerado durante o teste.



Figura 4.1 – Foto do ensaio com aço como corpo de prova.

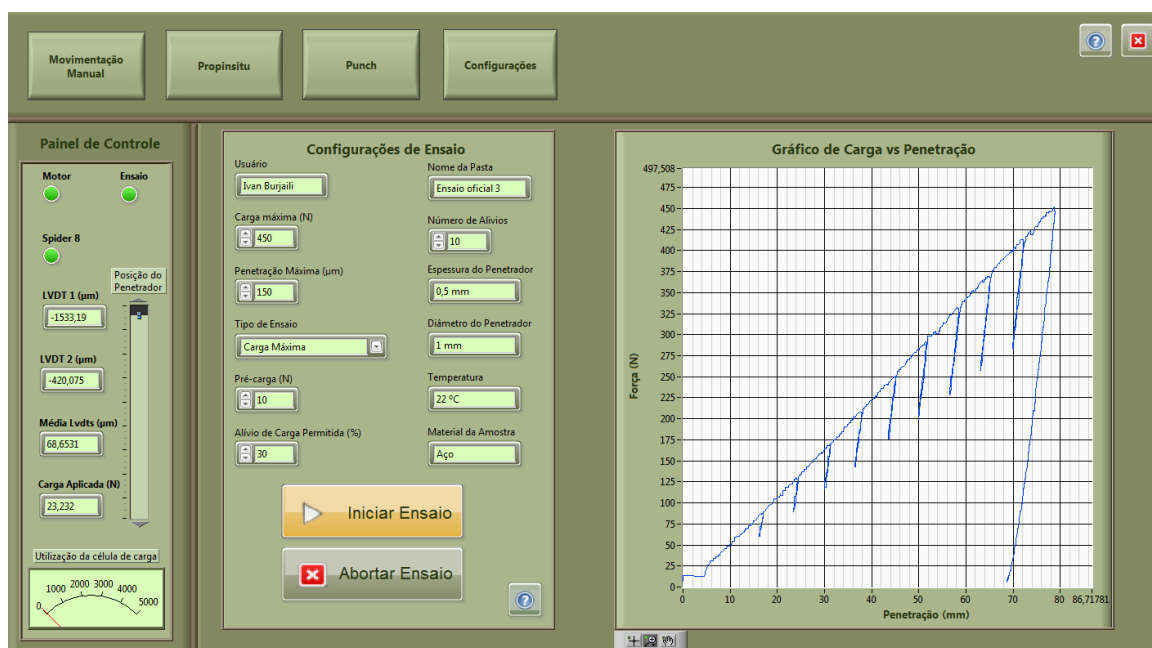


Figura 4.2 – Resultado do ensaio com aço como corpo de prova.

Este foi um ensaio utilizando carga máxima como parâmetro. Desta forma o penetrador avançou até que a carga aplicada fosse de 450 N. Foram realizados dez ciclos de carga cada um com alívio de 30%. Na Fig. 4.3 o arquivo Info.txt armazena os parâmetros do teste, e na Fig. 4.4 o arquivo Dados.txt armazena os valores medidos pelos sensores. O passo de deslocamento foi de 0,5 micrômetros. O erro no começo da curva se deve à aplicação da carga de identificação da superfície, este erro pode ser evitado diminuindo-se o passo de movimentação do motor durante o período de aplicação desta carga.

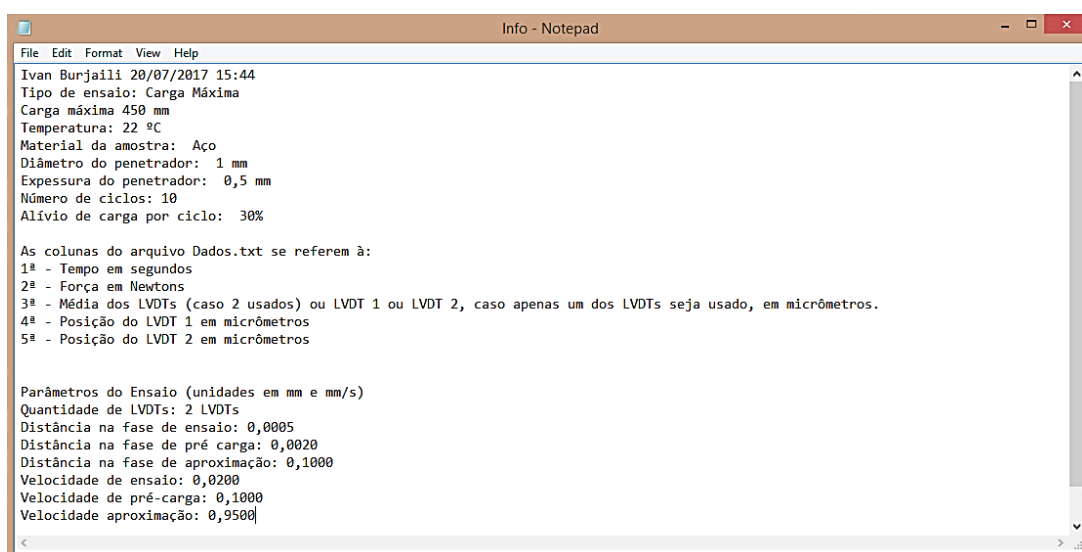


Figura 4.3 – Arquivo Info.txt. referente ao ensaio com aço.

Time (s)	Force (N)	LVDT 1 (μm)	LVDT 2 (μm)	Average (μm)
48,62600	311,92800	58,24375	58,56250	57,92500
48,78300	315,96000	58,33125	58,62500	58,03750
48,90800	321,01200	58,54688	58,90625	58,18750
49,01500	323,68800	58,60938	58,96875	58,25000
49,12200	329,66400	58,77500	59,12500	58,42500
49,25900	332,38800	58,97188	59,34375	58,60000
49,39100	335,52000	59,20313	59,53125	58,87500
49,51900	338,68800	59,58125	59,93750	59,22500
49,66700	340,76400	59,94375	60,31250	59,57500
49,77300	341,07600	60,07188	60,40625	59,73750
49,88000	344,05200	60,29375	60,62500	59,96250
49,98400	344,89200	60,51250	60,87500	60,15000
50,09200	346,15200	60,82188	61,21875	60,42500
50,19500	349,24800	61,22813	61,59375	60,86250
50,33200	352,00800	61,65625	62,00000	61,31250
50,51600	351,67200	62,00625	62,37500	61,63750
50,69500	354,37200	62,41563	62,84375	61,98750
50,90200	356,31600	62,67188	63,03125	62,31250
51,01800	358,12800	62,93750	63,31250	62,56250
51,12600	360,10800	63,13438	63,53125	62,73750
51,28200	362,80800	63,50000	63,87500	63,12500
51,43300	362,66400	63,83437	64,21875	63,45000
51,58800	365,72400	64,09688	64,46875	63,72500
51,79300	367,58400	64,50000	64,87500	64,12500
52,03100	369,18000	64,84375	65,25000	64,43750
52,26900	368,48400	65,12813	65,53125	64,72500

Figura 4.4 – Arquivo Dados.txt. referente ao ensaio com aço, primeira coluna é o tempo medido em segundos, segunda coluna é a carga medida em Newtons, terceira a quinta coluna é a penetração medida pelos LVDTs em micrômetros.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um *software* de fácil utilização e confiável, capaz de gerenciar ensaios de indentação instrumentada, gerando um gráfico de carga *versus* profundidade de penetração e armazenando os dados da maneira correta para posterior cálculo das propriedades mecânicas do material. O LabVIEW® se mostrou uma ferramenta poderosa na comunicação com os instrumentos e na aquisição de dados. A comunicação com os instrumentos é prática e rápida graças às funções para comunicação disponibilizadas pelo *software*.

O programa conta com vários cuidados relativos à segurança do ensaio, sempre verificando as configurações fornecidas pelo usuário e impedindo que movimentos indevidos sejam realizados. Além disto, o gráfico gerado mostra adequadamente o andamento do ensaio e fácil de se verificar quando algum fator está errado. Na ocorrência de algum problema, o botão abortar pára imediatamente a ação do motor, interrompendo um movimento indevido. Todos estes dispositivos de segurança foram testados diversas vezes. Por estes motivos o programa pode ser considerado confiável e seguro.

A interface simples do painel frontal faz com que seja fácil entender o programa. Aliando isso às janelas de ajuda, os dispositivos de segurança, às funcionalidades dos leds, o mostrador de aplicação de carga e o *slider* mostrando o posicionamento do penetrador, chega-se à conclusão de que o programa é amigável ao usuário e de fácil operação.

O ensaio de indentação instrumentada foi testado diversas vezes com a borracha, e verificou-se que a execução do ensaio segue a metodologia correta e que a movimentação do penetrador consegue atingir precisão melhor do que 1 micrometro. Com base nos testes com a borracha, foi concluído que o teste com aço poderia ser realizado.

O ensaio com amostra de aço foi realizado usando 0,5 micrometro no passo de penetração. Conforme observado nos resultados, o gráfico gerado é compatível com a teoria, o tempo de duração foi de 93 segundos, os dados foram salvos de maneira correta. Os ciclos de carga ocorreram nos momentos certos e não houve erros. Com base em todas as conclusões apresentadas, conclui-se que o *software* cumpre com o seu objetivo e está apto para realizar ensaios de indentação instrumentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALL ABOUT CIRCUITS. **Electrical instrumentation signals**. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-9/strain-gauges/>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

APPLIED MOTION PRODUCTS INC. **Hardware Manual 3540i - Programmable Step Motor Driver**. 1998. Disponível em: < https://www.applied-motion.com/sites/default/files/hardware-manuals/3540i_Hardware_Manual.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. Wiley, 1991.

CARDOSO, F. C. **Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação e Controle de um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos**, 2004.

DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios_mecanicos.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2017.

DE SOUSA, J. V. **Desenvolvimento de um sistema de hardware e software para otimização das unidades de controle, monitoração, coleta e processamento de dados de um macroindentador portátil para avaliação in-situ de propriedades mecânicas de dutos metálicos**. Horizonte Científico 2.2, 2008.

DE SOUSA, J. V., SOARES, A. B. **Desenvolvimento de um sistema computacional otimizado para controle e gerenciamento de um macroindentador portátil**. 2008.

HAGGAG, F. M. **In-situ Nondestructive Measurements of key Mechanical Properties of Oil and Gas Pipelines, Residual Stress Measurement and General Nondestructive Evaluation**. *American Society of Mechanical Engineers*. , v. PVP-Vol. 4, p. 99-104, 2001.

HAGGAG, F. M., **"In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System,"** *Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension*, ASTM STP 1204, W. R. Corwin F. M. Haggag, and W. L. Server, Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1993, pp. 27-44.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; BRASKI, D. N. **Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Microprobe.** ASME - *The American Society of Mechanical Engineers* - PVP. , v. 107, p. 101-107, 1989a.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; BRASKI, D. N. **Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Microprobe.** ASME - *The American Society of Mechanical Engineers* - PVP. , v. 170, n. *Innovative Approaches to Irradiation Damage, and Fracture Analysis*, p. 101-107, 1989b.

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.** In: A. A. Braun; N. E. Ashbaugh; F. M. Smith (Eds.); *Applications of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing*, ASTM 1092. Anais... p.188-208 Philadelphia: *American Society for Testing and Materials*, 1990.

HAGGAG, F. M.; WONG, H.; ALEXANDER, D. J.; NANSTAD, R. K. **The Use of Field Indentation Microprobe in Measuring Mechanical Properties of Welds.** *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Welding Research*, Gatlinburg, Tennessee. Anais... p.843-849, 1989d.

HBM, Spider8®, **Easy and reliable PC based data acquisition.** Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/2313/spider-8-easy-and-reliable-pc-based-data-acquisition/>>. Acesso em: 14 jul. 2017c.

HBM, U2B, **Como uma célula de carga trabalha.** Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>>. Acesso em: 13 jul. 2017b.

HBM, U2B, **Sensor de carga altamente versátil para forças de tração e compressão**. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/2407/u2b-sensor-de-carga-altamente-versatil-para-forcas-de-tracao-e-compressao/>>. Acesso em: 14 jul. 2017a.

HOTINGER BALDWIN MESSTECHNIK, HBM, **Manual de operação Spider8 e Spider8-30. Eletrônica de medição para PC**, 2005.

HOTINGER BALDWIN MESSTECHNIK, HBM, **Spider8 Command Help**, 2008.

ISO /TR 29381:2008. ISO /TR 29381: **Metallic materials -- Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test -- Indentation tensile properties**. 2008.

ISO 14577-1:2015: **Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method**. 2015.

NATIONAL INSTRUMENTS, **Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW**. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html>>. Acesso em: 13 jul. 2017a.

NATIONAL INSTRUMENTS, **Getting started**. Disponível em: <<http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/pt/dataflow>>. Acesso em: 12 jul. 2017b.

NATIONAL INSTRUMENTS, **Help**. Disponível em: <<http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/>>. Acesso em: 12 jul. 2017c.

NETO, F. F. R.; Cardoso, F. C.; Soares, A. B.; Franco, S. D.; Franco, V. L. D. S.; Paes, M. T. P., **Instrumentação e controle de um macroindentador portátil para avaliação de propriedades mecânicas de dutos**, 2003.

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, 2002.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**. Hemus, 1997.

RASLAN, A. A. **Introdução à ciência dos materiais**. Uberlândia: Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia - UFU, 1982.

SIEMENS, **Command language (SCL) software manual**, 2003.

SOUZA, F. C., **Implementação da comunicação serial entre o controlador lógico programável e o módulo de aquisição de dados Spider8 de um tribômetro de grande escala**, 2014. 145 p. Monografia de conclusão de curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

TANEMBAUM, A. S. **Redes de Computadores: Tradução da 4ª edição americana**. Brasil: Campus Elsevier, 2003. 936 p.

TOCCI, R. J., WIDMER, N. S. **Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações: Tradução da 7ª edição americana**. Rio de Janeiro: Pearson Prentice Hall, 1998. 600 p.

TRANSPETRO, **Terminais e oleodutos**. Disponível em: http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/terminais-e-oleodutos.html. Acesso em: 20 jun. 2017.

ZUM GAHR, K. H., **Microstructure and Wear of Materials**, Elsevier, Amsterdam, 1987.