

**FERNANDO PROCÓPIO DE ARRUDA**

**Implantação de um Equipamento  
de Medição do Módulo de  
Elasticidade Informatizado**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de São  
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e  
Automação

ORIENTADOR: Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos  
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A779i      Arruda, Fernando Procópio de  
                Implantação de um equipamento de medição do módulo  
                de elasticidade informatizado / Fernando Procópio de  
                Arruda; orientador Ruy Alberto Corrêa Altafim. São  
                Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
enfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2012.

1. Módulo de elasticidade. 2. Módulo de ruptura. 3.  
LVDT. 4. Célula de carga. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Fernando Procópio de Arruda

Título: "Implantação de um Equipamento de Medição do Módulo de Elasticidade Informatizado"

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 22/11/2012,*

*com NOTA 8,5 (oito, meio), pela Comissão Julgadora:*

**Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim (Orientador)**  
SEL/EESC/USP

**Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga**  
SEL/EESC/USP

**Prof. Titular Francisco Antonio Rocco Lahr**  
SET/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.

Aos meus pais, Eloiza de Fátima e Gilberto Procópio e minha família, pela confiança, incentivo, apoio e carinho que sem eles eu não estaria aqui.

À minha adorável namorada, Juliana Neris, por sempre estar ao meu lado e me apoiar.

Ao Professor Titular, Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela a orientação fornecida para a conclusão desse trabalho.

À todas as pessoas do Laboratório de Alta Tensão, especialmente ao Yuri Olivato e ao Daniel Ferreira.

À secretaria da graduação da SEL, Jussara, por sempre mostrar muita disposição em solucionar as minhas dúvidas e me auxiliar.

À todos os meus amigos, especialmente: Bruno Dantas, Bruno Faim, Bruno Granzoto, Camila Padovan, Claudete Silva, Cristiano José, David Trevizan, Diego Costa, Diego Domingues, Edson Bezerra, Efézio Gimenes, Gabriel Gutierrez, Hugo Arruda, Kall Andrade, Murilo Souza, Nilma Rezende, Paulo Cesar, Vinicius Teixeira, Vitor Fressatti e Vitor Hugo, que de forma direta ou indiretamente me ajudaram na conclusão desse trabalho, considero-os como irmãos.

À Tereza e ao Rodrigo Sousa, por sempre me receberem de braços abertos em sua casa.

A todos vocês, muito obrigado.

## **LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Flexão na madeira.....                                       | 9  |
| Figura 2 - Esboço do ensaio de flexão.....                              | 9  |
| Figura 3 - Diagrama carga x flecha de flexão .....                      | 11 |
| Figura 4 - Esquema elétrico de um LVDT .....                            | 12 |
| Figura 5 - Curva de resposta de um LVDT .....                           | 13 |
| Figura 6 - Extensômetro ou <i>strain gage</i> .....                     | 14 |
| Figura 7 - Ponte de Wheatstone .....                                    | 14 |
| Figura 8 - Fluxograma simplificado do funcionamento do equipamento..... | 16 |
| Figura 9 - Atuador elétrico .....                                       | 17 |
| Figura 10 - Circuito ponte H.....                                       | 17 |
| Figura 11 - Circuito fonte variável .....                               | 19 |
| Figura 12 - Célula de carga modelo BRT 10T.....                         | 20 |
| Figura 13 - Transdutor e sistema de aquisição SD20 - Metrolog .....     | 21 |
| Figura 14 - Tela do software de aquisição .....                         | 22 |
| Figura 15 - Equipamento alocado no laboratório .....                    | 24 |
| Figura 16 - Detalhamento dos sensores e atuador elétrico.....           | 24 |
| Figura 17 - Circuito ponte H alocado .....                              | 25 |
| Figura 18 - Circuito fonte variável alocado.....                        | 25 |
| Figura 19 - Preparação do ensaio .....                                  | 26 |
| Figura 20 - Corpo-de-prova, após ensaio .....                           | 26 |
| Figura 21 - Software em funcionamento .....                             | 27 |
| Figura 22 - Zoom no gráfico gerado pelo software .....                  | 28 |

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

|   |    |
|---|----|
| Eq. 1 - Resistência da madeira à flexão .....                 | 10 |
| Eq. 2 - Módulo de elasticidade .....                          | 11 |
| Eq. 3 - Tensões dos enrolamentos secundários de um LVDT ..... | 13 |

# SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| RESUMO .....                                   | 6  |
| ABSTRACT .....                                 | 7  |
| 1. INTRODUÇÃO .....                            | 8  |
| 1.1. Objetivos .....                           | 8  |
| 2. PROPRIEDADES FÍSICAS ENVOLVIDAS .....       | 9  |
| 2.1. Módulo de ruptura .....                   | 10 |
| 2.2. Módulo de elasticidade .....              | 10 |
| 3. INSTRUMENTAÇÃO .....                        | 12 |
| 3.1. Sensor de deslocamento .....              | 12 |
| 3.2. Sensor de força .....                     | 13 |
| 4. IMPLEMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO .....          | 16 |
| 4.1. Material utilizado .....                  | 16 |
| 4.2. Atuador elétrico .....                    | 16 |
| 4.3. Estrutura metálica .....                  | 17 |
| 4.4. Controle do atuador elétrico .....        | 17 |
| 4.7. Sensor de deslocamento do tipo LVDT ..... | 20 |
| 4.8. Computador .....                          | 21 |
| 5. RESULTADOS .....                            | 24 |
| 5.1. Equipamento alocado .....                 | 24 |
| 5.2. Ensaio .....                              | 25 |
| 5.3. Comparativo .....                         | 28 |
| 6. CONCLUSÕES .....                            | 29 |
| BIBLIOGRAFIA .....                             | 30 |

## RESUMO

Para comprovar a qualidade dos materiais são necessários diversos ensaios, um para cada propriedade a ser estudada. Por meio de ensaios mecânicos é possível determinar o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) dos corpos em diferentes direções. Para calcular essas propriedades, MOE e MOR, usa-se a força aplicada no material e a deformação sofrida pelo mesmo. Entretanto, para uma maior precisão do ensaio, é necessário um sistema que consiga obter os dados, de forma digital, da força aplicada e a quantidade de deformação sofrida pelo material concomitantemente e em tempo real.

O projeto consiste no desenvolvimento de um Equipamento de Medição do Módulo de Elasticidade, que consiste basicamente de uma prensa que fornecerá a força aplicada, um sensor de força, um sensor deslocamento LVDT e um programa computacional que controle todo o sistema. É desenvolvido um software em linguagem C, com o auxílio do programa *C Builder*, para a comunicação serial do sensor de força e do sensor LVDT com o computador, para o tratamento dos dados, geração de um gráfico força versus deformação

**Palavras-chave:** Módulo de elasticidade, módulo de ruptura, LVDT, célula de carga

## **ABSTRACT**

To prove the qualities of materials are needed several essays, one for each property to be studied. Through mechanical tests can determine the module of elasticity (MOE) and module of rupture (MOR) of bodies in different directions. To calculate these properties, MOR and MOE, it uses the force applied to the material and the deformation suffered by same. However, for greater accuracy of the assay requires a system that can retrieve data in digital form, the force applied and the amount of deformation experienced by the material simultaneously and in real time.

The project consists in developing a Measurement Equipment Module of Elasticity, which basically consists of a press that will provide the applied force, a force sensor, an LVDT displacement sensor and a computer program that controls the whole system. Is a software developed in C language with the help of the program C Builder, for serial communication of the force sensor and LVDT sensor to the computer for data processing, generating a graph force versus deformation

**Keywords:** Module of elasticity, module of rupture, LVDT, load cell

# **1. INTRODUÇÃO**

Esse trabalho surgiu da necessidade durante a construção de uma das dissertações de mestrado desenvolvidas no Laboratório de Alta Tensão (LAT) [1]

O estudo em questão foi a criação de um novo processo de revestimentos de madeira com material geotêxtil e impregnação com resina poliuretana derivada do óleo de mamona.

O estudo foi voltado à aplicação desse processo em cruzetas de postes de distribuição, pois, sendo as cruzetas estruturas de madeira que ficam expostas a diferentes condições climáticas e a micro-organismos, temos os seguintes problemas: desgaste com o surgimento de fissuras e rachaduras, e possível apodrecimento da estrutura devido aos micro-organismos tais como os fungos, necessitando assim de estudos que minimizassem estes impactos, aumentando a vida útil das estruturas e reduzindo o desperdício.

As amostras foram submetidas a ensaios para a comparação das propriedades elétricas e físicas da madeira em estado natural e utilizando o novo método.

Em uma das etapas desse processo, foi necessário submeter as amostras a testes para o cálculo do módulo de elasticidade (MOE) e também o seu módulo de ruptura (MOR), como o laboratório não possuía este equipamento e sendo ele muito dispendioso, optou-se na implementação do mesmo, utilizando equipamentos de baixo custo.

Com isso, no capítulo 2, será discorrido a fundo quais são as grandezas físicas envolvidas e como deverá calcula-las, no capítulo 3, como irá mensura-las, no capítulo 4, como será o tratamento dessas informações e quais os materiais utilizados, no capítulo 5 os resultados e no capítulo 6 a conclusão.

## **1.1. Objetivos**

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver um Equipamento de Medição de Módulo de Elasticidade Informatizado de baixo custo, utilizando uma prensa elétrica, uma célula de carga, um sensor de deslocamento LVDT, e um programa em linguagem C.

## 2. PROPRIEDADES FÍSICAS ENVOLVIDAS

Quando submetemos amostras de madeira à flexão, a madeira sofre diferentes tipos de esforço [2], conforme ilustrado na figura 1, tais como: compressão paralela às fibras, tração paralelas às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e compressão normal às fibras na região dos apoios.

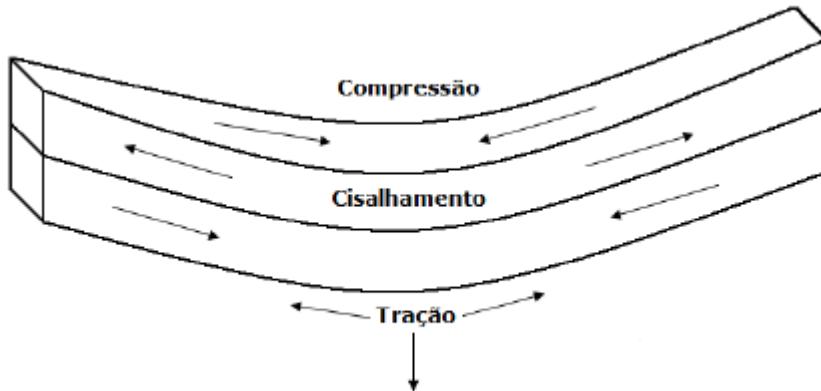


Figura 1 - Flexão na madeira

O equipamento implementado tem como objetivo a obtenção de duas grandezas, sendo elas o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade em concordância com a NBR7190 [3].

Para isso os ensaios mecânicos de flexão estática necessitam ser efetuados com o carregamento no ponto médio da amostra, o corpo-de-prova deve ser vinculado a dois apoios articulados móveis, sendo o equilíbrio do sistema garantido pelo atrito com o atuador, conforme a figura 2.

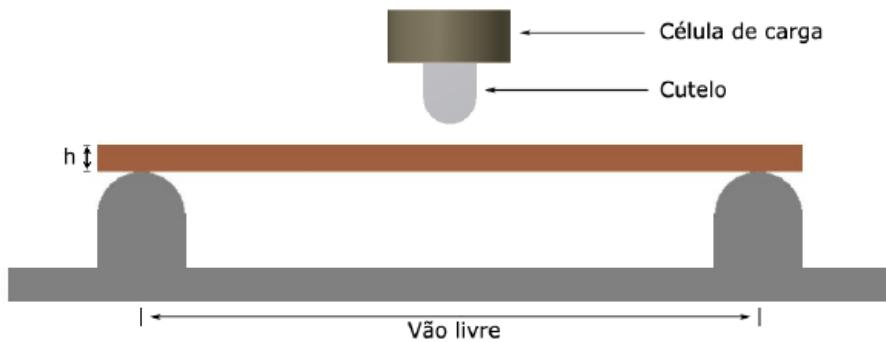


Figura 2 - Esboço do ensaio de flexão

## 2.1. Módulo de ruptura

A partir das definições da NBR 7190 [3], temos que a resistência da madeira à flexão ( $f_M$ ) ou módulo de ruptura (MOR) é um valor dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese de a madeira ser um material elástico, sendo dado na Eq. 1.

$$f_M = \frac{M_{max}}{W_e}$$

Eq. 1 - Resistência da madeira à flexão

Sendo:

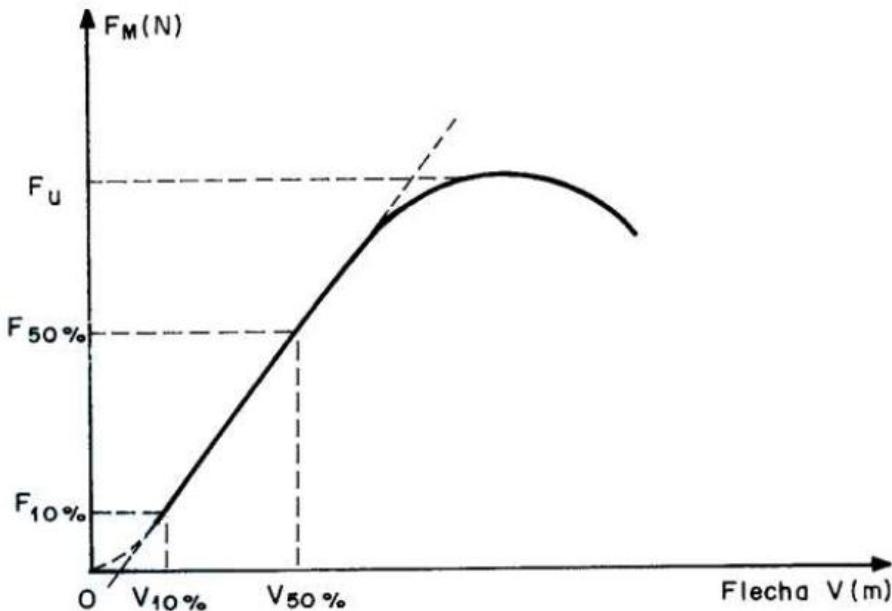
$M_{max}$  é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, em newtons-metro (N/m);

$W_e$  é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo-de-prova, dado por  $bh^2/6$ , em metros cúbicos ( $m^3$ )

$b$  e  $h$  correspondem, respectivamente, à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em metro (m).

## 2.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido, a rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama carga x deformação, indicado na figura 3.



**Figura 3 - Diagrama carga x flecha de flexão**

O módulo de elasticidade é dado pela equação 2, que deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deformação no ponto central do vão, definida pelos pontos  $(F_{10\%}; v_{10\%})$  e  $(F_{50\%}; v_{50\%})$  correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima.

$$E_{M0} = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%})L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})4bh^3}$$

**Eq. 2 - Módulo de elasticidade**

Sendo:

$F_{10\%}$  e  $F_{50\%}$  são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima, aplicada ao corpo-de-prova, em newtons (N);

$v_{10\%}$  e  $v_{50\%}$  são os deslocamentos no centro do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima  $F_M$ , em metros (m).

### 3. INSTRUMENTAÇÃO

Após o esclarecimento das propriedades físicas envolvidas, há a necessidade de métodos de mensurar essas grandezas, para isso se faz preciso o uso de transdutores.

A seguir iremos descrever os dois tipos de transdutores que foram utilizados no trabalho, sendo eles um sensor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) e um sensor de força do tipo célula de carga.

#### 3.1. Sensor de deslocamento

Os sensores LVDTs, são transdutores de deslocamento linear, muito utilizados em aplicações industriais, neste trabalho ele terá a função de medir a deformação sofrida pelo corpo-de-prova.

O seu princípio de funcionamento consiste em um transformador, cujas tensões induzidas nos dois enrolamentos secundários dependem da posição do núcleo magnético. Uma vez aplicada uma tensão externa senoidal no enrolamento primário, a tensão em cada enrolamento secundário será tanto maior quanto mais acoplado ele estiver em relação ao enrolamento de excitação [4], conforme a ilustração a seguir:

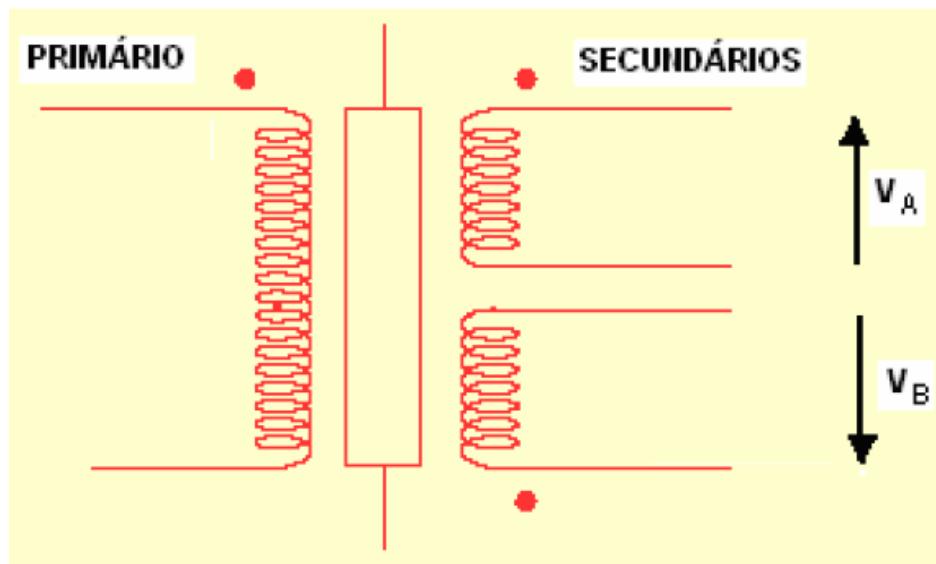


Figura 4 - Esquema elétrico de um LVDT

O fato de que o acoplamento entre as bobinas é feito por meio de um núcleo sem qualquer contato elétrico, garantem ao sensor LVDT uma robustez grande, pois esse sensor praticamente não sofre de desgaste.

Para entender o funcionamento do LVDT, supor que o núcleo magnético esteja na sua posição central, isto é, equidistante dos dois enrolamentos secundários. Nesta situação, as tensões  $V_A$  e  $V_B$  podem ser descritas em função de um coeficiente  $\alpha$  e da frequência  $f$  de excitação do primário:

$$V_A(t) = \left[ \frac{V_p}{2} (1 + \alpha) \right] \operatorname{sen}(2\pi f t)$$

$$V_B(t) = \left[ \frac{V_p}{2} (1 - \alpha) \right] \operatorname{sen}(2\pi f t)$$

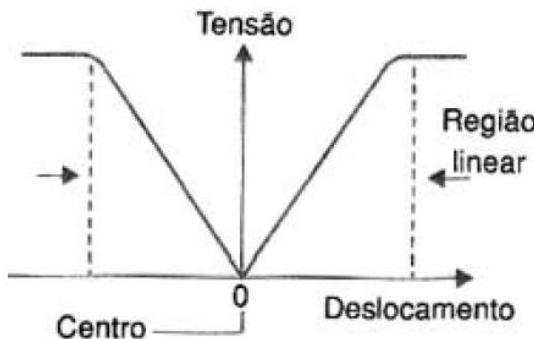
**Eq. 3 - Tensões dos enrolamentos secundários de um LVDT**

Sendo:

$V_p$  é o valor de pico

$\alpha$  é correspondente ao deslocamento do núcleo, medido em relação à sua posição central

Com isso o cursor do núcleo deverá ser menor do que o comprimento do encapsulamento das bobinas, para que se tenha uma boa linearidade, pois, um grande distanciamento (do núcleo) de uma bobina colocaria a outra fora do acoplamento máximo com o primário, como podemos observar na figura 5.



**Figura 5 - Curva de resposta de um LVDT**

### 3.2. Sensor de força

O uso de células de carga como transdutores de medição de força abrange hoje uma vasta gama de aplicações: desde nas balanças comerciais até na automatização e controle de processos industriais. A popularização do seu uso decorre do fato que a variável peso é inerente em grande parte das transações comerciais e de medição das mais frequentes dentre as grandezas físicas de processos

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gage* [4](Fig. 6)

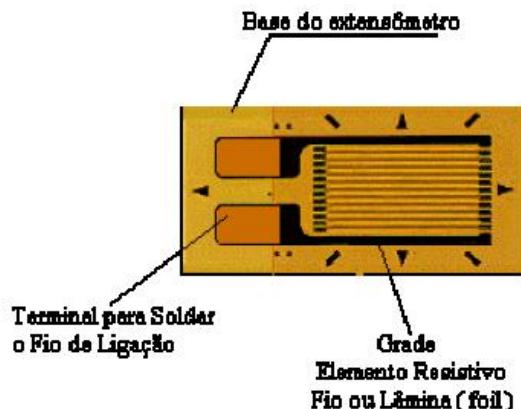


Figura 6 - Extensômetro ou *strain gage*

O *strain gage* é um resistor composto por uma fina camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante que é colado sobre a estrutura em teste.

Pequenas variações de dimensões das estruturas são transmitidas mecanicamente ao *strain gage*, que transforma essas variações em variações equivalentes de sua resistência elétrica.

Utiliza-se comumente em células de carga quatro *strain gage* ligados entre si segundo a ponte de Wheatstone (Fig. 7) e o desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos *strain gage*, é proporcional à força que a provoca. É por meio da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada.

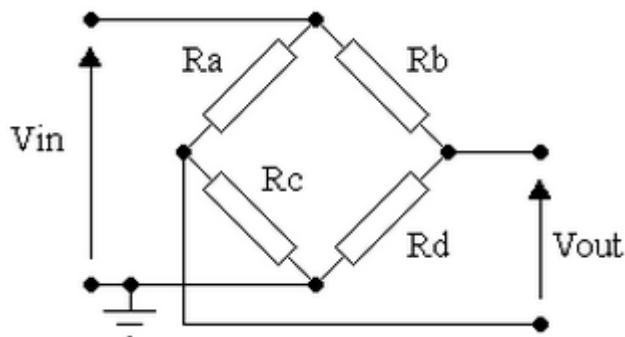


Figura 7 - Ponte de Wheatstone

Os *strain gages* são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga e inteiramente solidários à sua

deformação. A força atua, portanto sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos *strain gages*, que por sua vez medirão sua intensidade.

Considerando-se que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que estas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser medida, há necessidade de se "compensar" os efeitos de temperatura por meio da introdução no circuito de Wheatstone de resistências especiais que variem com o calor de forma inversa a dos *strain gages*.

## 4. IMPLEMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Após a revisão bibliográfica, aonde foi discutido quais as grandezas físicas envolvidas e o método de mensura-las, foi discutido como o sistema iria operar, sendo realizado um fluxograma simplificado, conforme a figura 8.

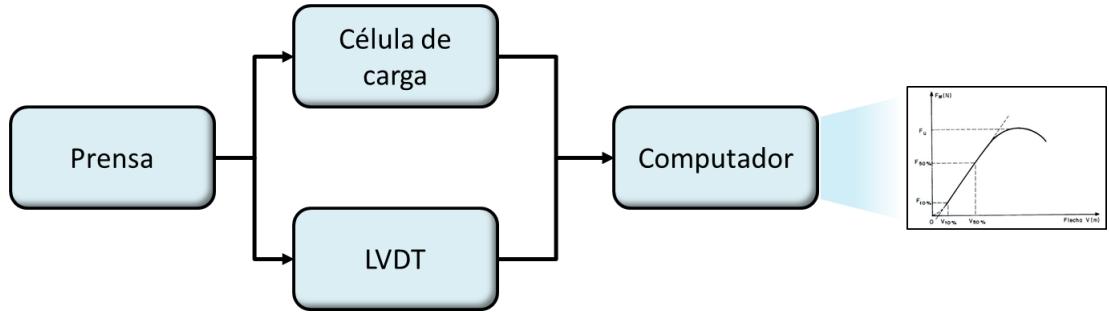


Figura 8 - Fluxograma simplificado do funcionamento do equipamento

Que consiste, na ativação da prensa, a ativação da célula de carga e o LVDT simultaneamente e enviado ao computador que iria dar como resposta o gráfico para a obtenção do MOE e MOR.

No próximo subcapítulo serão descritos quais foram os materiais utilizados e, após, um detalhamento de cada um.

### 4.1. Material utilizado

- Atuador elétrico
- Estrutura metálica
- Controle do atuador elétrico
- Sensor de força do tipo célula de carga
- Mostrador digital
- Sensor de deslocamento do tipo LVDT
- Computador

### 4.2. Atuador elétrico

O atuador escolhido é comercializado como um macaco elétrico automotivo, conforme a Figura 9, produzido pela *Schulz* [5]. Como esse atuador é projetado para automóveis, a sua tensão de alimentação é a mesma da bateria de um automóvel, 12V, com carga máxima de 2 toneladas.



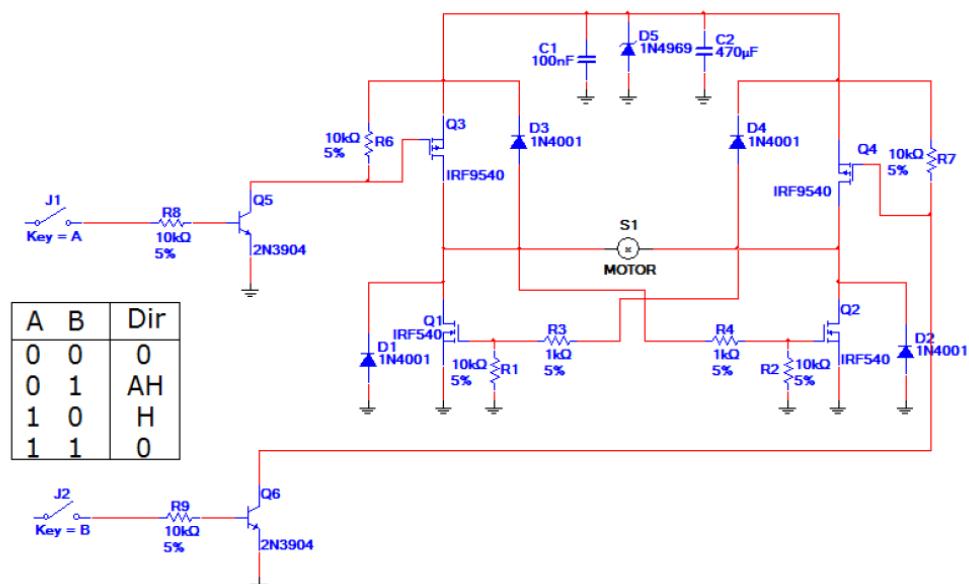
**Figura 9 - Atuador elétrico**

#### 4.3. Estrutura metálica

Optou-se em fazer a montagem da prensa elétrica usando a estrutura metálica de uma prensa hidráulica com capacidade de 15 toneladas, facilmente encontrada no mercado e apresenta a robustez necessária.

#### 4.4. Controle do atuador elétrico

Este controle é responsável pela subida, descida, aumento e redução da velocidade do atuador elétrico. Para isso utilizamos dois circuitos, na realização da subida e descida do motor, foi utilizado um circuito conhecido como ponte H [6], conforme a Figura 10.



**Figura 10 - Circuito ponte H**

Pelo fato do motor requerer uma alta corrente para seu funcionamento, *mosfets* foram usados na construção do circuito. Para acionar a ponte H foram utilizadas três chaves: uma chave de três estados – responsável pela subida e descida do atuador – e duas chaves do tipo *push button*, para um ajuste fino da posição do atuador.

Já o controle de velocidade foi realizado com o auxílio de uma fonte ajustável, conforme a Figura 11.

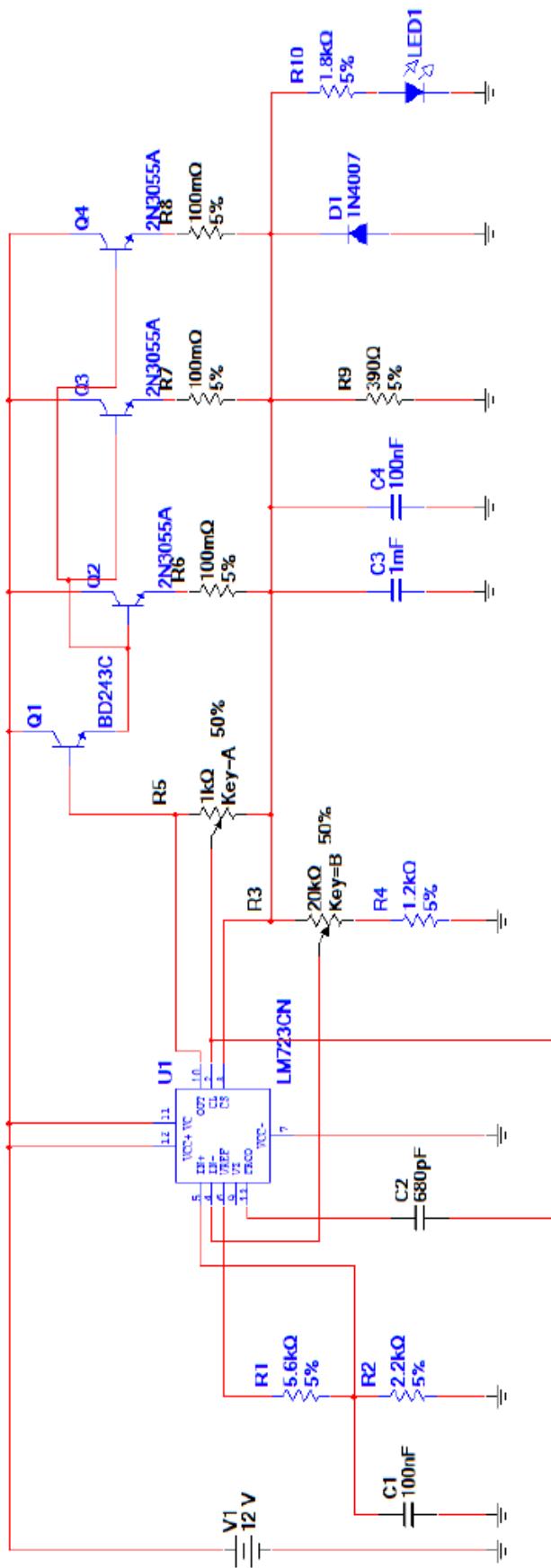


Figura 11 - Circuito fonte variável

#### **4.5. Sensor de força do tipo célula de carga**

A célula de carga utilizada é fabricada pela empresa *Berman Load Cells* [7] e o modelo utilizado no trabalho é o BRT 10T.



**Figura 12 - Célula de carga modelo BRT 10T**

Na Tabela 1, constam algumas especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante

**Tabela 1 - Parâmetros da célula de carga modelo BRT 10T**

|                              |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| Capacidade máxima            | 10 tonelas                    |
| Sensitividade                | $2,85 \pm 0,005 \text{ mV/V}$ |
| Erro total                   | $\pm 0,02 \%$                 |
| Limite de carga de segurança | 150% da capacidade nominal    |
| Sobrecarga de ruptura        | 300% da capacidade nominal    |

#### **4.6. Mostrador digital**

Além de expor para o operador a força exercida pela célula de carga, o mostrador digital tem função vital no sistema de aquisição dos dados, pois o mesmo é dotado de uma porta de comunicação serial RS232, a qual estabelece a comunicação entre o computador e a célula de carga. O modelo do indicador utilizado é o WT3000 ABS, da fabricante *Weightech* [8]. Esse dispositivo possui uma sensitividade de  $0,3\mu\text{V/d}$

#### **4.7. Sensor de deslocamento do tipo LVDT**

O sensor LVDT utilizado é fabricado pela *Metrolog* [9] e o modelo utilizado no trabalho é o SD20-LVDT.

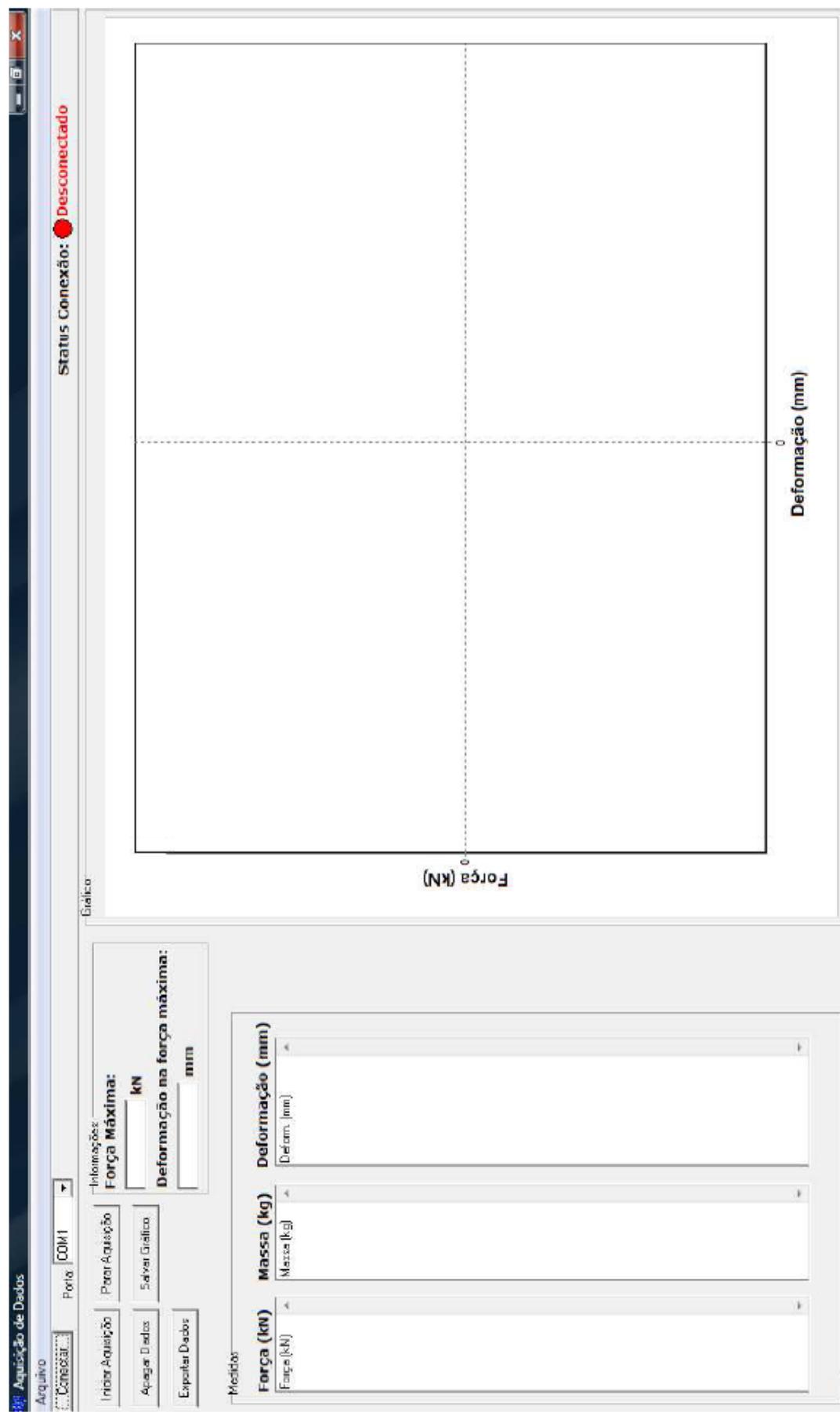


**Figura 13 - Transdutor e sistema de aquisição SD20 - Metrolog**

Possui saída USB com virtualização para porta serial, possui taxa de transferência ajustável entre 6,88 leituras/s até 2155 leituras/s e sua alimentação é obtida diretamente do barramento USB.

#### **4.8. Computador**

Um programa para a aquisição dos dados originados na célula de carga e no sensor de deslocamento foi implementado no aplicativo *Borland C++ Builder*. Para facilitar o manuseio do operador uma interface gráfica com opções e visualização das informações em tempo real foi desenvolvida. A imagem da tela do programa é apresentada na Figura 14.



**Figura 14 - Tela do software de aquisição**

As funções implementadas foram:

- Porta – refere-se à entrada serial que o sensor está conectado.
- Conectar – botão responsável por efetuar a conexão entre o computador e os sensores. A conexão só será estabelecida se a porta selecionada estiver correta. Se o endereço da porta estiver incorreto, o programa emitirá uma mensagem de alerta ao usuário, sobre o erro. Quando a conexão é estabelecida, o *Status conexão* mudará para a cor verde e com a escrita, conectado.
- Iniciar Aquisição – após iniciada a conexão, o clique neste botão inicia a aquisição dos dados. Se a conexão com indicador ainda não foi efetuada, a ativação deste botão emitirá uma mensagem de erro. No momento em que é iniciada a aquisição, os dados são enviados as respectivas caixas indicadas no programa, Força (kN), Massa (kg) e Deformação (mm). O gráfico é traçado em tempo real, após o clique no botão Iniciar Aquisição
- Parar Aquisição – para a aquisição que estiver ocorrendo
- Apagar Dados – botão utilizado para apagar os valores contidos em todas as caixas do programa e também o gráfico. Por motivo de segurança, sempre que este botão é acionado, uma mensagem é mostrada na tela perguntando se o operador realmente deseja excluir os dados.
- Salvar Gráfico – quando este botão é acionado, o gráfico é salvo em formato Bitmap.
- Exportar Dados – exporta todos os dados do ensaio para um arquivo do tipo txt.
- Campo Informações – apresenta a força máxima e a deformação do corpo-de-prova sofrida durante o ensaio

## 5. RESULTADOS

Nesse capítulo será mostrado os resultados obtidos com o trabalho.

### 5.1. Equipamento alocado

A implementação do equipamento foi realizada no Laboratório de Alta Tensão (LAT), conforme as figuras 15 e 16

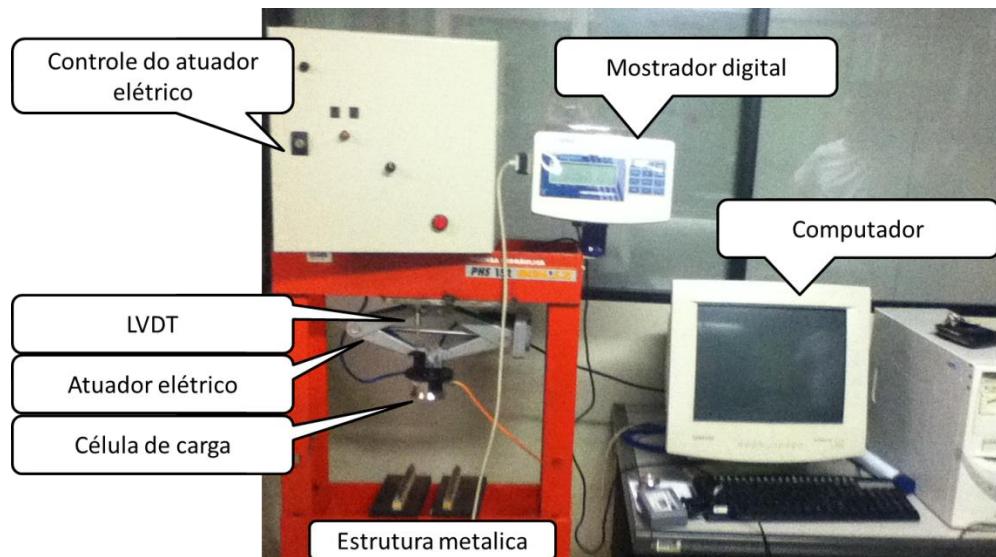


Figura 15 - Equipamento alocado no laboratório

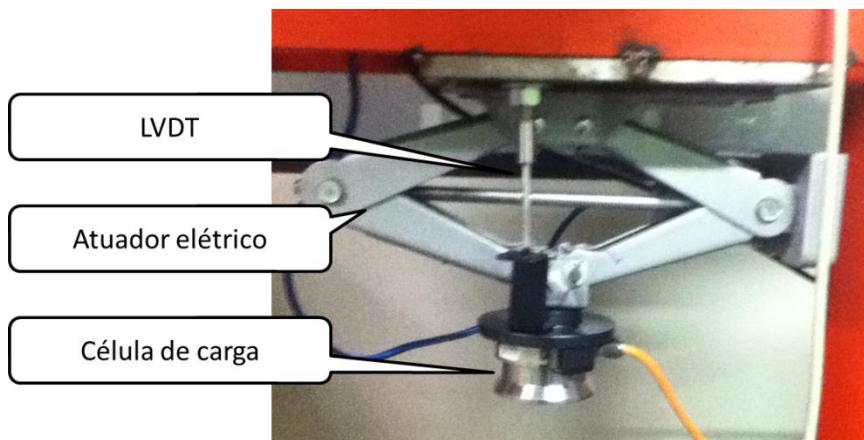


Figura 16 - Detalhamento dos sensores e atuador elétrico

Dentro do controle do atuador elétrico encontram-se o circuito ponte H e o circuito de corrente variável, conforme as figuras 17 e 18

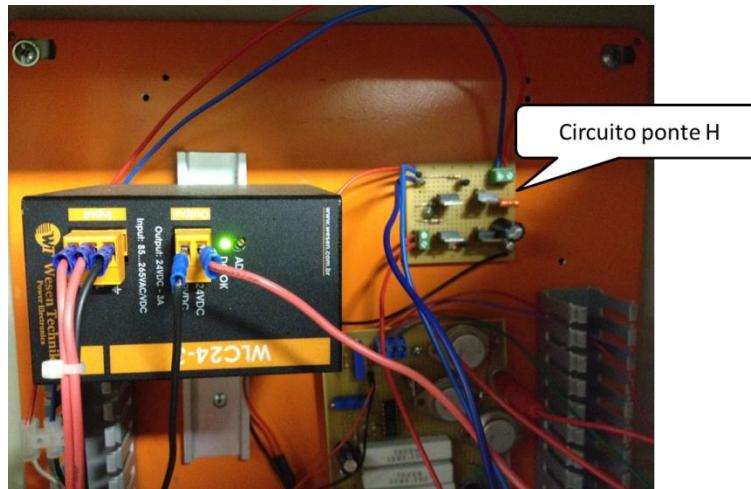


Figura 17 - Circuito ponte H alocado

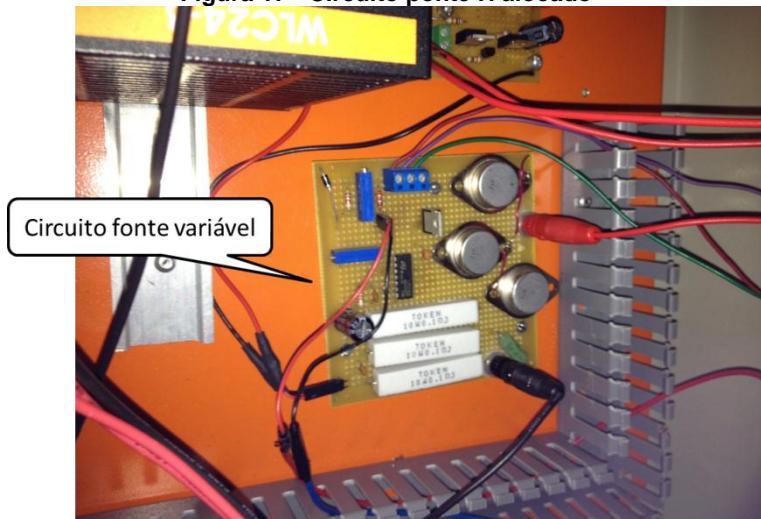
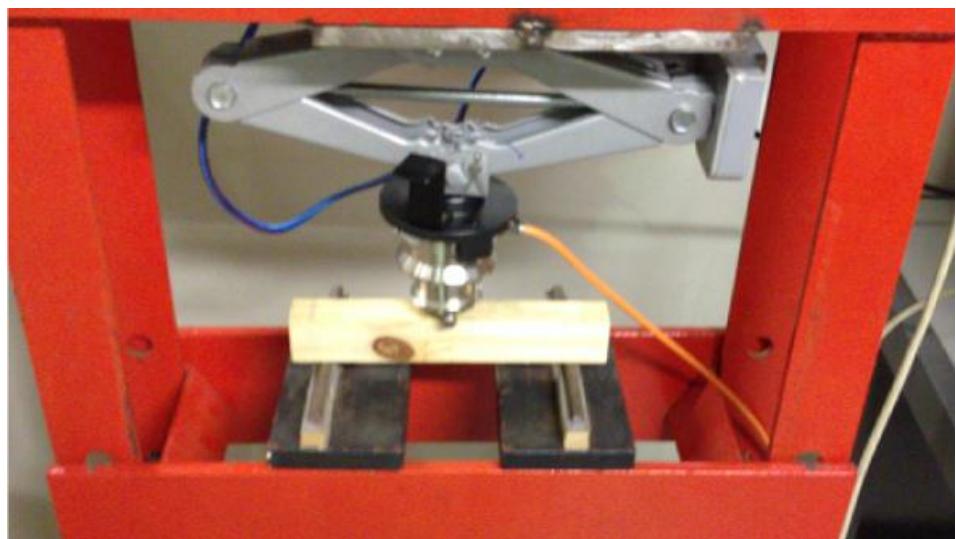


Figura 18 - Circuito fonte variável alocado

## 5.2. Ensaio

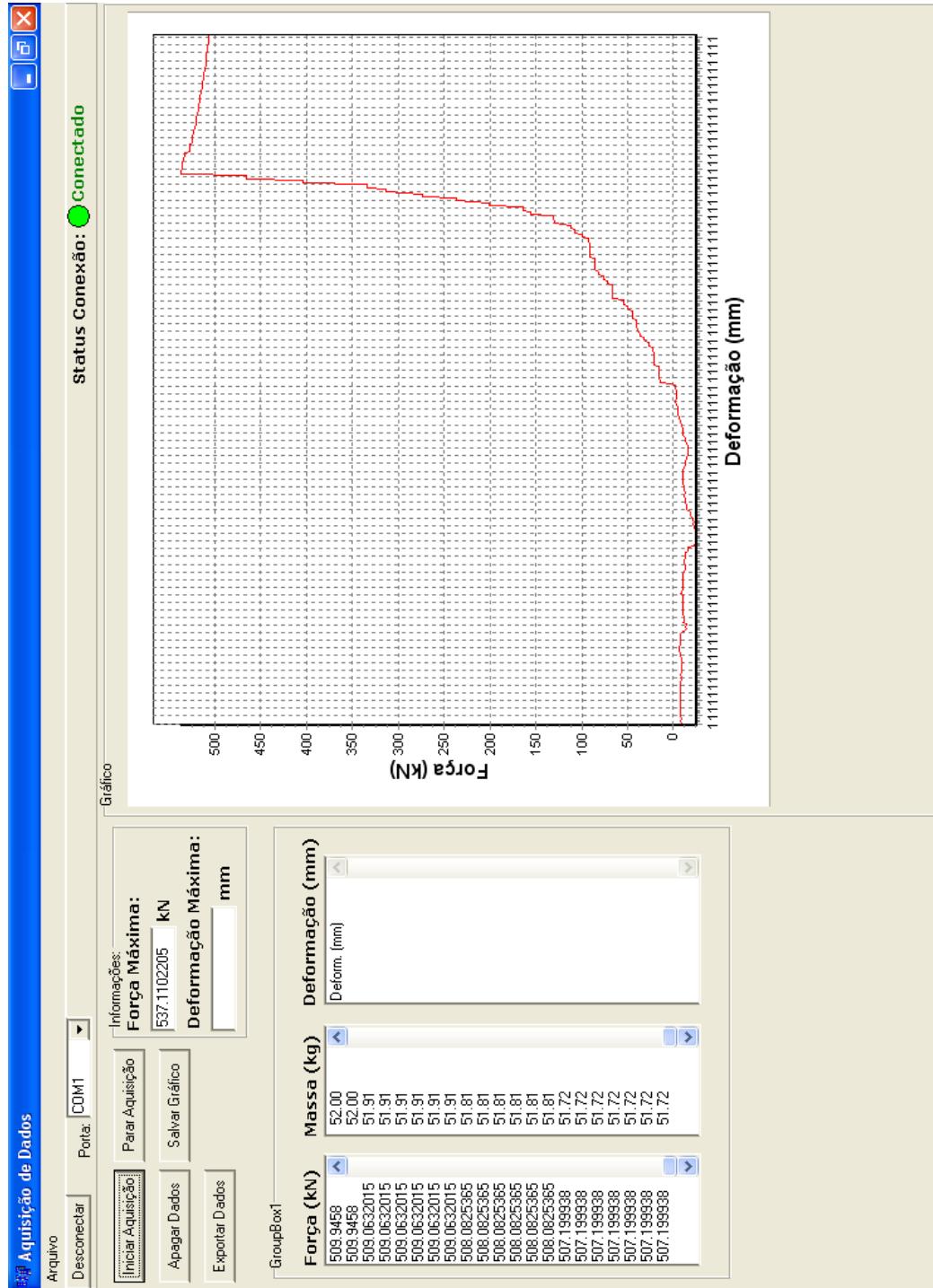
Com o equipamento alocado, foi possível a realização do ensaio, conforme as figuras 19, 20, 21 e 22.



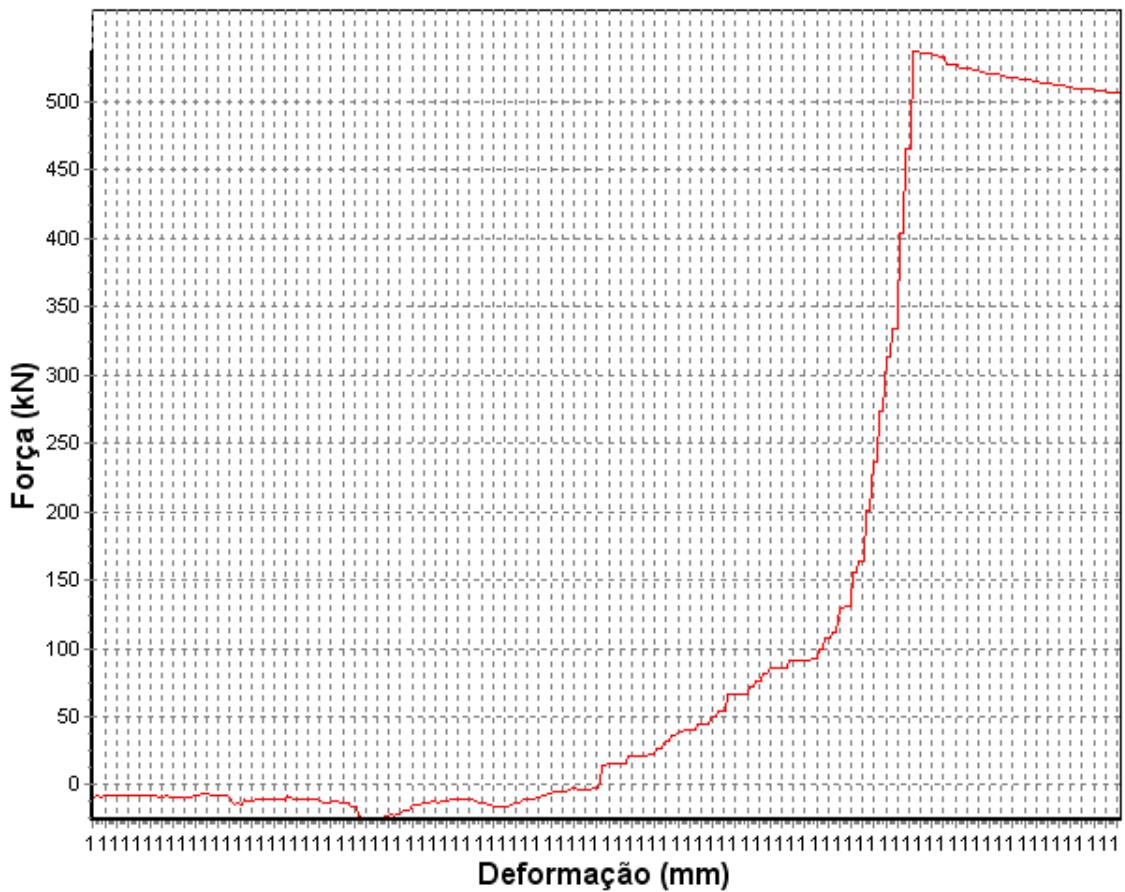
**Figura 19 - Preparação do ensaio**



**Figura 20 - Corpo-de-prova, após ensaio**



**Figura 21 - Software em funcionamento**



**Figura 22 - Zoom no gráfico gerado pelo software**

### 5.3. Comparativo

Foi realizado um levantamento entre os custos de equipamentos presentes no mercado e o desenvolvido no trabalho de conclusão de curso, conforme a tabela 2.

**Tabela 2 - Investimento dos equipamentos encontrados no mercado e o implementado no trabalho**

|                          | Investimento   |
|--------------------------|----------------|
| EMIC - DL 30.000 (300kN) | R\$ 165.000,00 |
| EMIC - DL 10.000 (100kN) | R\$ 90.000,00  |
| TCC (20kN)               | R\$ 10.000,00  |

## 6. CONCLUSÕES

O projeto possui viabilidade e atende os requisitos da NBR 7190 e apresenta um ótimo custo-benefício em relação aos equipamentos de mercado.

Tem como vantagem principal nos equipamentos disponíveis no mercado, a possibilidade de alteração do software de acordo com a necessidade do ensaio, o que não é possível nos equipamentos de mercado, pois estes possuem software fechado, sendo apenas possível a utilização limitada ao que os fornecedores disponibilizam.

Como sugestão de próximos estudos, é a geração de módulos para diferentes tipos de testes, como o de cisalhamento.

O equipamento consegue exercer 20kN de força tendo como fator limitante o atuador elétrico, mas é o suficiente para a realização dos ensaios. Caso necessite de maior força, é necessário a substituição do atuador elétrico por um hidráulico.

Um desafio foi a implementação da comunicação do LVDT com o sistema, sendo ainda necessário a realização de testes.

A comunicação com a célula de carga já está implementada, possibilitando plotar gráficos de força aplicada pelo tempo, já sendo possível determinar o módulo de ruptura (MOR) das amostras.

Desde a etapa do entendimento do projeto, até a concepção do mesmo, foi muito enriquecedor para o meu conhecimento, pois foram várias vertentes desenvolvidas e é muito estimulante ver a teoria aprendida nas aulas de diferentes matérias trabalharem juntas para a conclusão deste projeto.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Assagra, Y. A. O. Estudos mecânicos e elétricos em madeiras envoltas com manta geossintética e impregnadas com resina poliuretana, São Carlos, Brasil, 2011.
- [2] CALIL Jr, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. Dimensionamento de elementos estruturais de madeira, Manole, 2003.
- [3] NBR7190 Projetos de estruturas de madeiras - Anexo B; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA - ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.
- [4] Gesualdo, E. Apostila - Transdutores SEL0358, São Carlos, 2011.
- [5] Schulz, Disponível em: <http://www.schulz.com.br/pt/site/automotiva/home/index>. [Acesso em Outubro 2012].
- [6] A. S. Sedra, Microeletrônica - 5<sup>a</sup> Ed. - Volume Único, Pearson, 2000.
- [7] Berman Load Cells, Disponível em: [http://www.bermanloadcells.com.br/BRT\\_10-22t.html](http://www.bermanloadcells.com.br/BRT_10-22t.html). [Acesso em Outubro 2012].
- [8] Weightech, Disponível em: <http://www.weightech.com.br/detalhes.asp?id=100403&n=WT3000-ABS>. [Acesso em Outubro 2012].
- [9] Metrolog, Disponível em: <http://www.metrolog.net/transdutores/lvdt/sd20lvdt.php?lang=ptbr>. [Acesso em Outubro 2012].