

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos**

**Adriano Esperidião**  
**Ricardo Inoue Koga**

**Modernização de Máquina de Ensaio de Tração**

**São Paulo**

**2009**

**Adriano Esperidião**  
**Ricardo Inoue Koga**

## **Modernização de Máquina de Ensaio de Tração**

Monografia de Trabalho de Formatura  
apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

**São Paulo**

**2009**

**Adriano Esperidião**  
**Ricardo Inoue Koga**

## **Modernização de Máquina de Ensaio de Tração**

Monografia de Trabalho de Formatura  
apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica com ênfase em  
Mecatrônica e Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Livre-Docente  
Gilberto Francisco Martha de Souza

**São Paulo**

**2009**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Esperidião, Adriano**

**Modernização de máquina de ensaio de tração / A. Esperi -  
dião, R.I. Koga -- São Paulo, 2009.**

**72 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos.**

**1. Ensaio de tração 2. Dispositivos eletrônicos 3. Sensores  
eletromecânicos 4. Matlab 5. Digitalização I. Koga, Ricardo Inoue  
II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento  
de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.**

## DEDICATÓRIA

Adriano Esperidião:

Dedico este trabalho aos meus familiares pelo esforço, dedicação e compreensão, em todos os momentos desta e de outras caminhadas, aos meus amigos que estiveram presentes nos momentos de alegrias e tristezas, e que também souberam compreender os meus momentos de ausência dedicados aos estudos, ao Ricardo pela dedicação e paciência para conclusão deste trabalho e à minha namorada pelo incentivo e apoio que foi fundamental durante estes anos de graduação.

Ricardo Inoue Koga:

Dedico este trabalho à minha família por me oferecer suporte, compreensão e incentivo não apenas durante a elaboração deste trabalho, mas ao longo de toda minha vida; aos amigos antigos e recentes, da escola, faculdade, condomínio e estágio pelos momentos agradáveis de descontração que foram essenciais para manutenção minha sanidade mental; ao parceiro de TCC Adriano, que jamais desanimou, mesmo durante os momentos difíceis e principalmente à minha amada namorada Suemi, por estar sempre ao meu lado para me dar a força que estivesse faltando.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante o todo o trabalho.

Aos amigos Ana Claudia Simões, Andre Seiji Sandes Ianagui, Diego Ojima Takeshi, Diego do laboratório de metalurgia, Fernando do laboratório de eletrônica, Rafael do laboratório GMSIE, Prof. Nilson Noris Franceschetti, Técnico Cícero do PMR, Vendedores da loja Multi Comercial na Santa Ifigênia, e todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

## RESUMO

O trabalho de conclusão de curso realizado pelos alunos consistiu na modernização de uma máquina de ensaio de tração. Os objetivos foram o projeto e implementação de novos componentes visando modernizar as funcionalidades de uma máquina já existente. Tal máquina se encontra em um dos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

Alguns componentes da máquina estavam muito desatualizados tecnologicamente, no caso a exibição e armazenamento de resultados, uma vez que a máquina fora fabricada há algumas décadas. Entretanto ela se encontrava em boas condições de uso, possuindo uma mecânica robusta e de ótima qualidade, tendo, dessa forma, muito potencial para uma utilização confiável. Mas devido a essa defasagem tecnológica, a máquina se encontrava totalmente ociosa.

Dessa forma, o trabalho propôs a modernização de componentes estratégicos da máquina para que a mesma atingisse condições de uso adequadas e pudesse voltar a ser utilizada pela comunidade da USP. Essa atualização se deu através do projeto e implementação de diversos dispositivos tais como: circuitos de tratamento do sinal, sistemas de aquisição e digitalização de dados, interface programada em software etc.

Obteve-se o protótipo eletrônico e a interface de software, que foram testados na máquina, substituindo os componentes ineficientes e os resultados foram plenamente satisfatórios. Para verificação e homologação do projeto foram utilizados ensaios obtidos de uma máquina do departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da USP.

Palavras chave: Ensaio de tração, Dispositivos eletrônicos, Sensores eletromecânicos, Matlab, Digitalização

## **ABSTRACT**

The Graduation Project that was developed consisted in the modernization of a tensile tester machine. The main objectives were the design and implementation of new components, in order to modernize the capabilities of an existing machine. This machine resides in the "Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP)".

Some components of this machine like the results display and storage were very technologically outdated, since it was made some decades ago, but the machine itself has a good working condition since it presents a robust and high-quality mechanical structure, having great potential for reliable using. However, due to this outdated technology, the machine was completely idle.

So, this project proposed the modernization of strategic components of this machine in order to make it reach appropriate conditions of use and make it possible to be used again by the community of USP. This update occurred through the implementation of various extra devices such as electronic circuits, signal processing, acquisition and digitization of data, software based interface etc.

An electronic prototype and software based interface were developed. They were attached to the machine, replacing the inefficient components, and the results were fully satisfactory. Tensile Strength Tests obtained from a Tensile Tester Machine from "Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica" were used for the verification and homologation of the project.

**Keywords:** Tensile strength test, Electronic devices, Electro-mechanical sensors, Matlab, Digitization



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina para Ensaio de Tração .....	15
Figura 2 - Suporte e Corpo de Prova .....	15
Figura 3 - Corpo De Prova Típico.....	16
Figura 4 - Corpo de Prova Durante Ensaio .....	16
Figura 5 – Gráfico do Ensaio de Tração (Wikipedia).....	17
Figura 6 - Máquina Universal (Telecurso 2000) .....	20
Figura 7 - Corpos de prova (Telecurso 2000).....	21
Figura 8 - Fixação tipo cunha (Telecurso 2000) .....	22
Figura 9 - Fixação tipo rosca (Telecurso 2000) .....	22
Figura 10 - Fixação tipo flange (Telecurso 2000) .....	22
Figura 11 - Corpo de prova com solda no sentido transversal (Telecurso 2000) .....	23
Figura 12 - Corpo de prova com solda no sentido longitudinal (Telecurso 2000) .....	23
Figura 13 - Corpo de prova preparado (Telecurso 2000) .....	24
Figura 14 – Quadro de Reação .....	25
Figura 15 - Célula de Carga .....	26
Figura 16 - Extensômetro clip-on .....	26
Figura 17 – Módulo de Controle e Exibição de Resultado .....	26
Figura 18 – Sistema de Controle em Malha Aberta.....	29
Figura 19 – Sistema de Controle em Malha Fechada .....	29
Figura 20 – Esboço da Interface com usuário .....	30
Figura 21 - Câmbio da Redução (High, Neutral Low).....	33
Figura 22 - Embreagem para Engrenar Redução .....	33

Figura 23 – Fuso de Movimentação do cabeçote móvel .....	33
Figura 24 – Controle de Velocidade do Cabeçote Móvel (cm/min) .....	34
Figura 25 - Plotter Gráfico .....	34
Figura 26 – Interface de entrada do Extensômetro .....	35
Figura 27 – Conector da Célula de Carga.....	36
Figura 28 – Conector do Extensômetro.....	37
Figura 29 – Diagrama da solução utilizando módulos comerciais.....	40
Figura 30 – Módulo DAQ + Condicionador de Sinais da Lynx (Lynx) .....	41
Figura 31 – Módulo DAQ da Advantech (Advantech).....	42
Figura 32 – Isolador de Sinais para Strain Gages da Advantech (Advantech). 42	
Figura 33 – Módulo DAQ da National Instruments (National Instruments).....	43
Figura 34 – Módulo I/O da NI (National Instruments) .....	43
Figura 35 - Módulos Condicionadores de Sinal da NI (National Instruments) ..	43
Figura 36 – Diagrama da Solução usando a Gameport .....	45
Figura 37 - Pinagem da porta de Joystick .....	45
Figura 38 - Exemplo de conexão de sensor analógico na porta de joystick.....	46
Figura 39 – Diagrama da solução utilizando a porta paralela.....	47
Figura 40 - Circuito amplificador.....	48
Figura 41 – Conversor analógico-digital de 8 bits .....	49
Figura 42 – Diagrama Global da Solução .....	51
Figura 43 – Fonte Simétrica .....	53
Figura 44 – Proteção contra Oscilação da Rede.....	54
Figura 45 – Ponte de Wheatstone.....	54
Figura 46 – Ponte de Wheatstone e seus quatro terminais dos sensores .....	55
Figura 47 - Pinagem das células de carga .....	56
Figura 48 - Pinagem dos extensômetro (conector macho).....	56
Figura 49 - Circuito amplificador de Instrumentação .....	57

Figura 50 – Amplificador Inversor.....	58
Figura 51 – Gerador de Onda Quadrada .....	59
Figura 52 – Circuito Regulador de Intensidade de Sinal e Proteção da Placa de Som.....	60
Figura 53 – Plug TRS (P2 Stereo).....	61
Figura 54 – Modo de Calibração .....	63
Figura 55 – Menu de Carregar e Salvar Configurações .....	63
Figura 56 – Modo de Exibição de Resultados .....	64
Figura 57 – Configurações de Lo e Ao.....	65
Figura 58 – Exportar Dados .....	65
Figura 59 – Layout do Circuito Impresso.....	66
Figura 60 – Localização dos Componentes na Placa de Circuito Impresso.....	67
Figura 61 – Circuito de AmpOps (detalhe) .....	67
Figura 62 – Face das trilhas da placa de circuito impresso.....	68
Figura 63 – Face dos componentes da placa de circuito impresso.....	69
Figura 64 – Perspectiva da Caixa .....	69
Figura 65 – Calibração no Regime Elástico .....	71
Figura 66 – Ensaio de Tração Aço SAE 1020 Carga x Deslocamento.....	73
Figura 67 – Ensaio Detração obtido na máquina PMR Aço SAE 1020 Carga x Deslocamento .....	74
Figura 68 – Ensaio de Tração Alumínio Carga x Deslocamento.....	75
Figura 69 – Ensaio na máquina do PMR do Alumínio Carga x Deslocamento	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Células de carga.....	36
Tabela 2 – Extensômetros .....	37
Tabela 3 - Conexão da porta de Joystick .....	46
Tabela 4 – Valores de Referência no Regime Elástico .....	72

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2. ENSAIO DE TRAÇÃO .....</b>	<b>15</b>
2.1. DEFINIÇÃO.....	15
2.2. CARACTERÍSTICAS .....	16
2.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO .....	17
<b>3. MÁQUINAS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO E CORPOS DE PROVA.....</b>	<b>20</b>
3.1. MÁQUINAS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO .....	20
3.2. CORPO DE PROVA .....	21
3.3. PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA .....	23
<b>4. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA .....</b>	<b>25</b>
<b>5. PROJETO PRELIMINAR DA AUTOMATIZAÇÃO .....</b>	<b>27</b>
5.1. SISTEMA DE CONTROLE DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA: .....	27
5.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS: .....	28
5.3. SISTEMA DE EXIBIÇÃO DOS RESULTADOS: .....	28
5.4. SISTEMA DE INTERFACE COM O USUÁRIO:.....	28
<b>6. ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO ORIGINAL DA MÁQUINA .....</b>	<b>31</b>
6.1. PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA O FUNCIONAMENTO ORIGINAL .....	31
6.2. ANÁLISE DOS COMPONENTES INDIVIDUAIS .....	32
<b>7. OBJETIVOS .....</b>	<b>38</b>
<b>8. PROPOSTAS INICIAIS PARA O PROJETO FINAL .....</b>	<b>39</b>
8.1. PLACA DE AQUISIÇÃO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS COM EXIBIÇÃO DE RESULTADOS ATRAVÉS DE SOFTWARE PRÓPRIO .....	39
8.2. UTILIZAÇÃO DA ENTRADA ANALÓGICA DA GAMEPORT COM TRATAMENTO EXTERNO DO SINAL E EXIBIÇÃO DE RESULTADOS PELO MATLAB.....	45
8.3. UTILIZAÇÃO DA(S) PORTA(S) PARALELA(S) COM TRATAMENTO EXTERNO DO SINAL E EXIBIÇÃO DE RESULTADOS PELO MATLAB .....	47
<b>9. PROJETO FINAL IMPLEMENTADO.....</b>	<b>50</b>
9.1. DETERMINAÇÃO DO PROJETO FINAL.....	50
9.2. DESCRIÇÃO DO PROJETO FINAL.....	51

9.3. FABRICAÇÃO DO HARDWARE .....	66
<b>10. ENSAIOS E RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
10.1. ENSAIO 1 – AÇO SAE 1020 .....	71
10.2. ENSAIO 2 – ALUMÍNIO .....	74
<b>11. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DURANTE O PERÍODO .....</b>	<b>76</b>
<b>12. CONCLUSÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>13. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>78</b>
<b>14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A - LISTA DE MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE B - MANUAL DO USUÁRIO FINAL .....</b>	<b>82</b>

## 1. Introdução

O trabalho de conclusão de curso realizado pelos alunos consistiu na modernização de uma máquina de ensaio de tração. Os objetivos foram o projeto e implementação de novos componentes visando modernizar as funcionalidades de uma máquina já existente. Tal máquina se encontra em um dos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

Alguns componentes da máquina estavam muito desatualizados tecnologicamente, no caso a exibição e armazenamento de resultados, uma vez que a máquina fora fabricada há algumas décadas. Entretanto ela se encontrava em boas condições de uso, possuindo uma mecânica robusta e de ótima qualidade, tendo, dessa forma, muito potencial para uma utilização confiável. Mas devido a essa defasagem tecnológica, a máquina se encontrava totalmente ociosa.

Dessa forma, o trabalho propôs a modernização de componentes estratégicos da máquina para que a mesma atingisse condições de uso adequadas e pudesse voltar a ser utilizada pela comunidade da USP. Essa atualização se deu através do projeto e implementação de diversos dispositivos tais como: circuitos de tratamento do sinal, sistemas de aquisição e digitalização de dados, interface programada em software etc.

## 2. Ensaio de Tração

### 2.1. Definição

O ensaio de tração é um experimento no qual um corpo de prova é fixado em uma máquina específica que aplica esforços crescentes na direção axial, que tende a alongar ou esticar o corpo até a sua ruptura. O ensaio normalmente é realizado utilizando corpos de prova padronizados para que os resultados possam ser comparados ou reproduzidos. A norma técnica para a execução do ensaio é a ASTM-E8M-4.

Durante o ensaio o corpo é gradualmente submetido a esforços crescentes e são obtidas as deformações correspondentes, na própria máquina, através de sensores como extensômetro e células de carga. Os resultados geralmente são armazenados em um módulo auxiliar, para obtenção do gráfico de tensões e deformações, assim como para determinar características do material ensaiado.

O equipamento específico utilizado para realizar esse experimento denomina-se Máquina para Ensaio de Tração , apresentada nas Figuras 1 e 2.



Figura 1 - Máquina para Ensaio de Tração

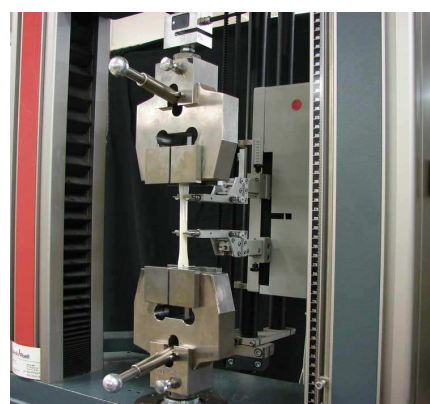


Figura 2 - Suporte e Corpo de Prova



## 2.2. Características

Pode-se considerar que as deformações sofridas pelo material são uniformemente distribuídas em toda a região de interesse do corpo de prova, pelo menos até que seja atingida uma carga máxima quando o ensaio está encaminhando para seu término. A magnitude da carga pode ser incrementada em uma velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, e desta forma o ensaio de tração permite obter parâmetros, com qualidade satisfatória, como a tensão de escoamento, tensão de ruptura, tensão máxima de tração, módulo de elasticidade do regime elástico entre outros.

A uniformidade da deformação permite obter parâmetros da variação da deformação em razão dos esforços aplicados no material. Ao atingir a carga máxima no material, surge o fenômeno da estrição ou para materiais mais dúcteis a diminuição da secção transversal do corpo de prova. A ruptura ocorre na região do corpo mais estreita, exceto se houver alguma imperfeição no corpo que poderá ocasionar maior fragilidade.

Devido ao fato de as deformações nos corpos serem de pequenas magnitudes, geralmente é mais preciso detectar esforços aplicados ao corpo do que deformações decorridas nestas cargas.

Nas Figuras 3 e 4 podemos observar um corpo de prova típico e o seu comportamento durante o ensaio.



Figura 3 - Corpo De Prova Típico



Figura 4 - Corpo de Prova Durante Ensaio

## 2.3. Resultados do Ensaio de Tração

Através do ensaio de tração é possível traçar um gráfico da tensão de engenharia (tensão que considera a área da secção transversal constante, durante a tração -  $\sigma$ ) em função da deformação (variação do comprimento dividido pelo comprimento inicial -  $\varepsilon$ ) e obter muitas propriedades importantes que caracterizam o material.

### 2.3.1. Gráfico da Tensão de Engenharia em função da Deformação

Um gráfico de deformação em função da tensão de engenharia típico está representado na Figura 5.

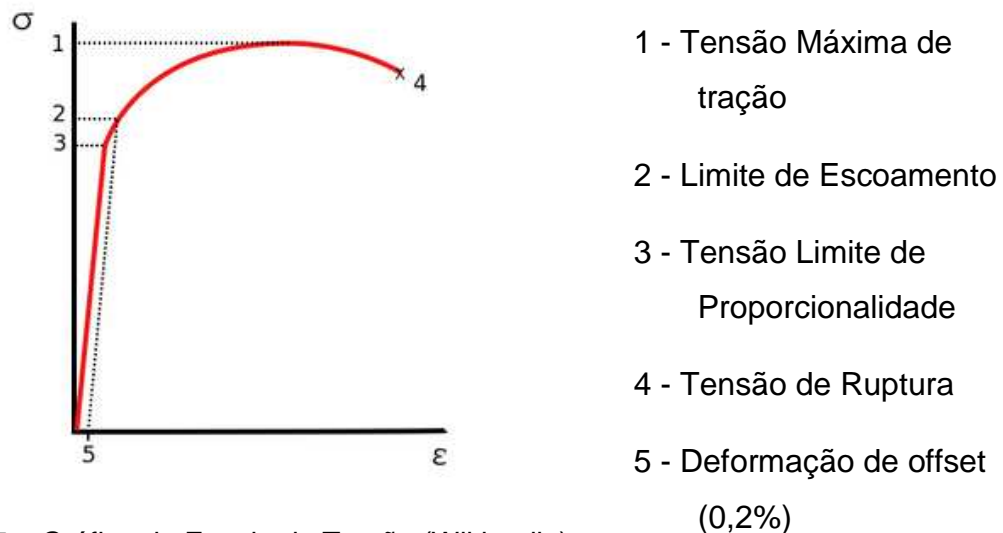


Figura 5 – Gráfico do Ensaio de Tração (Wikipedia)

A região do começo do gráfico (até 2) é denominada de operação em regime elástico e a parte seguinte (depois de 2) é denominada operação em regime plástico

### 2.3.2. Regime Elástico

Para a maior parte dos metais nos quais são aplicados esforços de tração com baixos valores de tensão, esta é linearmente proporcional a deformação ou seja, a relação de tensão/deformação é constante. Esta constante é denominada módulo de elasticidade ou módulo de Young e é representada pela letra E. Dessa forma, durante o regime elástico, é obtida relação denominada Lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

As deformações elásticas não são permanentes, e ao remover a carga o corpo retorna ao seu formato original, anterior a aplicação da mesma. Porém existem materiais em que a curva tensão-deformação não é linear como no ferro fundido cinzento, concreto e polímeros, por exemplo.

Assume-se que a deformação elástica independe do tempo, ou seja, a deformação elástica permanece inalterada durante o tempo em que uma carga aplicada ao corpo seja mantida constante. Também é assumido que, após a remoção da carga a deformação retorna para o valor zero.

### 2.3.3. Regime Plástico

Durante a deformação, após uma certa tensão o comportamento do material muda de elástico para plástico. Nesse estágio as deformações são permanentes e o ponto a partir do qual passam a ser bastante significativas é chamado de Limite de Escoamento e a tensão correspondente é a Tensão de Escoamento.

Traduzindo tal conceito para a curva tensão x deformação (Figura 5), cujo exemplo será apresentado com os corpos de prova testados, as deformações plásticas se iniciam no ponto em que a curva deixa de ser linear.

Este é o ponto chamado Limite de Proporcionalidade, que na prática é difícil de ser determinado com precisão. Por isso existe uma convenção na qual é construída uma linha reta paralela à porção elástica passando pelo ponto de deformação igual a 0,2%. A tensão correspondente à intersecção desta linha com a curva é o Limite de Escoamento.

Continuando a interpretar a curva, durante a deformação plástica a tensão necessária para continuar a deformar o material aumenta até atingir um ponto máximo, a Tensão Máxima de Tração (ou de resistência à tração), que é o ponto máximo do gráfico. Antes de atingir esse ponto a deformação é uniforme na seção, mas depois dele começa a formar-se uma estricção, ou seja, redução da área da seção transversal, na qual a deformação fica concentrada. É nessa área que se dá a ruptura e a tensão necessária para causar a ruptura cai. Esta tensão é chamada de Limite de Ruptura.

O trabalho apresentado trata de exemplos com materiais metálicos, cuja curva tensão x deformação é bastante definida, bem como seus limites de escoamento e tensão máxima. Entretanto, ressalta-se que o mesmo não ocorre com outros materiais, como por exemplo, as cerâmicas, que não possuem limite de escoamento.

### 3. Máquinas para Ensaio de Tração e corpos de prova

#### 3.1. Máquinas para Ensaio de Tração

O ensaio de tração é usualmente realizado na máquina universal. Esta máquina recebe este nome porque é utilizada para a realização de diversos tipos de ensaios, como tração, compressão e torsão. Na Figura 6 podem-se observar os componentes básicos de uma máquina universal de ensaios.

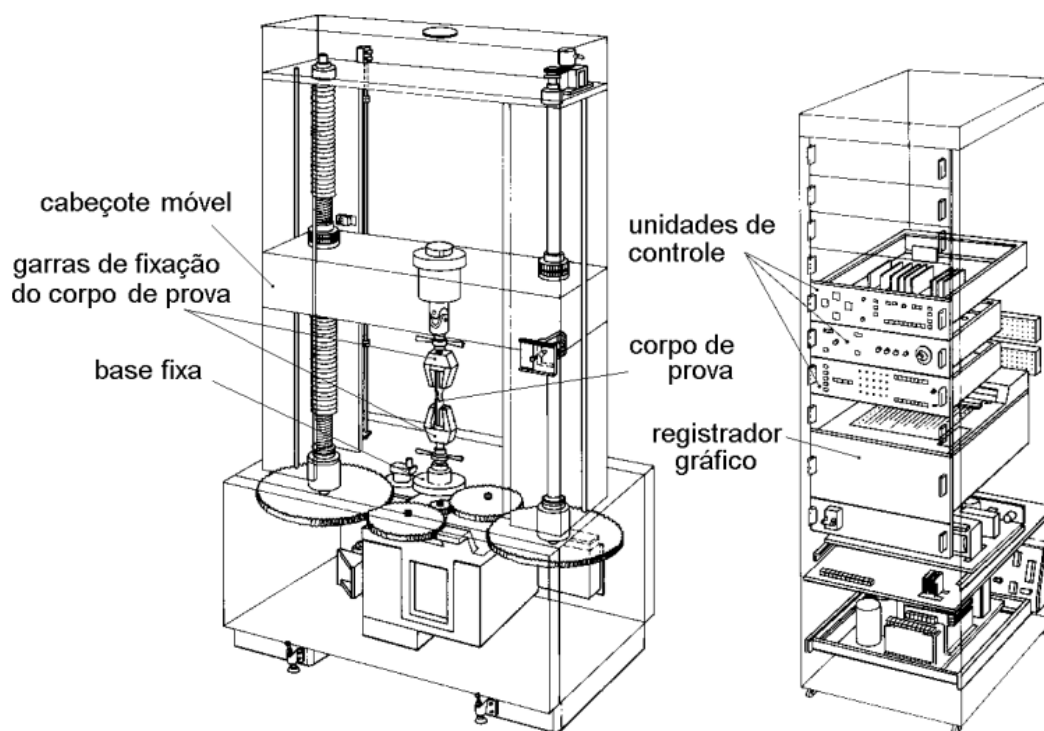


Figura 6 - Máquina Universal (Telecurso 2000)

Fixa-se o corpo de prova na máquina por suas extremidades, numa posição que permite ao equipamento aplicar-lhe uma força axial para fora, de modo a aumentar seu comprimento. A máquina de tração é hidráulica, movida pela pressão de óleo, e está ligada a um dinamômetro que mede a força aplicada ao corpo de prova.

A máquina de ensaio possui um registrador gráfico que vai traçando o diagrama de força e deformação, em papel milimetrado, à medida que o ensaio é realizado ou envia um resultado a um computador que exibe e armazena os mesmos.

### 3.2. Corpo de prova

O ensaio de tração é feito em corpos de prova com características especificadas de acordo com normas técnicas. Suas dimensões devem ser adequadas à capacidade da máquina de ensaio.

Normalmente utilizam-se corpos de prova de seção circular ou de seção retangular, dependendo da forma e tamanho do produto acabado do qual foram retirados, como mostram Figura 7.

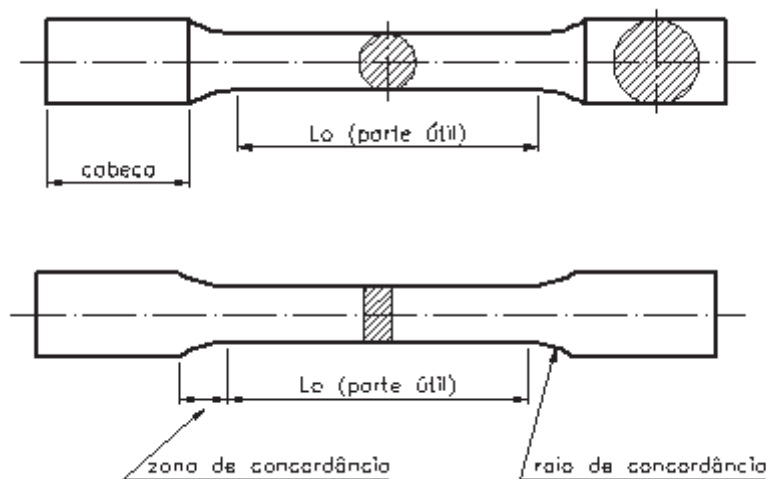


Figura 7 - Corpos de prova (Telecurso 2000)

A parte útil do corpo de prova, identificada no desenho acima por  $L_0$ , é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do material.

As cabeças são as regiões extremas, que servem para fixar o corpo de prova à máquina de modo que a força de tração atuante seja axial. Devem ter

seção maior do que a parte útil para que a ruptura do corpo de prova não ocorra nelas.

Suas dimensões e formas dependem do tipo de fixação à máquina. Os tipos de fixação mais comuns são esquematizados nas Figuras 8, 9 e 10.

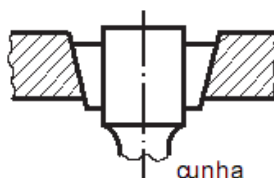


Figura 8 - Fixação tipo cunha (Telecurso 2000)

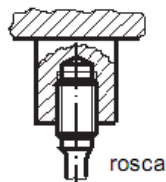


Figura 9 - Fixação tipo rosca (Telecurso 2000)

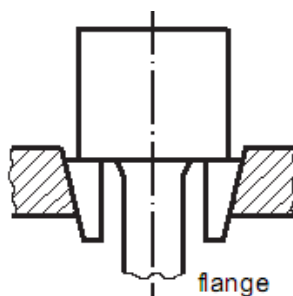


Figura 10 - Fixação tipo flange (Telecurso 2000)

Entre as cabeças e a parte útil há um raio de concordância para evitar que a ruptura ocorra fora da parte útil do corpo de prova (Lo).

Em materiais soldados, podem ser retirados corpos de prova com o cordão de solda no sentido longitudinal ou transversal da solda, como se pode observar nas Figuras 11 e 12.

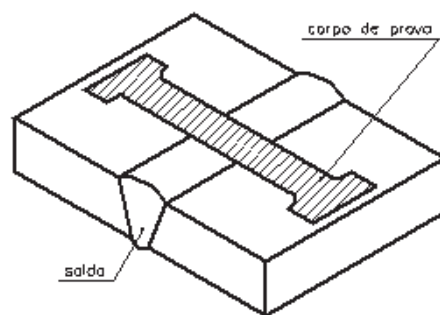


Figura 11 - Corpo de prova com solda no sentido transversal (Telecurso 2000)

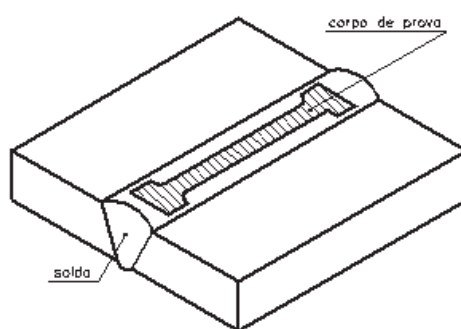


Figura 12 - Corpo de prova com solda no sentido longitudinal (Telecurso 2000)

### 3.3. Preparação do corpo de prova

O primeiro procedimento consiste em identificar o material do corpo de prova. Corpos de prova podem ser obtidos a partir da matéria-prima ou de partes específicas do produto acabado.

Depois, deve-se medir o diâmetro do corpo de prova em dois pontos no comprimento da parte útil, utilizando um micrômetro, e calcular a média.

Por fim, deve-se riscar o corpo de prova, isto é, traçar as divisões no comprimento útil. Num corpo de prova de 50mm de comprimento, as marcações devem ser feitas espaçadas em 5mm conforme é demonstrado na figura 13.



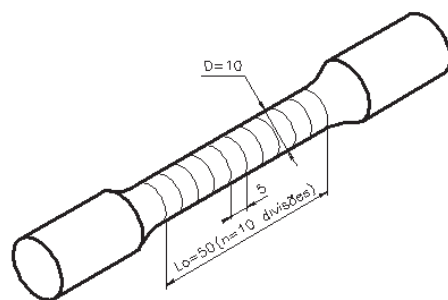


Figura 13 - Corpo de prova preparado (Telecurso 2000)

Assim preparado, o corpo de prova estará pronto para ser fixado à máquina de ensaio e ser ensaiado.

#### 4. Análise das Características da Máquina

A máquina de ensaio de tração para a qual foi realizado o projeto e implementação da modernização se encontra no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica e devido à sua defasagem tecnológica não vem sendo mais freqüentemente utilizada.

Apesar de antiga, a máquina possui ótima qualidade mecânica, muito robusta e confiável, tendo sido fabricada pela Instron. Ela conta com suporte para células de carga com capacidade máxima de aproximadamente 90kN, sistema de suporte por pinças inferior e superior, motor de corrente contínua, módulos eletrônicos analógicos para controle do motor e plotter.

A parte mecânica, composta basicamente pelo quadro de reação, não apresenta tantas diferenças em relação às máquinas fabricadas atualmente como pode ser observado na Figura 14.



Figura 14 – Quadro de Reação

A aquisição dos sinais necessários para o ensaio de tração, que são a carga aplicada e o deslocamento correspondente no corpo de prova, é realizada utilizando uma célula de carga (Figura 15) e um extensômetro clip-on (Figura 16), ambos analógicos.



Figura 15 - Célula de Carga



Figura 16 - Extensômetro clip-on

A parte eletrônica, responsável pelo controle do motor que realiza a o ensaio, bem como aquisição e tratamento dos sinais captados pelos sensores é totalmente analógica também, ou seja, os sinais não recebem nenhum tipo de digitalização e processamento, sendo manipulados analogicamente através de transistores e válvulas. Dessa forma, o módulo de controle da máquina (Figura 17) de ensaio de tração é totalmente diferente das máquinas atuais como pode ser observado na foto a seguir:



Figura 17 – Módulo de Controle e Exibição de Resultado

## **5. Projeto Preliminar da Automação**

O objetivo principal desse trabalho foi o de modernizar a máquina analisada anteriormente para que ela pudesse obter as melhorias e vantagens do controle das máquinas utilizadas atualmente. Para isso percebeu-se que o foco deveria ser a parte eletrônica, que era o que realmente apresentava defasagem, ou seja, a substituição do controle analógico e manual por um digital.

Dessa forma, levando-se em consideração a análise apenas das características da máquina, foi decidido que a parte mecânica deveria ser mantida intacta assim como os sensores utilizados. Pelo projeto preliminar foi decidido que a parte eletrônica seria modernizada completamente, incluindo basicamente quatro sistemas: sistema de controle do motor, de aquisição de sinais, de exibição de resultados e de interface com o usuário.

### **5.1. Sistema de Controle do Motor de Corrente Contínua:**

O motor de corrente contínua é controlado pela amplitude de um sinal contínuo que é enviado pelo módulo de controle.

É possível controlar a velocidade do motor de corrente contínua digitalmente gerando pulsos, que devem ser amplificados por um driver para poderem atingir a potência necessária para o motor se movimentar. Utilizando um feedback é possível controlar a velocidade com que o motor gira, independentemente da carga (torque) requisitada pelo ensaio.

## **5.2. Sistema de Aquisição de Sinais:**

Os sensores possuem saída analógica e são enviados diretamente ao módulo de controle e exibição de resultados, recebendo tratamento adequado para controle da caneta de plotagem.

O sinal deve ser condicionado (amplificado, filtrado e digitalizado) para poder ser adquirido e manipulado pela interface para o usuário, no caso um software rodando em um PC.

## **5.3. Sistema de Exibição dos Resultados:**

O único modo de utilização dos sensores e exibição dos resultados no sistema atual, analógico, é o plotter. O sinal não tem como ser manipulado ou armazenado para outros tipos de análise.

Digitalizando os sinais, será possível utilizá-los de diversos modos através da interface, além disso, também será possível armazenar os dados e utilizá-los posteriormente e de outras formas.

## **5.4. Sistema de Interface com o Usuário:**

No sistema analógico atual a interface é a própria parte eletrônica, que possui alguns controles, principalmente em relação ao motor e a única saída é o gráfico plotado em tempo real.

Com o sistema digitalizado é utilizado como interface um software que exibirá informações relevantes, o gráfico plotado e possuirá botões e outros

meios para o controle do ensaio. A interface também exportará os dados do ensaio para que o usuário possa utilizá-los em outros softwares ou de outras formas que preferir.

Utilizando essas considerações chega-se a dois tipos de projeto que podem ser implementados, indicados nas figuras 18 e 19.

a) Controle em Malha Aberta sem Microcontrolador

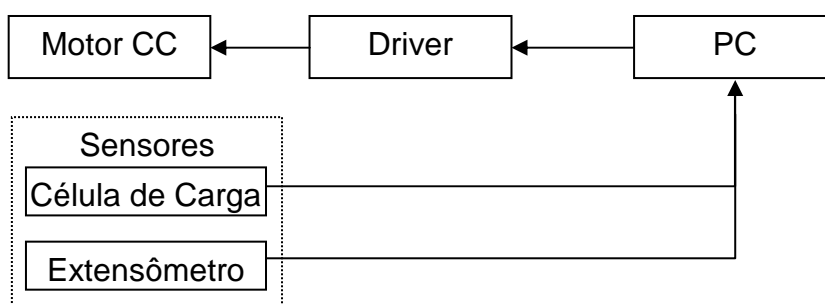


Figura 18 – Sistema de Controle em Malha Aberta

A primeira solução proposta baseia-se no controle de velocidade do motor, e conseqüentemente na velocidade da tração, por malha aberta e sem uso de microcontrolador, ou seja, o PC será responsável pela interface com o usuário, pela aquisição, armazenamento e exibição de sinais, além de controlar o motor através de sinais enviados ao driver.

Neste caso são necessários somente dois sensores: a célula de carga e o extensômetro clip-on.

b) Controle em Malha Fechada com Microcontrolador

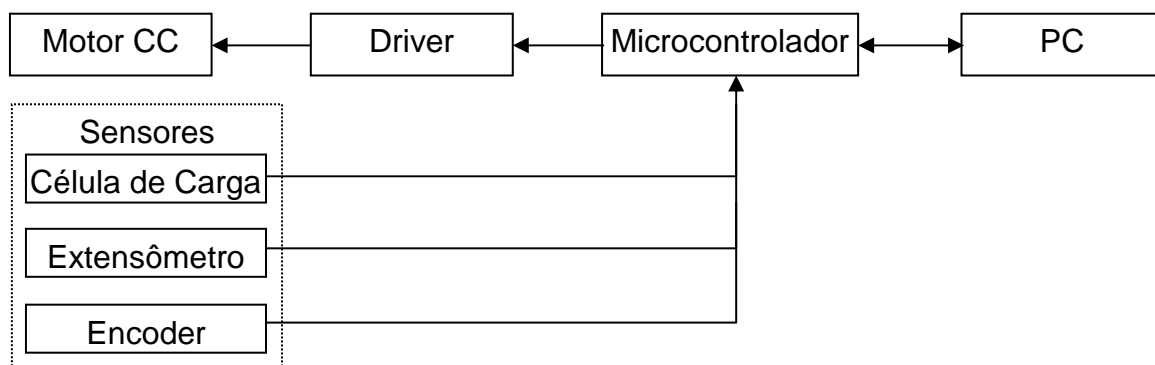


Figura 19 – Sistema de Controle em Malha Fechada

A segunda solução baseia-se no controle da velocidade do motor por malha fechada utilizando um microcontrolador, dessa forma é possível obter um controle realmente eficiente da velocidade do ensaio.

O microcontrolador é responsável pela aquisição dos dados, e utiliza um desses sinais para realizar o controle do driver. O microcontrolador também envia esses sinais ao PC que será responsável apenas pela interface com o usuário e exibição dos dados.

Neste caso além da célula de carga e do extensômetro clip-on é necessário um sensor adicional para controlar a velocidade do motor: o encoder óptico.

Para ambos os casos a Interface com o usuário será semelhante e, considerando os tipos de controle e informações relevantes, chegamos ao esboço exibido na figura 20.

Arquivo	Configura	Ajuda
---------	-----------	-------

Força (Kgf)

Tensão x Deformação

Deformação

Velocidade do Ensaio:

Histórico

Tensão x Deformação:

Comprimento Útil:

Área da Secção:

Deformação atual:

Iniciar

Parar

Figura 20 – Esboço da Interface com usuário

## **6. Análise do Funcionamento Original da Máquina**

Após a análise das características da máquina e elaboração de um projeto parcial baseado apenas nessas características, foi feita a análise do funcionamento original da máquina, ou seja, um estudo do comportamento individual dos componentes da máquina durante a operação para determinar a influência na qualidade da mesma, o que é fundamental para a elaboração do projeto final da automatização.

A seguir está descrito o procedimento de funcionamento original, que foi utilizado para a análise. Em seguida a análise dos componentes individuais.

### **6.1. Procedimento de Ensaio para o Funcionamento Original**

O procedimento a ser seguido na máquina original para a realização de um ensaio está descrito a seguir:

- 1)** Selecionar e instalar na máquina de ensaio de tração a célula de carga e o extensômetro mais apropriados ao ensaio;
- 2)** Ligar a máquina e aguardar alguns minutos para que ela entre em regime de operação.
- 3)** Posicionar as garras na distância adequada e fixar os corpos de provas nas mesmas. Utilizar os botões “up” ou “down”.
- 4)** Preparar o módulo de exibição de resultados (plotter) com abastecimento de papel e tinta, caso necessário;
- 5)** Configurar os módulos de aquisição e exibição de resultado;
- 6)** Selecionar a velocidade de ensaio e iniciar, mantendo a máquina ligada até a ruptura do corpo.



## **6.2. Análise dos Componentes Individuais**

Segundo o projeto preliminar pretendia-se manter o funcionamento mecânico, ou seja, o quadro de reação e trabalhar apenas na aquisição de dados e acionamento do motor, em outras palavras, no módulo de controle e exibição de resultados.

Realizando um ensaio, utilizando os procedimentos descritos, pode-se analisar a contribuição, positiva ou negativa, dos componentes principais individualmente para a operação e obtenção do resultado. São eles:

### **6.2.1. Sistema de Acionamento**

O sistema de acionamento é responsável pela movimentação do cabeçote móvel do quadro de reação, ou seja, o faz subir ou descer numa velocidade pré-determinado o que comprime ou traciona o corpo de prova que está sendo ensaiado.

Ele é composto por:

- Atuador: motor de corrente contínua, transforma a energia elétrica em energia cinética que é transferida ao redutor;
- Redução: é acionado pelo motor e é responsável por transmitir o movimento ao fuso. Além disso, possui duas opções de velocidade ( $H = 10 \times L$ ) aumentando o torque do movimento (figuras 21 e 22);



Figura 21 - Câmbio da Redução (High, Neutral Low)



Figura 22 - Embreagem para Engrenar Redução

- Fuso: Transforma o movimento rotativo da redução em movimento linear do cabeçote móvel (Figura 23).

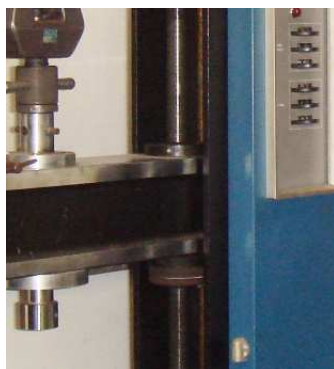


Figura 23 – Fuso de Movimentação do cabeçote móvel

O módulo de controle e exibição dos dados realiza o controle do motor, enviando sinais que o fazem operar em diversas velocidades, manual ou automaticamente. Cada velocidade de operação do motor possui duas configurações: H (High) ou L (Low), que depende de como está engrenada a redução.

As velocidades disponíveis em cm/min são: 5,2,1,0.5, 0.2, 0.1 e 0.05 em H e 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.005 em L, como indicado na Figura 24.



Figura 24 – Controle de Velocidade do Cabeçote Móvel (cm/min)

Analisando o funcionamento do sistema de acionamento foi constatado que este está em condições muito boas de uso e funcionamento, o que não é surpresa uma vez que está diretamente ligado à mecânica já estudada anteriormente e aprovada para permanecer inalterada. O sistema eletro-eletrônico que talvez pudesse operar de forma não satisfatória apresentou funcionamento apropriado, compatível com as necessidades do projeto.

### 6.2.2. Exibição de Resultados

Como estudado anteriormente nas características da máquina, a única saída para os dados colhidos durante o ensaio é um plotter mostrado na Figura 25.



Figura 25 - Plotter Gráfico

Ele é acionado no eixo horizontal (carga), pelo sinal da célula de carga e o eixo vertical (deslocamento) pode utilizar dois tipos de entrada:

- Sinal de entrada de extensômetro;
- Deslocamento do cabeçote móvel.

A Figura 26 mostra a interface de entrada dos sensores.



Figura 26 – Interface de entrada do Extensômetro

Durante a análise do funcionamento utilizou-se a entrada pelo deslocamento do cabeçote móvel, pois não obteve-se sucesso em operar os extensômetros corretamente (ver próximo item) e mesmo assim o módulo de exibição não operou de maneira correta, que pudesse levar à exibição de um resultado satisfatório. Além disso, como não há digitalização os dados não podem ser armazenados e manipulados para estudo posterior.

### 6.2.3. Células de Carga

Existe a disponibilidade de diversas células de carga, para ensaios de tração, compressão ou torção, as quais são listadas na Tabela 1 e ilustradas pela Figura 27.

Tipo de Célula	Carga	Assembly
Tração	2000GM	A30-38
Tração	50kg	A30-40
Tração	2000kg.cm	A349-2B
Reversível	10000kg	A357-498
Reversível	500kg	A217-17
Reversível	1000kg	A30-43
Compressão	50kg	A31-19

Tabela 1 – Células de carga



Figura 27 – Conector da Célula de Carga

Não foram testadas todas as células de carga, mas as que foram utilizadas durante as operações de teste apresentaram um comportamento satisfatório no sentido de gerar sinais, o que é de interesse ao projeto, uma vez que a compressão e tração geraram resultados coerentes para o módulo de exibição. A qualidade do sinal não pode ser analisada, mas o fato de a célula de carga gerar o sinal coerente já garante sua funcionalidade mesmo que seja necessário condicionamento e aquisição.

#### 6.2.4. Extensômetros

Os extensômetros disponíveis no laboratório são escassos, estando alguns sem condições de uso, e atingem algumas faixas de trabalho, sendo listados na Tabela 2 e ilustrados pela figura 28.

Extensômetro	Gage Length	Range
G51-14-M	0-50 mm	0-25 mm
G51-15-M	0-10 mm	0-5 mm
G51-17-M	0-25 mm	0-25 mm
G-51-14	0-2 "	0-1 "

Tabela 2 – Extensômetros



Figura 28 – Conector do Extensômetro

Os extensômetros foram ligados ao módulo de controle e apesar do excitação deles não houve resposta coerente no módulo de exibição. Foi levantada a hipótese de que o problema deveria estar no módulo de exibição, uma vez que ao tentarmos medir os pinos de diversas maneiras usando a medida de resistência (item 9.2.2) do multímetro obtivemos resultados coerentes garantindo a funcionalidade dos mesmos e possibilitando o uso no projeto.

## 7. Objetivos

Após a análise completa das características da máquina, do seu funcionamento e levando em consideração recursos materiais, de conhecimento e tempo chegou-se aos seguintes objetivos em relação à tarefa de automatização da máquina:

- Reutilização do sistema de acionamento;
- Condicionamento e aquisição de sinais das células de carga;
- Condicionamento e aquisição de sinais dos extensômetros;
- Envio dos sinais adquiridos a um PC;
- Módulo de exibição rodando no PC;
- Elaboração do gráfico do ensaio em tempo real;
- Exportação dos dados numéricos em texto ou planilha.

Como se pode notar, a maior preocupação ficou em se implementar um novo modo de utilização dos sinais gerados pelos sensores, que é o principal fator de defasagem da máquina. Na máquina original a única utilização dos mesmos é unicamente para mover o plotter enquanto nas máquinas modernas, dados são adquiridos por PC's após condicionamento e digitalização dos sinais, que podem ser armazenados, manipulados e estudados posteriormente.

Os outros componentes da máquina, principalmente os da parte mecânica, que incluem o quadro de reação e o acionamento da trave-móvel, apresentaram um funcionamento satisfatório, que não comprometeriam a usabilidade da máquina para as necessidades atuais do ensaio e optamos por mantê-las. Mas isso não quer dizer que não apresentem nenhuma defasagem com as máquinas atuais, como, por exemplo, os acionamentos do motor, os sensores entre outros.

## **8. Propostas Iniciais para o Projeto Final**

Para atender aos objetivos apresentados anteriormente e após pesquisa, estudo de casos semelhantes e consultas a engenheiros mais experientes chegou-se a três frentes distintas de solução. A diferença entre elas estão na forma como os sinais são condicionados, adquiridos e enviados ao PC. Dessa forma, o projeto preliminar da interface foi mantido, a única diferença foi que a interface apenas exibirá os resultados não controlando mais o ensaio. São elas:

### **8.1. Placa de Aquisição e Condicionamento de Sinais com Exibição de Resultados Através de Software Próprio**

Nesta solução pretende-se utilizar módulos comerciais associados ao desenvolvimento de um software para leitura e exibição dos dados coletados de acordo com os objetivos do projeto.

O módulo de condicionamento de sinais amplifica e filtra o sinal e o módulo de aquisição é responsável pela digitalização e envio ao computador de controle. Estes módulos são amplamente vendidos no mercado para instrumentação de ensaios e também são fortemente recomendados pelos fabricantes para um resultado muito satisfatório da atualização de máquinas de ensaios devido às experiências bem sucedidas nesse tipo de atividade.

Os fabricantes consultados desses módulos foram a Lynx, National Instruments e Advantech, fornecendo guias e especificações dos mesmos. O diagrama do projeto utilizando estes componentes é indicado na Figura 29.



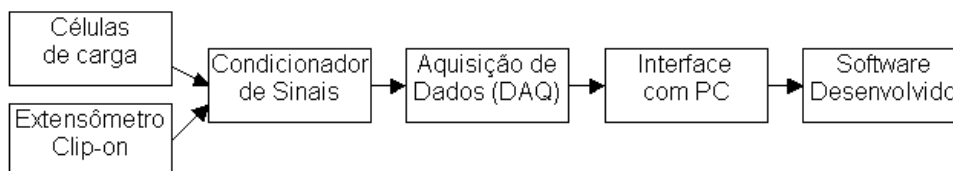


Figura 29 – Diagrama da solução utilizando módulos comerciais

### 8.1.1. Solução Lynx

A Lynx oferece dois tipos de produtos compatíveis com as necessidades do projeto. Um deles, o AD0500 (Figura 30), oferece uma solução completa com condicionamento de sinais e aquisição e suas principais características são:

- 8 ou 16 amplificadores de instrumentação com entrada diferencial e ganho selecionável por chaves internas entre cinco valores fixos: x1, x100, x200, x300 e x600. Outros ganhos (x500, x1000 ou x1200, com precisão de 2%) também podem ser selecionados;
- Configuração de entrada selecionável por chaves para: termopares, entrada direta de tensão (desde  $\pm 10\text{mV}$  até  $\pm 10\text{V}$ ) e corrente (até  $\pm 40\text{mA}$ );
- Filtro passa-baixas de 2ª ordem tipo Butterworth com frequência de corte em 35Hz, alterável pelo usuário mediante troca de componentes;
- Conversor A/D com resolução de 12 bits;
- Taxa máxima de aquisição: 500 amostras/segundo;
- Comunicação por protocolo IP, interface padrão Ethernet 10baseT;

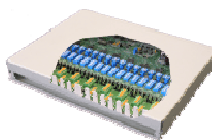


Figura 30 – Módulo DAQ + Condicionador de Sinais da Lynx (Lynx)

Ele é compatível com sensores tipo ICP, Pt100 e pontes de Wheatstone que são comuns em sensores de máquinas de ensaio de tração.

O custo do mesmo é de R\$3510,00 e por ser um fabricante nacional poderá ter um suporte mais fácil se necessário.

O outro produto é o condicionador MCS1000 que é semelhante ao AD0500 com o diferencial de não possuir aquisição, logo deve ser ligado a um DAQ de outro fabricante.

### 8.1.2. Solução Advantech

A Advantech diferentemente da Lynx não possui um produto que já apresenta uma solução completa, então, é necessário a aquisição separada de módulo de condicionamento de sinal e aquisição.

O módulo de aquisição da Advantech é o USB-4711<sup>a</sup> (Figura 31), suas principais características são:

- 16 ou 8 entradas analógicas simples ou diferenciais;
- Conversor A/D de 12 bits de resolução;
- Amostragem de 150kS/s;
- Buffer de armazenamento First In First Out para 1000 amostras;
- Comunicação por porta USB2.0.



Figura 31 – Módulo DAQ da Advantech (Advantech)

O módulo de condicionamento de sinais para strain gauge é o ADAM-3016 (Figura 32), mas este só possui função de isolar o sinal não apresentando amplificação e filtragem. Sua entrada é o sinal de uma ponte de Wheatstone completa:



Figura 32 – Isolador de Sinais para Strain Gages da Advantech (Advantech)

Seriam necessários um módulo DAQ e dois módulos isoladores de sinal da Advantech e um condicionador de outro fabricante.

O preço do DAQ é US\$545,00 e o preço dos módulos isoladores é US\$225,00. A vantagem da solução Advantech é o DAQ que por ter interface USB, e uma API desenvolvida pelo fabricante pode facilitar muito a programação da interface no PC.

### 8.1.3. Solução National Instruments

A National Instruments também não apresenta um módulo completo com DAQ e condicionamento de sinais como a Lynx.

O módulo de aquisição de sinais da National Instruments é o USB-6210 (Figura 33), suas principais características são:

- 16 entradas analógicas;
- Conversor A/D com 16 bits de resolução;

- Amostragem de 250kS/s
- Comunicação por porta USB 2.0;



Figura 33 – Módulo DAQ da National Instruments (National Instruments)

Para o condicionamento dos sinais que serão enviados ao DAQ a National Instruments oferece um módulo I/O no qual devem ser acoplados os módulos condicionadores de sinal. O módulo de I/O é o SCC-68 (Figura 34) que possui Slots para até 4 módulos condicionadores de sinal. O módulo condicionador de sinais compatível é o SCC-SG (Figura 35) que foram projetadas para operar com Strain Gauges com módulos específicos para um quarto de ponte, meia ponte e ponte inteira.



Figura 34 – Módulo I/O da NI (National Instruments)



Figura 35 - Módulos Condicionadores de Sinal da NI (National Instruments)

Os preços dos módulos são: DAQ US\$690,00, Módulo I/O US\$330,00 e dos Módulos Condicionadores de Sinal US\$395,00.

#### 8.1.4. Soluções Mistas

Todos os fabricantes apresentam soluções modulares independentes de DAQ e condicionamento então é possível utilizar módulos de fabricantes distintos para obter uma solução.

Os DAQ's de todos os fabricantes recebem sinais analógicos independentemente da fonte. Podem ser sinais quaisquer, condicionados ou não, e não importa o fabricante do módulo condicionador. As principais diferenças entre os DAQ's são a interface com o computador. O modelo da Lynx utiliza conexão Ethernet enquanto a Advantech e a National Instruments utilizam a interface USB.

Os módulos condicionadores são um pouco mais variados e complexos. A Lynx oferece o módulo de condicionamento de sinal em um equipamento único. A Advantech não possui condicionadores de sinal com amplificação e filtragem. A National Instruments necessita de um módulo I/O com slots aonde são encaixados os módulos condicionadores.

Dessa forma combinando os fabricantes chegamos às seguintes soluções adicionais:

- DAQ Advantech + Condicionador Lynx;
- DAQ Advantech + Módulo I/O e Condicionador da National Instruments;
- DAQ National Instruments + Condicionador Lynx

Deve-se, entretanto, ser feito um estudo mais detalhado acerca das interfaces, casamento de impedâncias, tipos de conector etc, para garantir a compatibilidade total de equipamentos de fabricantes distintos.

## 8.2. Utilização da Entrada Analógica da Gameport com Tratamento Externo do Sinal e Exibição de Resultados pelo Matlab

Esta solução é baseada em um experimento realizado no laboratório de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em que foi elaborado um sistema para leitura de dados de sensores através da placa de som pela leitura da entrada de joystick do computador.

O software para tratamento dos dados recebidos e exibição dos resultados seria desenvolvido em linguagem Matlab, que para utilização no laboratório seria necessário obter licença do software junto ao distribuidor.

O diagrama do projeto para utilização desta solução é indicado na Figura 36.

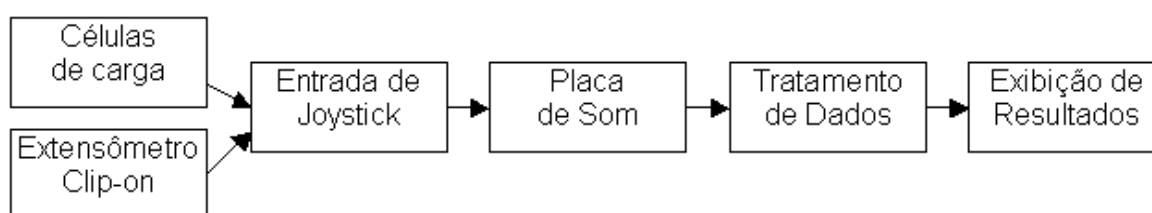


Figura 36 – Diagrama da Solução usando a Gameport

### 8.2.1. Entrada de Joystick

Na Figura 37 apresentamos a pinagem da porta de joystick e na Tabela 3 a indicação das conexões:

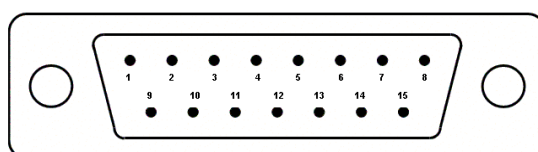


Figura 37 - Pinagem da porta de Joystick

Pino	Função	Pino	Função	Pino	Função
1	+5V	6	Analógica 2	11	Analógica 3
2	Digital 1	7	Digital 2	12	0V / Porta Midi
3	Analógica 1	8	+5V / sem uso	13	Analógica 4
4	0V	9	+5V	14	Digital 4
5	0V	10	Digital 3	15	5V / Porta Midi

Tabela 3 - Conexão da porta de Joystick

Para conexão com uma entrada analógica: o sensor deve ser conectado, primeiro, a um dos pinos das portas analógicas (3, 6, 11 ou 13), o qual apresenta o potencial elétrico mais baixo (-), e depois a um dos pinos de tensão (+5V) (1, 8 ou 9), o qual apresenta um potencial elétrico mais alto (+). Além das conexões citadas, deve-se fechar uma porta analógica, para que o programa possa fazer a leitura correta da(s) porta(s) analógica(s) utilizada(s) conforme a Figura 38.

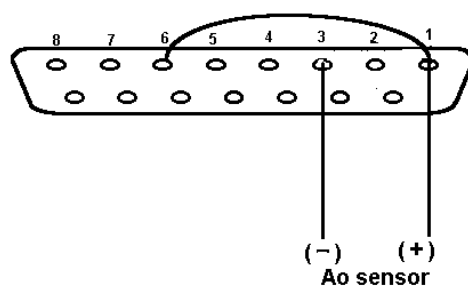


Figura 38 - Exemplo de conexão de sensor analógico na porta de joystick

### 8.3. Utilização da(s) Porta(s) Paralela(s) com Tratamento Externo do Sinal e Exibição de Resultados pelo Matlab

Esta solução se assemelha ao item anterior, porém necessita do desenvolvimento de circuito para amplificar e digitalização os dados provenientes das células de carga e extensômetros que serão coletados pela(s) porta(s) paralela(s) do computador, e posteriormente filtrados e exibidos por software também desenvolvido em linguagem Matlab.

O diagrama da solução utilizando a leitura das porta(s) paralela(s) é indicado na Figura 39.

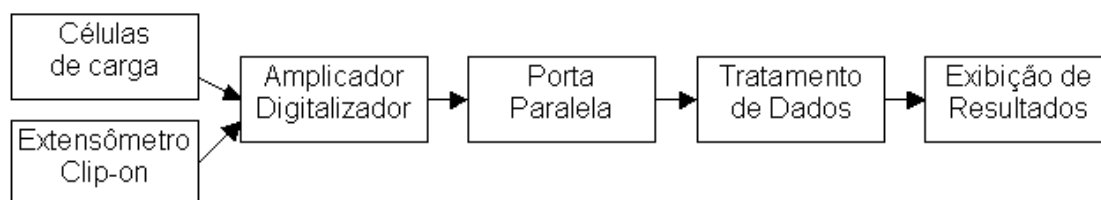


Figura 39 – Diagrama da solução utilizando a porta paralela

#### 8.3.1. Amplificador de Instrumentação

O circuito amplificador instrumentação pode ser aplicado neste projeto para comparar e amplificar a tensão  $V$  ( $V_1 - V_2$ ) proveniente da ponte de Wheatstone. O circuito do mesmo pode ser observado na Figura 40.



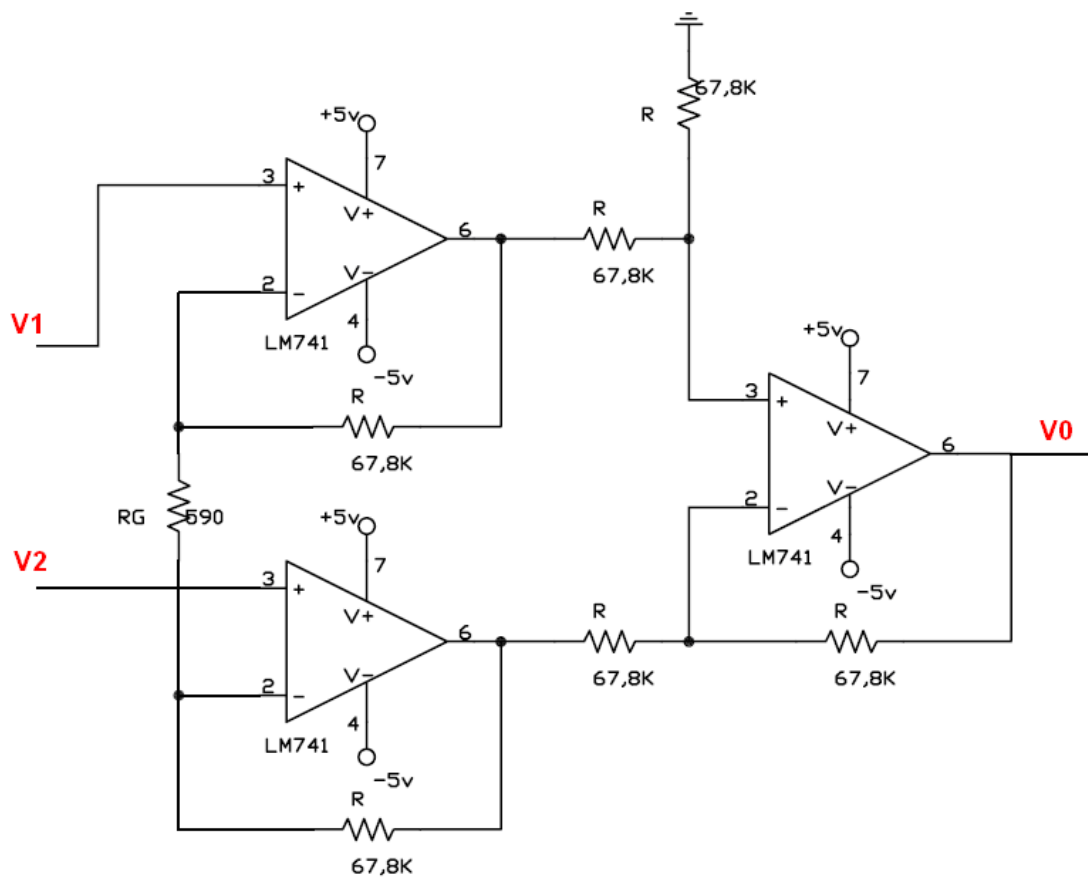


Figura 40 - Circuito amplificador

O ganho de tensão proporcionado pelo circuito é dado pela fórmula a seguir:

$$V_o = A \cdot (V_2 - V_1)$$

Sendo:

$$A = 1 + \frac{2 \cdot R}{R_G}$$

### 8.3.2. Conversão Analógica-digital de 8 bits

O circuito de conversão analógico-digital utilizará um CI ADC0804 padrão. O circuito conversor AD está indicado na Figura 41.

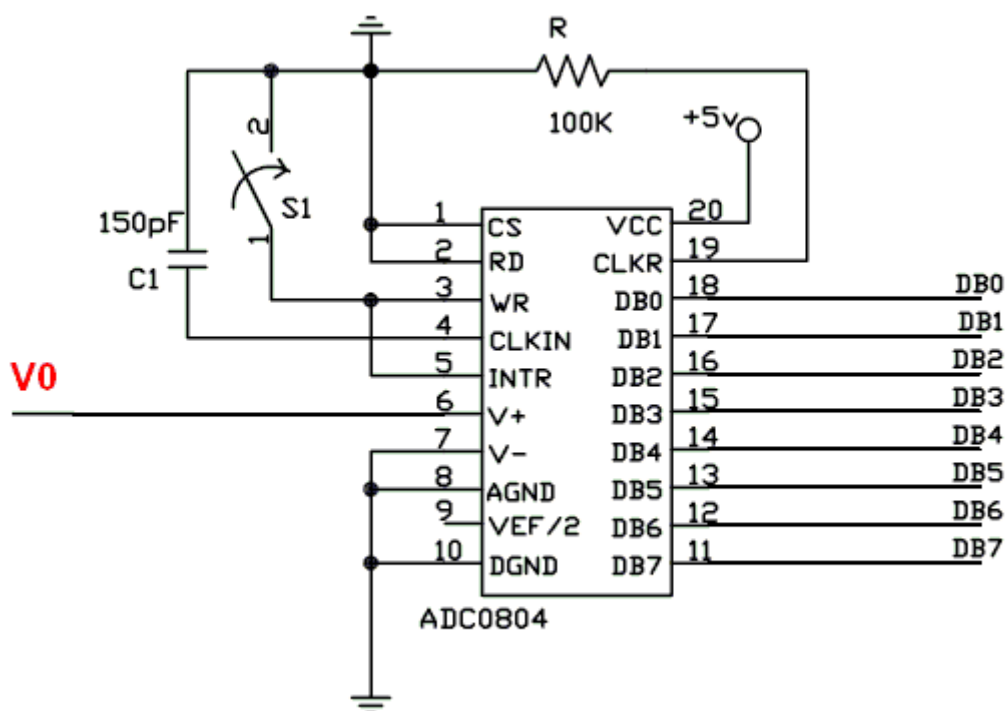


Figura 41 – Conversor analógico-digital de 8 bits

A tensão de entrada  $V_0$  é convertida em um digital proporcional de 8bits de 5V. Os pinos 11 a 18 do ADC0804 são conectados à porta paralela DB25 do PC conforme a especificação da figura. O GND do circuito AD deve ser o mesmo do GND da porta paralela do PC.

## **9. Projeto Final Implementado**

Após um período inicial apenas de estudos e análise das características da máquina e planejamento não aprofundado de diversas propostas para o projeto final, chegou o momento de determinar que método seria utilizado no projeto final. Após a escolha do método foram projetados e implementados os diversos componentes que formam a solução final. O processo de escolha do método e o detalhamento do mesmo estão descritos a seguir.

### **9.1. Determinação do Projeto Final**

Inicialmente o método escolhido foi o descrito no item 8.3, que consistia na utilização de porta paralela como DAQ e tratamento do sinal externo utilizando amplificação de instrumentação e filtros. Essa escolha ocorreu devido ao fato de já possuir-se experiência na utilização desse circuito já que havia sido utilizada uma solução semelhante para aquisição do sinal de um sensor baseado em ponte de Wheatstone na disciplina PMR-2470. Além disso, também se possuía experiência no software Matlab que seria utilizado para o desenvolvimento da interface responsável pelo armazenamento e exibição de resultados. Por fim, foi levada em consideração a questão financeira uma vez que essa seria uma das soluções menos custosas o que facilitaria liberação de recursos do departamento caso fosse necessário.

A elaboração e implementação dos componentes foi iniciada e em um determinado momento percebemos que o sistema de DAQ de apenas 8bits possuía uma resolução muito baixa o que resultaria num desempenho não satisfatório. Foi realizada uma breve análise dos componentes que já havíamos desenvolvido e alternativas que poderíamos utilizar para substituir o DAQ e chegamos ao projeto final, que consiste na utilização da placa de som como

DAQ mantendo os sistemas de tratamento de sinais do projeto inicialmente adotado.

## 9.2. Descrição do Projeto Final

O projeto final consistiu na utilização da placa de som do computador como DAQ. Como interface física é utilizado o conector “Line-in” da mesma. A entrada é a saída de um circuito Gerador de Onda Quadrada, que recebe e modula o sinal tratado e amplificado de dois circuitos Amplificadores de Instrumentação. Tal sinal é a reposta das pontes de Wheatstone dos dois sensores que, por sua vez, são alimentados por uma fonte de tensão contínua regulada. A figura 42 mostra uma visão geral da solução.

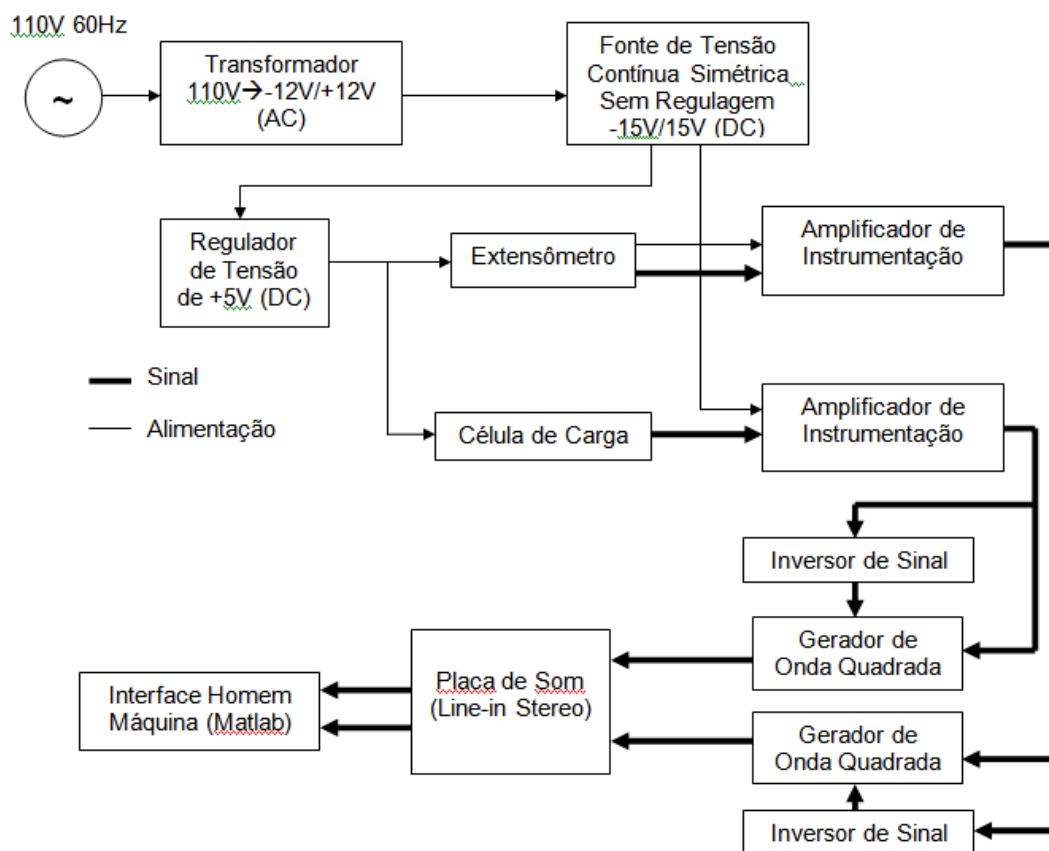


Figura 42 – Diagrama Global da Solução

Como pode ser notado a solução adotada pode ser dividida em diversos componentes. Os componentes desenvolvidos estão descritos na sequência.

### **9.2.1. Sistema de Alimentação**

Para o funcionamento do sistema é necessária a alimentação do circuito de amplificação e modulação e da ponte de Wheatstone dos sensores que gerarão o sinal. Além disso, para evitar que oscilações no sinal da rede possam causar interferências nos dados obtidos foi implementado um circuito regulador da tensão aplicada nas pontes.

#### **9.2.1.1. Alimentação do Circuito de Amplificação**

Para a alimentação do circuito de amplificação, composto por amplificadores operacionais, foi necessária a implementação de uma fonte de tensão contínua simétrica, ou seja, uma fonte capaz de fornecer potenciais positivos e negativos de valor semelhante em relação a um terra comum.

Foi projetada e implementada uma fonte simétrica capaz de fornecer aproximadamente  $-15V/+15V$ , suficiente para obtermos a saída do amplificador operacional em um nível que pudesse ser bem aproveitado pelo range do circuito gerador de onda quadrada, e para alimentar o regulador de tensão do circuito de Alimentação dos Sensores. O circuito está descrito no diagrama da Figura 43.

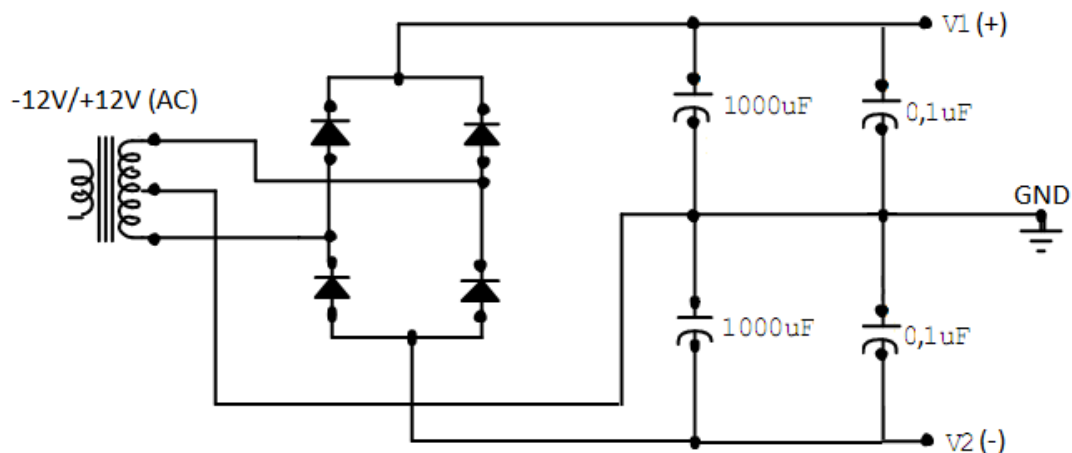


Figura 43 – Fonte Simétrica

Para alimentar o circuito de amplificação deve-se ligar os terminais V1 e V2 respectivamente às alimentações positiva e negativa do Amplificador de Instrumentação que compõe o circuito. O sinal resultante do circuito de amplificação é referenciado ao terra da fonte simétrica.

#### 9.2.1.2. Alimentação dos Sensores

A alimentação dos sensores foi feita com um regulador de tensão de 5V, cuja entrada vem da fonte simétrica, descrita no item anterior.

Para uma diminuição da tensão aplicada na ponte de Wheatstone de cada sensor foi colocado em série um resistor de  $220\Omega$  com potência 1W na saída resultado numa tensão aplicada efetiva de 1,76V em cada sensor.

O circuito utilizado é esquematizado na Figura 44.

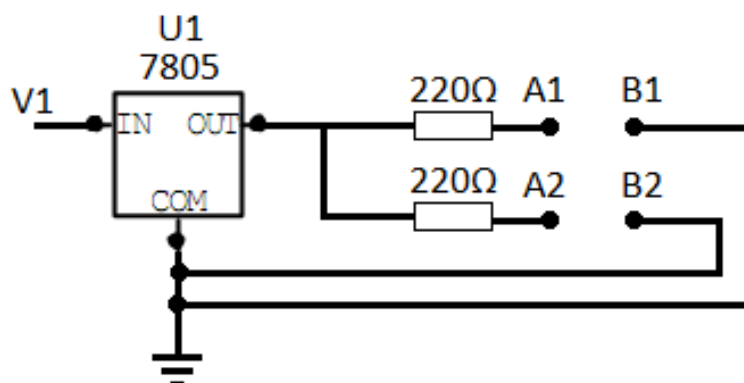


Figura 44 – Proteção contra Oscilação da Rede

As alimentações das pontes dos sensores são feitas ligando as mesmas aos terminais “A1” e “B1” ou “A2” e “B2” do circuito de alimentação.

### 9.2.2. Sensores

Para que a solução pudesse ser concebida foi necessário conhecer detalhes dos sensores disponíveis para os ensaios e assim aplicá-los nesta solução.

Os sensores, tanto as células de carga como os extensômetros, são baseados em pontes de Wheatstone com strain gages, como mostra a figura 45.

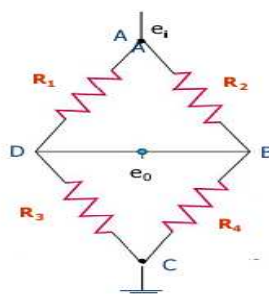


Figura 45 – Ponte de Wheatstone

Para a ponte em equilíbrio temos que a tensão entre os pontos D e B ( $e_0$ ) é nula. A voltagem induzida pela deformação das resistências (strain gages) é dada pela seguinte equação:

$$e_o = e_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

Uma vez conhecido este equacionamento seria necessário descobrir a pinagem dos conectores montados em cada sensor (Figura 46).

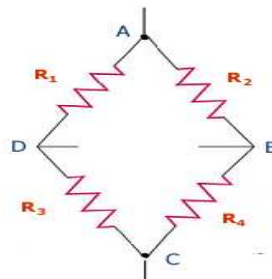


Figura 46 – Ponte de Wheatstone e seus quatro terminais dos sensores

Para descobrir a pinagem dos sensores foi utilizado um multímetro apenas verificando a resistência entre dois terminais de acordo com o seguinte equacionamento para uma ponte com resistências  $R_1, R_2, R_3$  e  $R_4$ :

Para terminais opostos:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{(R_1 + R_4)} + \frac{1}{(R_2 + R_3)}$$

Para terminais adjacentes:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{(R_2 + R_3 + R_4)}$$

Ao encontrar dois pares de terminais opostos ( $R_1$  e  $R_4$  ou  $R_2$  e  $R_3$ ) encontram-se os terminais de alimentação e, conseqüentemente, os terminais onde deverão ser colhidos os sinais.

Para as células de carga a pinagem encontrada está indicada na Figura 47 e para os extensômetros está indicada na Figura 48.



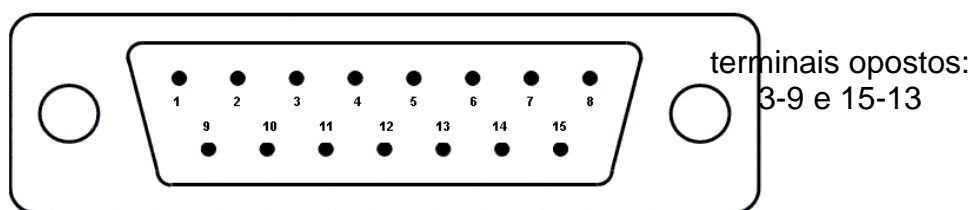


Figura 47 - Pinagem das células de carga

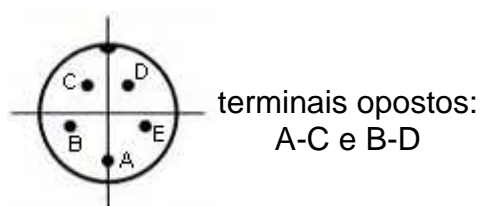


Figura 48 - Pinagem dos extensômetro (conector macho)

Ao alimentar um dos pares de terminais opostos da ponte de Wheatstone do sensor, no outro par será possível ler os sinais resultantes da de deformação. Este sinal é considerado linear com o esforço no sensor devido à utilização de “strain gage” na composição da ponte.

### 9.2.3. Circuito de Tratamento e Modulação do Sinal

O sinal proveniente das pontes de Wheatstone dos sensores deve receber um tratamento antes de ser enviado ao circuito Gerador de Onda Quadrada, responsável pela modulação.

O Gerador de Onda Quadrada gera um sinal quadrado com frequência constante (a partir de certo valor de alimentação) e uma amplitude proporcional à sua alimentação, que deve ser simétrica. Dessa forma, a alimentação do

mesmo é realizada utilizando o sinal de um dos sensores, tratado por um circuito Amplificador de Instrumentação, e mais esse sinal invertido.

### 9.2.3.1. Amplificador de Instrumentação e Inversor de Sinal

Para amplificação do sinal de saída de cada ponte de Wheatstone foi utilizado um circuito de Amplificação de Instrumentação como o esquematizado na Figura 49, sendo as entradas VSen1 e VSen2 correspondentes aos terminais de saída de cada sensor, e VAmpOut correspondente à diferença destes sinais de entrada amplificado e referenciado em terra.

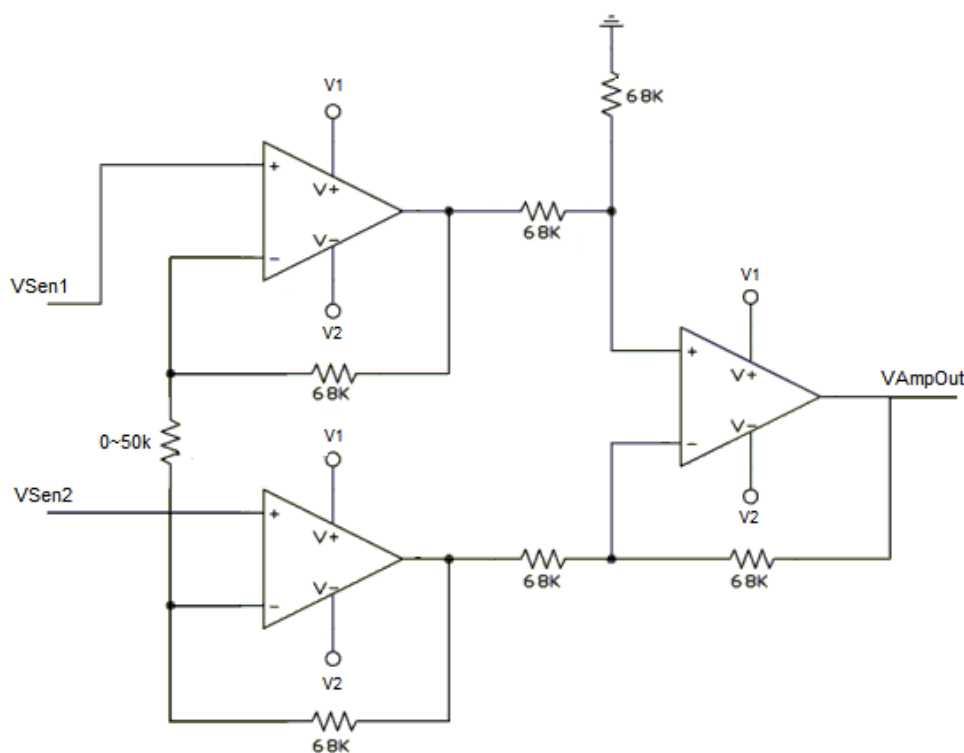


Figura 49 - Circuito amplificador de Instrumentação

O ganho de tensão proporcionado pelo circuito é dado pela equação a seguir:

$$V_{AmpOut} = A \cdot (V_{S2} - V_{S1})$$

Sendo:

$$A = 1 + \frac{2 \cdot 68k}{[0 \sim 50k]}$$

Para alimentar o circuito Gerador de Onda Quadrada é necessário um sinal de referência sendo a amplitude da saída proporcional a essa alimentação. Dessa forma, utilizou-se a saída do Amplificador de Instrumentação, que acompanha o sinal do sensor, para alimentar o Gerador de Onda Quadrada e modular o sinal dos sensores. Para um melhor aproveitamento do range da entrada “Line-in” foi implementado um Inversor de Sinal conforme a Figura 50.

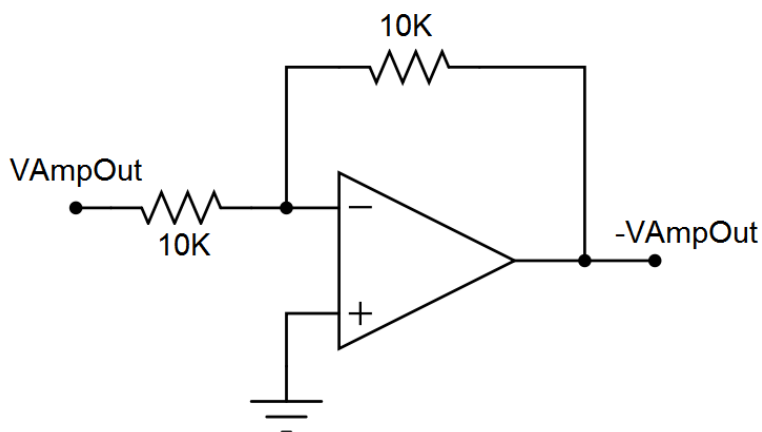


Figura 50 – Amplificador Inversor

O Gerador de Onda Quadrada foi Alimentado com VAmpOut/-VAmpOut aumentando a amplitude e conseqüentemente melhorando o aproveitamento e qualidade do sinal de saída do mesmo.

#### 9.2.3.2. Gerador de Onda Quadrada

A entrada de “Line-in” é capaz de ler sinais somente em corrente alternada, dessa forma foi necessário modular o sinal proveniente dos sensores. Para isso foi implementado um Gerador de Onda Quadrada baseado

em AmpOp. Ele possui uma frequência de oscilação fixa, que é determinada pelos valores dos resistores e do capacitor que compõem o conjunto. A amplitude da saída é equivalente à tensão aplicada em V+ e V-, ou seja, na alimentação do AmpOp.

O circuito implementado para cada um dos sensores pode ser observado na Figura 51.

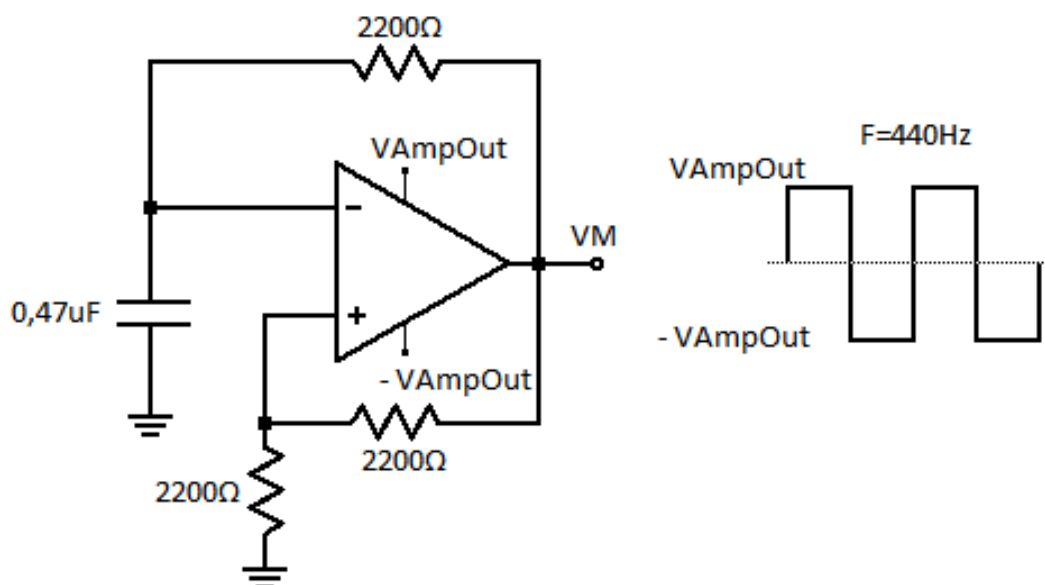


Figura 51 – Gerador de Onda Quadrada

Dessa forma obteve-se um sinal em forma de onda quadrada de 440Hz com uma amplitude linearmente proporcional ao sinal gerado pelos sensores. O sinal modulado resultante VM é então enviado ao Regulador de Intensidade e finalmente enviado ao PC para ser digitalizado e manipulado pela Interface Homem Máquina.

#### 9.2.3.3. Regulador de Intensidade de Sinal e Proteção da Placa de Som

A entrada de “Line-in” da placa de som, que foi utilizada para aquisição dos dados possui uma amplitude de entrada de no máximo 2V. A tensão de saída do circuito Gerador de Onda Quadrada pode gerar sinais de até 20V,

dessa forma, foi utilizado um Regulador de Intensidade de Sinal, implementando com um divisor de tensão, em conjunto com um circuito de Proteção da Placa de Som, formado por diodos em paralelo, nesse caso foi necessário apenas 1 diodo em cada sentido da corrente resultando numa limitação de  $\pm 0,7V$  e conseqüentemente em uma amplitude máxima de  $1,4V$ . Além disso foi instalado um capacitor de  $10nF$  para filtragem de ruídos de alta frequência.

O circuito Regulador de Intensidade de Sinal e o circuito de Proteção da Placa de Som para cada um dos sensores estão esquematizados na Figura 52.

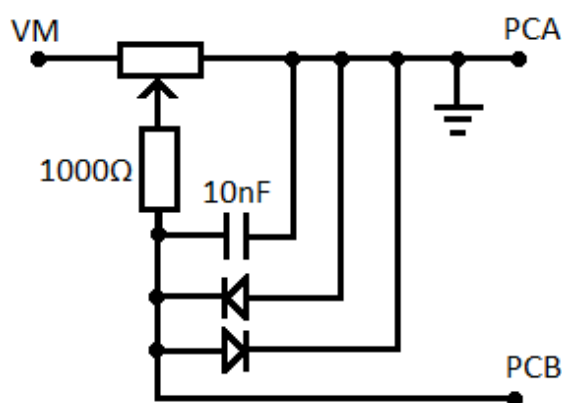


Figura 52 – Circuito Regulador de Intensidade de Sinal e Proteção da Placa de Som

A saída do Gerador de Onda Quadrada é ligada em “VM” e os terminais “PCA” (Terra) e “PCB” (Sinal) foram ligados à interface de hardware que possibilita a transmissão dos sinais de saída dos sensores tratados para o circuito de aquisição de dados.

#### 9.2.4. Interface de Hardware e Aquisição de Dados (DAQ)

A placa de som do PC desempenhou o papel de DAQ (16bits com amostragens de até  $96kHz$ ), ou seja, ela recebe o sinal analógico tratado

(saída do amplificador de instrumentação) e o digitaliza para poder ser manipulado pela interface de exibição de dados, um software rodando no PC.

Foi escolhida a porta “Line-in” da placa de som por ser uma entrada estéreo, ou seja, possui 2 canais independentes, um para cada um dos sensores. A conexão da entrada “Line-in” com a saída do amplificador de instrumentação foi feita utilizando o plug TRS (P2), como indicado na Figura 53.

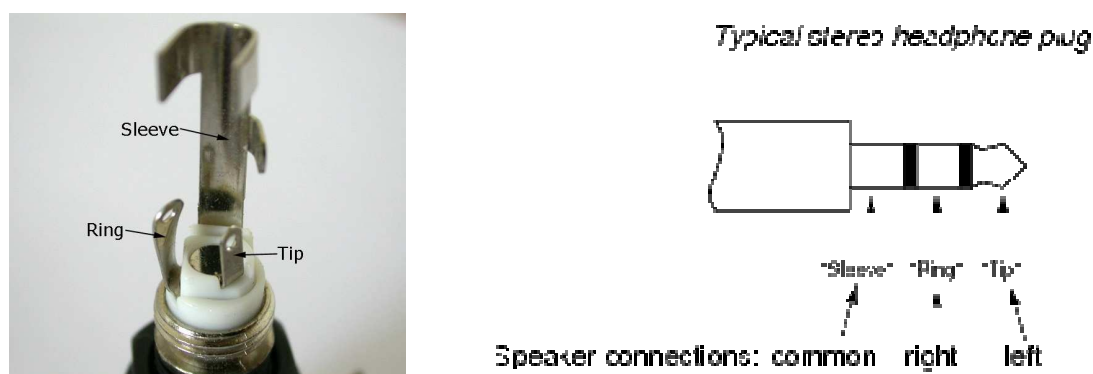


Figura 53 – Plug TRS (P2 Stereo)

A figura da esquerda indica a extremidade onde devem ser soldadas as saídas dos dois amplificadores de instrumentação. Utilizando como base a figura da direita, os terras dos amplificadores de instrumentação foram soldados no “Sleeve” e os sinais dos sensores foram soldados em “Ring” e “Tip”.

Além de conectar os componentes à placa de som é necessário alterar as configurações de som do Sistema Operacional para utilizar o “Line-in” como entrada de áudio.

Para o teste e regulação do nível de amplificação externo e interno, bem como a definição do fator de escala (conversão de unidade elétrica em unidades de pressão ou distância), foi utilizada a interface no modo de calibração. O procedimento será descrito com detalhes no manual destinado ao usuário final.

### **9.2.5. Interface de Exibição de Dados**

Para o armazenamento, exibição e manipulação dos dados adquiridos e digitalizados pela entrada “Line-in” da placa de som do computador, foi desenvolvida uma Interface de Exibição de Dados utilizando o software Matlab.

Apesar do desenvolvimento deste software ter sido realizado no Matlab, e dessa forma dependente do mesmo para ser rodado, pode-se gerar um arquivo executável (“Stand-Alone”) contendo todo o conteúdo da interface, permitindo a sua execução sem que haja necessidade da instalação do Matlab no computador que será utilizado para obtenção dos dados dos ensaios.

A Interface de Exibição de Dados consiste em uma GUI, que possui uma janela que exibe, em tempo real, os gráficos gerados pelos dados colhidos dos sensores, isto é, deslocamento e força, além do tempo.

Devem ser configurados no programa o valor do  $L_0$  (tamanho inicial) e de Área da secção transversal do corpo de prova para que possa ser obtido os valores da deformação e da carga, que são os objetivos do ensaio de tração.

Os valores obtidos podem ser exportados e utilizados em outros programas como o Excel.

A Interface de Exibição de Dados possui 2 modos de operação distintos:

#### **9.2.5.1. Modo de Calibração**

Os dados colhidos dos sensores são sinais de tensão, e podem possuir diversos valores, dependendo dos níveis de amplificação e redução configurados. Para relacionar o valor da tensão com as gradezas reais

(força/carga e deslocamento/deformação) é necessário fazer uma calibração dos sensores.

A Figura 54 mostra a Interface de Exibição de Resultados no modo de calibração:

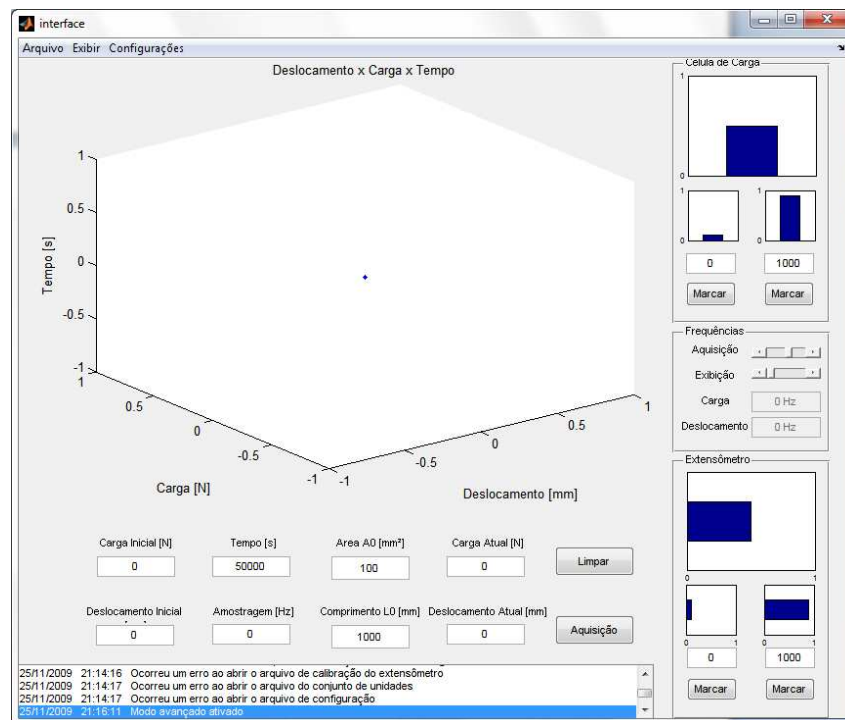


Figura 54 – Modo de Calibração

Para realizar a calibração devem-se utilizar dois valores de referência para cada sensor, excitar o sensor com esses valores de referência e pressionar o botão de calibração (“Marcar”). Por possuir característica linear, conhecendo-se dois sinais e seus valores verdadeiros podemos interpolar e converter qualquer outro sinal para valores verdadeiros.

É possível salvar e carregar configurações de calibração dos sensores e unidades das grandezas envolvidas como pode ser observado na Figura 55.

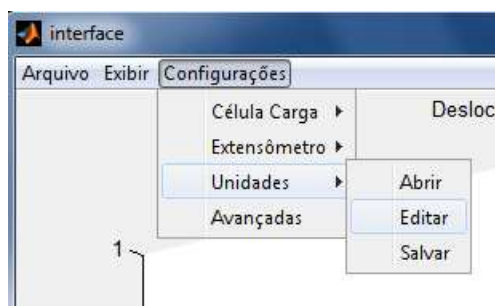


Figura 55 – Menu de Carregar e Salvar Configurações



### 9.2.5.2. Modo de Exibição de Resultados

Após realizar a calibragem correta dos sensores o ensaio pode ser realizado utilizando o modo de Exibição de Resultados para armazenar os dados e exibí-los em tempo real.

A interface no modo de operação pode ser observada na Figura 56.

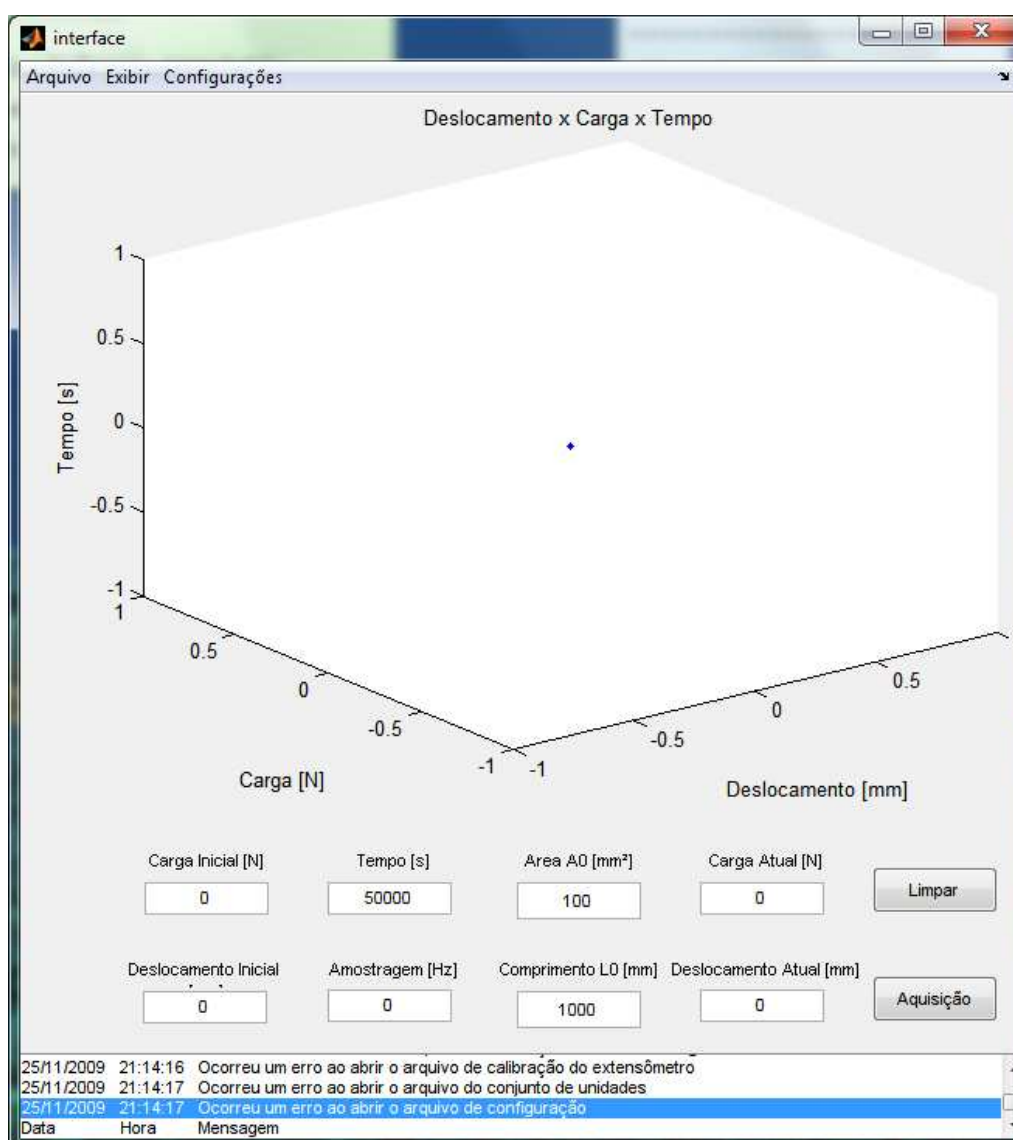


Figura 56 – Modo de Exibição de Resultados

No modo de Exibição de Resultados é possível alternar entre 8 tipos de gráfico distintos:

- Deslocamento x Tempo
- Carga x Tempo
- Carga x Deslocamento
- Deslocamento x Carga x Tempo
- Deformação x Tempo
- Tensão x Tempo
- Tensão x Deformação
- Deformação x Carga x Tempo

Para a configuração do Comprimento Inicial ( $L_0$ ) e da Área da Secção Transversal ( $A_0$ ) do corpo de prova foi implementado o menu observado na Figura 57.

A screenshot of a configuration window. It has two input fields. The first is labeled 'Area A0 [mm²]' and contains the value '100'. The second is labeled 'Comprimento L0 [mm]' and contains the value '1000'.

Figura 57 – Configurações de  $L_0$  e  $A_0$ .

Para a exportação de dados foi implementado o menu exibido na Figura 58.



Figura 58 – Exportar Dados

O arquivo exportado está no formato de texto em Comma-separated values (CSV), podendo ser importado e manipulado no Excel por exemplo. Podem-se obter diversas informações a partir desses dados.

### 9.3. Fabricação do Hardware

Os circuitos projetados foram inicialmente montados em protoboard para fins de teste e homologação. Após realizar ajustes chegou-se ao hardware final implementado em uma placa de circuito impresso com conectores, possibilitando que seja acondicionada em uma caixa de proteção.

A placa de circuito impresso incorpora todos os circuitos detalhados anteriormente e foi utilizado o layout exibido na Figura 59.

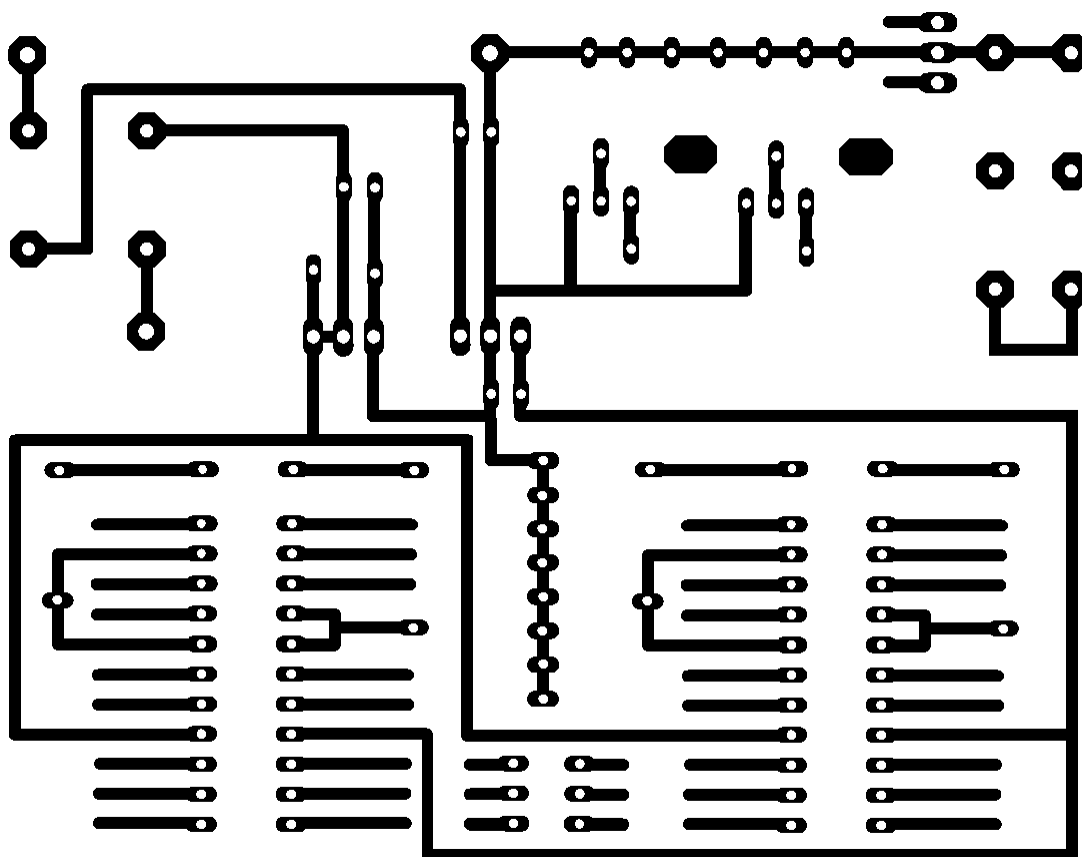


Figura 59 – Layout do Circuito Impresso

A localização dos componentes ficou como exibido na Figura 60.

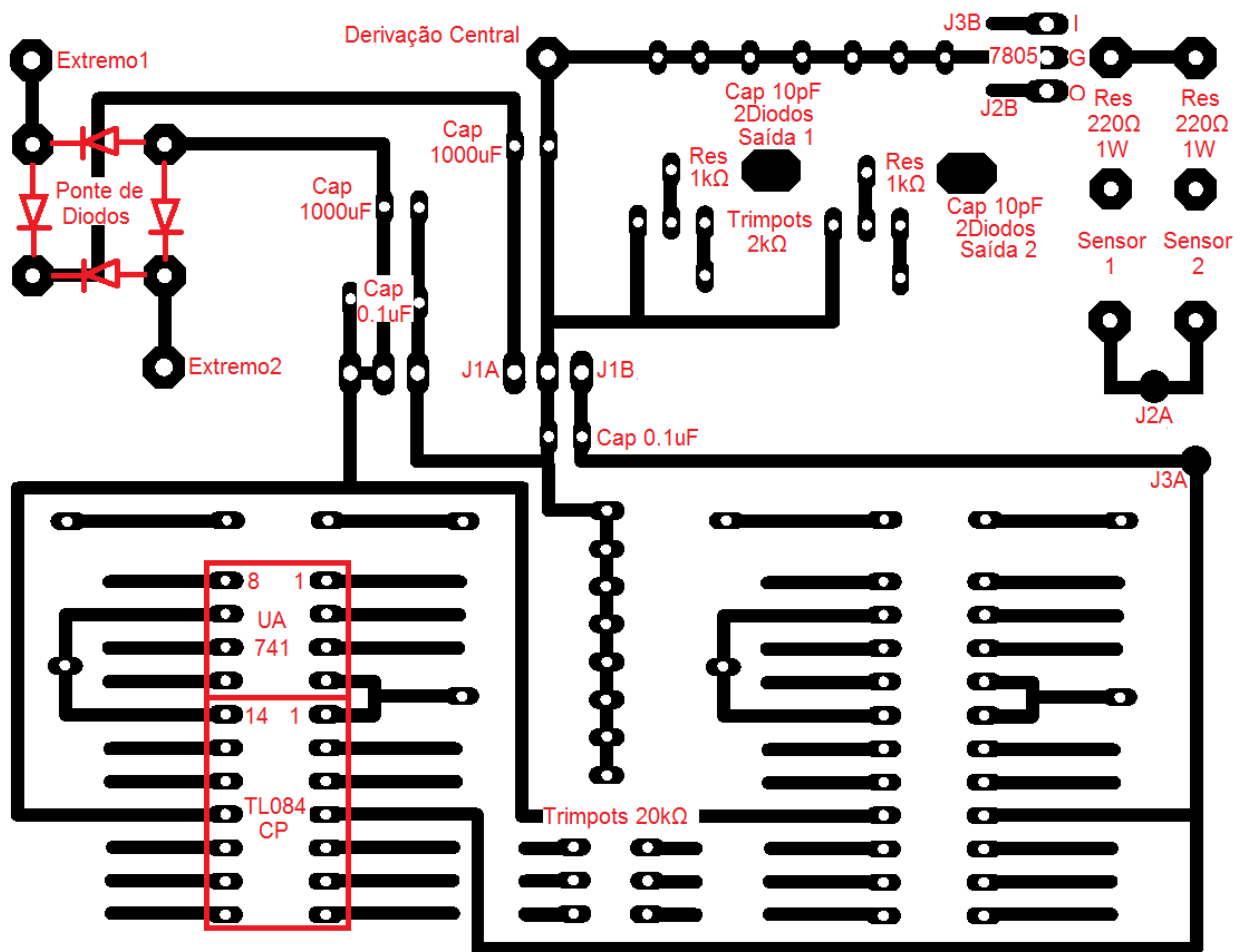


Figura 60 – Localização dos Componentes na Placa de Circuito Impresso

Na Figura 61 temos o circuito dos AmpOps detalhados.

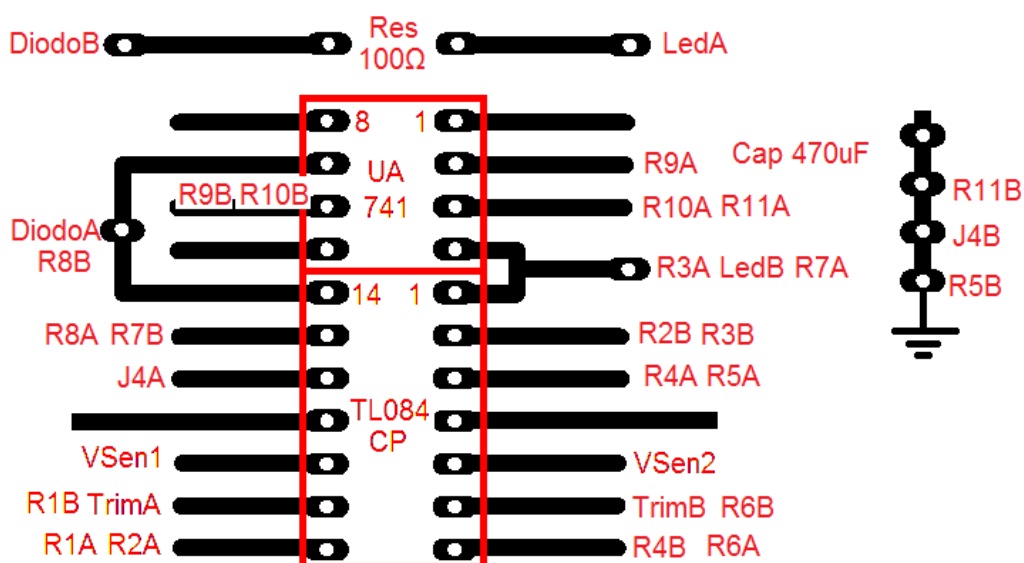


Figura 61 – Circuito de AmpOps (detalhe)

Utilizando o diagrama de localização dos componentes conjuntamente com as descrições detalhadas de cada circuito apresentadas anteriormente, é possível fabricar um novo equipamento.

As trilhas de cobre estão na cor escura e os componentes na cor clara, estando soldados na outra face da placa de circuito impresso. O terminais do transformador foram ligados em “Extremo1”, “Extremo2”, e “Derivação Central”.

Alguns componentes foram omitidos, já que uma parte do circuito é em duplicata, um para cada sensor, dessa forma, para os itens omitidos é necessários apenas reproduzir o análogo. Os itens representados por “JXA” e “JXB” são “Jumpers”, ou seja, fios comuns cujas extremidades estão em A e B. O sistema inteiro possui um terra comum que é a trilha da “Derivação Central”.

No esquema detalhado dos AmpOps, assim como a representação dos “Jumpers”, temos cada extremidade do componente representado por A e B. No caso temos  $R1=R2=R3=R4=R5=R6=68k\Omega$ ,  $R7=R8=10k\Omega$  e  $R9=R10=R11=2,2k\Omega$ . “TrimA” e “TrimB” são os terminais de um trimpot de  $2k\Omega$  e VSen1 e VSen2 são os terminais da saída do sensor.

A maioria dos componentes foram representados de forma simples, ou seja, não foi apresentado a localização exata de cada perna do mesmo, apenas a sua localização na placa, entretanto, as suas conexões podem ser deduzidas facilmente utilizando as descrições dos circuitos.

As Figuras 62 e 63 mostram como ficou o circuito final fabricado.

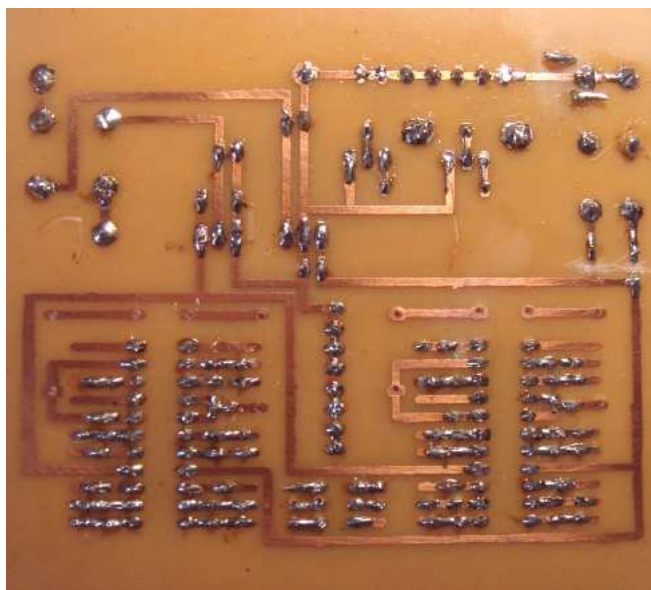


Figura 62 – Face das trilhas da placa de circuito impresso

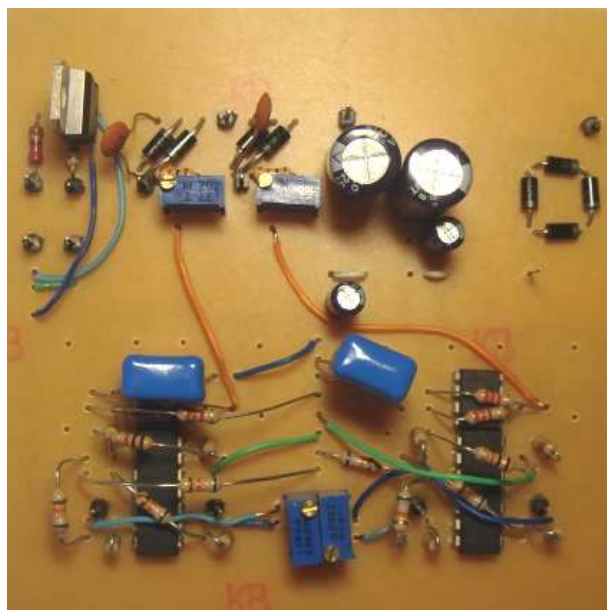


Figura 63 – Face dos componentes da placa de circuito impresso

A placa possui todas as conexões necessárias para operar (fêmea cabo de força, fêmea DB15 para entrada da célula de carga, fêmea Mike-5 para entrada para extensômetro e saída fêmea P2 para saída) podendo-se dessa forma acomodar o equipamento final apenas uma caixa simples, flexibilizando seu uso e prolongando sua vida útil. Além disso, pode-se instalar controle de ligar e desligar, LED indicativo, seletor de tensão etc. A perspectiva externa da caixa pode ser observada na Figura 64.

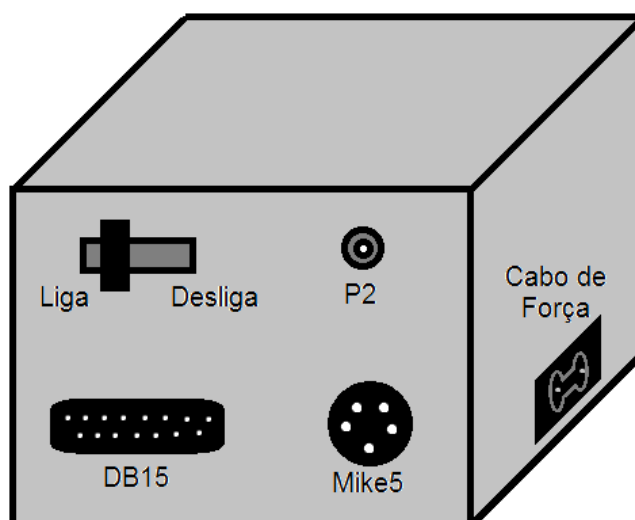


Figura 64 – Perspectiva da Caixa

## 10. Ensaios e Resultados

Após a fabricação do equipamento foram realizados ensaios-teste utilizando corpos de provas padronizados para se testar a funcionalidade e precisão do mesmo. Para isso, utilizou-se o seguinte procedimento:

1. Instalação do corpo de prova na máquina
2. Instalação dos sensores
3. Ajuste do equipamento fabricado (ganhos dos amplificadores)
4. Inicialização da interface de software
5. Configuração das unidades
6. Salvar configuração de unidades
7. Calibração da célula e do extensômetro via interface de software
8. Salvar configurações dos sensores
9. Início da Aquisição pela interface de software
10. Selecionar velocidade e ligar a máquina ("Down")
11. Aguardar o rompimento do corpo
12. Parar motor e aquisição
13. Salvar dados obtidos

Foram realizados dois ensaios: um com Aço SAE 1020 e outro com alumínio. Para realizar a calibração do extensômetro utilizou-se um paquímetro. Para a calibração da célula de carga realizou-se um princípio de ensaio utilizando o Aço. Foi selecionada a velocidade mínima (0.02cm/min) da máquina para garantir que o ensaio permanecesse no regime elástico. Foi fixado no corpo de prova um relógio medidor altamente preciso (centésimos de mm) e foram "marcados" 4 valores de deslocamento para os quais já se sabia o valor de carga correspondente, obtidos anteriormente através de um ensaio realizado com uma máquina de ensaio de tração do departamento de Mecatrônica da Escola Politécnica da USP.

## 10.1. Ensaio 1 – Aço SAE 1020

Material: Aço SAE 1020

Célula de Carga: 500kgf

Extensômetro: 15mm

### 10.1.1. Ensaio de Tração Parcial (Calibração)

Para a calibração da célula de carga foi realizado um ensaio de tração parcial visando obter resultados apenas no regime elástico. Como pode ser observado pelo gráfico (Figura 65), o gráfico da Carga x Tempo resultou em um formato de degrau, tendo as paradas sido realizadas em valores de deslocamento com trações conhecidas (tabela 4).

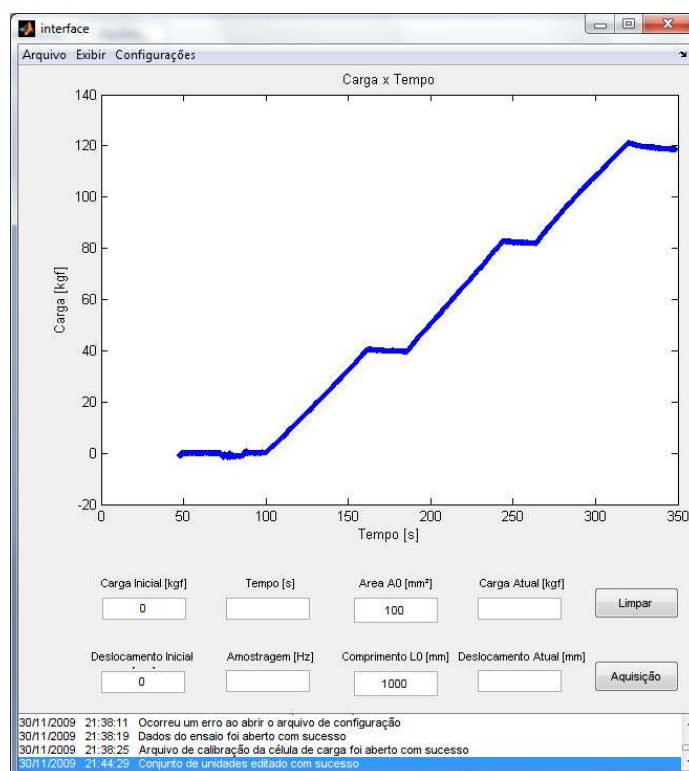


Figura 65 – Calibração no Regime Elástico



Deslocamento (mm*10 <sup>-2</sup> )	Carga (kgf)
0	0
1	40
2,1	80
3,2	120

Tabela 4 – Valores de Referência no Regime Elástico

A calibração foi feita de modo a fazer com que os degraus ficassem o mais próximo possível aos valores de referência. Como pode ser observado pela Figura 65, a calibração obteve êxito, pelo menos para o regime elástico. Para a validação e homologação dos valores foram realizados mais dois ensaios completos.

#### 10.1.2. Ensaio de Tração Completo (Validação)

Após a calibração, retornou-se a máquina até o estado inicial, isto é, com carga e deslocamento nulos, retirou-se o relógio medidor de alta precisão e instalou-se o extensômetro na célula de carga. A máquina foi regulada com uma velocidade de 0,2cm/min e obteve-se o resultado exibido na Figura 66.

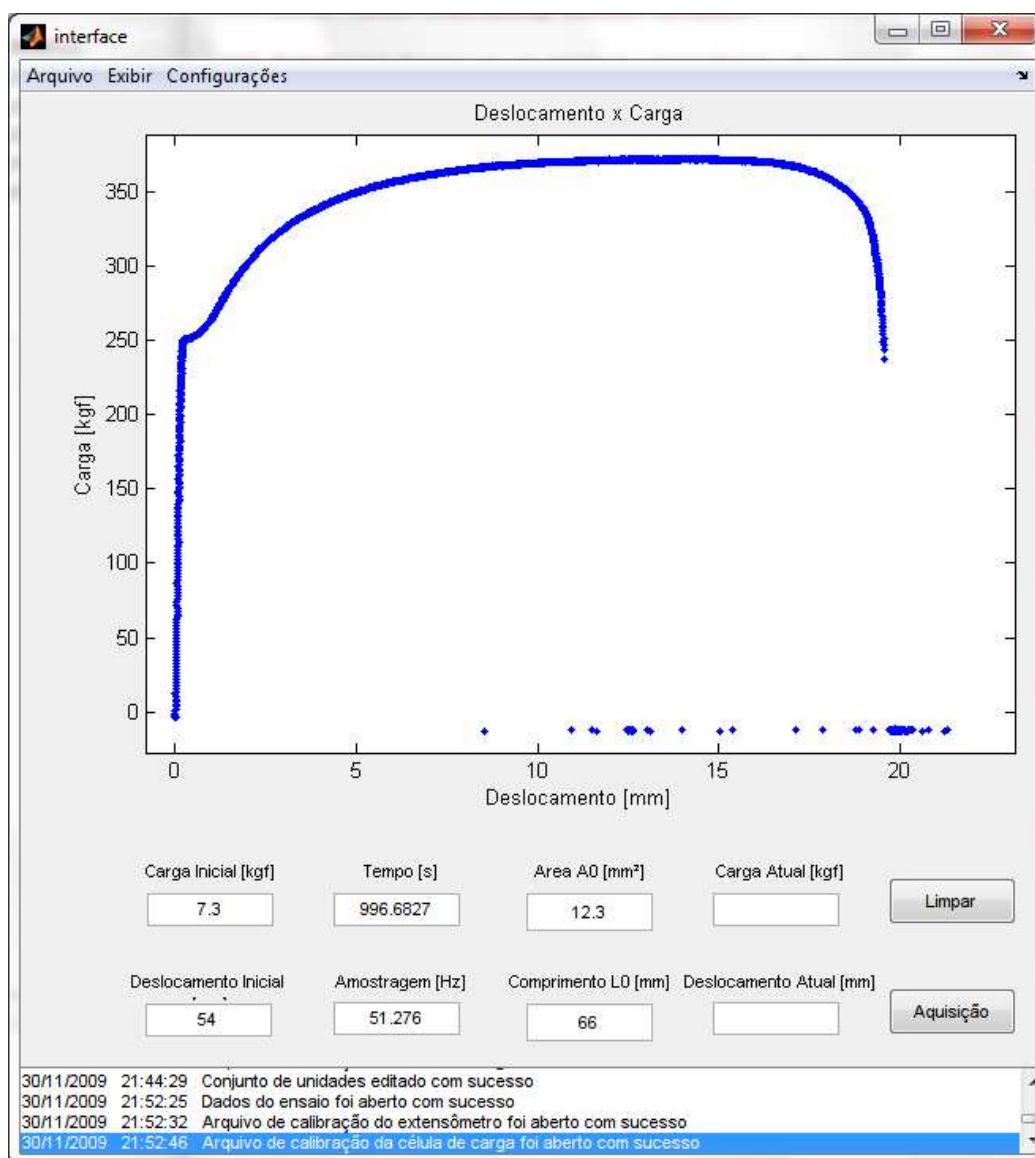


Figura 66 – Ensaio de Tração Aço SAE 1020 Carga x Deslocamento

O gráfico resultante possui uma aparência muito semelhante ao da máquina utilizada como modelo comparativo (Figura 67). Além do formato os valores obtidos se mostraram muito coerentes e precisos validando e homologando o projeto.

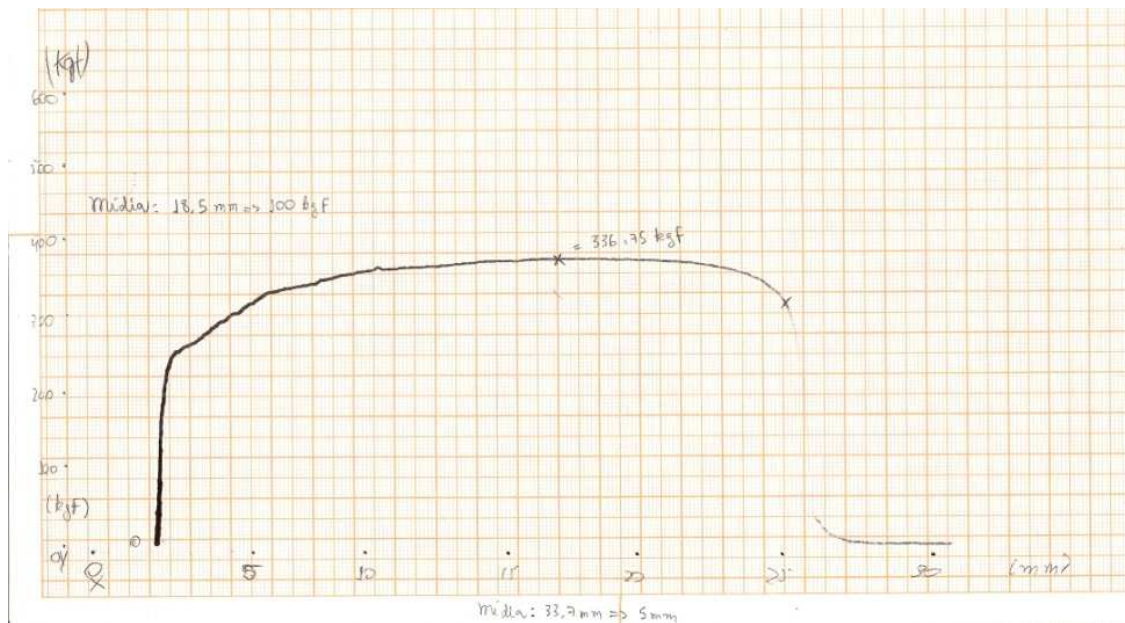


Figura 67 – Ensaio Detração obtido na máquina PMR Aço SAE 1020 Carga x Deslocamento

## 10.2. Ensaio 2 – Alumínio

Material: Alumínio

Célula de Carga: 500kgf

Extensômetro: 15mm

### 10.2.1. Ensaio de Tração Completo (Validação)

Utilizando as calibrações determinadas e salvas do ensaio anterior foi realizado mais um ensaio utilizando um corpo de prova de Alumínio e uma velocidade de ensaio de 0.2cm/min. O resultado pode ser observado na Figura 69.

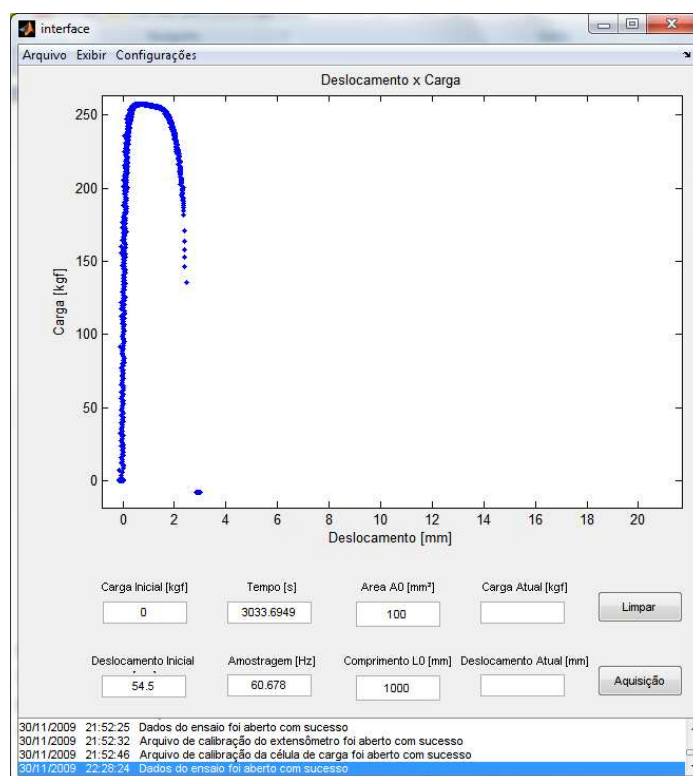


Figura 68 – Ensaio de Tração Alumínio Carga x Deslocamento

Novamente, como resultado foi obtido um gráfico de aparência semelhante ao da máquina utilizada como modelo comparativo (Figura 69), levando-se em consideração as diferenças de escala. Além do formato os valores obtidos se mostraram muito coerentes e precisos confirmando a validação do projeto.

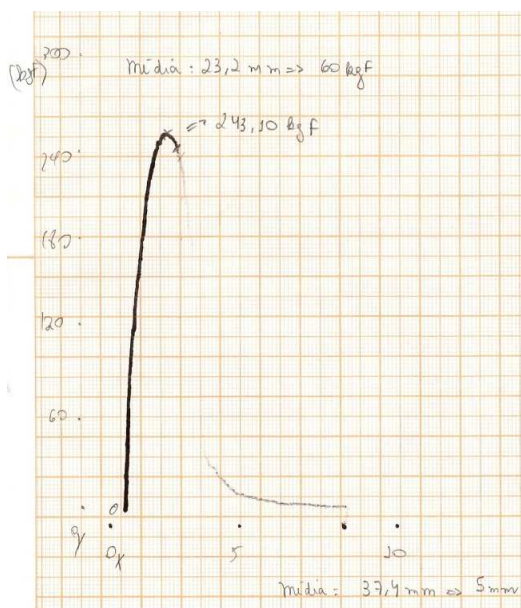


Figura 69 – Ensaio na máquina do PMR do Alumínio Carga x Deslocamento

## 11. Desenvolvimento do Projeto durante o Período

O projeto que se propôs-se a desenvolver como trabalho de conclusão de curso se mostrou desde o princípio bem complexo, multidisciplinar e dependente de vários fatores externos o que poderia ocasionar complicações.

Dessa forma, para facilitar o andamento e organização de atividades foi elaborado um cronograma com diversos checkpoints a serem atingidos. O cronograma se encontra no capítulo 13: “Anexos”.

Encerrada a primeira etapa que consistia praticamente apenas em planejamento e estudo, que ocorreu durante a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso I (PMR2500), determinou-se a solução que melhor correspondia às nossas expectativas e começou-se a trabalhar no projeto final, elaborando, implementando e testando diversos protótipos dos componentes de software e hardware que formam a solução completa.

Essas atividades se iniciaram durante o período das férias de julho, na maioria das vezes nas dependências da Escola Politécnica e tem ocorriam semanalmente, às vezes, mais de uma vez por semana.

O projeto candidato foi escolhido e desenvolvemos o software fabricamos e o protótipo de hardware, entretanto tivemos problemas e comportamentos inesperados do último, apesar de terem sido realizados diversos testes. O projeto de hardware acabou tendo que ser reformulado e refabricado em um curto espaço de tempo, atrapalhando o cronograma previsto.

Não foi possível fazer a acomodação do circuito impresso em uma caixa de proteção, formando um equipamento fechado, como planejado a princípio, o que garantiria maior durabilidade, segurança e proteção do circuito, entretanto tal fato não acarretou problemas no alcance dos objetivos iniciais do projeto.

A construção do protótipo e a realização dos testes, que eram os objetivos principais, foram alcançadas plenamente. A fabricação da caixa é uma dívida com o departamento para o qual a modernização da máquina de ensaio de tração foi requisitada e deverá ser quitada.

## 12. Conclusão

Os objetivos foram determinados e depois de muito estudo, projeto e testes implementou-se a solução. Esta atendeu plenamente a esses objetivos já que os resultados obtidos se mostraram coerentes desde o princípio e após a calibração correta e comparação com um resultado obtido por uma máquina escolhida como modelo comparativo, no caso, a máquina de ensaio de tração, do departamento da mecatrônica, pôde-se comprovar a veracidade dos dados obtidos e homologar a viabilidade e funcionamento da solução como um todo.

Além disso, pode-se concluir, com o desenvolvimento deste trabalho, que a realização do projeto resultará em uma redução de custo considerável comparativamente à contratação de serviço especializado de empresas que trabalham neste ramo. Este serviço é denominado “Retrofitting” e atingiria não apenas a exibição e armazenamento, como ocorreu, mas também outros componentes como o acionamento mecânico que ainda é muito confiável, e poderia até comprometer a qualidade da máquina no estado atual. Outra solução seria a compra de uma nova máquina que já contasse com os recursos que se pretendia implementar. Dessa forma, ocorreria a desativação de uma máquina em estado satisfatório, gerando um grande desperdício.

É importante lembrar também, que este trabalho, devido à sua multidisciplinaridade, acrescentou um grande desenvolvimento acadêmico, profissional e até mesmo pessoal aos alunos que o estão concretizando. A complexidade do mesmo tornou necessária a busca por novas idéias e soluções, o estudo e o planejamento minucioso e a criação de relações acadêmicas com professores e técnicos de outros departamentos.

Com a modernização da máquina de ensaios de tração, o objetivo deste trabalho foi alcançado, pois permite-se a utilização de modernas práticas metodológicas laboratoriais aos ensaios, melhorando a qualidade, a confiabilidade, permitindo a transmissão eletrônica dos resultados e criando uma ferramenta que tornou mais fácil aos alunos da Universidade de São Paulo a realização deste tipo de ensaio para comparação prática com os fundamentos teóricos assimilados.

### 13. Sugestões para trabalhos futuros

Levando-se em consideração os recursos de tempo e conhecimento limitamos o escopo do trabalho para alguns objetivos principais, que atenderiam às necessidades mais críticas. Os objetivos foram cumpridos plenamente, entretanto ainda há espaço para diversas melhorias e novos projetos tais como:

- Realização da automação do motor de movimento da trave através da aplicação de técnicas controle, tornando o acionamento da máquina operável através de comandos diretamente no computador.
- Elaboração de uma nova versão da interface gráfica para que esta também suporte o acionamento e configurações de velocidade do motor.
- Suporte a rotinas de ensaio pré-programadas configuráveis, com condições de parada, mudança de velocidade, etc determinados por diversos tipos de eventos como carga ou deslocamento determinado, mudanças bruscas etc.
- Adição de funcionalidades de análise tais como determinação de tensão de escoamento, tensão máxima de tração de ruptura etc na interface.
- Adição de tratamento, pré e pós processamento do sinal na interface de software.
- Aprimoramento da configuração de hardware ao realizar a troca entre os diversos modelos de sensores através da utilização de um seletor (das resistências) de ganho dos amplificadores.

## 14. Referências Bibliográficas

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia dos materiais** – uma introdução, 5ª edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2002.

ASTM 2004, Section 03: **Metals Test Methods and Analytical Procedures, Volume 03.01**: Metals - Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallograph: Norma E8M – 04;

ESPERIDIÃO, A.; SAITO, M. M.; HARAMI, G. B.; MATSUMOTO, M. M. S.; **Projeto de Desenvolvimento de um Acelerômetro** - PMR2470 Métodos Experimentais em Sistemas Mecânicos, São Paulo, 2008

INSTRON, **Operating Instructions for the Instron Universal Testing Instruments**, Massachusetts, 1967

INSTRON, Teste de tensão. Disponível em:  
<<http://www.instron.com.br/wa/resourcecenter/glossaryterm.aspx?ID=164>>.  
Acesso em: 13 de abril de 2009.

INSTRON, Tensile Strength Testing. Disponível em:  
<[http://www.instron.us/wa/applications/test\\_types/tension/default.aspx](http://www.instron.us/wa/applications/test_types/tension/default.aspx)>.  
Acesso em: 7 de abril de 2009.

DIGCHIP, IC database. Disponível em: <<http://www.digchip.com/>>.  
Acesso em: 23 de julho de 2009.

HYPERPHYSICS, Square wave generator. Disponível em:  
<<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/Electronic/square.html>>.  
Acesso em: 18 de julho de 2009.

TELECURSO 2000, Ensaio de tração procedimentos normalizados. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/3969815/Aula-04-Ensaio-de-tracao-procedimentos-normalizados>>. Acesso em: 30 de abril de 2009.

UFRGS, Amplificador Operacional. Disponível em:  
<[http://www.ufrgs.br/eng04030/aulas/teoria/cap\\_15/circampo.htm](http://www.ufrgs.br/eng04030/aulas/teoria/cap_15/circampo.htm)>.  
Acesso em: 20 de julho de 2009.



INSTITUTO DE FÍSICA DA UFRGS, Conexão de Sensores. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Conexao%20do%20Sensor.html>>. Acesso em 15 de maio de 2009.

LYNXTEC: AD0500. Disponível em: <[http://www.lynxtec.com.br/prod\\_ads0500.htm](http://www.lynxtec.com.br/prod_ads0500.htm)>. Acesso em 23 de abril de 2009.

WIKIPEDIA: Ensaio de Tração. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Ensaio\\_de\\_tra%C3%A7%C3%A3o](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ensaio_de_tra%C3%A7%C3%A3o)>. Acesso em: 18 de abril de 2009.

LYNXTEC: MCS1000. Disponível em: <[http://www.lynxtec.com.br/prod\\_mcs1000.htm](http://www.lynxtec.com.br/prod_mcs1000.htm)>. Acesso em 11 de junho de 2009.

ADVANTECH: e-store. Disponível em: <<http://buy.advantech.com/>>. Acesso em: 19 de junho de 2009.

NATIONAL INSTRUMENTS: shop for hardware. Disponível em: <<http://www.ni.com/products/>>. Acesso em: 12 de junho de 2009.

## APÊNDICE

### Apêndice A - Lista de materiais para fabricação

#### Geral:

- Placa de fenolite de 100x100mm
- Conectora fêmea P2, Mike5 e DB15
- Fios, “postinhos” e fêmeas para “postinhos”

#### Fonte Simétrica e Alimentação:

- Transformador -12/+12v
- 4 x Diodo 1N4007
- 2 x Capacitor 1000 $\mu$ F
- 2 x Capacitor 0.1 $\mu$ F
- 7805
- 2 x Resistor 220 $\Omega$  (1w)

#### Circuito de Tratamento e Saída:

- 2 x TL084CP
- 2 x LM741
- 12 x Resistor 68k $\Omega$
- 6 x Resistor 2,2k $\Omega$
- 2 x Resistor 10k $\Omega$
- 2 x Trimpots 20k $\Omega$
- 2x Capacitor 470 $\mu$ F
- 2 x Trimpot 2k $\Omega$
- 4 x Diodo 1N4007
- 2 x Capacitor 10pF

## Apêndice B - Manual do Usuário Final

Este manual é constituído de três partes: início, calibração e realização de ensaios.

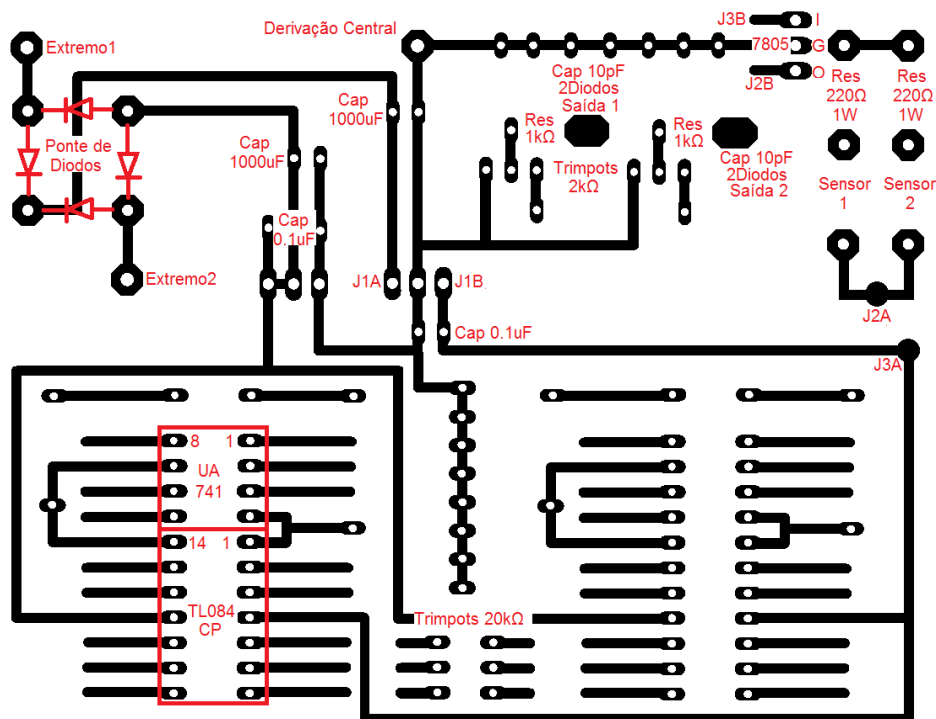
### ▪ Início:

Ligações	
Extensômetro	
Célula de carga	
Computador	
Rede elétrica	 (verifique tensão)

### ▪ Calibração:

Para calibração das células de cargas e extensômetros é necessário conhecimentos básicos de eletrônica e utilização de um multímetro simples. Siga os seguintes passos:

1. Mantenha o sensor em sua posição máxima e ajustar o ganho para que o sensor esteja sensível a pequenas variações (de carga ou deslocamento). O nível de tensão nos pinos 1 (negativo) e 14 (positivo) do componente TL084 deverá ser o maior possível (em módulo).



2. Utilize a interface gráfica no modo calibração e verificar se o sinal do sensor está sensível às pequenas variações impostas. Este procedimento pode ser notado tanto no gráfico de nível do sensor quanto no gráfico que é utilizado para realização de ensaios
3. Digite o valor correspondente no modo de calibração a aquele nível do sensor e clicar em marcar (logo abaixo do valor). Um ponto do sensor está marcado neste momento.
4. Para marcar o segundo ponto do sensor basta variar (carga ou deslocamento) para o menor valor (dentro da faixa de utilização), digite o valor correspondente e marcar o segundo ponto do sensor.
5. Salve a calibração no menu configurações assim como as unidades das grandezas utilizadas.
6. Ainda neste modo é possível alterar as frequências de aquisição de dados (pontos do ensaio por segundo), taxa de atualização dos dados na tela e verificar a frequência do sinal dos sensores. Obs.: Os sensores devem atuar de forma que exista a menor variação possível da frequência do sinal do sensor, se o deslocamento ou carga for muito baixo poderá ocorrer grandes variações da frequência do sinal e consequentemente perda da linearidade do sensor.

**▪ Realização de ensaios:**

Para realização ensaios deve-se seguir os seguintes passos após a fixação do corpo de prova na máquina e instalação adequada dos sensores:

1. Abra os arquivos de calibração dos sensores e unidades correspondentes aos sensores em uso

2. Preencha os dados de área inicial e comprimento inicial

Preencha os campos de carga inicial e deslocamento inicial dos sensores. Estes campos ajustarão a origem do sistema de coordenadas do ensaio

3. Clique no botão de aquisição e inicie o ensaio

4. Ao terminar o ensaio clique novamente no botão de aquisição para desligar o gráfico

5. Clique no menu Arquivo e salve o ensaio

6. É possível também utilizar os dados do ensaio em outros programas, para isto basta exportar o arquivo no formato CSV (comma-separated values). Lembre-se de configurar o programa que irá abrir este arquivo para que o separador de valores seja “;” (ponto e vírgula) e o separador decimal seja “.” (ponto) e milhar “,” (vírgula), como na notação inglesa.