

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO ROBERTO BEZERRA
MARLON H. IAHN LAIO CABRAL

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE
FORÇA PARA MENSURAR A CARGA REAL APLICADA POR UM
USUÁRIO EM UM APARELHO DE MUSCULAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Nº de Inscrição - 08)

CURITIBA

2014

BRUNO ROBERTO BEZERRA
MARLON H. IAHN LAIO CABRAL.

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE
FORÇA PARA MENSURAR A CARGA REAL APLICADA POR UM
USUÁRIO EM UM APARELHO DE MUSCULAÇÃO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Roberto Rodacoski

CURITIBA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇA PARA MENSURAR A CARGA REAL APLICADA POR UM USUÁRIO EM UM APARELHO DE MUSCULAÇÃO", realizado pelos alunos BRUNO ROBERTO BEZERRA E MARLON H. IAHN LAIO CABRAL, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Marcos Roberto Rodacoski

Damec, UTFPR

Orientador

Prof. Me. João Carlos Roso

Damec, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Walter Luís Mikos

Damec, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 18 de DEZEMBRO de 2014.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema de medição de força para ser utilizado em academias de musculação com o intuito de fornecer ao profissional de educação física novas ferramentas para acompanhar seus atletas e ter uma análise quantitativa mais detalhada de seus movimentos.

Para chegar a esses objetivos, são estudados os aparelhos de musculação e seu funcionamento para planejar qual a melhor forma de se aplicar o sistema de medição. Também é estudada a célula de carga, uma das formas mais utilizadas na atualidade de medir esforços de tração. O estudo inclui comparativos entre os materiais e as geometrias, buscando obter uma célula leve e compacta que resista aos esforços realizados na musculação.

Para a fabricação da célula, são estudados orçamentos e processos de fabricação, buscando preço acessível e boa confiabilidade para que os dados medidos sejam mais sensíveis. Na fabricação também está inclusa a colagem de extensômetros na célula, a construção de um circuito elétrico e a elaboração de um aplicativo, o que resultou em um sistema de medição de força.

Obtido o sistema, são realizados experimentos para comprovar sua funcionalidade e citados pontos positivos e negativos.

Palavras-chave: Aparelho de Musculação, Célula de carga, Extensometria.

ABSTRACT

This study presents the development of a force measuring system for application in bodybuilding gyms in order to provide physical education teachers new tools to monitor their athletes and have a more detailed quantitative analysis of their movements.

To reach these goals, weight machines and how they work is studied in order to plan the best way to apply the measuring system. Also, the load cell, one of the most widely used forms of measuring tensile stress at present is studied. The study includes comparative between the materials and geometries, seeking to obtain a compact and lightweight cell to resist the efforts made in bodybuilding.

For the manufacture of the cell, budgets and manufacturing processes are studied, seeking affordable and good reliability so that the measured data are more accurate. In manufacturing the strain gage bonding in the cell is also included. So is the construction of an electrical circuit and the development of an application, resulting in a force measuring system.

Obtained the system, experiments are carried out to confirm its functionality and cited positive and negative points.

Keywords: Fitness Equipment, Load Cell, Extensometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aparelho de Musculação estilo Multiestação	16
Figura 2 - Alguns exercícios possíveis na estação do aparelho.....	17
Figura 3 - Curva de variação da tensão aplicada sobre o material em função de sua deformação.	18
Figura 4 – Curvas S para diferentes materiais.	21
Figura 5 - Extensômetro Unidirecional Simples.....	22
Figura 6 – Extensômetro de Roseta.....	23
Figura 7 – Sistema de Medição.....	24
Figura 8 - Exemplo da Ponte de Wheatstone.	26
Figura 9 - Circuito de Resistores em Série.	26
Figura 10 - Configuração da Ponte de <i>Wheatstone</i>	29
Figura 11 - Modelo de uma Célula de Carga.....	31
Figura 12 - Modelos de Células de Carga.....	31
Figura 13 Célula de Carga do tipo Z	32
Figura 14 Comportamento da célula tipo Z	33
Figura 15 - Modelo a ser processado.....	40
Figura 16 - Colocação da malha	40
Figura 17 - Imposição das condições de contorno	41
Figura 18 - Deformação resultante na estrutura.....	41
Figura 19 - Representação gráfica das tensões.....	41
Figura 20 Aparelho Multiestação.....	44
Figura 21 – O gancho da máquina e a barra, montados e desmontados.....	44
Figura 22 - Célula de carga Tipo Z.....	45
Figura 23 - Tração e Compressão na Célula de Carga.....	50

Figura 24 - Espessura da Célula de Carga	51
Figura 25 – Dimensão limitada pelo tamanho da rosca do olhal	52
Figura 26 - DIN 580.....	52
Figura 27 - Dimensões para colagem dos Sensores.....	53
Figura 28 - Fixação da Célula de Carga.....	54
Figura 29 - Simplificação da Fixação	55
Figura 30 - Carga aplicada.....	56
Figura 31 – Malha	57
Figura 32 - Variação da Geometria	58
Figura 33 – Matéria Prima	62
Figura 34 – Fanuc Robocut Alfa 1iC.....	63
Figura 35 – Furadeira de Coluna Kone Z 5050 A	65
Figura 36 – Extensômetro posicionado (a); Descolagem de um dos lados da fita (b)	67
Figura 37 – Aplicação de loctite (a); Colagem definitiva do extensômetro (b).....	67
Figura 38 – Circuito Eletrônico	68
Figura 39 - Montagem para Levantamento da Curva de Transferência	72
Figura 40 - Medição de Tensão.....	73
Figura 41 – Deformação.....	74
Figura 42 – Tensão	75
Figura 43 - Dimensão Final da Célula de Carga	76
Figura 44 - Eletroerosão da Célula de Carga.....	76
Figura 45 - Rosca M8 para Olhais.....	77
Figura 46 – Circuito Eletrônico	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação do fator de sensibilidade pela composição química do material	24
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de ligas de alumínio	37
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga de 7075-T651.	50
Tabela 4 - Orçamentos de matéria prima	59
Tabela 5 - Orçamentos de peça pronta.....	60
Tabela 6 - Orçamentos de serviço de usinagem/eletroerosão	60

SUMÁRIO

1	A MUSCULAÇÃO E O RISCO DE LESÕES	11
1.1	A Aplicabilidade do Projeto	12
1.2	Caracterização do Problema	13
1.3	Objetivos	13
1.4	Objetivos específicos	13
1.4.1	Definição do Material	13
1.4.2	Configuração do Extensômetro	14
1.4.3	Escolha do modelo da Célula de Carga	14
1.4.4	Dimensionamento da Célula de Carga	14
1.4.5	Fabricar a Célula de Carga	14
1.4.6	Montagem do Circuito Elétrico	14
1.4.7	Criação de um Aplicativo	14
1.4.8	Obtenção de uma Curva de Conversão	14
1.4.9	Testar a Célula de Carga	14
1.5	Justificativa	15
2	Revisão da literatura	16
2.1	Definição de Célula de Carga	16
2.2	Modelo de Aparelho a Ser Estudado	16
2.3	Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos	17
2.3.1	Tensão e Deformação	17
2.3.2	Módulo de Elasticidade	18
2.3.3	Escoamento e Limite de Escoamento	19
2.3.4	Resiliência	19
2.4	Extensômetros	19
2.4.1	Princípios de Funcionamento:	20
2.4.2	Configuração do Extensômetro:	22
2.4.3	Fator de Sensibilidade (<i>Gage Factor</i>)	23
2.4.4	O Sistema de Medição:	24
2.5	Ponte de <i>Wheaststone</i>	25
2.6	Amplificador Operacional	29
2.7	Circuito Amplificador de Sinal	30
2.8	Célula de Carga	30
2.8.1	Principio de Funcionamento	30
2.8.2	Formatos de Células de Carga	31
2.8.3	Sensibilidade	33
2.8.4	Resolução	34
2.9	Ligas de Alumínio	34
2.10	Método de Elementos Finitos (MEF)	37

3	Metodologia	43
3.1	Descrição da Metodologia	43
3.1.1	Aparelho de Musculação de Estudo	43
3.1.2	Projeto da Célula de Carga	45
3.1.3	Obtenção da curva da Célula de Carga	47
3.1.4	Realização dos ensaios	47
3.2	Justificativa da Metodologia	47
3.3	Produtos do Projeto	47
3.4	Validação do Projeto	48
4	Detalhamento dos Procedimentos	49
4.1	Projeto da Célula de Carga	49
4.1.1	Material	49
4.1.2	Formato da Célula de Carga	50
4.1.3	Modelagem em CAD	51
4.1.4	Simulação	53
4.2	Orçamentos	58
4.2.1	Avaliação dos Orçamentos Obtidos	60
4.3	Fabricação	63
4.3.1	Eletroerosão a Fio	63
4.3.2	Furação e Rosqueamento	64
4.3.3	Colagem dos Extensômetros	66
4.3.4	Circuito Elétrico	67
4.3.5	Programação	70
4.4	Obtenção da Curva de Sinal	70
5	Resultados	74
5.1	Formato concebido	74
5.2	Circuito Final e Programa de Computador	77
5.3	Resultado do Estudo do Sinal	78
5.4	Ensaio	80
6	Conclusão	82
7	REFERÊNCIAS	83

1 A MUSCULAÇÃO E O RISCO DE LESÕES

Santarem (1997, p. 1) desmente a frase "Os exercícios com pesos apresentam grande risco de lesões" e afirma:

As estatísticas demonstram que a incidência de lesões musculoesqueléticas é muito baixa nos exercícios com pesos bem orientados. Lesões ocorrem em três situações particulares: o treinamento não supervisionado, o uso de equipamento mal projetado e cargas excessivas. Não apenas as cargas podem ser facilmente adaptadas à condição física individual, mas também as amplitudes dos movimentos e todos os outros fatores do treinamento.

"As principais lesões do aparelho locomotor estão relacionadas a exercícios físicos de organismos não condicionados aos tipos de exercícios e outras de "hiperuso" do membro ou segmento do corpo, na tentativa de superação de seus padrões habituais de treinamento". (FERNANDES, 2008)

Através dos dados acima, fica clara a existência de preocupação referente a excesso de força feito na musculação. Com a intenção de combater esse problema, a viabilização de uma célula de carga para uso na musculação será o propósito deste trabalho. Para realizar exercícios utilizando pesos em vez de aparelhos, a célula de carga dificilmente poderá apresentar alguma aplicação. Por isso, o trabalho foi direcionado exclusivamente para exercícios realizados em aparelhos.

Abaixo, alguns dados referentes a comparação entre exercícios com aparelhos e exercícios com pesos livres, de acordo com pesquisa realizada por Bruno Folli (2013, p. 1), para o iG São Paulo:

Os aparelhos são uma espécie de guia para os exercícios, facilitando a realização do movimento correto. Eles também dão apoio para o posicionamento do aluno. "Algumas pessoas têm dificuldade em manter a postura correta nos exercícios livres", comenta Fabiana Queiroz, coordenadora de uma unidade da academia Contours em Fortaleza. Isso pode acabar gerando lesões durante o treino, especialmente quando a academia não fornece a devida atenção aos alunos. Jr. Crocco, personal trainer da Body Systems, explica que muitas alunas preferem os

exercícios nos aparelhos, porque eles são mais simples de realizar. E eles realmente podem ser mantidos mesmo nos treinos mais avançados.

Por motivos citados acima, o propósito deste trabalho será ter maior controle sobre os exercícios feitos em aparelhos de musculação em vez de exercícios com pesos livres. É evidente que os aparelhos de musculação apresentam desigualdade entre o peso escolhido pelo usuário quando este utiliza o sistema da máquina e o peso efetivamente levantado por ele. Essa diferença se dá por vários fatores, incluindo polias, o atrito dos cabos e amortecedores. Visando a segurança de usuários, principalmente dos idosos e dos que possuem algum tipo de dificuldade física, gerar a possibilidade de prever essa diferença foi considerado algo de extrema importância.

Além da diferença criada pelo sistema da máquina, a diferença de aceleração imposta pelo atleta durante o exercício também causa diferença na força aplicada. Isso, juntamente com outros testes como a eletromiografia, pode gerar resultados que interessam um profissional da área.

A possibilidade de se instalar uma célula de carga em um aparelho de musculação atualmente depende muito do aparelho. Inicialmente, a instalação só seria possível em determinados tipos de aparelhos, mas caso haja interesse, pode-se fazer algumas alterações no aparelho, gerando a possibilidade de acoplar a célula de carga em qualquer aparelho, uma vez que ela não interfere no funcionamento do aparelho.

Acredita-se que o acessório a ser produzido neste trabalho possa despertar interesse em grandes academias, motivando seus donos a comprar aparelhos com modificações para que possa ser instalada uma célula de carga.

1.1 A Aplicabilidade do Projeto

O que motiva em realizar este projeto é o fato de que os equipamentos de musculação da atualidade não possibilitam de forma alguma que seja medida a força sendo realizada pelo usuário em tempo real.

O projeto é relevante para estudo na Engenharia Mecânica já que uma célula de carga é fabricada utilizando quase todas as áreas de engenharia, com mais

ênfase em mecânica estrutural e metrologia. Outro fato interessante é a interdisciplinaridade do projeto, uma vez que são utilizados conceitos de eletricidade e a aplicação é voltada para o meio da Educação Física.

Células de carga já foram utilizadas na Educação Física, mas nunca para mensurar a força exercida durante um exercício. Por exemplo, a Professora de Educação Física na UTFPR, Cintia Rodacki, realizou testes utilizando uma célula de carga com capacidade nominal de até 200 kg em conjunto com a eletromiografia para investigar se o Omega 3 gerava mudanças neuromusculares em idosas em sua tese de doutorado. (RODACKI, 2012) Mencionou ter utilizado a célula de carga para verificar a força máxima do indivíduo através de um teste de tração onde a célula era acoplada em uma das extremidades num cabo de aço (este era provavelmente fixo no chão ou na parede, mas não foi mencionado) e na outra extremidade, por exemplo, na perna do indivíduo utilizando uma alça ajustável com velcro. Vale ressaltar o quanto essa célula foi superdimensionada.

1.2 Caracterização do Problema

É impossível determinar em tempo real a força realizada por um indivíduo durante a musculação, expondo usuários a lesões.

1.3 Objetivos

Desenvolver uma célula de carga capaz de medir força, sem influenciar na dificuldade do exercício e evitando superdimensionamentos.

1.4 Objetivos específicos

Neste tópico, serão detalhados os objetivos que se pretende alcançar no projeto.

1.4.1 Definição do Material

Escolher um material que se deforme suficientemente para facilitar a medição, que resista aos esforços da musculação e que possa ser dimensionado adequadamente.

1.4.2 Configuração do Extensômetro

Definir como será feita a colagem dos extensômetros na célula de carga para que este sofra influência apenas do exercício sendo realizado.

1.4.3 Escolha do modelo da Célula de Carga

Estudar os tipos de célula de carga existentes no mercado para determinar qual tipo a ser utilizado.

1.4.4 Dimensionamento da Célula de Carga

Dimensionar a célula de carga em um software de desenho 3D com auxílio de elementos finitos para analisar seu comportamento quando submetida aos esforços.

1.4.5 Fabricar a Célula de Carga

Investigar os processos de fabricação em questões de viabilidade, qualidade e custo, para posteriormente realizar a fabricação e a colagem dos extensômetros.

1.4.6 Montagem do Circuito Elétrico

Montar um circuito elétrico capaz de converter a deformação dos extensômetros para um sinal que permita a medição.

1.4.7 Criação de um Aplicativo

Criar um aplicativo capaz de converter o sinal obtido em um valor de força e demonstrá-lo na tela do computador de maneira simples.

1.4.8 Obtenção de uma Curva de Conversão

Equacionar o sinal obtido para que a conversão feita pelo aplicativo obtenha valores adequados

1.4.9 Testar a Célula de Carga

Realizar o teste da célula de carga em um aparelho de musculação e analisar o resultado obtido

1.5 Justificativa

Espera-se que, ao final do curso acadêmico, o Engenheiro Mecânico esteja apto a trabalhar com as diversas ferramentas de engenharia disponíveis. No caso deste trabalho, utilizaram-se diversas áreas de conhecimento e foram trabalhadas situações práticas, baseadas no conhecimento teórico adquirido ao longo do curso. A situação abordada neste projeto representa a tentativa de promover uma melhoria em uma atividade presente no cotidiano de muitas pessoas e é de grande valia para o aprendizado prático.

Além disso, foi feita uma busca no mercado sobre esse tipo de produto, buscando algo que tivesse o mesmo objetivo e parâmetros semelhantes, não foi encontrado nada similar. É possível encontrar aparelhos que contam o número de repetições e outros que possuem um sistema com base em chip que exibem informações sobre o próprio usuário e parâmetros que este utiliza no aparelho escolhido. De acordo com Maria Antonieta Toledo, da Agencia SEBRAE de Notícias, o Brasil conta com 15.551 academias, perdendo apenas para os Estados Unidos. Com faturamento de US\$ 1,1 bilhão no ano de 2010, a perspectiva da associação é de que o setor continue em crescimento no Brasil, impulsionado pela ascensão das classes econômicas C e D, por este aumento expressivo buscou-se desenvolver este trabalho com aplicação em academias.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Definição de Célula de Carga

As células de carga são estruturas mecânicas, projetadas para um determinado intervalo de forças, no qual se deformam apenas elasticamente. Embora essa deformação seja pequena, é suficiente para gerar um sinal de saída compatível com a carga aplicada sobre a célula.

As células de carga podem ser utilizadas para medição de esforços de tração ou compressão em prensas, cabos, máquinas de ensaio, dinamômetros e vários outros equipamentos, sempre que a medição de força for necessária (THOMAZINI, 2005).

No projeto e construção de uma célula de carga, assim como em outros projetos mecânicos, o conhecimento e estudo de propriedades mecânicas de materiais metálicos é estritamente necessário.

2.2 Modelo de Aparelho a Ser Estudado

O aparelho de musculação utilizado é um aparelho do tipo “Multiestação” composto de quatro estações e fabricado sob medida para a academia visitada para a realização do trabalho. A estação a ser estudada pode ser vista em primeiro plano na figura 1, possui 8 barras de ferro fundido pintado de 5kg cada e 4 barras de 8kg cada, podendo totalizar em levantamento de até 72 kg pelo usuário e seu sistema permite adaptação para vários exercícios, mostrados na figura 2.



Figura 1 - Aparelho de Musculação estilo Multiestação

Fonte: Autoria Própria¹

¹ As figuras e tabelas sem indicação de fonte foram compiladas pelos autores.



Figura 2 - Alguns exercícios possíveis na estação do aparelho

2.3 Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos

Essa seção terá como objetivo revisar as principais propriedades mecânicas que serão utilizadas nesse projeto. Para toda a seção foi utilizado como referência a quinta edição do livro de William Callister, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, publicado em 2002.

2.3.1 Tensão e Deformação

O gráfico apresentado na Figura 3 mostra uma curva de tensão-deformação típica para materiais dúcteis.

No eixo das ordenadas da Figura 3 está representada a tensão de deformação, que é a relação da força aplicada com a área transversal.

No eixo das abscissas da Figura 3 está representada a deformação específica do material, que é a relação da variação de comprimento com o comprimento inicial.

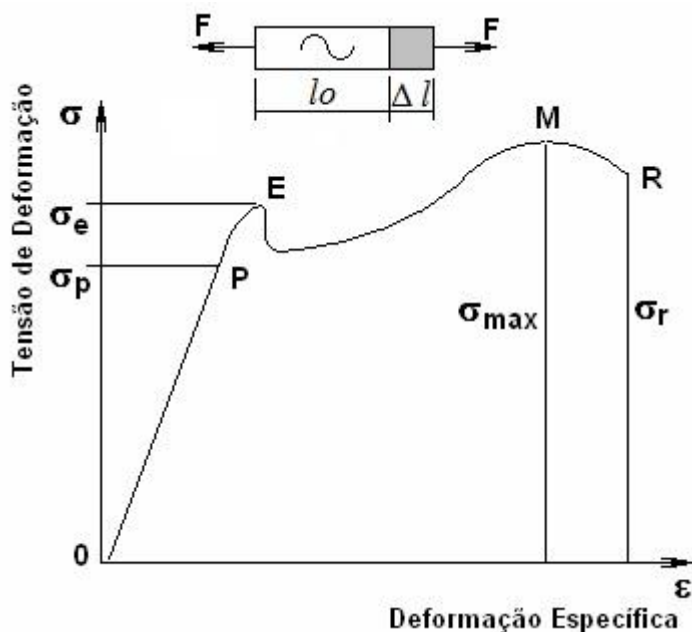


Figura 3 - Curva de variação da tensão aplicada sobre o material em função de sua deformação.

Fonte: WILLIAN D. CALLISTER, 2002.

Abaixo serão estudados apenas os parâmetros mais relevantes para o projeto: Módulo de Elasticidade, Limite de escoamento e Resiliência

2.3.2 Módulo de Elasticidade

O fator responsável pela relação entre tensão e deformação dentro do regime elástico. Para a maioria dos materiais que são submetidos a uma tensão de tração em níveis relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si. No trecho OP da curva mostrada na Figura 1, a tensão aplicada é proporcional à deformação de acordo com a equação (3) mostrada abaixo:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

Esta relação é conhecida por lei de Hooke, e a constante E , dada em (GPa), é conhecida como módulo de elasticidade, ou *módulo de Young*. A lei dá a informação de que quanto menor o módulo de elasticidade, maior será a deformação do material para uma dada tensão.

Nessa parte da curva, o material se comporta linearmente. A tensão correspondente ao ponto P, σ_p , é chamada de limite de proporcionalidade do material. A partir do ponto P, o material começa a perder a linearidade definida pela

Lei de Hooke e, quanto mais próximo do ponto E, que é o ponto de escoamento, perderá também a elasticidade, ou seja, haverá uma pequena deformação residual se a tensão deixar de ser aplicada, além de mudanças permanentes na microestrutura do material.

2.3.3 Escoamento e Limite de Escoamento

A maioria das estruturas é projetada para assegurar que, quando uma tensão é aplicada, ocorra somente deformação elástica no material. Para isso torna-se desejável conhecer os valores de tensão onde pode começar a ocorrer deformação plástica, que é em valores próximos ao limite de escoamento. Para metais que experimentam essa transição elastoplástica gradual, o ponto de projeto a ser escolhido é o ponto onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão-deformação, o limite de proporcionalidade.

A magnitude do limite de escoamento para um metal mede sua resistência à deformação plástica, o que torna esse parâmetro importante para todos os projetos.

2.3.4 Resiliência

A resiliência é a capacidade de um material absorver energia quando ele é deformado elasticamente e depois, com o descarregamento, ter essa energia recuperada. A propriedade associada é o módulo de resiliência U_r , que representa a energia de deformação por unidade de volume exigida para tensionar um material desde um estado com ausência de carga até a sua tensão limite de escoamento.

Os materiais resilientes são aqueles que possuem limites de escoamentos elevados e módulos de elasticidade pequenos, tais ligas encontram aplicações como mola.

2.4 Extensômetros

Um elemento importante na composição de uma célula de carga são os extensômetros de resistência elétrica, ou também conhecidos como *Strain gages*. Para realização do projeto será imprescindível o estudo dos extensômetros. Abaixo estão descritas as definições, princípios de funcionamento e configuração dos extensômetros.

Definição:

Extensômetros de resistência elétrica são dispositivos de medidas que transformam pequenas deformações em variações equivalentes em sua resistência elétrica. São utilizados para medir deformações em diferentes estruturas. (ANDOLFATO, 2004)

As principais características das medições feitas por extensômetros são listadas logo abaixo:

- boa resolução;
- dimensão e massa baixas;
- respostas satisfatórias aos fenômenos dinâmicos;
- excelente linearidade;
- medições possíveis dentro de uma grande faixa de temperatura;
- usados como elementos transdutores para medidas de variações físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);

2.4.1 Princípios de Funcionamento:

A medição feita pelo extensômetro considera que a deformação do objeto medido é transferida sem perdas para o extensômetro, o que requer uma ligação ótima entre as superfícies de ambos. A melhor ligação, segundo estudos é a feita por adesivo. (ANDOLFATO, 2004)

Nos extensômetros, a deformação transmitida para eles gera alteração na resistência elétrica.

De acordo com (ALMEIDA, 1999) todo condutor elétrico altera sua resistência com a tensão. A alteração na resistência se deve a deformação do condutor e a mudanças na resistividade Q do condutor, como resultado de mudanças micro estruturais. Esse processo é descrito pela relação a seguir:

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon \cdot (1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q} \quad (5)$$

Onde R é a resistência, R_0 é a resistência nominal do extensômetro, ε é a tensão, ν é o coeficiente de Poisson e ρ é a resistividade.

Para investigar melhor a diferença entre os materiais, foram traçadas suas curvas S , que são baseadas na seguinte relação:

$$S = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta l / l} = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (6)$$

Caso a alteração na resistência desprezasse as mudanças micro estruturais do material, as curvas S seriam retas. No gráfico da figura 4 se pode observar que as mudanças micro estruturais do material não são desprezáveis e deve-se conhecer a faixa de tensões onde o material não sofrerá alterações na microestrutura ou o cálculo poderá apresentar erros. (HOFFMANN, 2012)

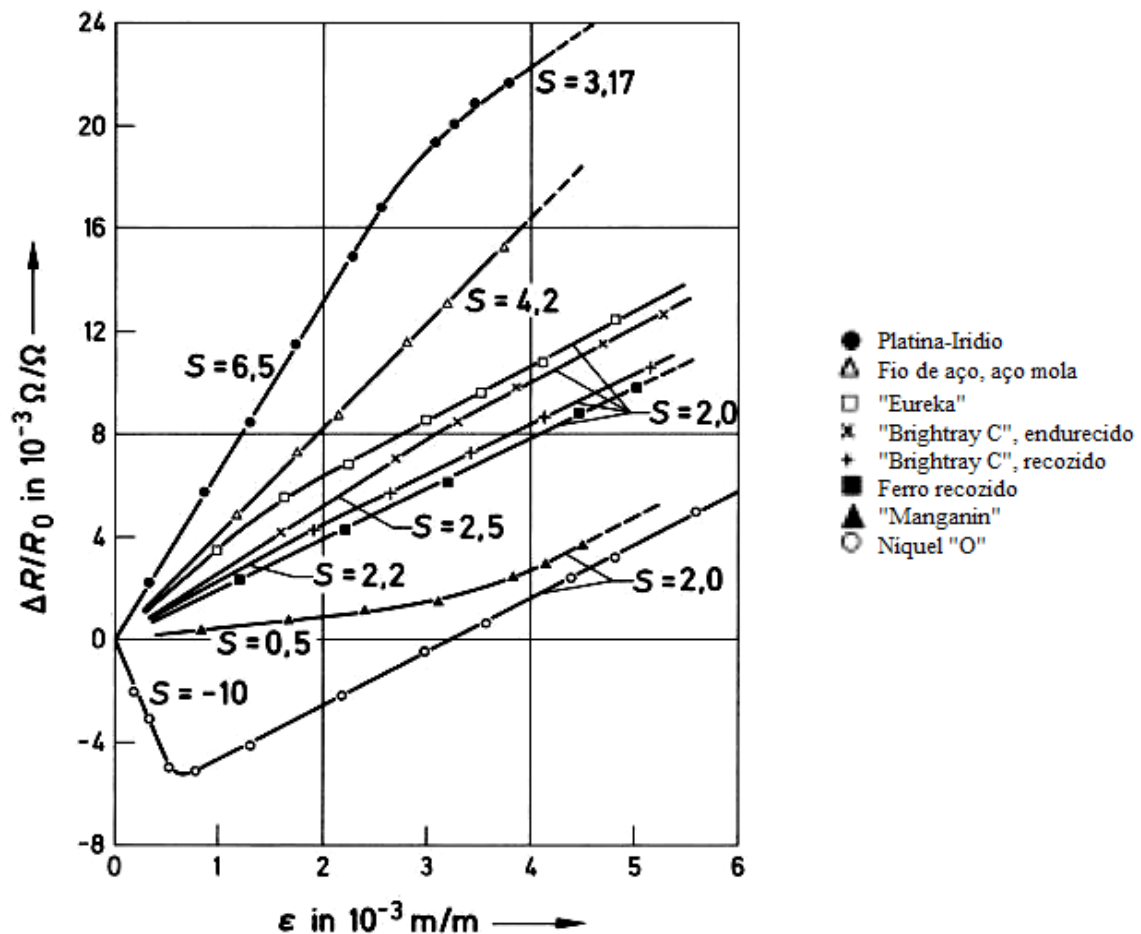


Figura 4 – Curvas S para diferentes materiais.

Fonte: AN INTRODUCTION TO STRESS ANALYSIS AND TRANSDUCER DESIGN USING STRAIN GAGES

2.4.2 Configuração do Extensômetro:

Um modelo bem comum de extensômetro é mostrado na figura 5, sendo que essa configuração, grade, terminais e base, compõem todos os tipos de extensômetros.

A base do extensômetro tem o objetivo de alojar o resistor, e os terminais soldáveis, esta base é composta por um material eletricamente isolado que em geral é uma resina epóxi, o resistor é formado pela grade ou grelha, é a região que sofre a deformação, e devido a isso apresenta a mudança de geometria do fio. (ANDOLFATO, 2004)

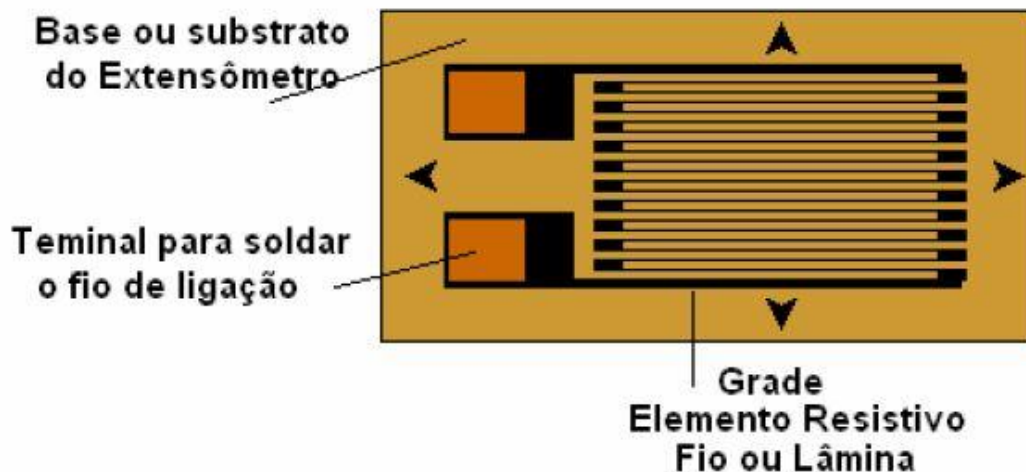


Figura 5 - Extensômetro Unidirecional Simples.
Fonte: EXTENSOMETRIA BÁSICA, 2004.

O modelo apresentado na figura 5 é chamado de unidirecional simples, ou seja, ele realiza leitura de deformação em somente uma direção, existem modelos para medir deformações em mais de uma ou duas direções simultaneamente, as chamadas rosetas, apresentada na figura 6, que realiza leitura de deformação em três direções simultaneamente, e a ângulo de 120° uma da outra. (ANDOLFATO, 2004)

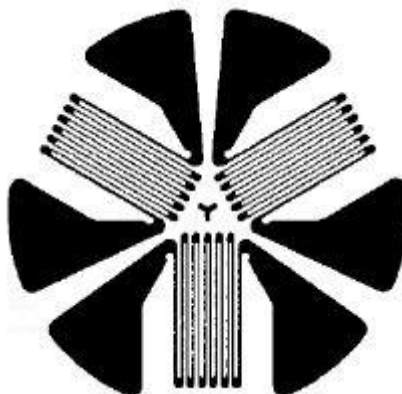


Figura 6 – Extensômetro de Roseta

Fonte: Disponível em <http://www.excelsensor.com.br/ext_roseta_tripla120.htm> Acesso em ago. 2014.

2.4.3 Fator de Sensibilidade (*Gage Factor*)

De acordo com (HOFFMANN, 2012) a relação entre a resistência elétrica do extensômetro e o alongamento é aproximada para o linear, como pode ser visto na Figura 4. Ou seja, a relação da deformação sofrida por ele e a variação de resistência resultante dessa deformação gera uma constante, que é chamada de fator de sensibilidade ou *gage factor*, essa constante varia em função do tipo de material do extensômetro, tabela 3.

O fator de sensibilidade está diretamente ligado à resolução do extensômetro e por consequência a resolução da célula de carga. Na Tabela 3, podem ser vistas algumas ligas que costumam ser usadas na fabricação dos extensômetros (ALMEIDA, 1999).

Tabela 1 - Relação do fator de sensibilidade pela composição química do material

Nome do Material	Composição %	Sensibilidade
Armour D	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2.0
Constantan (ou Advance)	45 Ni, 55 Cu	2.1
Isoelástico	36 Ni, 8 Cr, 0,5 Mo, 55,5 Fe	3.6
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2.0
Nicrômio	80 Ni, 20 Cr	2.1
Platina/Tungstênio	92 Pt, 8 W	4.0

Fonte: PEDRO AFONSO DE OLIVEIRA ALMEIDA, 1999.

2.4.4 O Sistema de Medição:

Segundo (HOFFMANN, 2012), como as deformações medidas com extensômetros são normalmente muito pequenas, as variações na resistência elétrica também são muito pequenas, portanto, deve-se incluir o extensômetro em um sistema que torne possível a determinação dessa variação.

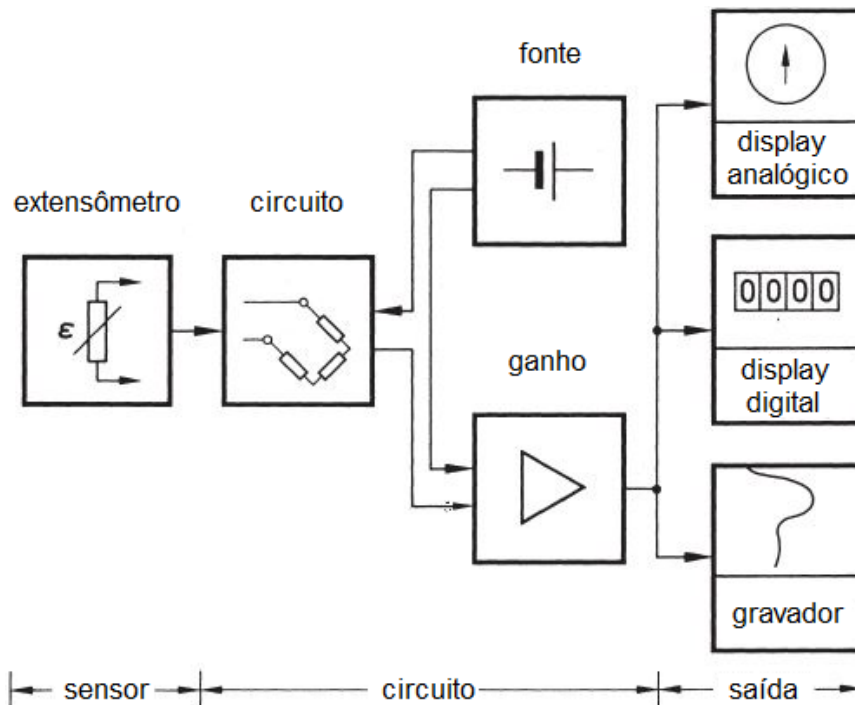


Figura 7 – Sistema de Medição

Fonte: AN INTRODUCTION TO STRESS ANALYSIS AND TRANSDUCER DESIGN USING STRAIN GAUGES

O primeiro componente do sistema é formado por um ou mais extensômetros, que convertem a deformação mecânica para resistência elétrica.

O segundo componente é um circuito de medição, que comumente é a Ponte de Wheatstone, que será abordada na seção 2.4.

Como um terceiro componente, é introduzido um amplificador operacional, que será mencionado na seção 2.5.

O quarto componente do aparelho de medição é o display. Este converte o sinal do amplificador de forma que possa ser visto pelo homem. No caso mais simples, esse display mostrará o valor em Volts ou Ampéres. Caso a variação na deformação seja necessária como no caso de um processo dinâmico, instrumentos de gravação são mais adequados que os de simples indicação. A maioria dos amplificadores permite conexões com ambos os tipos de instrumentos. (HOFFMANN, 2012)

Muitas vezes o sistema é aumentado com equipamentos conforme sua necessidade. Por exemplo: scanners, filtros, armazenadores de valores de pico, botões de limite, gravadores transientes, etc. Processadores eletrônicos como computadores, podem ser conectados ao sistema no lugar dos instrumentos de indicação para aumento significativo na versatilidade.

2.5 Ponte de *Wheatstone*

Segundo (ANDOLFATO, 2004) circuitos elétricos são utilizados para medir a variação de resistência de extensômetros montados em corpos de prova, esse circuito é geralmente chamado de ponte de *Wheatstone*, conforme a figura 8.

Esse tipo de circuito é utilizado para compensar deformações indesejáveis que estariam presentes na medição direta, ou seja, por apresentar maior confiabilidade.

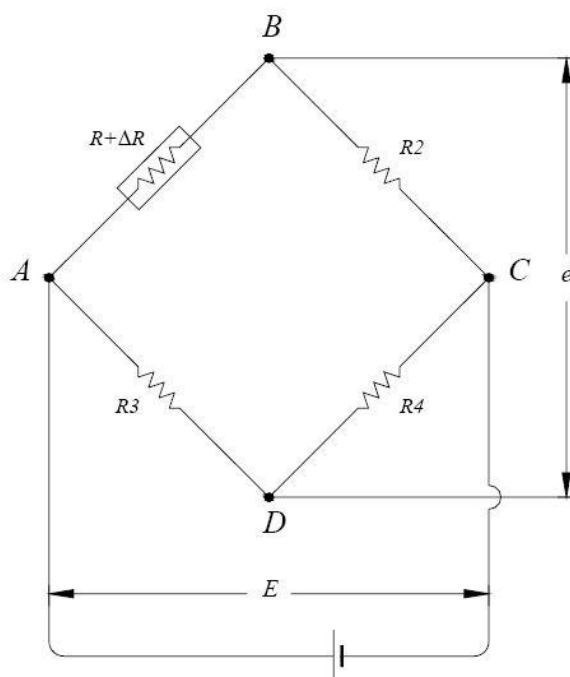


Figura 8 - Exemplo da Ponte de Wheatstone.
Fonte: EXTENSOMETRIA BÁSICA, 2004.

(ANDOLFATO, 2004) diz que utilizando os conceitos de divisores de tensão, sabe-se que resistores em série dividem a tensão e que a tensão de resistores em paralelo não variam. Para dois resistores em série, figura 9, com uma tensão de alimentação aplicada a eles verifica-se as seguintes situações:

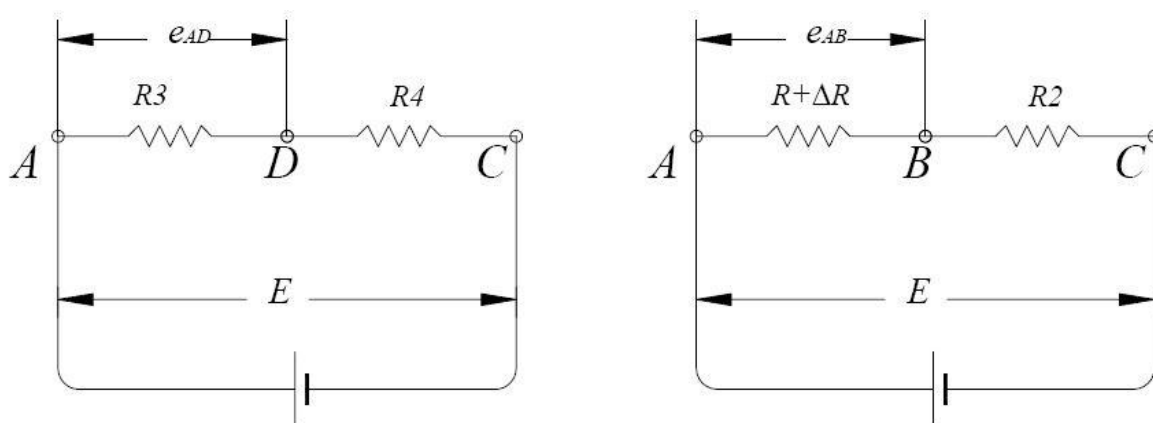


Figura 9 - Circuito de Resistores em Série.
Fonte: EXTENSOMETRIA BÁSICA, 2004.

A tensão entre o ponto A e D é chamada de e_{ad} , e seu resultado é expresso pela equação (7), representada abaixo:

$$e_{ad} = \left[\frac{R3}{R3 + R4} \right] \cdot E \quad (7)$$

Onde $R3$ é a resistência do resistor 3, $R4$ é a resistência do resistor 4 e o E é a tensão de alimentação do circuito.

Analogamente para o circuito ao lado na figura 7 a tensão entre o ponto A e B é chamada de e_{ab} , e seu resultado é expresso pela equação (8), representada abaixo:

$$e_{ad} = \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R2} \right] \cdot E \quad (8)$$

Onde $R2$ é a resistência do resistor 2, ΔR é a variação da resistência de um extensômetro qualquer.

Colocando os dois circuitos da figura 9 em paralelo tem-se a ponte de Wheatstone, figura 6, onde a diferença de potencial entre os pontos B e D será a diferença entre e_{ab} e e_{ad} , que se trata apenas do valor de e que é representado pela equação (9) logo abaixo, que é o sinal que se pretende medir.

$$e = e_{ad} - e_{ab} = \left[\frac{R3}{R3 + R4} - \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R2} \right] \cdot E \quad (9)$$

Onde e é o sinal de saída da ponte e e_{ad} e e_{ab} são representadas pela equação (7) e (8).

Quando os quatro extensômetros da ponte, figura 6, são de mesma resistência, o valor de saída e é igual a zero, mas quando a resistência $R1$, também conhecido como extensômetro ativo, por exemplo mudar para $R + \Delta R$, ou seja ele varia, o sinal de saída e será um pequeno valor de diferença de potencial, a leitura de saída da ponte.

Diferentes montagens da ponte são comumente utilizadas para leituras de sinais dos extensômetros, a figura 10 mostra as diferentes configurações possíveis para a leitura com extensômetros. (ANDOLFATO, 2004)

Ponte Completa: Utilização de quatro extensômetros para a leitura da deformação, sendo que dois deles, os passivos, são colocados no sentido perpendicular à deformação do corpo, e os outros dois, os ativos, são montados no sentido da deformação. Os dois passivos têm o objetivo de realizar a compensação de temperatura, pois com a mudança de temperatura o corpo se dilata ou contrai em todos os sentidos. Os ativos realizam a leitura de deformação do corpo causada pelo carregamento.

Meia ponte: Leitura utilizando somente dois extensômetros, para completar a ponte são utilizados mais dois resistores de mesma resistência que os extensômetros. Essa configuração não permite a compensação de temperatura, somente a leitura de deformação obtida através de um carregamento.

Quarto de ponte: Leitura utilizando um extensômetro e com o circuito externo são utilizados três resistores de mesma resistência que o extensômetro. Essa configuração é comum em instrumentações rápidas, ou seja, em ensaios para checar a deformação ou carga em vigas ou corpo de prova.

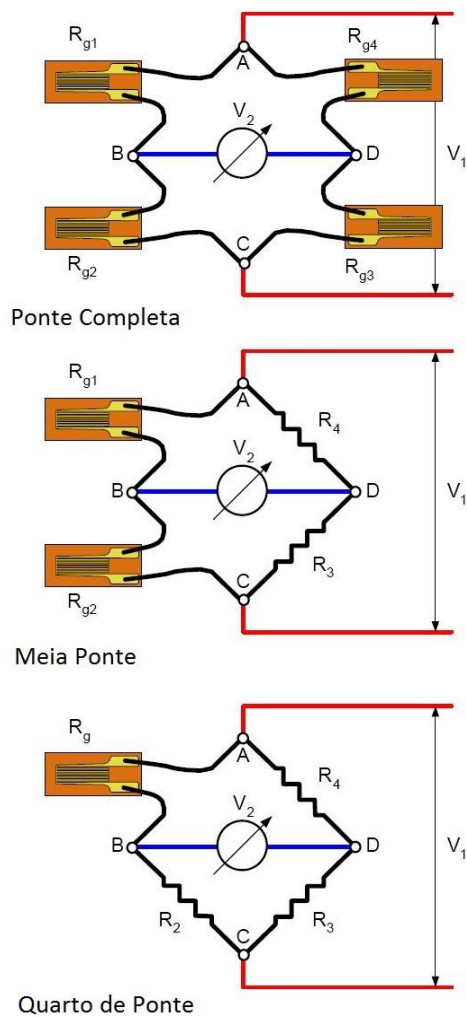


Figura 10 - Configuração da Ponte de *Wheatstone*.
Fonte: CURSO EXTENSOMETRIA, 2010.

2.6 Amplificador Operacional

Como citado acima em muitos casos de instrumentação, o sinal de saída de transdutores é relativamente baixo, não possibilitando uma leitura correta e segura das deformações dos extensômetros. Para que se possa obter uma leitura mais satisfatória dos sinais, se faz necessário amplificar esses sinais por meio de um circuito eletrônico, o responsável por amplificar os sinais é por meio de um circuito integrado denominado amplificador operacional.

Segundo (PERTENCE, 1990) amplificadores operacionais são circuitos bastante usados em instrumentação analógica, permitindo a execução de uma serie

de operações matemáticas como soma, multiplicação, comparação, entre outros, com elevados níveis de resolução.

O amplificador operacional possui uma saída O , uma entrada inversora (-) e uma entrada não inversora (+). Considerando o ganho, a relação entre as tensões V_2 e V_1 aplicadas nas entradas e a saída V_0 é mostrada na equação (10), logo abaixo:

$$V_0 = a \cdot (V_1 \cdot V_2) \quad (10)$$

Onde V_0 é a saída, a é o ganho e V_1 e V_2 são as entradas.

Ou seja, é um amplificador linear cuja tensão de saída é proporcional à diferença entre as tensões aplicadas nas entradas.

2.7 Circuito Amplificador de Sinal

O circuito amplificador de sinal tem por objetivo o tratamento do sinal, ou seja, tornar a leitura do sinal do extensômetro possível. O circuito amplificador de sinal é composto por reguladores de tensão, que visam gerar uma tensão estável para alimentação da ponte e do amplificador, e um amplificador de sinal, que amplifica o sinal de tensão gerado pelo desbalanceamento da ponte.

A configuração do circuito amplificador de sinal é estabelecida a partir do *data sheet* do amplificador operacional, ou seja, do circuito necessário para utilizar o amplificador para este fim. (PERTENCE, 1990)

2.8 Célula de Carga

Esta seção trata com maiores detalhes o funcionamento das células de carga, alguns conhecimentos necessários e importantes para o entendimento do funcionamento e até mesmo para o projeto de uma célula de carga.

2.8.1 Princípio de Funcionamento

Como dito em tópicos acima, a célula de carga transmite para o *display* a deformação utilizando a variação da resistência. Como a célula de carga pode ser utilizada em várias áreas, é fundamental que exista a possibilidade de configurar a

célula de várias formas, de acordo com o tipo de força que esta será utilizada para medir.

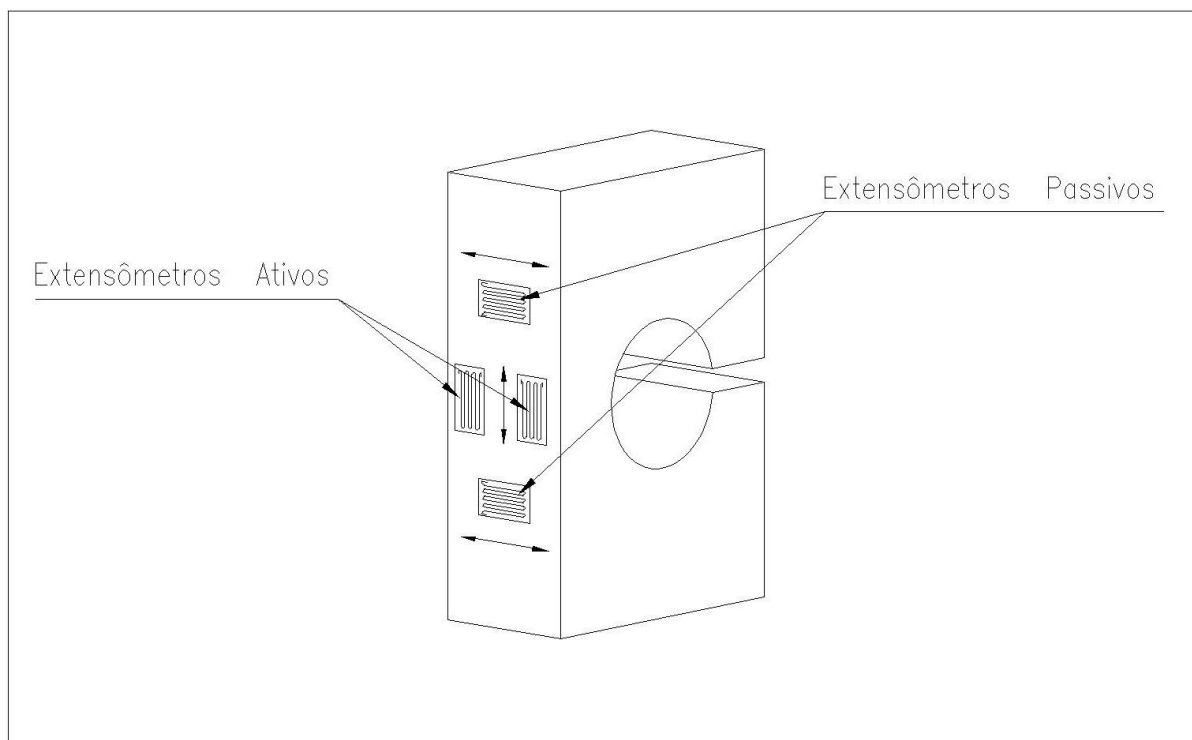


Figura 11 - Modelo de uma Célula de Carga.

2.8.2 Formatos de Células de Carga

De acordo com a aplicação, determinados formatos são requeridos, considerando-se se a carga é apoiada (células do tipo viga), figura 12 (a), ou se a carga é sustentada (células do tipo Z), figura 12 (b) ou ainda se a carga introduz algum momento torsor na célula (células do *tipo single point*), figura 12 (c).



Figura 12 - Modelos de Células de Carga

Neste trabalho, será adotada a célula de carga do tipo Z, que está sujeita a flexão, e é muito utilizado para medir forças de tração e como nossa aplicação tem como único esforço a tração, e a geometria mais apropriada para o estudo.

A célula do tipo Z é muito utilizada por possuir componentes elásticos submetidos à flexão, por apresentarem elevada deformação mesmo com pequenas cargas. Outra vantagem é as deformações de tração e compressão ocorridas na geometria que serão captadas nos extensômetros, e essa deflexão nos possibilita um arranjo com 4 sensores, obtendo assim uma sensibilidade maior captada pelo do transdutor.

A Figura 13 nos mostra como funciona a célula de carga do tipo Z, criando um estado de tração e compressão ao longo da viga, conforme Figura 13, onde as marcações em T são os locais de tração e o C de compressão onde os sensores devem ser colados.

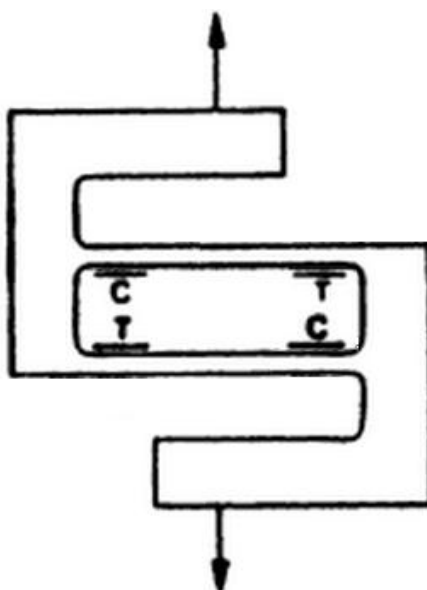


Figura 13 Célula de Carga do tipo Z
Fonte: STRAIN GAGE USERS' HANDBOOK, 1992.

Dessa maneira pode-se dizer que a célula de carga do tipo Z apresenta um comportamento que se assemelha a duas vigas bi engastada, e quando carregada por uma força, induz a uma deflexão de acordo com a Figura 14.

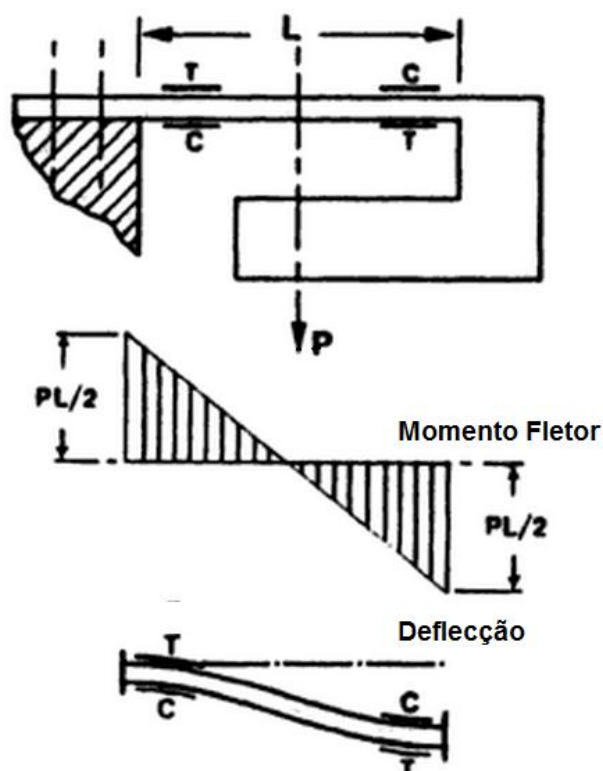


Figura 14 Comportamento da célula tipo Z
 Fonte: STRAIN GAGE USERS' HANDBOOK, 1992.

E desse modo pode-se colar 4 sensores em ponte completa, 2 nos locais onde ocorreria tração e 2 nas compressão aumentando assim a sensibilidade se compararmos com apenas a deformação criada pela mesma força num eixo simples onde ocorreria apenas tração.

2.8.3 Sensibilidade

Como é possível perceber na figura 11, é feita a aplicação de quatro extensômetros montados em ponte completa, sendo dois dos extensômetros ativos e dois passivos de forma a compensar a variação de temperatura.

A medição do desbalanceamento da ponte de Wheatstone é feita pela variação da tensão de saída em função da tensão de excitação aplicada na entrada da ponte. Quando a célula de carga está carregada, este valor é dado em milivolt por volt aplicado, e normalmente, entre 2 e 3 mV/V. Isto significa que uma célula de carga de 30 Kg de capacidade nominal e 2mV/V de sensibilidade, com uma tensão de

excitação na entrada de 10V, quando sujeita a uma força de 30 Kgf apresentará na saída uma variação de tensão de 20mV.

2.8.4 Resolução

É o número de divisões da capacidade nominal. As células de carga neste caso podem ser divididas em:

- Baixa resolução: até 1.000 divisões (ou 0,1% da capacidade nominal);
- Média resolução: de 3.000 a 5.000 divisões (ou de 0,03 a 0,02% da capacidade nominal);
- Alta resolução: 10.000 divisões (ou 0,01% da capacidade nominal).

2.9 Ligas de Alumínio

Esta seção descreve as ligas de alumínio, e por sua vez suas características mecânicas.

Os principais elementos de ligas de alumínio incluem combinações com os seguintes elementos:

- Cobre (Cu);
- Magnésio (Mg);
- Silício (Si);
- Manganês (Mn);
- Zinco (Zn);

De acordo com o produto, as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos:

Ligas conformadas ou trabalhadas (*wrought alloys*) – ligas destinadas à fabricação de produtos semi-acabados, como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não planos (tarugos, barras e arames), perfis extrudados e componentes forjados.

Ligas Fundidas (*cast alloys*) – ligas destinadas a fabricação de componentes fundidos.

Somando-se as ligas conformadas e as ligas fundidas, existem mais de 600 ligas reconhecidas industrialmente.

Estes dois grupos se subdividem em:

Ligas não tratáveis termicamente – Não são endurecidas por meio de tratamento térmico.

Ligas tratáveis termicamente – São endurecidas por meio de tratamentos térmicos.

Nomenclatura das ligas conformadas

1xxx – Al puro não ligado com 99,00% mínimo de Al;

As ligas da série 1xxx são caracterizadas pela excelente resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e elevada ductilidade.

2xxx – ligas contendo cobre como elemento de liga principal e adições de outros elementos, principalmente Mg. As ligas da série 2xxx são largamente empregadas na indústria aeronáutica e aeroespacial;

São ligas tratáveis termicamente, podendo, após os tratamentos, atingir-se a resistência de aço baixo carbono (450 MPa). A resistência à corrosão das ligas da série 2xxx é inferior a de outras ligas de alumínio. Sob certas condições estas podem apresentar corrosão intergranular. As ligas desta série apresentam boa usinabilidade características de soldagem limitadas.

3xxx – ligas contendo manganês como elemento de liga principal.

As ligas desta série não são tratáveis termicamente, entretanto, apresentam resistência 20% superior que ligas da série 1xxx. Devido à baixa solubilidade de Mn no Al (de até 1,8%) existem poucas da série 3xxx.

4xxx – ligas contendo silício como elemento de liga principal;

A maior parte das ligas desta série não são tratáveis termicamente. O Si pode ser adicionado para abaixar a temperatura de fusão sem provocar fragilidade

excessiva, assim, ligas Al-Si são utilizadas em arames de solda ou como ligas para brazagem de Al (soldagem de Al).

5xxx – ligas contendo magnésio como elemento de liga principal;

O magnésio é um dos elementos mais efetivos no endurecimento do Al. Quando utilizado como elemento ou em conjunto com Mn o resultado são ligas não tratáveis com resistência moderada à elevada. O Mg é considerado mais efetivo que o Mn como endurecedor, (0,8% de Mg tem o mesmo efeito sobre a resistência que 1,25% de Mn), e ainda pode ser adicionado em quantidades elevadas (~15%). Ligas desta série possuem boas características de soldagem e resistência à corrosão em atmosfera marinha.

6xxx – ligas contendo magnésio e silício como elementos de liga principais;

A proporção de Mg e Si visa a formação da fase Mg_2Si , formando ligas tratáveis termicamente. As ligas da série 6xxx apresentam boa ductilidade, boas características de soldagem e de usinagem e boa resistência à corrosão.

7xxx – ligas contendo zinco como elemento principal e adições de Cu, Mg, Cr, Zr;

O zinco adicionado entre 1 a 8%, adições em conjunto com Mg resultam em ligas tratáveis termicamente com resistência mecânica elevada.

8xxx – ligas cujas composições apresentam diferentes elementos como Sn ou Li;

As ligas da série 8xxx envolvem um grande número de composições com uma miscelânea de elementos de liga. As ligas conformadas contendo Li (2,4% a 2,8%) foram desenvolvidas para uso aeroespacial e criogenia.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas de ligas de alumínio

Liga	Módulo de Elasticidade	Tensão de Escoamento	Tensão de Ruptura	Coefficiente de Poisson
1060-H16	68,9 GPa	103 MPa	110 MPa	0,33
2014-T6	73,1 GPa	414 MPa	483 MPa	0,33
3005-H18	69 GPa	225 MPa	240 MPa	0,34
4032-T6	78,6 GPa	317 MPa	379 MPa	0,34
5005-T6	68,9 GPa	152 MPa	159 MPa	0,33
6061-T6	68,9 GPa	276 MPa	310 MPa	0,33
7075-T651	71,7 GPa	503 MPa	530 MPa	0,33

Fonte: (ASM HANDBOOK, 2007).

2.10 Método de Elementos Finitos (MEF)

A teoria do Método de elementos finitos foi desenvolvida pela indústria aeroespacial e apresentada em publicação por Turner e seus colaboradores na década de 50 de acordo Turner (1956), com o objetivo de simplificar a solução de problemas complexos.

Segundo Segerlind (1976), essa teoria permite que qualquer quantidade contínua de temperatura, pressão ou deslocamento possa ser aproximado através da discretização do modelo em sub-regiões definidas por elementos finitos.

O método de elementos finitos (MEF) é caracterizado como sendo uma simulação na qual pode ser recriado matematicamente o comportamento de um determinado sistema físico. Este método permite que o componente em estudo tenha forma geométrica, propriedades mecânicas e condições de contorno quaisquer, ocorrendo uma semelhança entre o modelo do MEF e a situação física real.

Inicialmente, o MEF foi utilizado em cálculos estruturais e hoje é largamente aplicado em análises nas mais diversas áreas, objetivando uma solução numérica para um problema físico. Com o aumento da capacidade de memória e resolução,

bem como a redução de custos dos computadores, as aplicações do MEF se expandiram e se tornaram cada vez mais sofisticadas de acordo com Segerlind (1976). Algumas análises que podem ser executadas por softwares de elementos finitos são:

- Estática linear de tensões e deformações;
- Não linear de tensões e deformações;
- Dinâmica;
- Tensões devido ao carregamento térmico;
- Escoamento de fluídos;

O primeiro procedimento para a utilização do MEF é a obtenção do modelo que se deseja estudar. Esta etapa de modelagem consiste no desenho da estrutura a ser analisada e pode ser executada no próprio programa de elementos finitos ou importada de outro programa compatível. Em função do objetivo da análise, detalhes excessivos e supérfluos devem ser simplificados ao máximo, de modo que haja uma minimização do consumo de tempo de cálculo e espaço de memória do computador de acordo com Logan (1992).

Este modelo, então designado domínio, é totalmente subdividido em pequenos segmentos poligonais, denominados elementos finitos, com o propósito de, individualmente, calcular as tensões e deformações mais facilmente do que na estrutura inteira. Os elementos finitos são conectados entre si por nós, resultando em uma malha. Esses elementos podem se apresentar em formato triangular, quadrático, tetragonal ou hexagonal, sendo a localização dos nós definida através de um sistema de coordenadas bi ou tridimensionais, dependendo da forma geométrica do modelo e da análise que se deseja realizar.

Este processo de divisão do modelo é chamado de discretização segundo Cook (2002). As incógnitas fundamentais do problema se encontram localizadas sobre os nós. No caso de elementos estruturais, as incógnitas são os deslocamentos nodais, que uma vez determinados, permitem calcular as tensões e deformações ou a combinação de seus efeitos em qualquer ponto da estrutura. Definem-se essas incógnitas como os graus de liberdade de cada nó do modelo, o que permite a

determinação do estado e da posição dos nós, ou seja, a possibilidade que um nó tem de rotacionar ou transladar em relação a um eixo coordenado.

No caso de tensões e deformações cada nó possui até 6 graus de liberdade em relação ao sistema de coordenadas cartesianas globais, dependendo do tipo de elemento em questão.

O processamento do problema se dá através da formulação de uma matriz que indica as relações entre forças aplicadas e deslocamentos e que no caso de análises estruturais fica definida como matriz de rigidez. A solução do conjunto de matrizes é facilmente realizada pelo computador, sendo transparente ao usuário.

As propriedades físicas dos materiais estudados necessárias ao programa para a execução das análises linear-elásticas são o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) segundo Cook (2002).

De acordo com Anusavise (1998), o módulo de elasticidade descreve a relativa rigidez de um material, que é medida pela inclinação da curva da porção elástica de um diagrama tensão versus deformação. Ele representa a relação de tensões elásticas em função das deformações elásticas, sendo que quanto maior for o módulo de elasticidade para um determinado valor de tensão, menor será a deformação correspondente. A determinação do módulo de elasticidade ocorre através do ensaio de tração do material.

O coeficiente de Poisson (ν) pode ser definido como a razão entre a deformação lateral e a deformação longitudinal de um objeto quando aplicada uma força, ou seja, um alongamento em sentido longitudinal ocasiona, conseqüentemente, uma contração no sentido lateral e vice-versa, admitindo-se que o volume final do objeto deve permanecer o mesmo.

As condições de contorno requeridas pelo programa de elementos finitos são os carregamentos e as restrições que atuam no objeto que se pretende analisar. Os carregamentos definem as solicitações as quais a estrutura está sendo submetida (forças, pressões, cargas térmicas, entre outras), enquanto que as restrições definem quais são os pontos que devem ser vinculados para que o objeto não se mova, reproduzindo desta forma como a estrutura se relaciona com o seu meio de acordo com Logan(1992).

Na etapa de pós-processamento, o programa de elementos finitos permite visualizar a estrutura deformada. Além disto, através de uma representação gráfica colorida do modelo, são apresentadas também as regiões de maiores concentrações de tensão, que durante a vida útil da estrutura estarão mais propensas a apresentarem falhas. Os valores máximos e mínimos das tensões principais, tensões cisalhantes ou os valores calculados de acordo com os critérios de resistência de *Von Mises* são apresentados através de uma escala de faixas coloridas relacionada com o desenho.

As figuras numeradas de 1 a 5 apresentam, esquematicamente, as etapas envolvidas no procedimento de análise de tensões pelo método de elementos finitos.

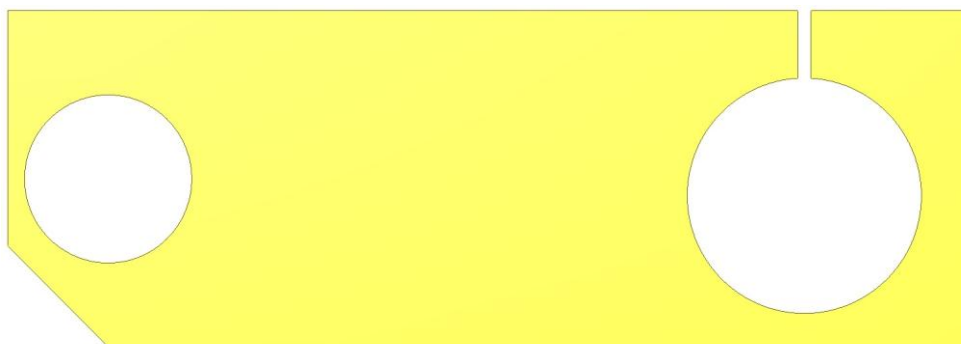


Figura 15 - Modelo a ser processado

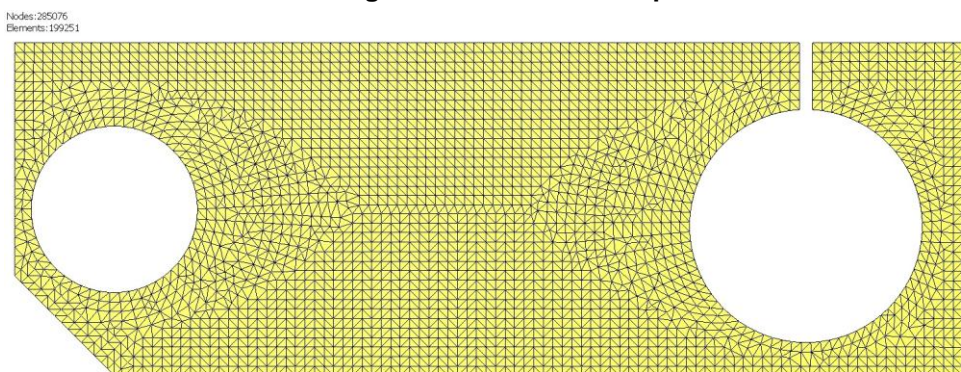


Figura 16 - Colocação da malha

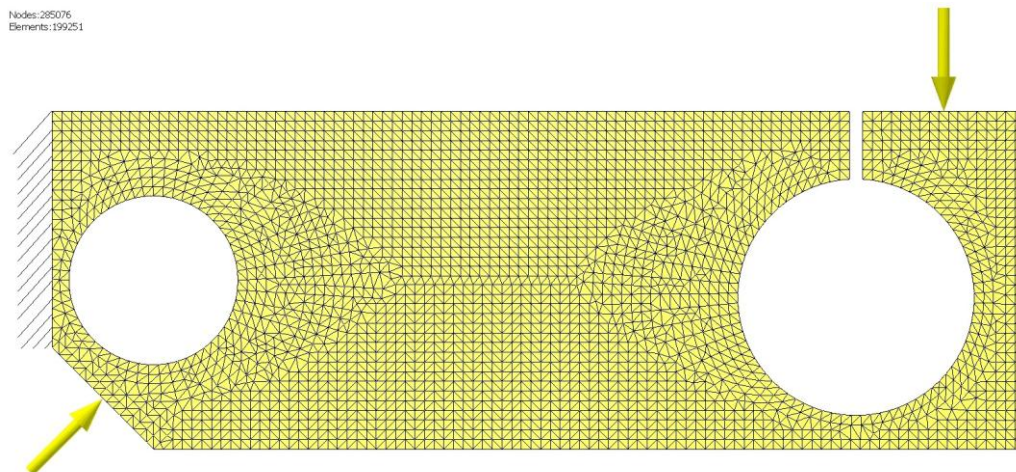


Figura 17 - Imposição das condições de contorno

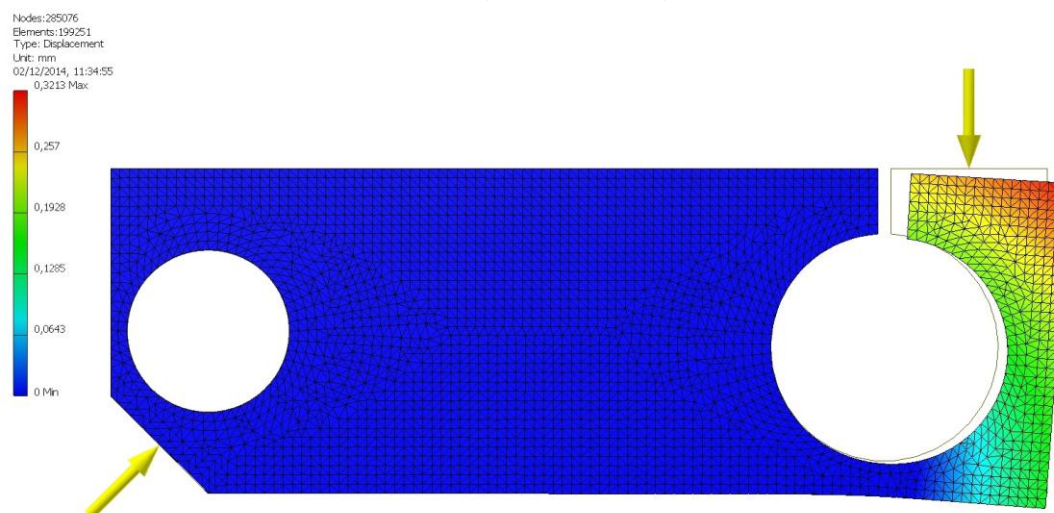


Figura 18 - Deformação resultante na estrutura

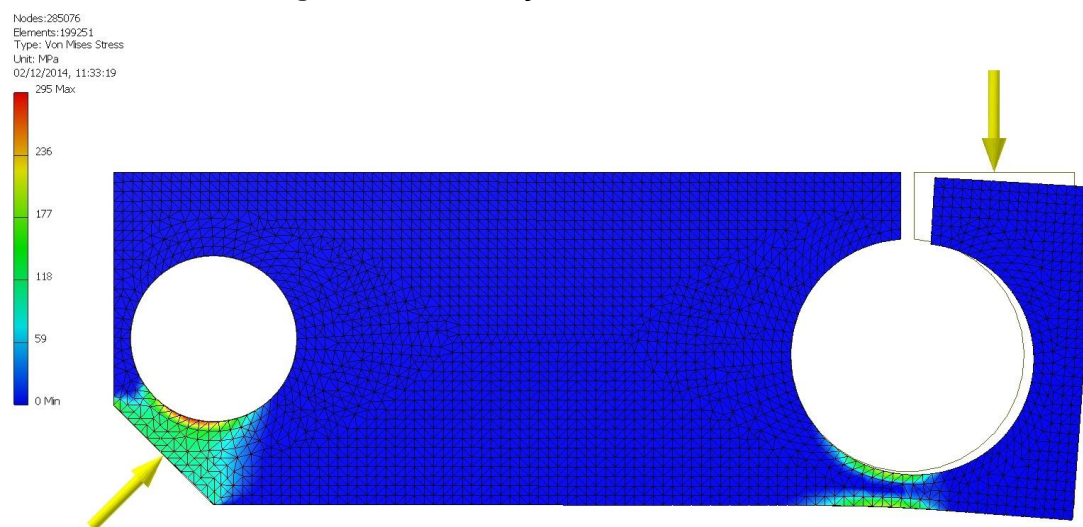


Figura 19 - Representação gráfica das tensões

As inúmeras vantagens da aplicação deste método contribuíram para seu extensivo uso.

Dentre elas podem ser citada:

- As propriedades do material em elementos adjacentes podem ser diferentes, permitindo que o método possa ser aplicado em objetos compostos de diversos componentes;

- O método não está limitado a geometrias simplificadas, podendo ser utilizado em modelos com contornos irregulares;

- O tamanho dos elementos pode ser variado, ou seja, os elementos podem ser expandidos ou refinados de acordo com a necessidade de análise do projeto;

- Condições de contorno descontínuas podem ser aplicadas facilmente por este método.

3 METODOLOGIA

Neste tópico serão abordados como será a execução do projeto, apresentando, explicando e descrevendo as ferramentas que serão utilizadas para atingir os objetivos planejados.

3.1 Descrição da Metodologia

Para o início do projeto, foi necessário definir o tipo de aparelho de musculação a ser utilizado para realizar os estudos. Vale ressaltar que não será o único aparelho no qual pode-se instalar o sistema de medição, mas mesmo assim, ele servirá de base para as dimensões de projeto da célula de carga como seu encaixe e a massa máxima para ser trabalhada nele disponível.

3.1.1 Aparelho de Musculação de Estudo

O aparelho de musculação de estudo será um aparelho do tipo “Multiestação”, a estação a ser estudada pode ser vista no centro da figura 5, possui 8 barras de ferro fundido de 5kg cada e 4 barras de 8kg cada carga, podendo totalizar em levantamento de até 72kgf pelo usuário, ressaltando que todos os exercícios realizados no aparelho têm como princípio a tração de um cabo de aço, onde em uma extremidade é fixada a uma carga e a outra é tracionado pelo usuário.



Figura 20 Aparelho Multiestação

O acoplamento da célula de carga no aparelho de musculação seria feito em série com os componentes da máquina, entre a extremidade do cabo a ser utilizada e a barra conforme a figura 16. O gancho do aparelho não gera limites significativos para o projeto do acoplamento, mas tanto o cabo de aço quanto o encaixe das barras exigem que o espaço que o gancho terá que passar não tenha diâmetro maior que nove milímetros.



Figura 21 – O gancho da máquina e a barra, montados e desmontados

3.1.2 Projeto da Célula de Carga

3.1.2.1 Definição do Formato

Como o funcionamento do aparelho em foco, assim como o da maioria dos aparelhos de musculação, se baseia na tração de cabos, foi pesquisado sobre o assunto e visto que as células de carga do tipo “Z” (figura 17) são as mais utilizadas para esse tipo de esforços. Portanto, será desenvolvida de uma célula de carga desse tipo.



Figura 22 - Célula de carga Tipo Z
Fonte: Alfa Instrumentos

3.1.2.2 Matéria Prima

A matéria prima utilizada para a fabricação da célula de carga deve nos permitir uma boa deformação e ao mesmo tempo ser leve, possuir uma grande resistência mecânica e um alto modulo de elasticidade. Com essas propriedades será possível desenvolver um protótipo compacto, porém com uma grande resistência a tração e com uma deformação que possa ser captada pelos sensores de deformação.

3.1.2.3 Modelagem em CAD

As células de carga serão modeladas utilizando a ferramenta SOLIDWORKS®, após essa etapa de modelagem, será feita a análise estrutural dos modelos com

forças estáticas utilizando a ferramenta ANSYS®. Na qual se tem o objetivo de definir a geometria e dimensões que melhor atenderão a necessidade da aplicação. Será realizada uma simulação de um ensaio de tração, como a carga máxima permitida pelo aparelho de musculação em estudo é de 64kg, considerando uma margem, o fundo de escala será de 100 kgf. As dimensões da célula de carga devem atender aspectos de resistência mecânica, adaptação do sistema de medição (sensibilidade e possibilidade de colagem dos extensômetros) e fixação no aparelho de musculação.

3.1.2.4 Colagem dos Sensores

A fidelidade das leituras efetuadas com extensômetros está intimamente relacionada com a perfeita aderência deste sobre a superfície em estudo. Toda e quaisquer imperfeições ocorridas durante a fixação dos extensômetros irão posteriormente gerar interpretações errôneas quanto as reais deformações ocorridas em uma determinada região.

Desta forma torna-se necessária uma apurada técnica de fixação dos extensômetros para se evitar eventuais erros posteriores na avaliação das deformações superficiais. Essa técnica começa com a preparação da superfície que consiste em vários procedimentos para a perfeita aderência até a colagem dos sensores.

3.1.2.5 Circuito Elétrico

A ponte de Wheatstone é utilizada para medir o desbalanceamento entre os extensômetros, causado pela deformação sofrida da estrutura. O desbalanceamento é medido pela variação de tensão e posteriormente transformado na grandeza desejada. Existem diversos tipos de configurações de ponte: $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{2}$ e ponte completa, sendo que no último se obtém um melhor resultado, pois possui elevada sensibilidade e uma compensação da temperatura.

O sinal de saída do extensômetro possui uma variação muito pequena, com isso é necessário amplificá-lo, para posteriormente efetuar a medição, por isso o circuito elétrico terá que possuir um amplificador para ponte completa.

3.1.3 Obtenção da Curva de Transferência da Célula de Carga

Após a definição do projeto final da célula de carga, será realizada a fabricação de um protótipo, no qual serão colados os extensômetros e será feita a obtenção da sua curva de conversão de sinal.

O levantamento da curva consistirá em submeter à célula de carga a pesos já conhecidos, assim que um peso conhecido for utilizado para tracionar a célula de carga, a tração imposta a ela irá gerar uma deformação captada pelos sensores gerando uma variação na resistência elétrica, e conseqüentemente um sinal de tensão diferente de zero, e para cada sinal de tensão irá existir uma correspondência direta para uma carga conhecida. Este método será repetido buscando reduzir qualquer divergência entre as cargas selecionadas no aparelho de musculação e a verdadeira carga transmitida para o usuário.

3.1.4 Realização dos ensaios

Posteriormente com o protótipo pronto, serão realizados ensaios no aparelho de musculação, a fim de observar a diferença entre carga selecionada pelo usuário e a esforço realizado pelo mesmo.

3.2 Justificativa da Metodologia

A escolha da ferramenta computacional ANSYS® e SOLIDWORKS®, se dá por duas razões: (i) sua grande utilização em empresas de análise numérica e estruturas pelo método dos elementos finitos, projetos mecânicos; (ii) por serem programas disponíveis na universidade para realizar as análises. O uso dos elementos finitos e de linguagens de programação no trabalho reflete a busca, por parte dos membros da equipe, por novos conhecimentos, além daqueles obtidos ao longo do curso de Engenharia.

3.3 Produtos do Projeto

Como resultado deste trabalho, espera-se obter um protótipo de um sistema de medição que possa medir forças de tração num aparelho de musculação, com um sistema de fixação que permita a utilização da célula de carga durante a atividade física no aparelho.

O projeto também resultará em uma Monografia e também numa oportunidade de produto, que posteriormente possa ser patenteada.

3.4 Validação do Projeto

A principal etapa da validação da célula de carga é a etapa referente ao levantamento da curva de transferência, descrita na seção 3.1.3, onde será garantido um menor erro na força mostrada no display.

Para confirmar a funcionalidade da célula de carga, a intenção da equipe é realizar, sem a participação de terceiros e com a supervisão de um professor de academia qualificado, testes utilizando a célula de carga no aparelho estudado. Lembrando que como a célula de carga não causa nenhuma alteração na dificuldade do exercício, uma pessoa que consegue realizar um exercício com uma determinada carga antes do acoplamento conseguirá levantar a mesma carga depois do acoplamento.

4 DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS

O presente capítulo visa detalhar os procedimentos realizados no desenvolvimento da célula de carga. Serão explicados todos os passos seguidos de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior.

4.1 Projeto da Célula de Carga

4.1.1 Material

Realizou-se uma comparação entre as ligas comerciais de alumínio, onde se comparava a liga de alumínio com a tensão de escoamento do material, dessa maneira tornou-se possível escolher um material com excelentes propriedades mecânicas e que se disponibiliza comercialmente. A partir de informações de catálogos de fornecedores, realizou-se essa comparação através de um gráfico onde era comparado a liga de alumínio pela tensão de escoamento do material, como pode ser vista no gráfico 1.

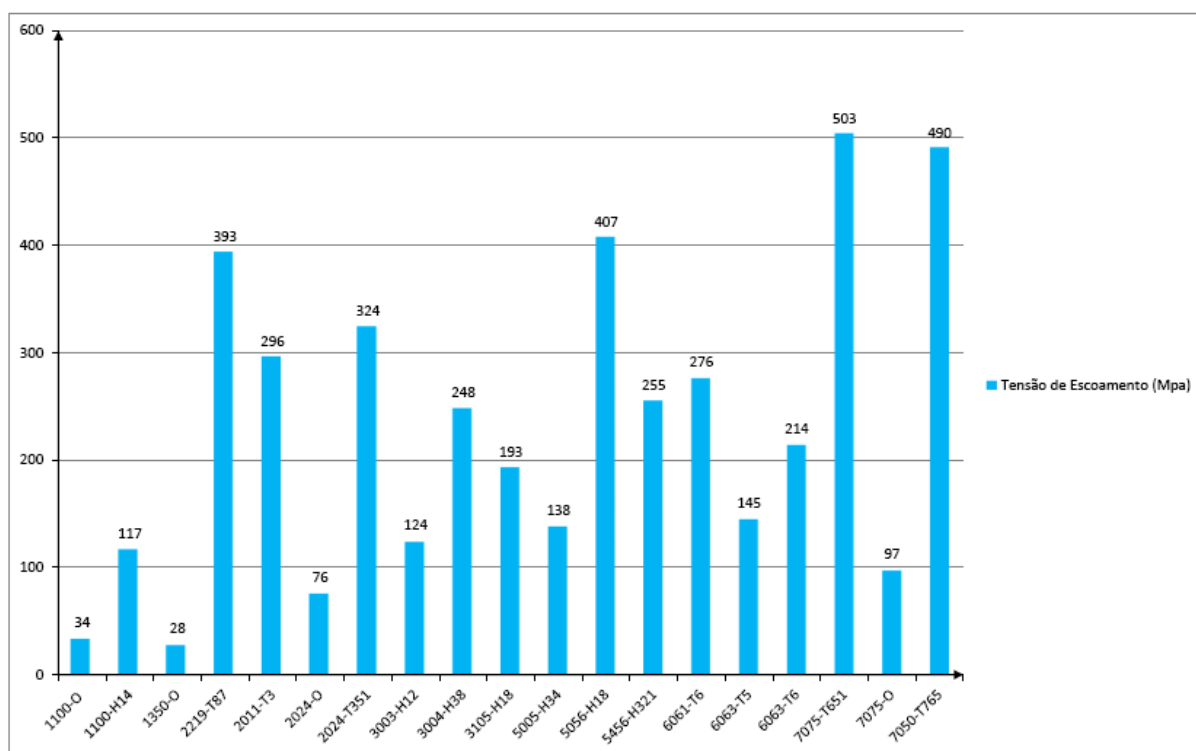


Gráfico 1 – Liga de Alumínio x Tensão de Escoamento

Dentre os materiais disponíveis, a escolha da liga de alumínio 7075-T651 se dá por ela dispor o maior limite de escoamento e de possuir uma excelente usinagem e estabilidade, assim como uma elevada resistência conforme mostrado na tabela 5, se trata de material leve se comparado com outros aços, e também possui um alto módulo de elasticidade se encaixando perfeitamente às necessidades para uma boa leitura dos extensômetros.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga de 7075-T651.

Propriedades Mecânicas	Unidade
Módulo de Elasticidade	71,7 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Limite de Escoamento	503 MPa
Limite de Resistência à Tração	572 MPa

Fonte: (ASM HANDBOOK, 2007).

Contudo o fornecimento dessa liga se dá através de chapas e placas laminadas, de dimensões pré-determinadas pelos fornecedores.

4.1.2 Formato da Célula de Carga

Como já mencionado anteriormente, optou-se pelo desenvolvimento de um formato do tipo “Z”, pelas qualidades que essa geometria nos traz, como apresentar uma elevada deformação mesmo quando cargas pequenas são aplicadas sobre ela, e essas deformações geradas possuem um caráter de tração e compressão conforme a figura 18, que serão captadas pelos extensômetros, e essas deformações nos possibilita um arranjo com 4 sensores, obtendo assim uma sensibilidade maior captada pelo transdutor.

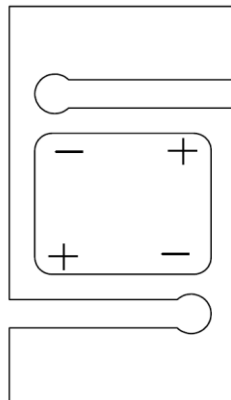


Figura 23 - Tração e Compressão na Célula de Carga

4.1.3 Modelagem em CAD

Este tópico traz os procedimentos e condições encontradas para o desenvolvimento e dimensionamento do modelo em CAD.

4.1.3.1 Limitantes

Antes de dar início a modelagem em CAD, realizou-se um levantamento sobre os limitantes do nosso projeto, como a espessura da matéria prima, fixação no aparelho de musculação entre outros, como será detalhado a seguir.

- **Matéria Prima** – Por se tratar de um produto comercial, a matéria prima é fornecida com dimensões pré-determinadas, com a espessura, e tamanhos de chapas padrões, e como um dos processos de fabricação é a eletroerosão, que basicamente recorta uma forma em uma chapa de acordo com o foi definido, sem alterar a espessura da chapa, é um limitante admissível, onde por motivo de reduzir custos, foi utilizada uma das espessuras de chapa disponibilizadas pelo fornecedor.

A figura 19 mostra a dimensão limitada pelo fornecimento da matéria prima.

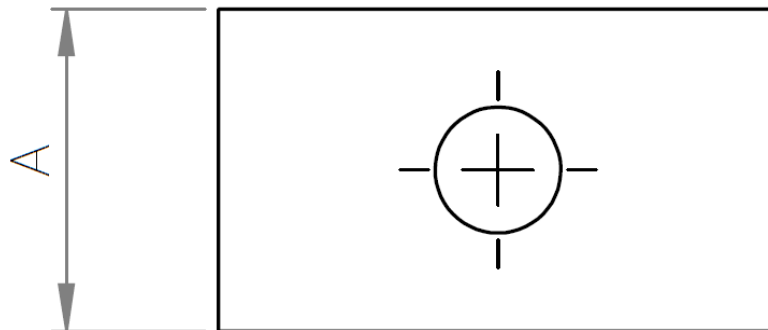


Figura 24 - Espessura da Célula de Carga

- **Fixação** – Como a adaptação no aparelho de musculação será realizada por meios de olhais de suspensão comerciais, tornou-se necessário realizar uma furação com rosca na geometria, para a fixação do mesmo, por este motivo foi adotada uma espessura de chapa dentre as fornecidas comercialmente, que possibilite esta operação, por isso a dimensão “A” na figura 19, deve possuir uma espessura mínima para que se possa realizar tal fixação, e a dimensão “B” na figura 20, deve ter

uma dimensão mínima para a total fixação com a rosca do olhal, tal dimensão deve ser consultada na norma DIN 580, que especifica as dimensões dos olhais e cargas suportadas por eles, dessa maneira pode-se seleccionar um olhal que melhor se encaixa em nosso projeto, de acordo com a figura 21.

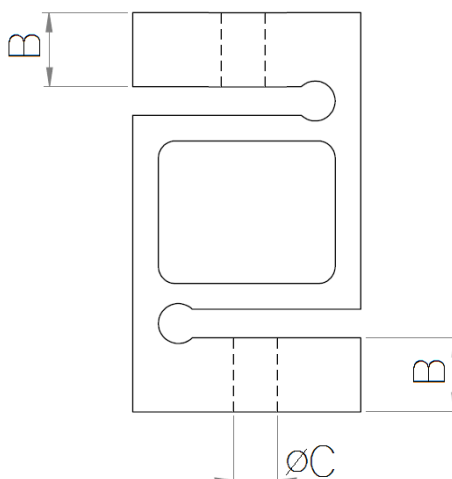


Figura 25 – Dimensão limitada pelo tamanho da rosca do olhal

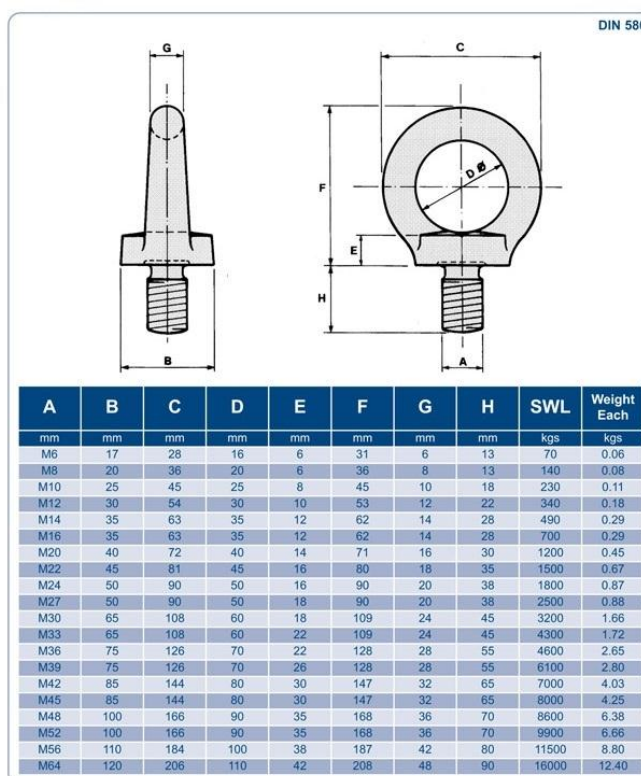


Figura 26 - DIN 580

E a dimensão “C” é definida de acordo com o olhal selecionado, que vai ser especificado de acordo com a carga suportada por ele quando estiver sendo aplicada uma carga da vertical, de acordo com a norma DIN 580 utiliza-se o olhal M8, que suporta até 140 kg, sendo que o máximo necessário é 100 kg, e tem suas dimensões especificadas na figura 21.

- Colagem dos sensores - convencionou-se que seria deixada no mínimo uma região livre de 25x25mm, para que se possam ser realizados os procedimentos para a colagem dos sensores, a figura 22 ilustra essas dimensões.

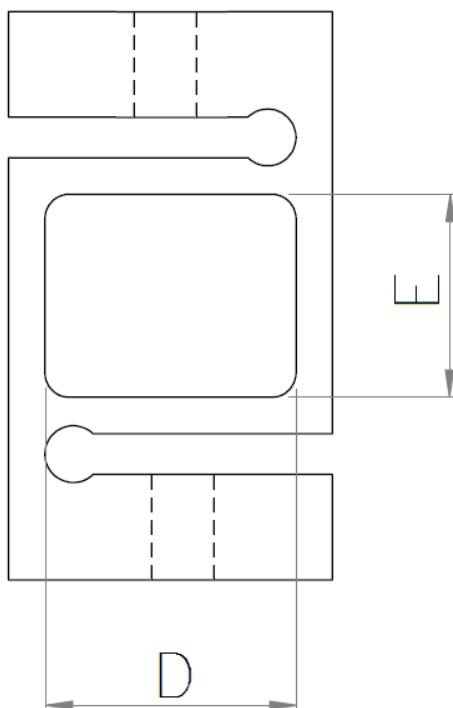


Figura 27 - Dimensões para colagem dos Sensores

Depois dos limitantes definidos foi gerados modelos em CAD de alguns protótipos, para realizar simulações que irão determinar as dimensões da célula de carga, para posteriormente realizar a sua fabricação.

4.1.4 Simulação

O método utilizado para a análise de elementos finitos é composta de três etapas: análise preliminar; pré-processamento e pós-processamento.

ANÁLISE PRELIMINAR

Na análise preliminar buscou-se prever o comportamento da célula de carga, isto é, determinar os esforços sofridos pela célula e definir as condições de contorno para o estudo.

A célula foi projetada para ser fixada em um aparelho de musculação em dois pontos, a união entre a célula de carga e o aparelho é feita através de olhais de suspensão comerciais, conforme representado na figura 23.

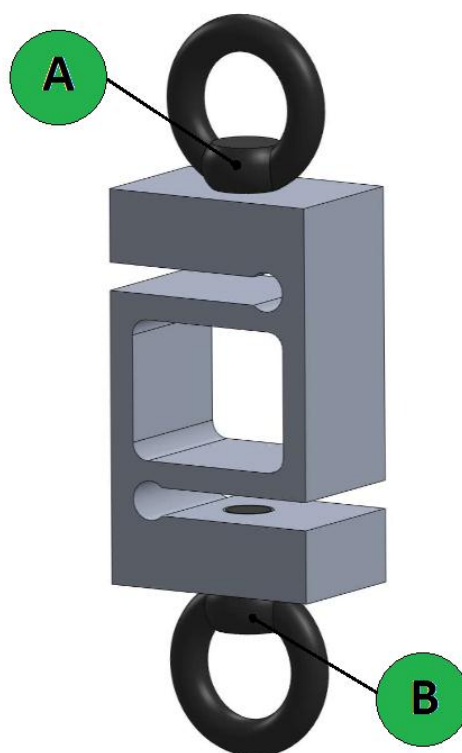


Figura 28 - Fixação da Célula de Carga

O ponto A é montado na extremidade do cabo de aço do aparelho, onde as cargas selecionadas pelo usuário são transmitida através de um conjunto de polias até o ponto A, onde ocorre a realização dos exercícios. O ponto B, mostrado na figura 22, na parte inferior da célula, é fixada na barra de carga onde o usuário efetivamente realiza os exercícios, gerando assim um estado de tração na célula de carga.

Para a simplificação da análise foi utilizada apenas a célula de carga, sem o sistema de fixação por olhais de suspensão, e aplica-se a carga no furo superior da

célula e fixa-se o furo inferior, a figura 24 ilustra esta simplificação, para realizar a simulação do esforço que a célula irá receber.

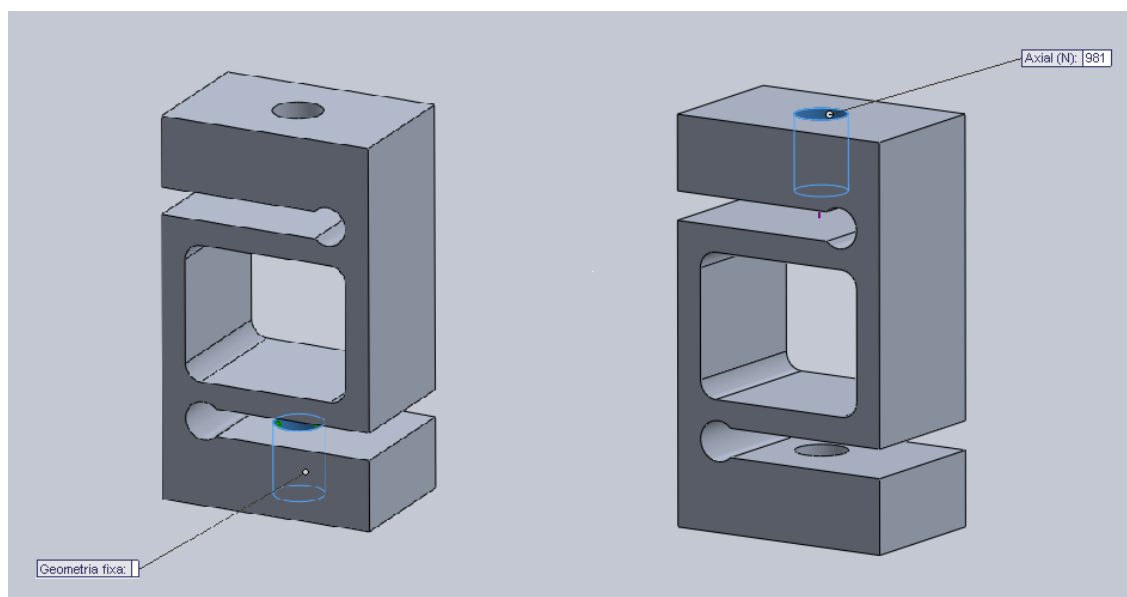


Figura 29 - Simplificação da Fixação

Para a realização da análise, a condição de contorno (crítica) foi definida para a situação em que a célula estivesse com a carga máxima selecionada no aparelho com, sendo essa carga de 100 kg e considerando uma aceleração gravitacional de $9,81\text{m/s}^2$, com uma força pontual aplicada no furo superior, com intensidade de 981 N. Outra condição de contorno teve que ser adicionada ao modelo, pois a espessura do fornecimento da matéria prima era limitada por valores fixos e como o processo de eletroerosão a fio poderá ser utilizada para a fabricação da célula, sendo que tal processo restringe a dimensão da espessura, sendo essa dimensão igual a do fornecimento da matéria prima.

PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta etapa foi realizada a preparação do modelo para a análise de elementos finitos. Esta abrange desde a criação da malha do modelo até a aplicação das condições de contorno do sistema. Ela foi realizada no modulo “*Mechanical*” do ANSYS utilizando os modelos exportados do CAD desenvolvidos utilizando a ferramenta SOLIDWORKS.

O primeiro passo foi à geração de modelos em 3D, partiu-se de uma geometria mais simples possível, sendo ela um retângulo solido com furos nas

extremidades, onde serão montados os olhais de suspensão, um rasgo de 25x25mm para colagem dos sensores e uma espessura fixa de acordo com os limitantes mencionados anteriormente. E simulados de acordo com as etapas a seguir. Desta maneira observou-se a variação da deformação e da tensão escoamento dos modelos, onde por sua vez foram sendo realizadas variações na geometria dos modelos, que devem nós permitir a colagem dos extensômetros em um local onde ocorra uma deformação significativa e que a geometria suporte a nossa carga crítica de 981 N, e que apresente um coeficiente de segurança igual 2, desta maneira o modelo deverá suportar a sobrecarga de 1962 N (200 Kg) sem se deformar plasticamente.

Posteriormente foi adicionado ao modelo o sistema de fixação no furo da parte inferior, e aplicada a carga de 981 N no furo da parte superior do modelo, para que o comportamento de estresse gerado na simulação seja de tração, que é por sua vez o esperado, sendo ilustrado na figura 25.

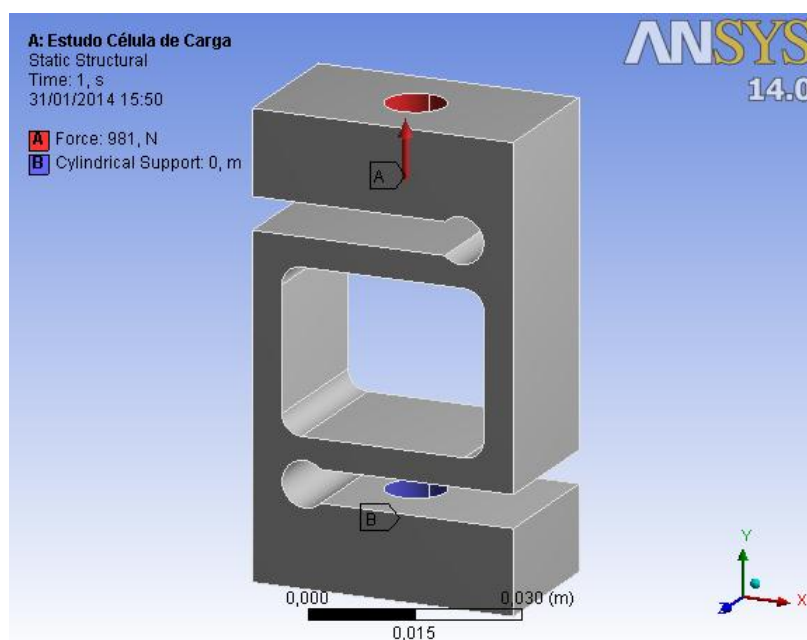


Figura 30 - Carga aplicada

Foram utilizados elementos sólidos para a geração da malha da estrutura, sendo necessária a aplicação de refinamentos para que o resultado convergisse. Os elementos utilizados são tetraédricos e a malha do modelo é formada por 101481

elementos 163380 nós. A figura 26 ilustra como estão arranjados os elementos no modelo.

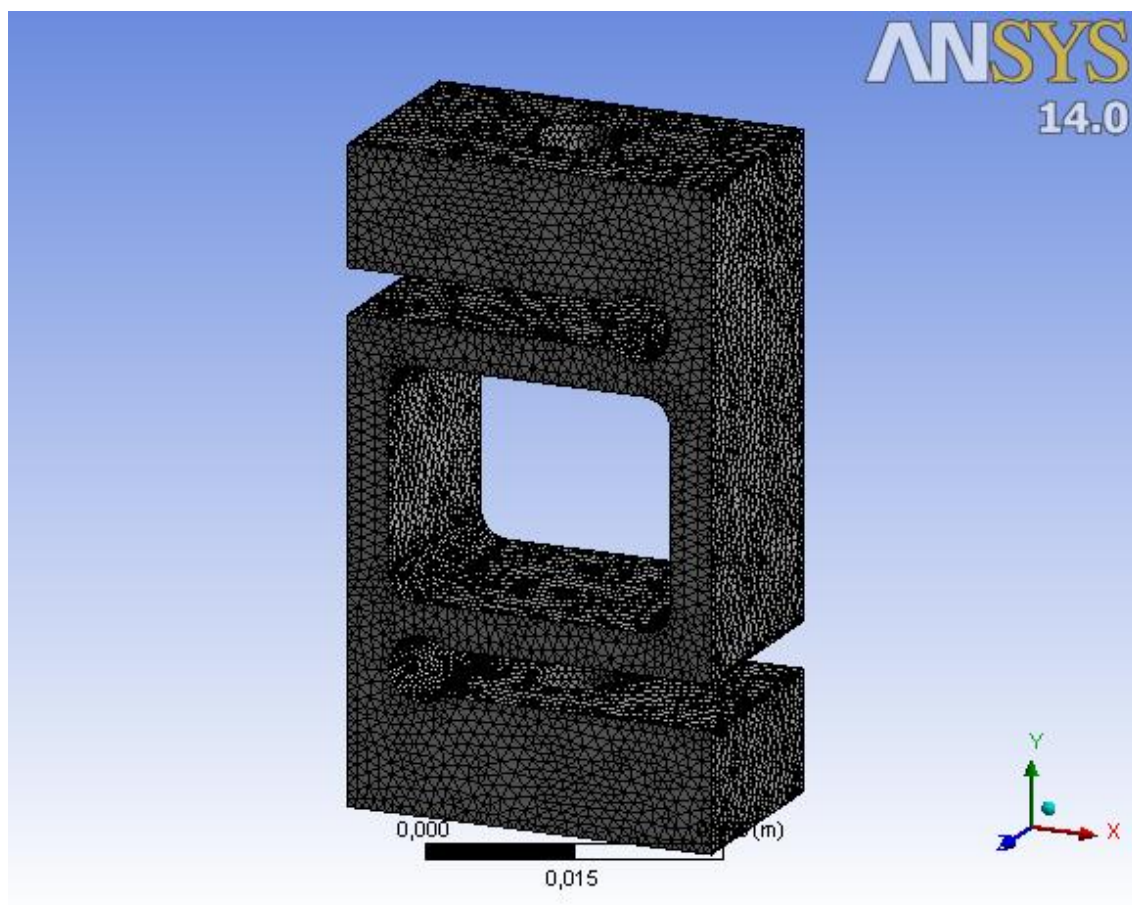


Figura 31 – Malha

PÓS-PROCESSAMENTO

Após a conclusão do método utilizado os resultados encontrados foram analisados. Uma das análises realizada foi quanto às deformações elásticas existentes no modelo e a tensão gerada nos mesmos.

Realizou-se esses procedimentos de simulação em vários modelos onde se variava algumas dimensões livres dos limitantes, até se chegar a uma geometria compacta e adequada para desempenhar a função, onde ela permite a colagem dos extensômetros, possui dois furos M8 onde serão fixados 2 olhais de suspensão, possui uma boa deformação na região da colagem dos extensômetros e resiste a força crítica sendo que essa força gere uma tensão de próxima de 250 MPa, dessa maneira resultando e um coeficiente de segurança igual a 2.

A figura 27 ilustra as dimensões que foram sendo alteradas de acordo com as simulações, até se chegar à geometria final.

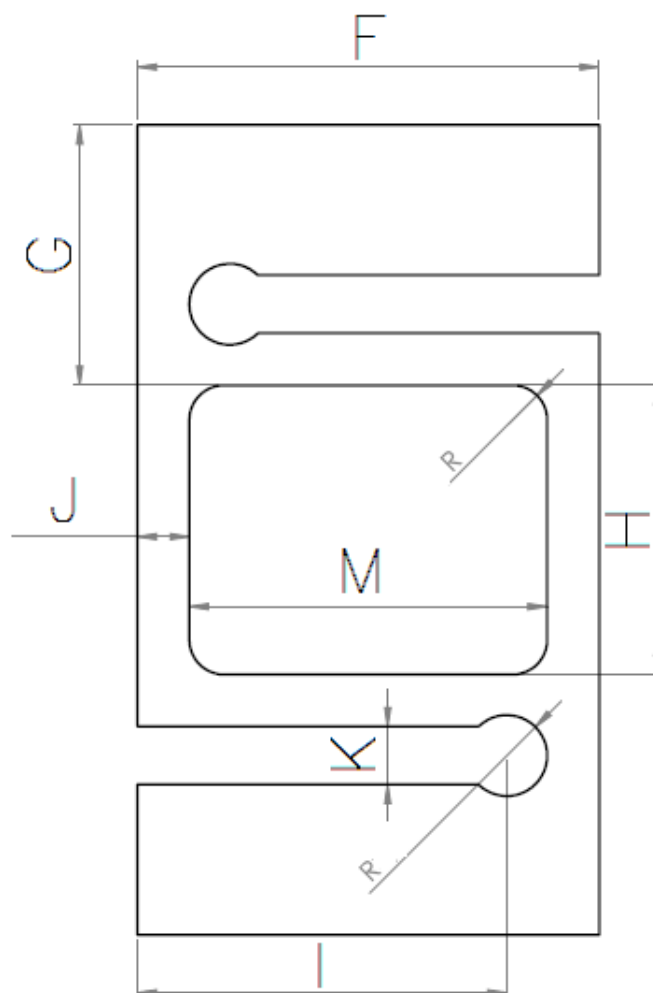


Figura 32 - Variação da Geometria

Depois de definida a geometria realizou-se estudos de orçamentos para realizar a fabricação da célula de carga.

4.2 Orçamentos

Apesar de proposta a fabricação por usinagem, ao dar início a etapa de fabricação da célula foi decidido que inicialmente seriam feitas solicitações de orçamentos de diferentes tipos para procurar menor preço e possivelmente menor prazo. Foram levantados alguns tipos de fornecedores tanto de usinagem e matéria

prima, que foram as propostas feitas anteriormente, quanto de peças prontas e serviço de eletroerosão a fio.

Fornecedores de peça pronta foram escolhidos devido a sua facilidade de conseguir matéria prima em menor escala e de fabricar diversos tipos de peças por preços competitivos

Prestadores de serviço de eletroerosão foram escolhidos uma vez que o serviço de eletroerosão é de difícil automação e de fabricação lenta, ou seja, não consegue produzir peças em alta escala o que gera redução nos custos de preparação de máquina, ou *set-up*. Também vale mencionar que há a presença de dois furos com rosca no projeto da célula de carga que são obrigatoriamente feitos por usinagem, como se tratam apenas de dois furos, foi disponibilizada uma furadeira de coluna sem acréscimo de custos.

Após listados fornecedores, foi feito contato com cada um deles através de e-mails e telefonemas para explicar o motivo do orçamento e para conhecer mais sobre as empresas. Grande parte dos fornecedores já era conhecida.

Os fornecedores se dividiram em:

- 4 fornecedores de matéria prima que trabalham com ligas de alumínio;
- 3 fornecedores de peça pronta
- 2 prestadores de serviço de usinagem
- 2 prestadores de serviço de eletroerosão.

Foi decidido esperar pelos orçamentos o tempo necessário para definir qual método seria mais vantajoso, sem exceder o prazo de duas semanas. O mais atrativo seria comprar a peça pronta por depender do prazo de apenas um fornecedor. O resumo dos orçamentos está disposto a seguir:

Tabela 4 - Orçamentos de matéria prima

Fornecedor; localização	Orçou? Sim/Não – motivo	Preço	Frete	Total
F. 1; São Paulo – SP	Sim	R\$ 11,03	R\$ 36,50 (frete mais rápido)	R\$ 47,53
F. 2; Curitiba – PR	Não – não dispunha da MP, propôs alternativa comercial inferior	-	-	-

F. 3; Curitiba – PR	Não – fornecedor industrial de maior escala, solicitou lote mínimo	-	-	-
F. 4; Curitiba – PR	Não – não respondeu no prazo	-	-	-

Tabela 5 - Orçamentos de peça pronta

Fornecedor; localização	Orçou? Sim/Não – motivo	Preço	Frete	Total
F. 1 – Fundição/usinagem; Curitiba – PR	Não – não possuía matéria prima, sem interesse de aquisição	-	-	-
F. 2 – Fundição/usinagem; Curitiba – PR	Não – não respondeu no prazo	-	-	-
F. 3 – Estamparia leve/usinagem; Curitiba – PR	Sim	R\$ 170,00	s/frete; possível buscar no local	R\$ 170,00

Tabela 6 - Orçamentos de serviço de usinagem/eletroerosão

Fornecedor; localização	Orçou? Sim/Não – motivo	Preço	Frete	Total
F. 1 – usinagem; Curitiba – PR	Sim	R\$ 170,64	s/frete; possível levar e buscar no local	R\$ 170,64
F. 2 – usinagem; Curitiba – PR	Não – não respondeu no prazo	-	-	-
F. 3 – eletroerosão; Curitiba – PR	Sim	R\$ 95,00	s/frete; possível levar e buscar no local	R\$ 95,00
F. 4 – eletroerosão; Curitiba – PR	Sim	R\$ 117,65	s/frete; possível levar e buscar no local	R\$ 117,65

4.2.1 Avaliação dos Orçamentos Obtidos

Apesar da praticidade de obter um orçamento de peça pronta, foi optado por comprar a matéria prima, cortar com eletroerosão e fazer furos c/rosca na furadeira de coluna disponibilizada.

Aparentemente o fornecedor de peça pronta terceirizaria o corte da célula para uma empresa que realiza corte com jato d'água, que apesar do bom acabamento, seria uma etapa do processo de difícil controle, uma vez que o fornecedor não

revelou o nome da empresa que efetuaria o corte. Além deste fato, o corte com jato d'água é caro e pode ter sido o fator encarecedor do orçamento. Um fato positivo de ter orçado a peça pronta juntamente a este fornecedor foi que o fornecedor apresentou uma opção de R\$ 27,00 para a compra de 100 unidades (R\$ 16,00 de fabricação e R\$ 11,00 de matéria prima)

Demais detalhes das escolhas feitas e dos fornecedores/prestadores de serviço contratados serão descritos nos tópicos abaixo.

4.2.1.1 Fornecimento de Matéria Prima

O alumínio liga 7075 T651 é uma matéria prima especial, de difícil aquisição e de custo elevado por quilo. Fornecedores que não adquirem matérias primas especiais para estoque dificilmente poderiam cortar um bloco de pequenas dimensões para item único por um preço acessível. Nesse caso, o fornecedor realiza análise de viabilidade e declina ou pede um lote mínimo. Por este motivo, foi obtida apenas uma resposta de orçamento, uma vez que foi deixado claro que não havia interesse na compra de um volume maior de peças.

O fornecedor contratado é conhecido justamente pela capacidade de fornecer ligas especiais de cobre, alumínio e titânio, amplo estoque e atendimento ágil. Compra a liga 7075 T651 em chapas de espessuras que variam entre 5,65 e 150 mm. Caso a espessura desejada não estivesse disponível, era oferecido serviço de usinagem para facear a chapa e obter a espessura desejada. A espessura de 26 mm era uma das disponíveis, dispensando usinagem.

Já era conhecido que independente do processo no qual a célula fosse ser fabricada, a matéria prima teria que ser solicitada com sobras de metais nas demais dimensões, uma vez que se desconhece a forma na qual o fornecedor de alumínio cortaria o bloco para enviar, portanto, as medidas de projeto foram consideradas com a adição de 10mm em cada lado, totalizando em um bloco de 50x80mm. 10mm é a quantidade de sobremetal que um prestador de serviço de eletroerosão solicita para que o serviço seja executado com maior confiabilidade. A usinagem requer medidas de menos de 1mm ou pelo menos décimos acima das tolerâncias de corte, que eram desconhecidas, mas como o fator encarecedor da compra do alumínio do fornecedor escolhido seria o frete, não foram solicitados dois orçamentos distintos.

A matéria prima foi recebida dentro do prazo pactuado em perfeito estado, identificada e com as medidas anotadas, conforme Figura 28.



Figura 33 – Matéria Prima

4.2.1.2 Prestação de Serviço de Eletroerosão

Como para o processamento da peça foram obtidos no total três orçamentos, foi possível ser mais seletivo entre as escolhas. Após contato por telefone, foi feito proveito de todos os fornecedores serem localizados em Curitiba e foi agendada uma visita com o que se dispôs a efetuar o serviço por menor preço. Por telefone também foi solicitado informações sobre a marca e o modelo da máquina utilizada por eles, de forma com que foi possível fortalecer a confiança no serviço prestado. Felizmente essa empresa cujo orçamento foi mais barato, apesar de ser situada em um imóvel simples, possuía uma máquina Fanuc Robocut Alfa 1iC muito bem cuidada e o operador demonstrou muito conhecimento, se dispondo a explicar e mostrar a máquina detalhe por detalhe. Graças a essa visita, foi decidido efetuar a compra e não visitar os fornecedores restantes.

O corte da peça foi efetuado em três dias úteis, sem atraso e cumpriu as expectativas. Detalhes do processo de eletroerosão a fio serão apresentados na seção 4.2.1.

4.3 Fabricação

Nesse subtópico, serão descritos os procedimentos feitos na fabricação da célula de carga para garantir sua qualidade e seu funcionamento.

4.3.1 Eletroerosão a Fio

A eletroerosão a fio se baseia na destruição de partículas metálicas por meio de descargas elétricas. O processo consiste em um fio ionizado atravessando a peça deionizada em movimento constante que causará descargas elétricas, cortando o material sem contato físico. O corte é otimizado por CNC, permitindo cortes com exatidão que independem da dureza superficial da peça. O sistema é envolto em fluido dielétrico, que tem como função controlar a potência de abertura da descarga elétrica, controlar as impurezas e refrigerar todo o sistema.

A máquina utilizada pelo prestador de serviço contratado é uma Fanuc Robocut Alfa 1iC. É composta de um corpo rígido, uma mesa móvel, válvulas para o líquido dielétrico, desbobinador para o fio de latão, um reservatório para o fio usado e o sistema CNC.



Figura 34 – Fanuc Robocut Alfa 1iC
Fonte: Catálogo do Fabricante

A função do operador é realizar o acoplamento da peça e a programação de todo o corte por CNC. Além das duas funções citadas anteriormente, o operador precisa suprir a limitação da eletroerosão, que é a incapacidade de fazer um furo, portanto, para fazer aberturas/janelas como a localizada na região central da célula de carga, é necessário abrir um furo utilizando outro processo, no caso da célula, furadeira de coluna. Com a furação feita, o sistema desbobinador é capaz de romper o fio que está sendo desbobinado, inseri-lo em uma cavidade e tornar a desbobinar, sem ser preciso parar a máquina. Paradas de máquina só necessitam ser feitas caso seja necessário alterar a fixação da peça.

O acoplamento da peça é feito na mesa móvel, que se movimenta precisamente de acordo com a programação enquanto o fio é desbobinado. A suavidade de seus movimentos é garantida devido ao controle automatizado da máquina do fluxo de fluido dielétrico, que regula o fluxo de acordo com a quantidade de impurezas gerada, calculada por parâmetros inseridos na programação inicial.

4.3.2 Furação e Rosqueamento

Para realizar operações de furar ou roscar, podem ser utilizadas diversas máquinas de usinagem convencionais, no caso da célula de carga fabricada, foi utilizada uma furadeira de coluna Kone Z 5050 A.



Figura 35 – Furadeira de Coluna Kone Z 5050 A
Fonte: Catálogo do Fabricante

Para produção em série de volumes altos de peças, é comumente utilizado um dispositivo para acoplar a peça, de forma que a centragem seja facilitada e reduza o risco de falhas de posicionamento causadas por distração do operador. No caso da fabricação de apenas uma peça, é necessário optar por métodos artesanais. Inicialmente, foram marcados os dois locais de furação, que são localizados exatamente nos centros das faces superior e inferior da célula. Posteriormente, foi feito o acoplamento da célula com uma das faces voltadas para cima, inserida a ferramenta de furar, feito o pré furo, trocada a ferramenta para a de roscar, feita a rosca e, em seguida, alterada a fixação para a outra face e repetido o processo.

Como a furadeira utilizada possui sistema de avanço e rosqueamento automáticos a maior parte do tempo gasto nesse processo foi o posicionamento das peças para garantir o posicionamento correto dos furos.

4.3.3 Colagem dos Extensômetros

A escolha do extensômetro utilizado na célula de carga foi feita, entre alguns modelos disponíveis no almoxarifado de metrologia da universidade. A intenção inicial era realizar uma escolha baseada nas propriedades do extensômetro, no seu tamanho, modelo e material, considerando que os extensômetros seriam comprados novos. Uma vez que os extensômetros fornecidos pela instituição estavam armazenados no almoxarifado, foi necessário alterar levemente o critério de escolha, acrescentando a necessidade de avaliar o estado dos extensômetros. Os extensômetros utilizados foram extensômetros Kyowa KFN-5-350-D20-11 de níquel-cromo, com resistência de $349,1 \pm 1 \Omega$, revestidos com poliamida.

Para minimizar o máximo possível os efeitos que podem afetar a medição, é necessário adotar medidas que favoreçam a colagem ideal:

Depois de identificados os pontos de colagem, foi realizada a limpeza das regiões inicialmente com lixas para remover óxidos e saliências e em seguida álcool isopropílico para eliminar resíduos oleosos da superfície.

Em seguida foram feitas marcações de leve com riscador, para localizar o local exato de colagem. Após essa etapa, novamente foi utilizado o álcool isopropílico na região, utilizando gaze nele embebida, friccionando várias vezes em uma única direção até que a gaze continuasse branca após passada sobre a superfície.

O extensômetro a ser colado era preparado com fita adesiva transparente. A fita foi colada em contato com a proteção de poliamida, deixando a parte de níquel-cromo voltada para fora. Esse procedimento é feito para que na hora da colagem não seja feito contato com os dedos no extensômetro em momento algum.

Com a limpeza feita e o extensômetro pronto, foi feito o posicionamento do extensômetro com muito cuidado usando como referência as marcações. Nessa etapa a função da fita adesiva é permitir que o posicionamento seja visível a olho nu e possa ser corrigido simplesmente descolando e colando novamente. Após encontrada a posição ideal, (Fig. 31.a) um dos lados da fita deve ser melhor colado e o outro levantado, deixando a superfície do extensômetro voltado para cima (Fig. 31.b)

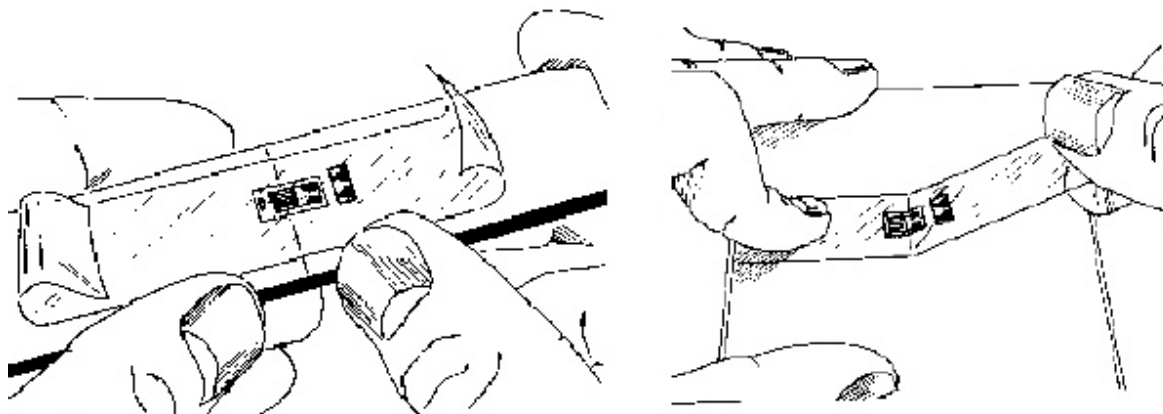


Figura 36 – Extensômetro posicionado (a); Descolagem de um dos lados da fita (b)
Fonte: Extensometria – Manual Prático

Em seguida, foi depositada loctite na superfície do extensômetro (Fig. 31.a) e novamente, este foi posto em contato com a superfície da peça de forma que a colagem não perdesse a posição referenciada (Fig 31.b). Foi necessário exercer pressão sobre o extensômetro durante o tempo de cura, para eliminar as possíveis bolhas de ar que possam ficar sob o extensômetro. Após o processo de cura estar completo, a fita adesiva foi removida. Esse processo foi repetido para todos os quatro extensômetros.

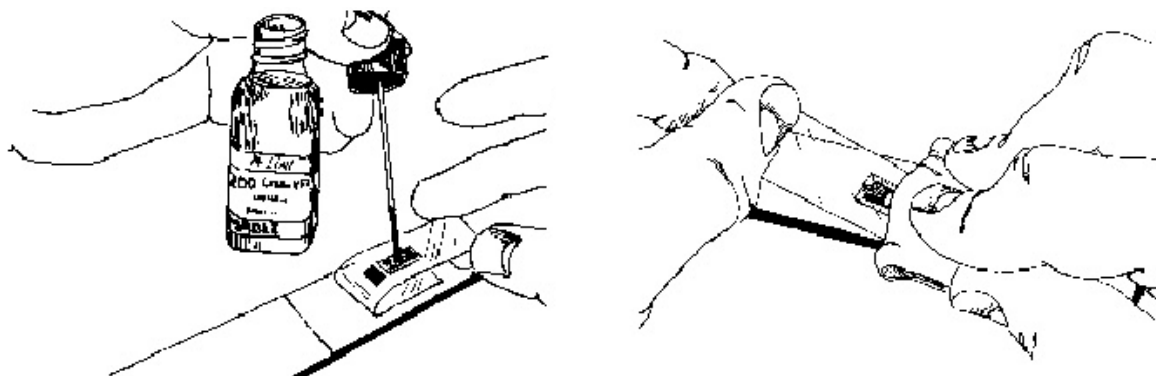


Figura 37 – Aplicação de loctite (a); Colagem definitiva do extensômetro (b)
Fonte: Extensometria – Manual Prático

4.3.4 Circuito Elétrico

A célula de carga, por ter seu princípio baseado em *strain gages*, onde a deformação no comprimento da resistência elétrica se dá de forma micrométrica, o conseqüente valor desta resistência é muito pequeno, deixando assim o sistema com baixa sensibilidade.

Para que se consiga aumentar a excursão deste valor de resistência elétrica, é utilizada a Ponte de Wheatstone, onde os próprios strain gages da célula de carga a compõe. A Figura 8 ilustra a configuração da Ponte de Wheatstone.

Cada resistência que compõe a ponte possui um valor aproximado em repouso de $349,1 \pm 1 \Omega$.

Mesmo submetendo a ponte a uma diferença de potencial de 12 V, o resultado de tensão correspondente à deformação ao se aplicar 627,8N (64kg) não excede um potencial de ± 7 mV. Considerando que este potencial é inferior à resolução do conversor analógico digital (AD) escolhido, pois:

Adicionalmente, uma tensão de saída nas células neste nível tão baixo, a relação sinal/ruído é muito pobre, resultando em um ruído muito maior que o próprio sinal dentro dele, o que mascara a aquisição no conversor AD, mascarando a realidade na aquisição do mesmo.

Desta forma, há necessidade de compor um conjunto de circuitos eletrônicos que amplifiquem o sinal proveniente da Ponte, bem como um conjunto de filtros que eliminem parte do ruído provocado pelo próprio conjunto de strain gages. A Figura 33 a seguir ilustra o circuito idealizado.

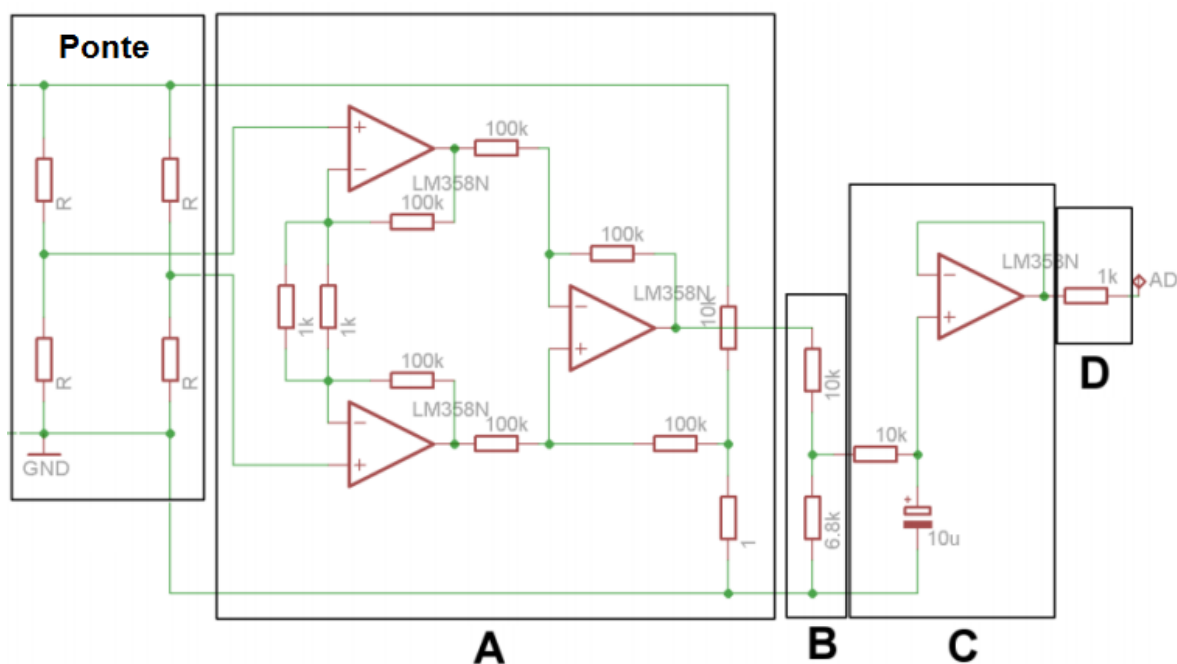


Figura 38 – Circuito Eletrônico

Após a deformação do strain gage na Ponte, o sinal entra no bloco A da figura. Este bloco representa um amplificador de instrumentação. Esta configuração eletrônica é utilizada em quase todas as balanças disponíveis no mercado, exatamente porque utilizam células de carga, onde o sinal possui um valor muito baixo e a relação sinal ruído é muito crítica.

Este circuito é de montagem crítica, pois o balanceamento dos resistores de 100 k Ω é muito importante. Por este motivo, são utilizados resistores comerciais, onde o erro máximo é de $\pm 1\%$. O ganho de tensão é de 401, definido através dos dois resistores de 1 k Ω em paralelo. Este ganho já consegue elevar o sinal da célula de 7 mV para 2,8 V no fundo de escala previamente.

Na saída do amplificador de instrumentação, identificada com a letra B na figura 33, foi colocado um divisor resistivo para uma discreta redução do sinal de saída, evitando a saturação da entrada no conversor AD do Arduino, pois está limitado em 3,3 V. Esta medida é apenas preventiva, pois o ganho do amplificador de instrumentação não deve chegar aos 3 V.

O próximo passo é eliminar os ruídos provenientes do ambiente externo, tal como a própria fonte de alimentação e seu cabeamento (no caso a bateria e seus cabos de ligação, que mesmo blindados captam o ruído externo), bem como rede elétrica externa em bancada e ruído interno dos componentes eletrônicos.

O filtro idealizado é identificado na parte C da figura 33. Trata-se de um filtro passa-baixas, de primeira ordem, com corte em 1,13 Hz, já condicionando o sinal para amostragem. A frequência de amostragem projetada é de 1 kHz, portanto à taxa de Nyquist, 500 Hz, a atenuação deverá ser de aproximadamente 53 dB. O propósito desta seção é reduzir o ruído de alta frequência do sinal antes que seja passado ao conversor analógico-digital.

Em D é colocado um resistor em série com a saída do módulo de amplificação e filtragem. Este resistor tem a finalidade de acoplar a saída do filtro à entrada do conversor AD interno ao microcontrolador Arduino. Apesar de não haver instruções quanto à sua necessidade, notou-se experimentalmente que há uma significativa redução nos valores de conversão errôneos quando se utiliza esta resistência e, portanto, este é o seu propósito. A documentação do microcontrolador define uma resistência máxima de 7,5 k Ω para este valor.

4.3.5 Programação

Como na prática o ruído ainda estava presente apesar de se tomar os devidos cuidados em cada etapa de fabricação, foram utilizados recursos eletrônicos para refinar ainda mais o sinal obtido. Cada valor mostrado é o resultado da média entre 10 leituras e a taxa de valores obtidos é um valor a cada 100 milissegundos.

Para criar a possibilidade de transformar a tensão (V) obtida em uma força (N) é necessária fazer uma conversão. Como na teoria a relação entre ambas grandezas se comportaria de forma linear, bastaria multiplicar os valores em V por uma constante a ser calculada.

Foi decidido criar um programa em linguagem DELPHI para facilitar a etapa de conversão de sinal em força e, também, para agilizar a amostragem do produto final.

O programa inicial, utilizado para tal procedimento incluiu a função “Zero” e a função “Calibrar”, onde inicialmente seria posta a célula em repouso para zerar e eliminar o offset selecionando a função “Zero” e, em seguida, seria inserido um peso conhecido, digitado seu valor no espaço disponível a ele e seria selecionada a função “Calibrar” para inserir o segundo valor na equação calculada pelo programa. Com os dois valores inseridos, o programa seguiria o simples raciocínio da função de reta, onde bastam dois valores para se obter qualquer valor.

O programa final passou de um programa de inserção de dados para um programa de simples amostragem. Ele já recebe como entrada em seu código a equação da reta calculada com o programa inicial e não requer que nenhum valor seja inserido. Nele, são disponíveis dois mostradores, um para o peso (kg) e o outro para a força (N). O valor de força também é amostrado temporalmente em um gráfico de força por tempo, onde o intervalo mostrado é de 10 segundos, equivalente a 100 valores, uma vez que a taxa de amostragem é uma a cada 100ms.

4.4 Obtenção da Curva de Sinal

Para a obtenção da curva de sinal desta célula de carga, a célula de carga foi submetida a pesos já conhecidos, utilizando pesos da própria academia, como dito anteriormente assim que um peso conhecido for utilizado para tracionar a célula de carga, a tração imposta a ela irá gerar uma deformação captada pelos sensores

gerando uma variação na resistência elétrica, e conseqüentemente um sinal de tensão diferente de zero, e para cada sinal de tensão irá existir uma correspondência direta para uma carga conhecida.

Como os pesos disponíveis são blocos de ferro fundido de 5 kg, e estavam disponíveis 17 blocos com 5 kg cada um, a obtenção da curva de sinal consiste em suspender de 5 em 5 kg na célula e medir a tensão de saída para cada carga aplicada, assim sendo possível gerar um gráfico de força por tensão e correlacionar estas informações, de maneira que após este procedimento torna-se possível aplicar uma força desconhecida e correlacionar com o valor calculado a partir da tensão.

A figura 34 ilustra a montagem para o procedimento, onde se a célula de carga foi fixada pelos olhais, e um dos olhais na parte superior da célula foi preso por uma corda onde por sua vez foi presa a uma viga suspensa, para deixar a célula totalmente suspensa, e o outro olhal na parte inferior foi fixado num gancho onde por sua vez se suspendia as barra de ferro fundido de 5 kg cada, o procedimento consistiu em ir suspendendo primeiramente 5 kg, depois 10 kg e de 5 em 5 kg até 85 kg, que era a maior carga conhecida disponível, para cada carga conhecida suspensa era medida a tensão de saída do circuito.



Figura 39 - Montagem para Levantamento da Curva de Transferência

A figura 35 ilustra a medição da tensão, com uma carga de 40 kg suspenso na célula, a tensão de saída do circuito foi de 420 mV.

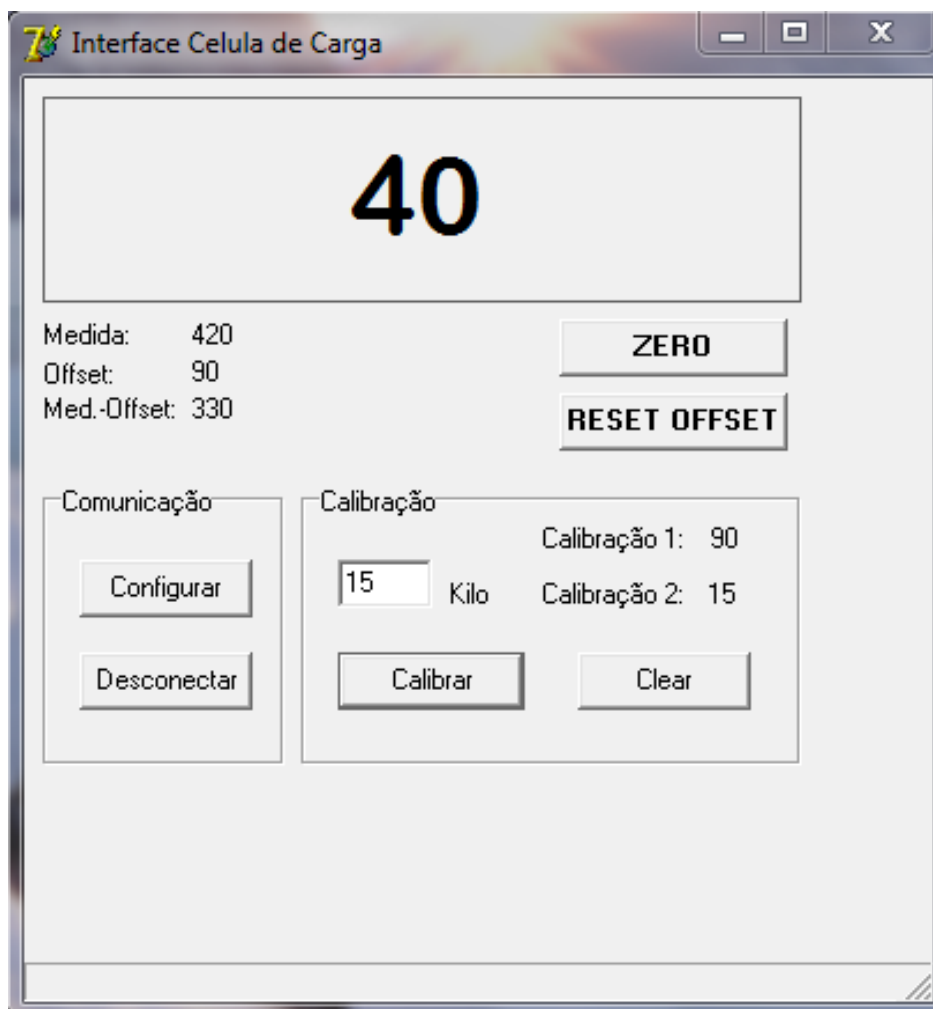


Figura 40 - Medição de Tensão

Foi realizado este procedimento de medição para todas as cargas até 85 kg, para posteriormente gerar um gráfico de V por Kg. Depois de realizar o equacionamento da célula de carga realizou-se ensaios no aparelho de musculação multiestação, para observar e avaliar a variação da carga durante a realização dos exercícios e sua proximidade com o esperado.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à simulação no qual foram obtidas as deformações ocasionadas pelo carregamento aplicado. É também apresentado o protótipo de acordo com o a geometria simulada. Finalmente, os resultados dos ensaios realizados no aparelho de musculação.

5.1 Formato concebido

Após a conclusão do método utilizado os resultados encontrados foram analisados.

Uma das análises realizada foi quanto às deformações elásticas existentes no modelo. A figura 36 mostra as deformações encontradas no local onde os extensômetros irão ser colados, essa região apresentou uma deformação média de 1224,6 μ strain.

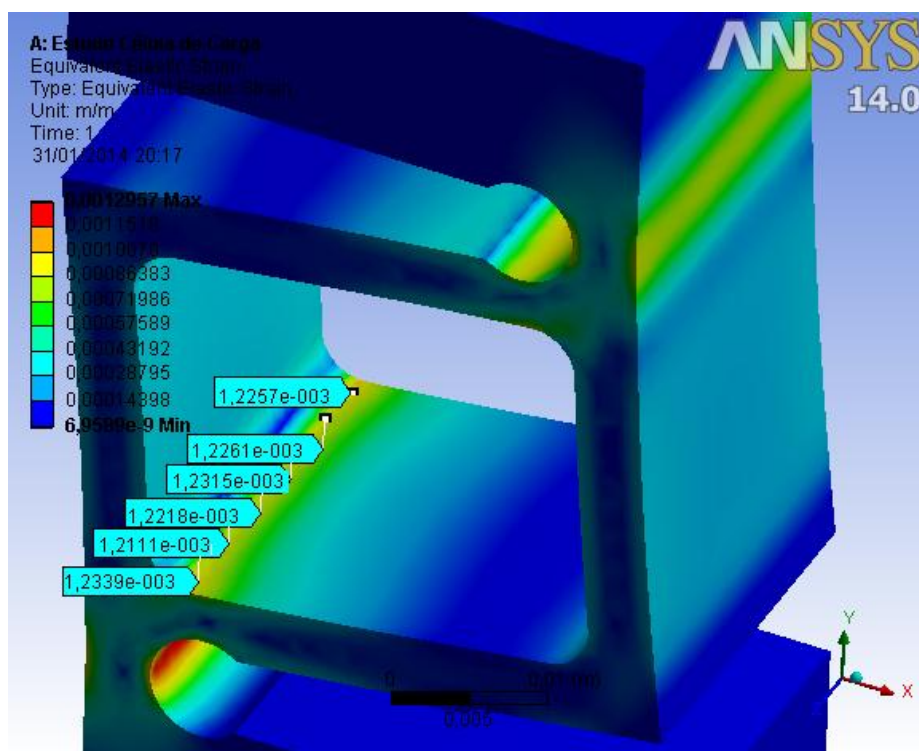


Figura 41 – Deformação

Os resultados das tensões foram calculados através da equação de Von Mises. A Figura 37 mostra que em nenhuma região do modelo as tensões excedem o limite do material de 503 MPa, e sendo o valor máximo de tensão de 254,22 MPa.

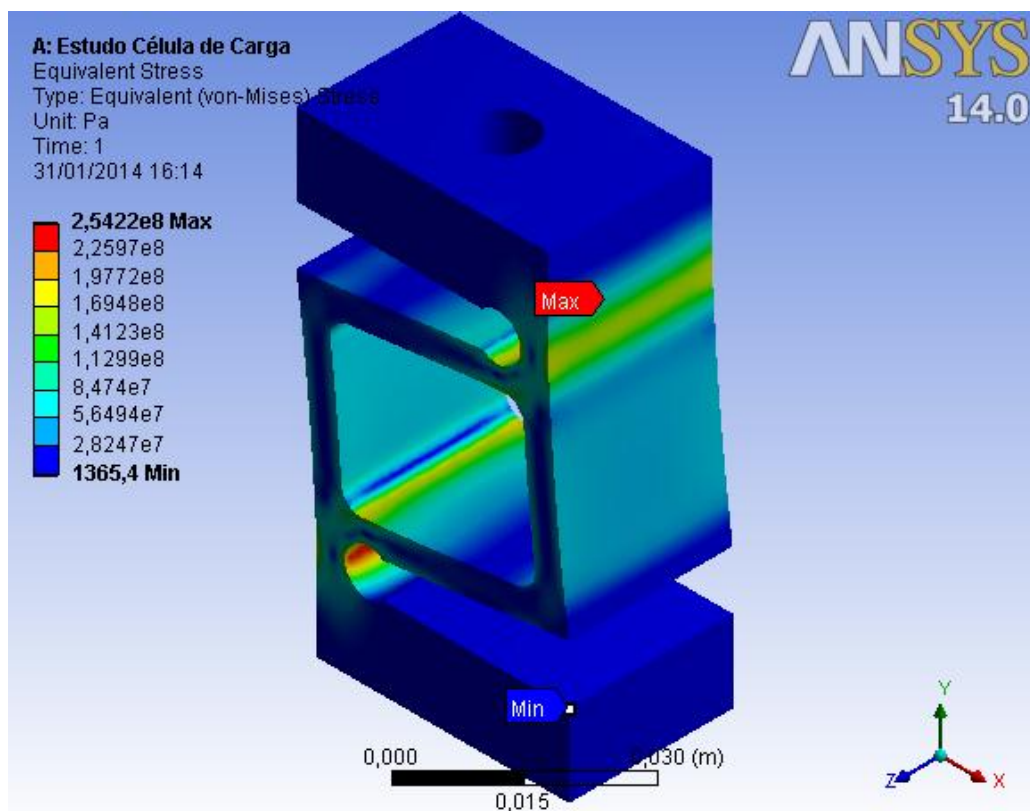


Figura 42 – Tensão

O modelo do protótipo definido pela simulação é uma geometria compacta e adequada para desempenhar a função, porque ela permite a colagem dos extensômetros, possui dois furos M8 onde serão fixados os olhais de suspensão, possui uma boa deformação na região da colagem dos extensômetros e possui um coeficiente de segurança igual a 2, ou seja possui uma sobre carga de 100% da carga máxima a que foi projetada.

A figura 38 nos mostra as dimensões finais da geometria final da célula de carga.

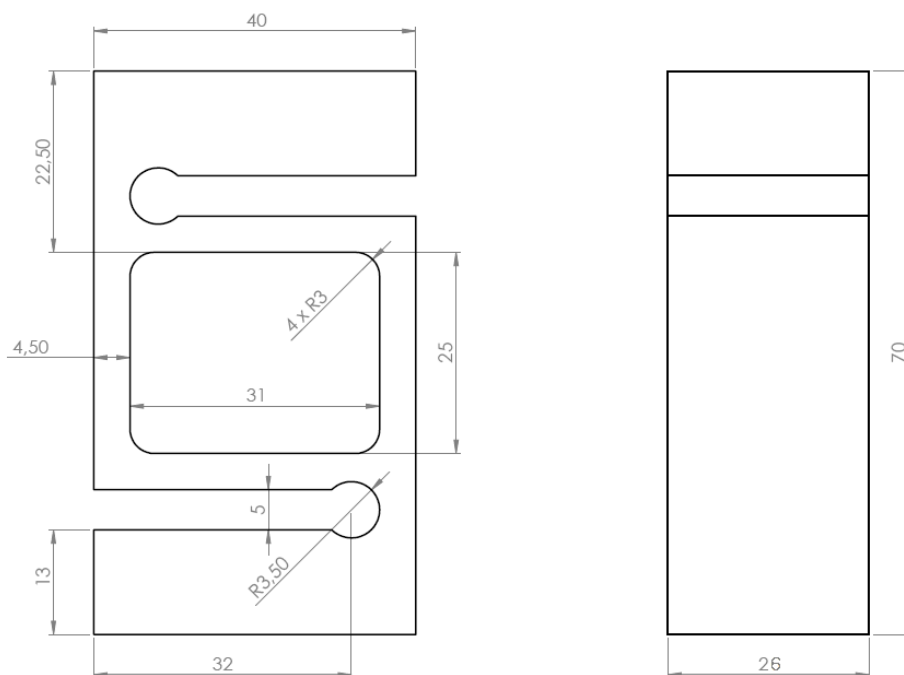


Figura 43 - Dimensão Final da Célula de Carga

Após o detalhamento da célula de carga e aquisição da matéria prima, realizou-se a fabricação da mesma, pelo processo de eletroerosão, a figura 39 mostra a célula após o processo de eletroerosão, ainda sem os furos M8 para os olhais.



Figura 44 - Eletroerosão da Célula de Carga

Posteriormente realizou dois furos M8 na célula de carga para fixação dos olhais de suspensão, a figura 40 ilustra a célula de carga após este procedimento.

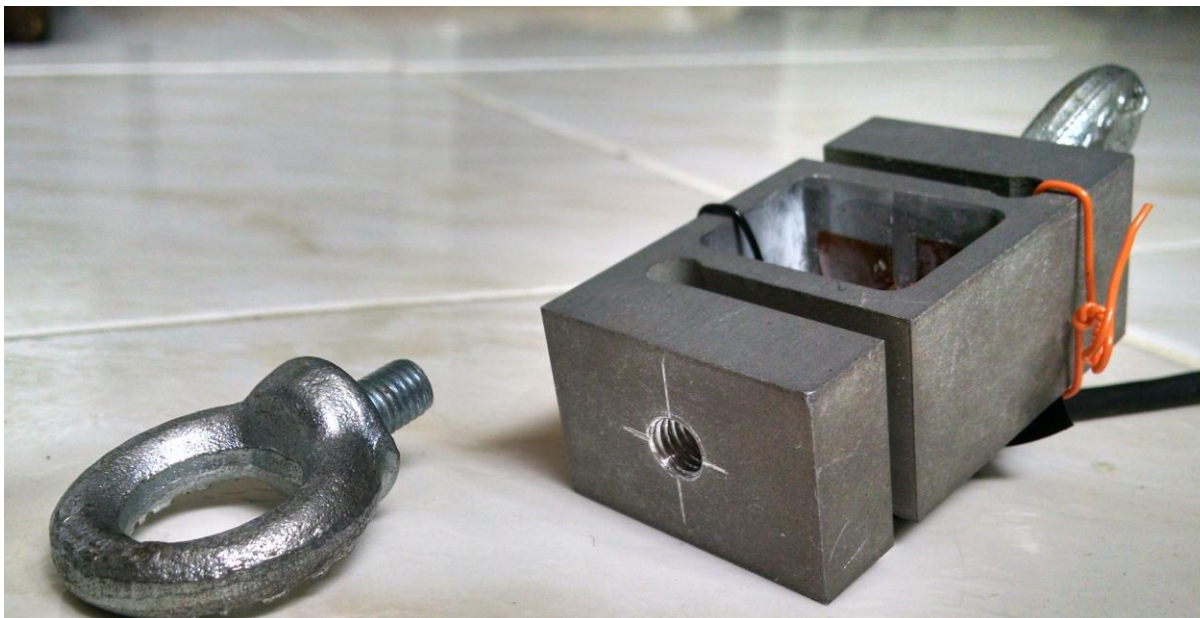


Figura 45 - Rosca M8 para Olhais

5.2 Circuito Final e Programa de Computador

Após o término do circuito elétrico foi possível ver em osciloscópio a redução significativa no ruído obtido. Inicialmente os valores de sinal não chegavam a superar a oscilação do ruído. Essa melhoria no sinal somada com o método de calcular a média dos valores medidos tornou possível a leitura do sinal com maior resolução e atender o propósito desejado.

O programa de computador criado se baseia na simples obtenção de valores de tensão e na manipulação de seu valor com operadores matemáticos simples: a soma para eliminar o offset e a multiplicação para ajustar a inclinação da reta que descreve o comportamento da célula para variar de maneira mais fiel a força nela imposta. A partir disso, foi necessário apenas tornar a visualização de dados mais fácil e agradável aos olhos do usuário.

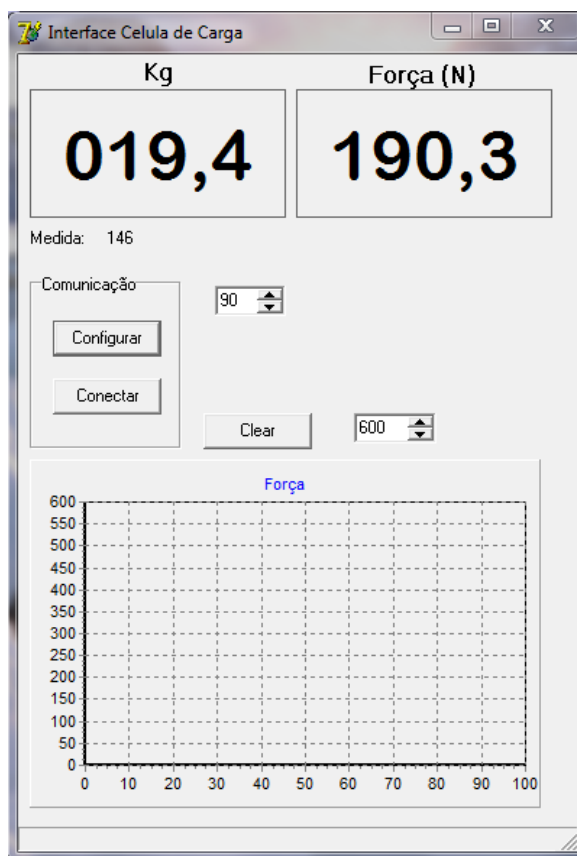


Figura 46 – Circuito Eletrônico
Fonte: Professor Rubens Faria

As únicas funções que deverão ser modificadas pelo usuário são o Clear, que limpa o gráfico e a entrada numérica que mostra o número 600, que é o valor máximo do eixo y do gráfico. A entrada numérica que mostra o número 90 representa a tensão mínima mostrada no gráfico. Esse dado tornou-se necessário uma vez que foi descoberto o comportamento não linear da célula para pesos abaixo de 15 kg.

Com um investimento maior de tempo, é possível criar um aplicativo para celular que realize a mesma função do programa de computador, possivelmente com mais funções.

5.3 Resultado do Estudo do Sinal

Com a avaliação da curva da célula de carga foi obtido um gráfico de tensão por força, como pode ser visualizado no gráfico 2.

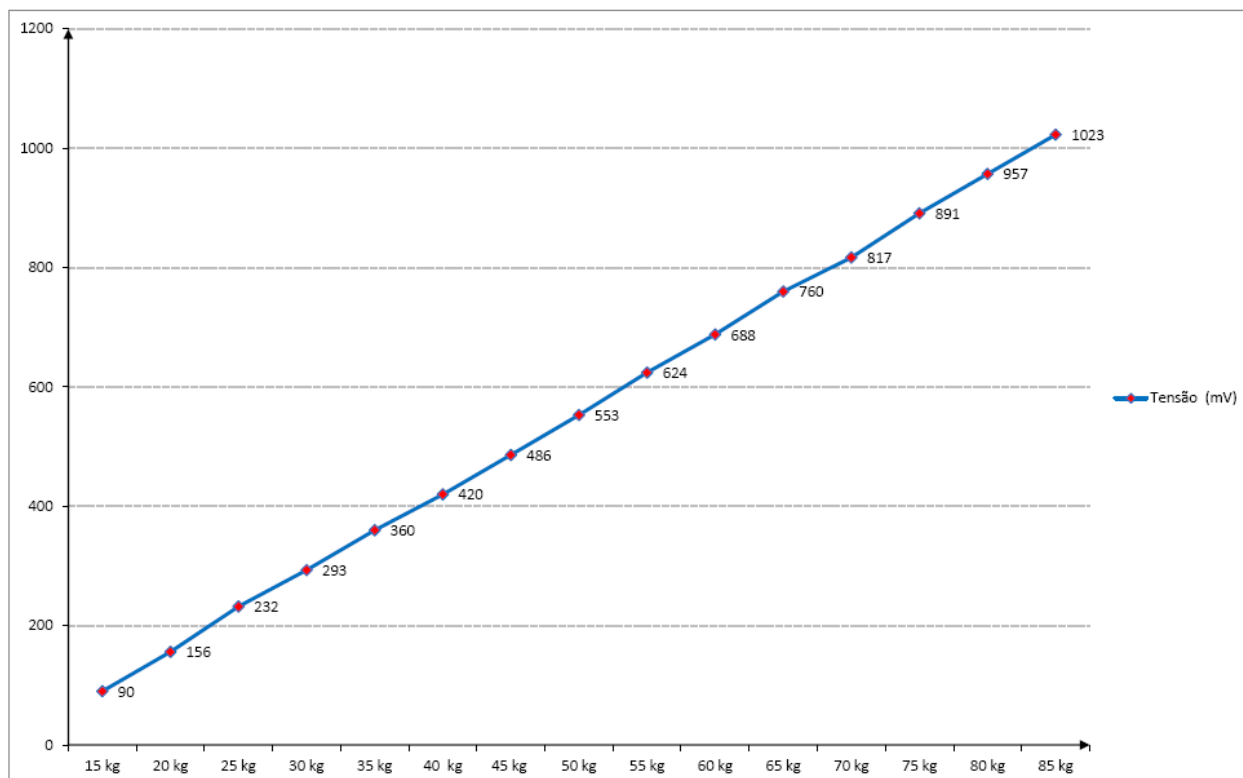


Gráfico 2 – Curva de Transferência

Pode-se visualizar no gráfico 2 que a célula possui um comportamento linear conforme o previsto, já que a deformação ocorre dentro do regime elástico do material, de acordo com a Lei de Hooke.

A partir das informações do gráfico 2, foi feita a relação da carga com o sinal de tensão de saída do circuito, e encontrado que $x=(j+108)/13.3$ onde "x" é o valor em kg e "j" a tensão medida, assim pode-se aplicar essa relação no algoritmo, para fazer o processo inverso, onde entra-se com o sinal de tensão e obtém-se seu valor em kg. Multiplicando o valor obtido por $g=9,81\text{m/s}^2$, resulta no valor da força em Newton.

Devido ao ruído gerado pelo circuito eletrônico, a célula de carga não consegue obter valores inferiores a 15 kg com uma boa resolução, o a medição de tensão nesta faixa não é linear, por este motivo no algoritmo cargas abaixo de 15 kg foram incluídas em uma regra para serem mostradas como zero para evitar interpretações erradas, ou seja a faixa de operação da célula de carga vai de 15 kg a 100 kg.

5.4 Ensaio

Tendo a célula com a curva de sinal levantada e a aquisição de dados sendo rápida suficiente para identificar pontos e variações, foi possível analisar movimentos com alguns pesos e verificar alguns padrões. Era intendido verificar a variação da força ao longo de um exercício e, para isso, foram dados alguns parâmetros iniciais:

- Seria feito o teste apenas em um exercício (puxador alto – costas) por ser o exercício mais fácil de trabalhar com cargas maiores permitido pelo aparelho;
- O teste seria feito com 3 pesos diferentes – 20kg, 40kg e 56kg;
- Para cada peso, o movimento seria executado de duas formas: lentamente, prezando pela qualidade do movimento e rapidamente, prezando pela explosão.

Cada movimento teve início com os braços estendidos e final com os braços também estendidos e não com a carga solta. Uma vez que com a carga solta, a célula mostraria zero e com os braços estendidos e parados, o valor mostrado deve ser igual ao peso exercido pela carga inserida, o que facilita analisar temporalmente o momento em que o indivíduo inicia e termina o exercício.

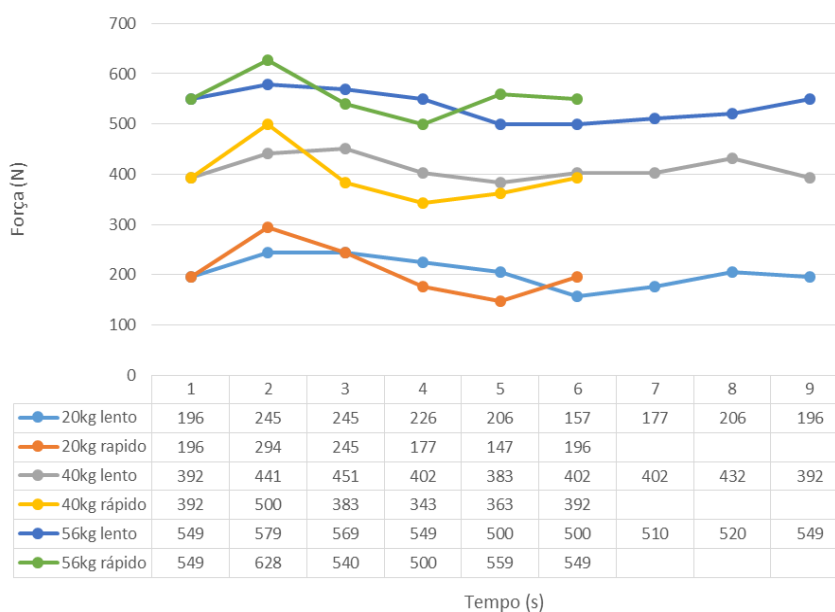


Gráfico 3 - Resultados dos Ensaio

Pode-se visualizar no gráfico 3 como o esforço inicial feito para tirar o peso da inércia gera um incremento grande na força, principalmente em repetições mais rápidas, independente do peso e também que após a desaceleração do movimento da puxada e no início da subida a força passa a ser menor do que a força necessária para sustentar a massa em repouso.

Acredita-se que ao realizar um trabalho com os gráficos obtidos após uma série de repetições em uma academia, o treinador seja capaz de encontrar erros e formas de aperfeiçoar o movimento do atleta, tanto para melhorar seu rendimento quanto para realizar mudanças que preservem sua integridade física.

6 CONCLUSÃO

Após realizar estudos em células de carga já existentes, foi almejada a fabricação de uma célula capaz de atender uma gama de pesos menores que as células comerciais, ou seja, pesos de até 100 kg (com sobrecarga de 200 kg) com dimensões menores e peso pouco significativo.

O projeto, a fabricação da célula e colagem dos extensômetros foi realizada buscando a melhor qualidade de dados coletados e, quando traçado um gráfico força x tensão, a relação foi linear, com exceção a massas muito baixas (de zero a aprox. 13 kg), tornando fácil e confiável seu uso em auxílio a atividades de musculação de pesos médios (entre 15 e 100 kg).

Como trabalho futuro, sugere-se a aplicação de uma pré-carga na célula de aprox. 15 kg e alteração em seu offset, para compensar a não linearidade em cargas baixas.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. A. O. **Introdução à Extensometria Elétrica de Resistência - Notas de aula** - DEEF - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – 1999.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas, CAMACHO, Jefferson Sidney e BRITO Gilberto Antônio. **Extensometria Básica**. UNESP Universidade Estadual Paulista, 2004.

Arduino. Disponível em: <<http://arduino.cc>>. Acesso em 01 dezembro de. 2013.

ASM HANDBOOK, Vol. 2. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-purpose materials**. ASM International The Materials Information Company, 2007.

BACK, N; OGLIARI, A.; DIAS, A; SILVA, J. C. da. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. São Paulo, Manole, 2008.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. Prentice-Hall, 1996.

BEER, Ferdinand P.; JOHNTON, E. Russel, Jr. **Resistência dos Materiais**. 3 ed. São Paulo, SP, Pearson Makron Books, 1995.

BARRETO Jr. Consultoria Técnica. **Extensometria** [online]. Disponível em: http://www.barretojunior.hpg.com.br/euler/ext_05.htm. Acesso em 8 de agosto de 2013.

CALLISTER, Jr William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª edição, 2002.

CINEL, **Centro de Formação Profissional da Indústria Electrónica**. Aquisição de Dados. Porto, Portugal

COOK, R.D; Malkus D.S.; Plesha M.E.; Witt R.J. **Concepts And Applications of Finite Elements Analysis**. 4ª edição, 2002.

FERNANDES M.H., ROCHA V.M. da, COSTA-OLIVEIRA A.G.R. da. **Fatores Associados à Prevalência de Sintomas Osteomusculares em Professores**. Revista de Salud Pública, Bogotá, v.11, 2008.

FOLLI, Bruno. **Comparação entre pesos livres e aparelhos de musculação**, iG São Paulo. Disponível em:

<http://saude.ig.com.br/bemestar/peso+livre+ou+aparelho+o+que+e+melhor+na+musculacao/n1237726395635.html> Acesso em: 30 de julho de 2013.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7 ed. São Paulo, SP, Pearson Prentice Hall, 2010.

HOFFMANN, Karl. **An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges**. HBM, 2012. Disponível em: <http://www.hbm.com/>.

Acesso em 13 de agosto de 2013.

MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G. **Mecânica para Engenharia: Estática**. 6ª ed. LTC, 2008.

LOGAN D. L. **A First Course in the Finite Element Method**. 2ª edição, 1992.

PERTENCE, A. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**, 4ª edição. São Paulo, McGraw, 1990.

RODACKI, Cintia de Lourdes Nahhas. **Efeito da Atividade Física Associada à Suplementação de Óleo de Peixe Sobre a Resposta Neuromuscular e Imunitária de Idosas**, Curitiba, UFPR, 2012. Disponível em: <http://www.pgedf.ufpr.br/downloads/TESES/2012/R%20-%20T%20-%20RODACKI,%20CINTIA%20DE%20LOURDES%20NAHHAS.pdf>.

Acesso em 18 de setembro de 2013.

SANTAREM, José Maria. **A Responsabilidade Profissional nas Informações Sobre Atividade Física para a População**. São Paulo: USP, 1997. Disponível em: <http://www.saudetotal.com.br/artigos/atividadefisica/responsabilidade.asp>

Acesso em 30 de julho de 2013.

SEGERLIND, L.J. **Applied Finite Elements Analysis**. Michigan, 1976.

THOMAZINI, Daniel e ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga – **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações** – Editora Érica Ltda – São Paulo, SP 2005.

TOLEDO, Maria Antonieta. **Número de academias dobra em três anos no Brasil**, Exame.com Disponível em: <http://exame.abril.com.br/pme/noticias/numero-de-academias-dobra-em-tres-anos-no-brasil>

Acesso em 11 de julho de 2013.

TUNER, M.J.; Clough R.H.; Martin H.C.; Topp L.J. **Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures**. J. Aero. vol. 23, 1956.

KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS - **KFN Series - non inductive foil strain gages** - Disponível em:

http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/kfn/index.html

Acesso em 15 de julho de 2013.

ZIENKIEWICZ O.C. **The Finite Element Method**, Vol. 1, Editora W.B.Saunders, 4ª edição, 1989.