

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

ALINE FONSECA E SILVA

ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E CONCEPÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA

Guaratinguetá

2012

ALINE FONSECA E SILVA

ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E CONCEPÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA

Trabalho de Graduação apresentado
como requisito para obtenção do
diploma de Graduação no curso de
Engenharia Mecânica na Faculdade
de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá.

Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini

Guaratinguetá

2012

Silva, Aline Fonseca e
S586 Estudo, desenvolvimento e concepção de uma célula de carga / Aline
Fonseca e Silva – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
e 52 f : il.

Bibliografia: f. 51-52

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini

1. Resistência de materiais 2. Medidores de tensão I. Título

CDU 620.17

**ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E CONCEPÇÃO DE UMA CÉLULA DE
CARGA**

ALINE FONSECA E SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE

"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

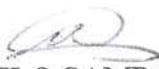
Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI

COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI

Orientador/FEG-UNESP


Prof. MARCELO SAMPAIO MARTINS

UNESP-FEG


FABIO AKIO KOBAYAKAWA

Engenheiro Mecânico

Outubro de 2012

Aos meus pais que sempre me deram todo o apoio para me desenvolver como pessoa, aos meus avós que sempre tiveram um papel indispensável em minha vida, ao meu noivo Fábio que sempre me deu todas as forças para prosseguir até mesmo quando tudo me fazia querer desistir.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus que me mostrou toda sua força neste último ano e me auxiliou a seguir em frente mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço também a todos que estiveram ao meu lado e acreditaram no meu potencial e capacidade quando eu mesma tive dúvidas sobre mim.

Aos meus amigos, mesmo aqueles que nem sempre puderam estar presentes, mas sempre moraram dentro do meu coração e constituíram uma parte fundamental para que eu pudesse seguir os meus objetivos sem me perder durante a jornada.

Às meninas da república Super Rep, com as quais eu pude aprender e me divertir muito durante tantos anos.

Aos professores e aos técnicos da FEG/UNESP que fizeram parte do meu aprendizado e conseguiram enriquecer minha bagagem de conhecimento.

Ao pessoal da república Vamointão, que sempre me recebeu muito bem e me proporcionou momentos de muita diversão.

À minha família e ao meu noivo Fábio, que foram, sem dúvida alguma, aqueles que mais torceram e viveram comigo meus momentos de alegria, tristeza, dificuldades e conquistas.

SILVA, Aline F. **Estudo, desenvolvimento e concepção de uma célula de carga**. 2012. 52f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Para projetos de engenharia, é fundamental o conhecimento das cargas atuantes em seus componentes a fim de garantir valores aceitáveis para a segurança e a confiabilidade do mesmo de acordo com as especificações determinadas. Por outro lado, os métodos de medição destas cargas podem ser muito complexos e inviáveis em certos casos e, para tanto, pode-se utilizar células de carga com extensômetros de resistência elétrica como uma opção simples e precisa para se medir a força desejada. O objetivo principal do presente trabalho é apresentar o desenvolvimento de um modelo de célula de carga que permita realizar medidas uniaxiais de carga independentes da localização do carregamento em uma viga engastada utilizando extensômetros. Para tanto, tomou-se como base um objetivo secundário, porém fundamental, que é apresentar um estudo geral de conceitos fundamentais e abrangentes sobre transdutores, células de carga e extensômetros primeiramente. Apresentam-se informações como: os tipos de solicitações e medições que podem ser realizadas, algumas características dos dispositivos estudados bem como os fatores que influenciam seus funcionamentos, informações sobre os tipos de ligações em ponte de Wheatstone, os pontos principais de um projeto de uma célula de carga, os tipos de adesivos utilizados para colagem de extensômetros e, por fim, o desenvolvimento e os ensaios do transdutor desenvolvido. Ao final do trabalho, tem-se apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios, concluindo-se sobre a célula de carga desenvolvida e o trabalho como um todo.

PALAVRAS-CHAVE: extensômetros, carga, células de carga.

SILVA, Aline F. **Study, development and conception of a load cell.**2012. 52f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

In engineering projects, it's fundamental to determine the active loads in components in order to guarantee acceptable values of safety and reliability according to project specifications. On the other hand, force measurement methods might be very complex and impracticable in some cases and, so that, load cells with electric resistance strain gages can be applied as a simple and accurate option to measure the required load. The main purpose of this paper is to present the development of a load cell that measures uniaxial forces using electric resistance strain gages without being influenced by the location of the loading in a cantilever beam. For that, it was taken as basis a secondary purpose which is to present a general study of basic and wide concepts about transducers, load cells and extensometers primarily. Information such as: loading and measurements types, characteristics of the presented devices as well as factors that influence its functioning, the most common kinds of Wheatstone bridge links, the main points of a load cell project, cements used to fix extensometers and, finally, the project itself with the tests of the built transducer are presented. By the end of this paper, all the results are shown and analyzed, concluding about the designed load cell and the work itself.

KEYWORDS: extensometers, force, load cells.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.3 CONTEÚDO DO TRABALHO.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 TIPOS DE SOLICITAÇÃO.....	15
2.2 EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	17
2.2.1 TIPOS DE EXTENSÔMETROS	18
2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DE EXTENSÔMETROS	20
2.2.3 LIGAÇÕES EM PONTE DE WHEATSTONE.....	21
2.3 TRANSDUTORES.....	23
2.3.1 TIPOS DE MEDIDAS	23
2.4 CÉLULAS DE CARGA	23
3 CÉLULA DE CARGA E EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	25
3.1 PROPRIEDADES	25
3.2 TIPOS.....	26
3.3 CUIDADOS PARA ESCOLHA E CONSERVAÇÃO DOS <i>STRAIN GAGES</i>.....	29
3.4 ADESIVOS UTILIZADOS PARA FIXAÇÃO DE EXTENSÔMETROS	33
4 CÉLULA DE CARGA DESENVOLVIDA	36
4.1 CÁLCULOS INICIAIS DE PROJETO	36
4.2 PREPARAÇÃO E MONTAGEM DA CÉLULA	41
4.2.1 MATERIAIS NECESSÁRIOS	41

4.2.2 MÉTODOS	42
4.2.3 MONTAGEM DA CÉLULA	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
6 CONCLUSÕES.....	50
REFERÊNCIAS	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Tipos de esforços atuantes	15
FIGURA 2 – Extensômetro elétrico de resistência	18
FIGURA 3 – Extensômetro uniaxial	18
FIGURA 4 – Extensômetros biaxiais	19
FIGURA 5 – Extensômetros triaxiais.....	19
FIGURA 6 – Extensômetro de gradiente de pressão uniaxial.....	19
FIGURA 7 – Extensômetro de gradiente de pressão biaxial.....	19
FIGURA 8 – Extensômetro de pressão	19
FIGURA 9 – Montagem em ponte de Wheatstone	21
FIGURA 10 – Esquematização de um <i>strain gage</i> com fios não aderentes.....	27
FIGURA 11 – Extensômetros com fios encurvados	27
FIGURA 12 – Extensômetro soldável.....	29
FIGURA 13 – Modelo de célula a ser desenvolvida	37
FIGURA 14 – Dados dos extensômetros utilizados na célula de carga	42
FIGURA 15 – Vista superior da célula montada no suporte	45
FIGURA 16 – Vista lateral da barra montada no suporte de engaste.....	45
FIGURA 17 – Esquematização do posicionamento das cargas para os ensaios da célula.....	46
FIGURA 18 – Posicionamento da carga na célula	47
FIGURA 19 – Gráfico dos resultados de leitura obtidos nos ensaios da célula.....	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Modelo de planilha utilizada para cálculos.....	39
TABELA 2 – Resultados obtidos nos ensaios da célula	47
TABELA 3 – Erros percentuais de leitura.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

R	resistência elétrica
V	tensão de alimentação
ΔE	tensão de saída da ponte de Wheatstone
ν	coeficiente de Poisson
ε	deformação
ρ	resistividade
S_a	sensibilidade axial
S_t	sensibilidade transversal
S_s	sensibilidade ao esforço cortante
ϵ_a	deformação axial
ϵ_t	deformação transversal
γ_{at}	deformação decorrente do esforço cortante
S_g	fator do extensômetro
k	fator do extensômetro
σ	tensão normal
M	momento fletor
I	momento de inércia
E	módulo de elasticidade
c	distância da linha neutra da seção transversal à superfície
x	distância do ponto de aplicação da carga em relação à extremidade do extensômetro
P	carga aplicada a ser medida pela célula de carga
b	dimensão da base da seção transversal da célula de carga
h	altura da seção transversal da célula de carga
y	deslocamento

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para fins como dimensionamento de componentes, fabricação de peças, máquinas e seus elementos constituintes, e muitos outros diversos, um ponto fundamental é prever, definir e/ou analisar as tensões que poderão atuar durante seu funcionamento para evitar falhas ou até mesmo para fins de realização de ensaios para garantir o cumprimento da função para a qual serão destinados.

O uso de métodos de medição de força é de certa forma recente e foi impulsionado pela necessidade de produzir máquinas para implementação da produção em massa em diversos setores (FIALHO, 2002). Até então, os métodos utilizados se mostravam muito formais e exigiam um tempo considerável para obtenção dos resultados desejados, além disso, muitas vezes não atendiam à precisão requerida para certa análise. Por outro lado, muitas medições eram limitadas pelo comportamento das tensões ser plástico e dependente do tempo (SMART; SINGH; ISAAC, 2003).

Outro motivo importante que justificou o desenvolvimento de novos métodos de medição de força foi o custo associado aos ensaios antes realizados. O superdimensionamento de componentes estruturais e as análises que, muitas vezes, traziam resultados com muita imprecisão passaram a ser inadmissíveis para as indústrias dos setores mais avançados (automotiva, produtora de máquinas operatrizes, aeronáutica, etc.) (FIALHO, 2002).

Em 1678, ficou estabelecida a relação entre tensões e deformações devido às solicitações mecânicas por Robert Hooke (FIALHO, 2002). Segundo Hooke, se for considerado um material isotrópico e homogêneo, sem que seu limite elástico seja superado, esta relação será linear (FIALHO, 2002). A partir desta definição, a anisotropia dos materiais passou a ser preocupação constante quando se relacionava com medidas de tensões e deformações.

Anos mais tarde, em 1856, William Thomson verificou que a resistência elétrica de condutores de cobre e ferro dependia da constante de resistividade elétrica do material, do comprimento e da seção transversal (FIALHO, 2002). Depois, relacionou suas descobertas com os estudos de Hooke e concluiu que, quando uma barra metálica é esticada, ocorre redução em seu volume e aumento no comprimento, resultando no aumento de sua resistência elétrica devido à redução de sua seção transversal e na situação inversa, ele verificou a redução da resistência elétrica (FIALHO, 2002).

Quase na mesma época, desenvolvia-se o Método dos Elementos Finitos, que também se mostrou uma ferramenta eficiente na análise das tensões atuantes em um componente, contudo, não permitia investigar as propriedades dos materiais experimentalmente (FIALHO, 2002).

A partir de 1930, impulsionadas pelos estudos de Robert Hooke, pesquisas científicas nos campos da Física, da Eletrônica e da Mecânica Aplicada resultaram na extensometria e nos transdutores de força, que tornaram possível medir esforços experimentais sob condições reais de serviço (FIALHO, 2002).

Em 1931, Roy Carlson utilizou pela primeira vez fios resistivos para fins de medição de forças (FIALHO, 2002). Alguns anos depois (1937 e 1939), Edward Simmons e Arthur Ruge utilizaram pela primeira vez fios metálicos para medir deformações colando-os na superfície de um corpo de prova, experiência que foi a precursora dos extensômetros conhecidos atualmente (FIALHO, 2002).

O desenvolvimento do trabalho referente a esta monografia se justifica principalmente para fins de redução de custos e do tempo destinado à realização das medições, pontos mais do que prioritários para qualquer empresa.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são: apresentar conceitos amplos sobre extensômetros de resistência elétrica, transdutores e células de carga a fim de compreender seus funcionamentos e características principais e, então, utilizar os conceitos no desenvolvimento de uma célula de carga que efetue medidas de uma força sem que haja interferência da localização da força nas medidas e verificar a célula através de experimentos para que possam ser demonstradas sua grande utilidade e relevância para o campo da extensometria.

1.3 CONTEÚDO DO TRABALHO

Esta monografia é composta por 6 capítulos:

O capítulo 1, “INTRODUÇÃO”, apresenta-se como um breve histórico sobre os sistemas de medição de tensões/forças, além da justificativa para seu desenvolvimento e utilização, o que torna válida a composição da monografia acerca deste tema.

O capítulo 2, “FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA”, tem como objetivo apresentar conceitos relacionados aos tipos de esforços e, principalmente, no que se refere aos extensômetros de resistência elétrica, suas características e tipos de ligação em ponte de Wheatstone; aos transdutores e às células de carga.

O capítulo 3, “CÉLULA DE CARGA E EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA”, refere-se diretamente ao uso de células de carga com extensômetros de resistência elétrica e apresenta as propriedades deste tipo de extensômetro, alguns tipos utilizados em células de carga e pontos a serem considerados em relação ao projeto, além dos cuidados a serem tomados, bem como os tipos de adesivos para fixação dos extensômetros.

O capítulo 4, “CÉLULA DE CARGA DESENVOLVIDA”, é focado na apresentação do dispositivo construído para ensaios com os cálculos iniciais de projeto e a concepção da célula de carga.

O capítulo 5, “RESULTADOS E DISCUSSÕES”, visa à apresentação dos testes com a célula de carga projetada com a finalidade de verificar seu funcionamento, os resultados obtidos e uma breve discussão sobre os mesmos.

O capítulo 6, “CONCLUSÕES”, discute acerca dos resultados e do objetivo deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TIPOS DE SOLICITAÇÃO

Um ponto muito importante que deve ser observado antes da escolha do tipo de método de medição de força é o tipo de esforço que será aplicado ao componente ou à peça a ser estudada. As solicitações podem ser basicamente: normais, cisalhantes, de flexão ou de torção, sendo que podem ocorrer também esforços combinados. Conceitos básicos sobre os tipos de solicitações serão apresentados a seguir, tomando como base a Figura 1.

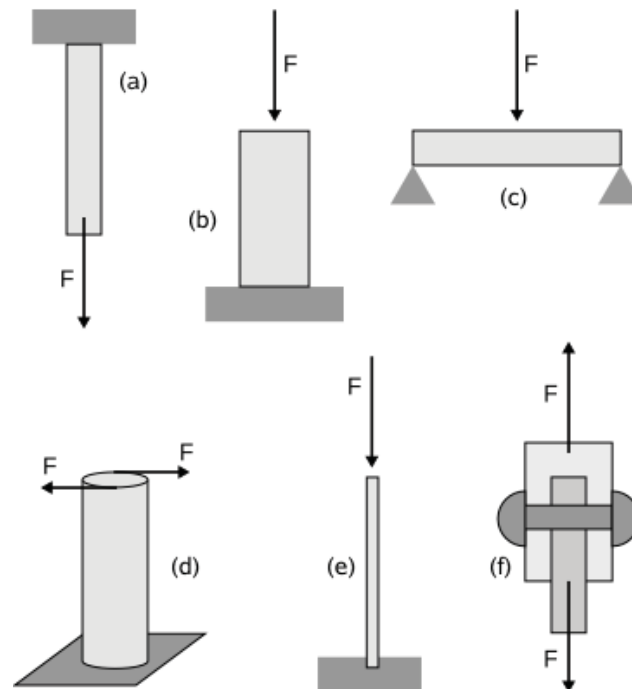


Figura 1 – Tipos de esforços atuantes (MSPC, 2012).

a) Solicitação Normal:

Um esforço normal é a componente da tensão aplicada ao material que se encontra na direção longitudinal – de tração (ver Figura 1a) ou de compressão (ver Figuras 1b e 1e).

Os efeitos deste tipo de tensão podem ser: o alongamento ou o encurtamento das fibras do material, denominados deformações longitudinal e transversal (FIALHO, 2002).

Quando se observa o encurtamento das fibras diz-se que o esforço é normal de compressão e, quando ocorre o contrário, diz-se que é um esforço normal de tração (FIALHO,

2002). Para o caso apresentado pela Figura 1e, observa-se a ocorrência de flambagem devido a uma curvatura (flambagem) da barra.

b) Solicitação de Cisalhamento:

Este tipo de solicitação é resultado da aplicação de tensões na direção transversal ao eixo principal (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995) – ver Figura 1f.

c) Solicitação de Flexão:

A solicitação de flexão é decorrente da aplicação de conjugados ou momentos iguais, mas com sentidos opostos, que atuam no mesmo plano longitudinal de um membro (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995) – ver Figura 1c.

O carregamento transversal causa a deformação das fibras do material no sentido de se encurvarem, sendo que algumas fibras sofrerão alongamento e outras, encurtamento, dependendo da sua localização em relação ao carregamento aplicado (FIALHO, 2002). Por outro lado, as seções transversais permanecem planas (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995).

De acordo com as deformações sofridas pelas fibras é possível observar que, para ocorrer a transição do tipo de deformação (encurtamento ou alongamento) deve existir uma região onde as deformações e as tensões são nulas (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995). Esta superfície é paralela às faces superior e inferior do membro e é conhecida como superfície neutra (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995).

Sabendo-se que as seções transversais permanecem planas, pode-se afirmar que em qualquer plano paralelo ao de simetria serão observadas as mesmas deformações (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995). Deste modo, diz-se que a deformação específica normal é uma função linear da distância à superfície neutra (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995). Portanto, as tensões e as deformações máximas sempre serão observadas nas regiões mais distantes da linha neutra, portanto, ou seja, nas superfícies superiores e inferiores do componente (FIALHO, 2002).

d) Solicitação de Torção:

Decorrente da ação de conjugados que tendem a torcer as peças, os quais tem a mesma intensidade e sentidos opostos (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995) – ver Figura 1d.

Para eixos circulares, que são utilizados em diversas práticas de engenharia como, por exemplo, eixos de transmissão, observam-se duas propriedades importantes: as seções transversais permanecem planas e não se distorcem quando o eixo é submetido à torção (BEER; JOHNSTON JUNIOR, 1995).

2.2 EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Os extensômetros de resistência elétrica são constituídos basicamente de um fio metálico ou uma grade metálica cuja resistência elétrica varia, causando diferenças de potencial que são associadas ao efeito sofrido pelo material, ou seja, convertem efeitos mecânicos em variação de resistência elétrica (AMOROS, 2008).

Este tipo de extensômetro é normalmente empregado para medição de forças em determinados pontos de aplicação do carregamento (DALLY; RILEY, 1978).

A colagem de extensômetros deve suceder a preparação cuidadosa da superfície de colagem, devendo ser retirada toda e qualquer sujeira, pintura e reduzindo a rugosidade da mesma para obter uma superfície lisa, mas não completamente polida; seguida da aplicação de solventes para retirada de vestígios de óleo ou graxa (DALLY; RILEY, 1978). Antes de colar o dispositivo é importante também que seja aplicada uma solução básica para dar à superfície uma característica compatível com as do adesivo a ser empregado (DALLY; RILEY, 1978).

O posicionamento do extensômetro é feito utilizando uma fita transparente, sobre a qual é colada a parte que contém a grade do extensômetro (DALLY; RILEY, 1978). A orientação e a posição corretas do dispositivo sobre o corpo-de-prova são mantidas pela fita enquanto o adesivo não é inserido (DALLY; RILEY, 1978).

Após ter colocado o adesivo sob o extensômetro é necessário aplicar uma certa pressão e manter uma condição de temperatura para que a fixação seja realizada de maneira adequada (DALLY; RILEY, 1978).

Um exemplo de extensômetro de resistência elétrica segue na Figura 2.

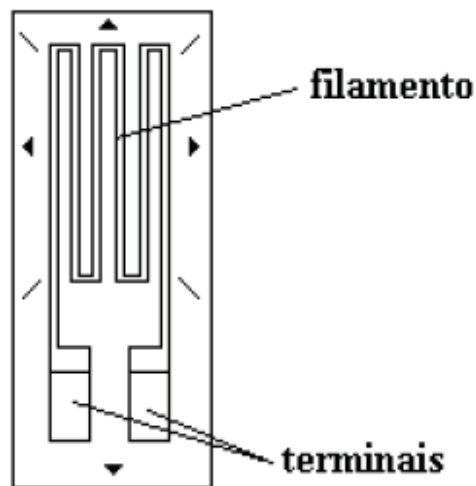


Figura 2 – Extensômetro elétrico de resistência (AMOROS, 2008).

2.2.1 TIPOS DE EXTENSÔMETROS

Os extensômetros elétricos ainda podem ser classificados como dois tipos: de fio ou de lâmina, de acordo com sua construção.

A direção da medição também pode diferenciar os extensômetros, os quais podem ser: uniaxiais, biaxiais (rosetas de duas direções) ou triaxiais (rosetas em delta, por exemplo), de gradiente de tensão uniaxial ou biaxial ou de pressão. Os diversos tipos seguem apresentados nas Figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8.



Figura 3 – Extensômetro uniaxial (VISHAY, 2012).

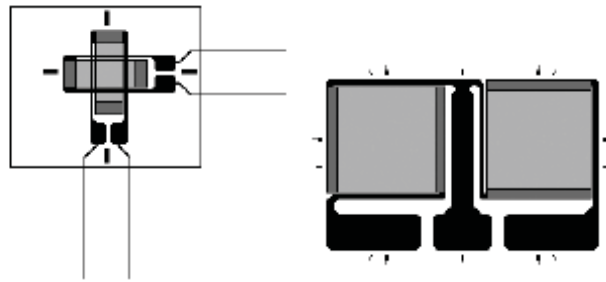


Figura 4 – Extensômetros biaxiais (VISHAY, 2012).

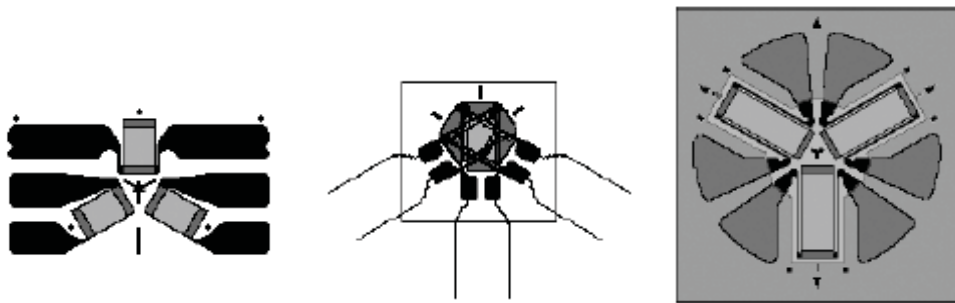


Figura 5 – Extensômetros triaxiais (AMOROS, 2008).

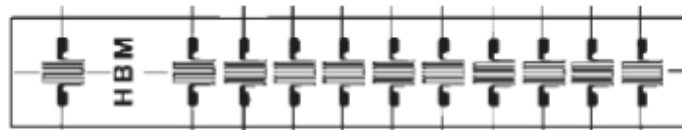


Figura 6 – Extensômetro de gradiente de pressão uniaxial (MAGALHÃES, 2012).

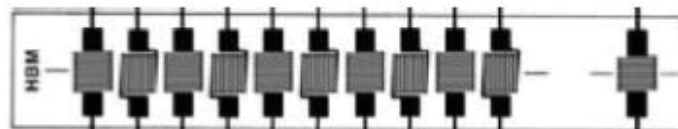


Figura 7 – Extensômetro de gradiente de pressão biaxial (MAGALHÃES, 2012).



Figura 8 – Extensômetro de pressão (MAGALHÃES, 2012).

As rosetas retangulares de três elementos (rosetas triaxiais) são constituídas de três extensômetros arrançados nas posições 0, 45 e 90° (DALLY; RILEY, 1978). As rosetas em delta possuem extensômetros arrançados nas posições 0, 120 e 240° (DALLY; RILEY, 1978).

2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Como já citado, extensômetros são amplamente empregados e este fato se deve principalmente a algumas de suas características que são muito favoráveis ao seu uso e garantem um bom funcionamento do dispositivo.

Quando se tem um dispositivo com pequena dimensão e baixo peso combinados a um material de alta rigidez, por exemplo, fica garantido que o extensômetro possuirá alta frequência natural, o que garante uma boa operação em uma ampla faixa de frequências (BECK, 1983). Esta pequena influência da frequência no seu funcionamento também permite o uso em sistemas de alimentação em circuitos com corrente alternada ou contínua, permitindo um circuito de saída simplificado (BECK, 1983).

Outros pontos muito positivos do uso de extensômetros são: alta linearidade para faixas de tensão muito amplas, a estabilidade com o tempo se for armazenado em condições adequadas, seu baixo custo e a grande variedade de tipos de medições (BECK, 1983).

Por outro lado, há alguns pontos desfavoráveis ao uso de extensômetros, dentre os quais podem ser citados:

- Degradação térmica: quando se utilizam altas temperaturas, pode ocorrer degradação de isolantes, adesivos ou outros tipos de revestimento de proteção do dispositivo (BECK, 1983). Por este motivo, a temperatura máxima de uso de um extensômetro se limita em torno de 260 °C (BECK, 1983);
- Baixos sinais de saída: torna-se indispensável que haja a amplificação deste sinal, um bom controle da tensão de entrada, ausência de ruídos e a aplicação da compensação da temperatura (BECK, 1983);
- Cuidados na instalação e uso: pela sua alta sensibilidade, deve-se ter controle rigoroso nestas etapas (BECK, 1983);
- Proteção: é essencial o cuidado com a armazenagem destes dispositivos, caso contrário, seu funcionamento é comprometido e sua vida útil reduzida (BECK, 1983).

2.2.3 LIGAÇÕES EM PONTE DE WHEATSTONE

Como já citado, os extensômetros de resistência elétrica tem seu funcionamento baseado na variação da resistência elétrica, a qual será posteriormente lida e convertida em uma leitura que diz respeito à grandeza que se pretende medir. Para realizar tais medições, utiliza-se a montagem dos extensômetros em ponte de Wheatstone, podendo-se utilizar quatro diferentes configurações (ver Figura 9).

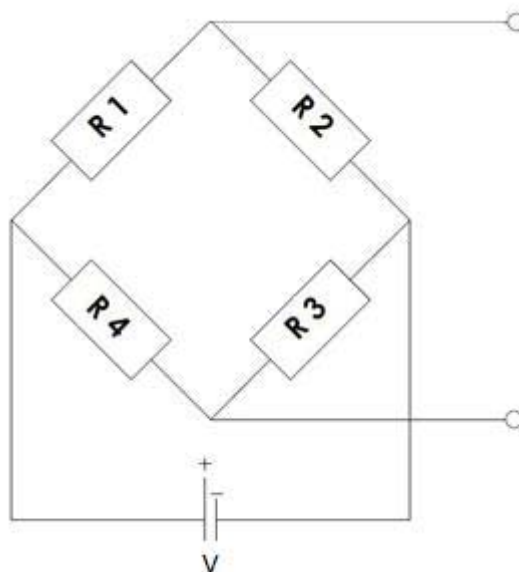


Figura 9 – Montagem em ponte de Wheatstone (DALLY; RILEY, 1978).

A. Montagem com um extensômetro ativo:

A montagem apresentada pela Figura 9 pode ser feita utilizando somente um dispositivo como ativo (R_1) à variação de resistência, sendo geralmente empregada para medições sem compensação de temperatura que podem ser estáticas ou dinâmicas (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). A seleção das demais resistências do circuito deve ser realizada de acordo com a maximização da sensibilidade e deve sempre manter o equilíbrio $R_1R_3=R_2R_4$ (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

A sensibilidade da ponte neste tipo de montagem pode ser favorecida com extensômetros de maior resistência e com a grade o mais larga possível, sempre atendendo aos requisitos de erros permissíveis decorrentes do aumento do tamanho da área do dispositivo (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

B. Montagem com um extensômetro ativo e outro para compensação:

A montagem apresentada pela Figura 9 também pode apresentar uma configuração de ponte com um resistor ativo e outro para fins de compensação. No caso, a resistência R_1 será ativa e R_2 servirá como compensador (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

O resistor de compensação deve ser idêntico ao ativo e também deve ser colado utilizando-se o mesmo adesivo, bem como deve ser submetido ao mesmo processo de cura que o ativo (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Os dois outros extensômetros devem possuir valores fixos pré-determinados de acordo com as condições da ponte (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

C. Montagem com um extensômetro ativo e outro para compensação sem limitação com relação ao equilíbrio da ponte:

A montagem representada pela Figura 9 pode ser feita similarmente à anterior, mas sem restrições devido ao equilíbrio da ponte. O ponto de distinção dos dois casos é que, pelo fato de que o resistor de compensação (R_4) estar em paralelo com o resistor fixo, não ocorre limitação por causa do equilíbrio da ponte e não se perde eficiência do circuito como na configuração anterior (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

D. Montagem com quatro extensômetros ativos:

A configuração da ponte representada pela Figura 9 pode ser feita com quatro extensômetros ativos (ponte completa). Nesta montagem, tem-se que ocorre compressão nos resistores R_2 e R_4 enquanto ocorre tração nos demais quando os extensômetros são colocados em um corpo-de-prova que pode ser uma viga, por exemplo (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). As variações de resistência em relação à resistência original do dispositivo serão, portanto, todas iguais em módulo (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Este tipo de arranjo permite obter compensação de temperatura e maior sensibilidade do que os anteriores (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Este tipo de circuito se tornou o mais utilizado desde o início do uso de extensômetros devido ao fato de responder muito bem a pequenas variações de resistência consequentes da deformação do dispositivo, além de permitir ajuste da tensão (AMOROS, 2008).

2.3 TRANSDUTORES

Transdutores são basicamente dispositivos que permitem realizar medidas indiretas de uma dada grandeza física, utilizando-se de efeitos eletro-óptico-magnéticos.

Transdutores que medem força, torque e pressão normalmente são constituídos por um elemento elástico que pode ser: um anel, extensômetros, diafragmas, cilindros, dentre (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). Suas características de sensibilidade, linearidade e faixa de medição serão dadas de acordo com o tipo, o tamanho, o material e o sensor do elemento elástico (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

O princípio de funcionamento de transdutores pode ser diferente de acordo com o tipo da transformação da energia de entrada desejado, podendo ser: resistivo, capacitivo, indutivo, piezoelétrico, etc. Este trabalho é focado nos resistivos.

2.3.1 TIPOS DE MEDIDAS

Os transdutores podem ser usados para diversos tipos de medidas: estáticas, dinâmicas ou estáticodinâmicas. Uma breve explicação sobre cada tipo de medida será apresentada a seguir (FIALHO, 2002).

- a) Medições Estáticas: estudo de esforços que praticamente não variam com o tempo ou variam muito vagarosamente.
- b) Medições dinâmicas: esforços que variam rapidamente, constituídos por uma componente alternada e outra média.
- c) Medições estático-dinâmicas: medidas simultâneas de esforços estáticos e dinâmicos.

2.4 CÉLULAS DE CARGA

Células de carga são transdutores utilizados exclusivamente para medições de cargas, os quais convertem a grandeza desejada em sinais elétricos.

Os elementos elásticos utilizados em células de carga podem ser: barras com arranjos de extensômetros, vigas engastadas, anéis ou elementos de aço que resistem a esforços cortantes (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Para uso de células de barras com arranjos de extensômetros é possível realizar medidas de cargas de tração ou compressão, sendo que dois extensômetros devem ser colados na

direção da atuação da carga e outros dois devem estar na direção perpendicular à mesma (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). A montagem em ponte de Wheatstone deve assegurar que dois extensômetros colados na mesma direção no corpo-de-prova estejam em braços opostos da ponte (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Para células de carga em formato de viga engastada normalmente utilizam-se dois extensômetros colados na parte superior da viga e outros dois na parte inferior, sendo ambos colocados na direção axial da viga (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). Neste tipo de célula de carga, a sensibilidade diminui e a faixa de medição aumenta à medida que o ponto de aplicação da carga se aproxima do local onde estão colados os extensômetros (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

No caso de células de carga em formato de anéis, é possível desenvolver diversos tipos de células com diferentes faixas de medição de acordo com a variação do diâmetro, da espessura e da largura do anel (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). Neste tipo de célula podem ser usados extensômetros ou transformadores lineares como sensores e a faixa de medição dependerá da resistência do material que constitui o anel (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

As células de carga com elemento de aço são basicamente constituídas de uma estrutura para suporte sobre a qual é colocado um elemento de aço, o qual é preso ao suporte por meio de parafusos e os extensômetros são colados em pequenos furos localizados na superfície neutra do elemento (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). No ponto central do conjunto há um furo onde fica alojado o parafuso que será submetido ao carregamento cortante a ser medido (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). Este transdutor pode ser também usado para medir carregamentos dinâmicos em frequências maiores do que as células de carga em formato de viga (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

A célula de carga a ser apresentada ao final deste trabalho é uma célula em formato de viga engastada que apresentará uma configuração de colagem dos extensômetros diferente daquela que foi citada anteriormente, a fim de que a localização da carga não influencie nas medidas realizadas.

3 CÉLULA DE CARGA E EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Para construir uma célula de carga utilizando extensômetros de resistência elétrica é necessário considerar o tipo mais adequado de dispositivo, bem como algumas propriedades e características que podem influenciar em seu funcionamento.

Neste capítulo serão apresentados alguns tipos de *strain gages* utilizados em células de carga, enfatizando pontos principais da escolha do dispositivo.

3.1 PROPRIEDADES

A propriedade na qual é baseado o uso de extensômetros de resistência elétrica vem da relação fundamental da extensometria, dada pela equação (1) (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

$$(1 + 2\nu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (1)$$

Sendo: ε a deformação; ν o coeficiente de Poisson; ρ a resistividade; R a resistência elétrica.

A relação expressa pela equação (1) demonstra o fato de que todo condutor tem sua resistência elétrica modificada quando é submetido a tensões mecânicas.

Uma propriedade importante do extensômetro é a sensibilidade. A sensibilidade axial é definida como: $\Delta R/(R_0\varepsilon)$, onde tem-se a razão da variação da resistência elétrica do dispositivo pelo produto de sua resistência inicial e a deformação axial causada pelo carregamento (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). A sensibilidade axial (S_a) é uma função do material constituinte do dispositivo e de suas condições metalúrgicas (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Por outro lado, os segmentos da grade do extensômetro apresentam uma alta relação largura-espessura, o que ocasiona transferência parcial das forças na direção transversal do dispositivo através do adesivo até a grade, produzindo uma resposta adicional ao carregamento axial aplicado (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). Deste modo, analogamente à sensibilidade axial, define-se a sensibilidade transversal (S_t).

A resposta dada por um extensômetro submetido a tensões biaxiais pode ser expressa pela equação 2:

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \epsilon_a + S_t \epsilon_t + S_s \gamma_{at} \quad (2)$$

Na equação (2), tem-se: S_a, S_t e S_s como sendo as sensibilidades axial, transversal e ao esforço cortante, respectivamente, ϵ_a e ϵ_t sendo as deformações axial e transversal (nesta ordem) e γ_{at} a deformação decorrente do esforço cortante. Em geral, a sensibilidade ao esforço cortante é muito pequena e pode ser desprezada (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Fabricantes de extensômetros fornecem um valor constante de calibração conhecido como fator do extensômetro (S_g) que é dado por: $\Delta R/R = S_g \epsilon_a$ (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

3.2 TIPOS

Teoricamente, considera-se possível medir forças/deformações com um único fio como sendo o elemento sensor de um *strain gage*, contudo, há a necessidade de prevenir sobrecarga e amenizar efeitos de aquecimento no dispositivo utilizado e, para tanto, recomenda-se uma resistência máxima de cerca de 100 Ω (DALLY; RILEY, 1978).

Alguns dos tipos de extensômetros serão apresentados a seguir, sendo que os mais usuais atualmente são os de grade metálica.

A. EXTENSÔMETROS COM FIOS NÃO ADERENTES

Os primeiros extensômetros de resistência elétrica fabricados foram do tipo com fios não aderentes (DALLY; RILEY, 1978).

Seu princípio de funcionamento básico consiste em uma associação de fios que são presos em duas estruturas: uma fixa e outra móvel (DALLY; RILEY, 1978). O movimento da parte móvel (estrutura interior) é permitido na direção horizontal, ocasionando aumento nas tensões nos fios 2-6 e 3-7 e as tensões nos fios 1-5 e 4-8 diminuem (DALLY; RILEY, 1978) – ver Figura 10. Neste tipo de dispositivo, cada fio representa um *strain gage*.

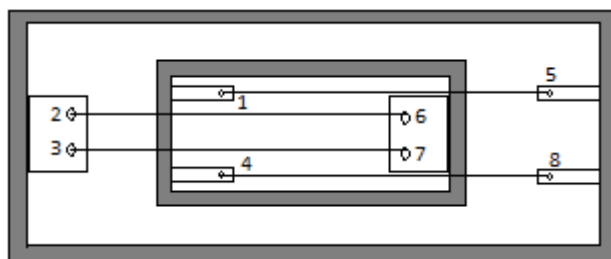


Figura 10 – Esquemática de um *strain gage* com fios não aderentes (DALLY; RILEY, 1978).

Apesar de ter sido o primeiro dispositivo desenvolvido, seu uso não foi muito difundido. Tal fato deve-se principalmente à largura do *strain gage* e à exigência de pontos para fixação, o que limitou muito sua aplicação (DALLY; RILEY, 1978).

B. EXTENSÔMETROS COM FIOS ADERENTES

A fim de eliminar os pontos desfavoráveis dos extensômetros de fios não aderentes, desenvolveram-se os extensômetros de fios aderentes. Em meados dos anos de 1930, Ruge e Simmons conseguiram construir estes dispositivos (DALLY; RILEY, 1978).

O problema da grande área requerida para a aplicação do extensômetro foi resolvido a partir da formação de grades em formato de bobina ou com fios encurvados (DALLY; RILEY, 1978) – ver Figura 11.

Estes dispositivos foram amplamente utilizados para medições de cargas exclusivamente até cerca de meados dos anos 50 (DALLY; RILEY, 1978).

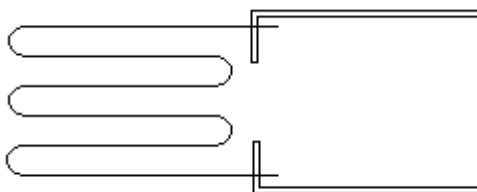


Figura 11 – Extensômetro com fios encurvados (DALLY; RILEY, 1978).

C. EXTENSÔMETROS DE LÂMINA DELGADA DE METAL

O princípio de funcionamento destes dispositivos é baseado na variação da resistência elétrica da grade.

Neste tipo de dispositivo, a grade é constituída de uma fina camada de metal, cuja grade é definida por um processo de impressão através da aplicação de raios ultravioleta (DALLY; RILEY, 1978). Como o processo produtivo é bastante versátil, é possível construir diferentes tipos e tamanhos de extensômetros (DALLY; RILEY, 1978).

Valores comerciais de resistência elétrica para este tipo de dispositivo variam de 120 a 350 Ω , sendo que para comprimentos maiores de 152 mm também encontram-se dispositivos com resistência de 1000 Ω (DALLY; RILEY, 1978).

Em casos que se tem gradientes de força muito elevados, torna-se difícil identificar em qual ponto ocorre a máxima carga e, portanto, recomenda-se utilizar arranjos com mais de um extensômetro (DALLY; RILEY, 1978).

Rosetas de dois ou três elementos podem ser utilizadas em configurações planas ou até mesmo arranjadas umas sobre as outras, sendo recomendadas para medições biaxiais de carga (DALLY; RILEY, 1978). O primeiro tipo é usado na direção da tensão principal e, o segundo, pode ser usado quando não se sabe a direção da tensão principal (DALLY; RILEY, 1978).

Extensômetros de lâmina de metal são muito frágeis e, por este motivo, geralmente são cobertos com uma fina camada de plástico que o protege durante o processo de fabricação e provê isolamento elétrico entre o dispositivo e o componente após a montagem (DALLY; RILEY, 1978).

D. EXTENSÔMETROS SOLDÁVEIS

Este tipo de dispositivo é principalmente indicado para medidas em altas temperaturas e é inflexível e altamente resistente à água (DALLY; RILEY, 1978).

Um dos tipos desenvolvidos consiste em um fino fio encravado em uma capa de metal compactado com pó de MgO (óxido de magnésio) que funciona como isolante (DALLY; RILEY, 1978). O fio se estende para o exterior da capa e da região coberta com o pó (DALLY; RILEY, 1978). O diâmetro do fio usado dentro da capa é reduzido por um processo de decapagem (DALLY; RILEY, 1978). A Figura 12 mostra um extensômetro soldável.



Figura 12 – Extensômetro soldável (DALLY; RILEY, 1978).

Os valores comuns para resistências de extensômetros soldáveis estão entre 60 e 350 Ω , sendo adequados para uso em temperaturas entre -200 a 650 °C (DALLY; RILEY, 1978).

A soldagem deste tipo de dispositivo pode ser feita com um soldador de descarga de capacitor em diversos tipos de metal (DALLY; RILEY, 1978).

3.3 CUIDADOS PARA ESCOLHA E CONSERVAÇÃO DOS *STRAIN GAGES*

A. RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Os valores das resistências elétricas utilizadas em transdutores deste tipo dependem basicamente da aplicação e do tipo de dispositivo.

Para transdutores com dispositivos de resistência não metálica, por exemplo, há uma faixa muito ampla de resistência (de 15 a 35 k Ω), tornando inaplicável o uso de amplificadores de sinal (HETËNYI, 1966).

Para casos de extensômetros de resistência elétrica metálica, as faixas de resistência foram apresentadas nos itens C e D da seção 3.1.2.

B. TEMPERATURA

Um dos efeitos da variação de temperatura pode ser a modificação da sensibilidade do dispositivo, decorrente da dilatação ou contração do extensômetro, o que também pode ocasionar aumento ou redução do distanciamento entre os terminais do dispositivo (HETËNYI, 1966).

Devido a tais influências, deve-se procurar utilizar extensômetros adequados para a faixa de temperatura de operação em cada caso, de modo que sua resposta seja somente uma função da grandeza a ser medida e não da temperatura. Para tanto, pode-se considerar o uso de um extensômetro que tenha todas suas partes constituídas de um material cujo coeficiente de expansão seja idêntico ao do material do corpo-de-prova, entretanto, em alguns casos é

suficiente que isto somente ocorra em relação ao material da grade do dispositivo (HETËNYI, 1966).

Outro ponto de consideração sobre a variação da temperatura é a possibilidade de diferentes variações sentidas pelo extensômetro e pelo corpo-de-prova. Quando isto ocorre, erros significativos serão inseridos nos resultados e, neste caso, torna-se difícil de percebê-los e corrigi-los (HETËNYI, 1966).

Outros efeitos comuns ocasionados pela temperatura são: mudança de resistividade do dispositivo, degradação do material da base, do adesivo e/ou da proteção e mudanças de fase da liga utilizada na grade (GRANTE, 2004).

Caso seja desejável medir movimentos absolutos com grande precisão recomenda-se trabalhar com um dispositivo constituído de Invar (liga de ferro e níquel) ou até mesmo utilizar mecanismos de compensação de temperatura (HETËNYI, 1966).

C. DEFORMAÇÃO

O valor máximo de deformação que pode ser medido depende do tamanho da grade, do material, do adesivo usado e do material constituinte do dispositivo (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Extensômetros feitos de poliamida e constituídos de ligas avançadas ou de níquel, cromo, alumínio e ferro (*Karma alloys*) permitem ser empregados para medições de deformações entre ± 5 e $\pm 1,5$ %, respectivamente, faixas adequadas para medições em análises elásticas em componentes metálicos ou cerâmicos (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Em análises plásticas, é comum empregar extensômetros fabricados com grades de ligas avançadas que passaram por dois processos de recozimento e lâminas constituídas com poliamida de alta deformação (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993). Nestes casos, é possível alcançar até mesmo deformações de 20 % antes do início de fraturas nos pontos de solda ou nas regiões próximas ao final das grades dos dispositivos (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Em casos que podem ocorrer deformações de até 100 % é recomendado o uso de extensômetros de metal líquido, os quais são basicamente tubos de borracha preenchidos com mercúrio ou com uma liga de gálio-índio-estanho (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

D. TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

Além dos fatores ambientais, a tensão de alimentação pode influenciar muito na operação do extensômetro.

A potência dissipada pelo dispositivo se dá na forma de calor e dependerá da tensão aplicada ao extensômetro (DALLY; RILEY, 1978). Por tal motivo, não é recomendado utilizar tensões maiores do que as indicadas pelo fabricante do *strain gage* e, caso não seja possível reduzir a tensão de alimentação, pode-se optar pela aplicação de dispositivos com maior resistência elétrica, garantindo a adequação à faixa de potência dissipada por unidade de área permitida.

E. MEIO AMBIENTE

Cuidados na aplicação e na proteção do extensômetro, das ligações e dos fios são indispensáveis para reduzir erros de medida. Neste capítulo se apresentam alguns pontos importantes para o bom funcionamento dos extensômetros e alguns efeitos causados por fatores ambientais.

- Umidade

Além da temperatura que já foi apresentada, outro fator muito influente é a umidade. A presença de vapor d'água no ar atmosférico ou o contato direto com a água em si fazem com que a umidade seja absorvida pelo extensômetro e também pelo adesivo, o que pode prejudicar seu funcionamento de diversas maneiras (DALLY; RILEY, 1978). O vapor absorvido ocasiona redução da resistência do extensômetro e, caso tal redução seja muito significativa, o dispositivo poderá operar como se estivesse em curto-circuito (DALLY; RILEY, 1978). A absorção de água diretamente reduz a resistência e a rigidez da grade, reduzindo também a eficácia de transmissão da carga aplicada ao corpo-de-prova ao extensômetro – se tal efeito for muito significativo, não será possível obter os fatores de calibração corretos do dispositivo e erros de medição serão introduzidos (DALLY; RILEY, 1978).

Outro modo de influência pode ocorrer quando se tem adesivos à base de plástico. Ao absorver água, o adesivo tende a expandir e isto produzirá forças no mesmo, as quais serão transmitidas ao extensômetro e estarão inclusas nas medições sem que possam ser

identificadas como erros (DALLY; RILEY, 1978). Além disto, com a absorção de água, ocorrerá eletrólise no adesivo, resultando em aumento da resistência do mesmo e a transmissão de novas tensões ao extensômetro, as quais também não poderão ser identificadas como erro de leitura (DALLY; RILEY, 1978).

A fim de evitar os efeitos da absorção de água, pode-se utilizar métodos de proteção do extensômetro, como, por exemplo, a aplicação de uma fina camada de cera microcristalina ou um filme de poliuretano (DALLY; RILEY, 1978).

- Pressão hidrostática

Em aplicações em que o extensômetro fica exposto diretamente a um gás ou outro fluido, ocorre variação da resistência do dispositivo induzida pelas pressões hidrostáticas atuantes no mesmo (DALLY; RILEY, 1978).

Para estes tipos de aplicação, indica-se o uso de *strain gages* com grades muito finas e coladas em uma superfície lisa com uma camada o mais fina possível de adesivo, na qual não se podem ter bolhas (DALLY; RILEY, 1978).

- Radiação nuclear

Os efeitos da radiação nuclear no extensômetro podem ser dos mais diversos. O efeito mais preocupante é a modificação da resistividade elétrica (DALLY; RILEY, 1978). Para minimizar ou evitar tal efeito pode-se reduzir o número de testes a um valor mínimo ou aplicar dispositivos que já tenham sido expostos à radiação, além de efetuar sempre a retirada do carregamento e permitir que o reestabelecimento da resistência nula no extensômetro (DALLY; RILEY, 1978).

A exposição aos nêutrons produz também efeitos mecânicos no extensômetro, tais como: o aumento do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura e a redução da capacidade de alongamento; por outro lado, pode ocorrer a estrutura orgânica original da grade se esta for constituída de polímeros (DALLY; RILEY, 1978).

Outros efeitos adicionais como o aumento de temperatura, o aumento da tensão e o surgimento de correntes ao circuito de ligação dos extensômetros podem ocorrer em casos em que se tem radiação alta de raios gama ou em fluxos transientes. Para cada caso, devem-se tomar cuidados adicionais para evitar danos aos dispositivos de medição e erros de medidas.

F. ARMAZENAGEM

Apesar de não estar diretamente ligado ao projeto de *strain gages* a armazenagem é fundamental para garantir o bom funcionamento contínuo dos mesmos.

A condição padrão de armazenagem definida pela norma DIN 50014 é 23 °C e 50 % de umidade relativa (DALLY; RILEY, 1978). Deve-se evitar contato dos extensômetros com água, ácidos, bases, gases reativos, materiais contaminados e radiação nuclear.

3.4 ADESIVOS UTILIZADOS PARA FIXAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Como citado anteriormente, os dispositivos aderentes ou soldáveis requerem o uso de adesivos em sua montagem, o qual exerce a função de transmitir a força do corpo-de-prova ao dispositivo sem que ocorra distorção.

Apesar de parecer simples, a escolha do adesivo não é, pois pode influenciar o fator do dispositivo, a resistência, as características de histerese, dentre outras. Portanto, esta etapa deve ser cuidadosamente realizada para evitar que sejam ocasionados danos que podem resultar em comprometimento sério dos resultados de análises realizadas.

Primeiramente, antes de aplicar qualquer tipo de adesivo, a superfície deve estar adequadamente preparada e limpa para recebê-lo (DALLY; RILEY, 1978). Para tanto, deve-se remover qualquer tipo de pintura e/ou camadas de óxidos, bem como resíduos gordurosos que podem ser removidos com acetona ou metiletil cetona (DALLY; RILEY, 1978).

Outros cuidados importantes envolvem a limpeza do fundo do dispositivo com acetona imediatamente antes de sua colagem e também a limpeza da mão de quem fará a instalação (DALLY; RILEY, 1978).

Após ser instalado, o adesivo deve ficar submetido a determinadas condições de temperatura e pressão por tempo que garanta sua aderência adequada (DALLY; RILEY, 1978).

Alguns dos tipos de adesivos usados estão apresentados a seguir.

A. Cimento de nitrato de celulose

Este tipo de adesivo é muito empregado em dispositivos montados em base de papel e seu funcionamento adequado requer que o adesivo esteja completamente seco (DALLY; RILEY, 1978). Um dos problemas associados ao adesivo de nitrato de celulose é que pode

ocorrer liberação de solvente, uma vez que 85% da composição do cimento são solventes (DALLY; RILEY, 1978). Para evitar que isto aconteça, é necessário retirar grande parte do solvente através de evaporação (DALLY; RILEY, 1978). Além disso, usualmente se cobre o dispositivo e o confina ao corpo-de-prova para reduzir a área de possível liberação de solvente (DALLY; RILEY, 1978).

Não existe um procedimento padrão para o tratamento do cimento, pois a evaporação do solvente depende do tipo de célula e do tipo de instalação (DALLY; RILEY, 1978). Contudo, ao empregar calor ao dispositivo, se obtém um tempo menor e em condições ambientes o tempo será consideravelmente maior e dependerá estritamente das condições de umidade e temperatura (DALLY; RILEY, 1978). Quanto maior o tempo para a secagem do cimento, maior é o fator do dispositivo (DALLY; RILEY, 1978).

Assim que se finalizar completamente a secagem, é preciso colocar o dispositivo em água para que parte seja absorvida e o volume do mesmo se expanda (DALLY; RILEY, 1965). Não se deve deixar por um período muito longo, pois poderão ocorrer instabilidades e o funcionamento do mesmo será comprometido (DALLY; RILEY, 1978).

Para se verificar se o adesivo está adequado para a aplicação, mede-se a resistência da camada do mesmo, sendo que um valor adequado está em torno de 10 GΩ (DALLY; RILEY, 1978).

B. Cimentos de epóxi

A epóxi pura não libera voláteis durante seu tratamento, portanto, não se torna necessário aplicar ciclos adicionais de aquecimento para evaporar produtos residuais (DALLY; RILEY, 1978). Neste caso, nunca se deve adicionar os voláteis para melhorar a viscosidade da epóxi, pois isso traria mais prejuízos do que benefícios (DALLY; RILEY, 1978).

Os cimentos de epóxi podem ser amplamente empregados em células de carga se seus componentes estiverem adequadamente selecionados, pesados e tratados, sendo que o tratamento é a fase crucial para o uso deste tipo de cimento (DALLY; RILEY, 1978). Caso não tenha ocorrido o tratamento completo, a leitura dada pelo dispositivo ao qual o cimento foi aderido será influenciada pelas tensões residuais devido à continuação da polimerização da epóxi (DALLY; RILEY, 1978).

C. Cimentos cerâmicos

Os cimentos cerâmicos utilizados para fixação de extensômetros podem ser utilizados em forma de pó ou através de processos de spray por chama.

O uso de pó cerâmico (sílica ou alumina) é feito em combinação com um ácido fosfórico, sendo usualmente misturado com um solvente (álcool isopropílico) e um composto orgânico a fim de formar uma mistura líquida para melhor manipulação (DALLY; RILEY, 1978). Duas camadas de cimento são colocadas no extensômetro: uma entre o dispositivo e a superfície para isolamento; e outra sobre a grade do extensômetro (DALLY; RILEY, 1978).

O uso do processo de spray por chama consiste em inserir partículas cerâmicas ao dispositivo através da inserção do material cerâmico pela pistola de combustão durante a queima de uma mistura de gás oxiacetileno (DALLY; RILEY, 1978). Para esta técnica é necessário utilizar fitas à base de Teflon para o posicionamento do extensômetro no corpo-de-prova e dispositivos de lâmina de metal não são comumente usados já que as partículas pulverizadas são abrasivas (DALLY; RILEY, 1978).

D. Cimento de cianoacrilato

Este tipo de cimento é quimicamente incomum, pois não exige processos que apliquem calor nem catalisação para que sua polimerização seja completada (DALLY; RILEY, 1978). Pequenas quantidades de água ou outras bases fracas em sua superfície são suficientes para finalizar o processo de polimerização (DALLY; RILEY, 1978).

Para aplicação deste tipo de cimento em células de carga, basta colocar uma fina camada do cimento entre o corpo-de-prova e o dispositivo, pressionando levemente o conjunto durante um ou dois minutos para que se induza a polimerização (DALLY; RILEY, 1965). Após iniciado, o processo continuará em temperatura ambiente ou em temperaturas mais elevadas sem que seja preciso continuar aplicando a pressão (DALLY; RILEY, 1978).

Este tipo de adesivo tem uma vida útil relativamente curta, de cerca de 2-3 meses após sua aquisição (DALLY; RILEY, 1978). Seu bom funcionamento é muito influenciado pelas condições de armazenagem e, por isso, deve ser mantido em locais com temperatura entre 1,7 – 7,2 °C (DALLY; RILEY, 1978).

4 CÉLULA DE CARGA DESENVOLVIDA

Neste capítulo, apresentam-se os cálculos que devem ser feitos antes da concepção da célula de carga em questão.

4.1 CÁLCULOS INICIAIS DE PROJETO

Como descrito nos objetivos do trabalho, a célula de carga a ser projetada é constituída de uma viga engastada na qual são colados quatro extensômetros localizados na metade livre da viga próxima ao engaste. A célula visa à medição de uma força localizada na região que engloba a metade da viga até sua extremidade livre, tal como na Figura 13. A região hachurada representa a região do engaste, os retângulos em marrom representam os extensômetros e algumas medidas foram adotadas, tais como:

- O comprimento livre da viga, adotado como 140 mm;
- O comprimento do engaste, adotado como 50 mm;
- A carga a ser medida, adotada inicialmente como 300 N para que seja obtida uma célula de carga intermediária às que já se encontram no laboratório do DME (de 100, 500 e 1000 N) da FEG/UNESP.

Como mencionado nos objetivos deste trabalho, a célula a ser desenvolvida tem a finalidade de medir a carga aplicada à viga sem que haja intervenção de sua localização nos resultados. Para tanto, foi realizada uma análise breve sobre a montagem dos extensômetros e concluiu-se que a montagem como descrito na Figura 13 permite obter tal característica para a célula de carga. Além disto, levou-se em conta a sensibilidade da célula e escolheu-se a ligação dos extensômetros em ponte completa, que, de acordo com os conceitos apresentados na seção 2.2.3, permite obter máxima sensibilidade. A ligação dos extensômetros indicados pela Figura 17 deve ser feita como descrito na seção 2.2.3 – D.

As medidas da altura e da largura da viga, apresentadas na Figura 13 foram calculadas a partir da análise do tipo de ligação dos extensômetros para a célula desejada.

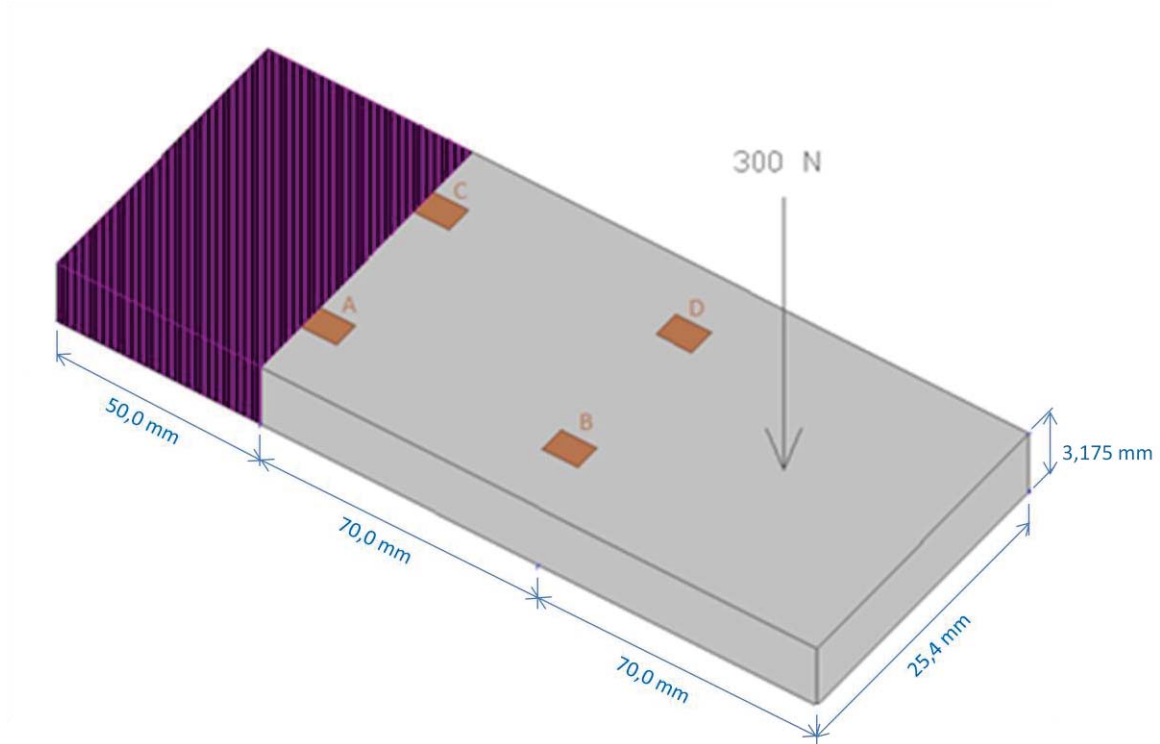


Figura 13 – Modelo da célula a ser desenvolvida.

A fim de projetar a célula, escolhendo seu material e as dimensões de sua seção, tomou-se como base a equação (3), relativa à montagem em ponte completa dos extensômetros.

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k(\varepsilon_A - \varepsilon_B + \varepsilon_C - \varepsilon_D)}{4} \quad (3)$$

Sabendo-se que a relação entre a deformação e a tensão é dada pela equação (4) e que a tensão normal no caso estudado é ocasionada por um momento fletor, sendo calculada pela equação (5):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (5)$$

Relacionando as equações anteriores, obtém-se a equação (6):

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{kc}{4EI} (M_A - M_B + M_C - M_D) \quad (6)$$

Na qual os momentos M_A , M_B , M_C e M_D são os momentos fletores atuantes nas seções onde estão colados os extensômetros. Vale ressaltar que a força aplicada deve estar localizada em qualquer ponto após a metade da região livre da viga em direção à sua extremidade livre.

Considerando uma carga genérica P , localizada a uma distância qualquer (x) em relação ao centro da viga livre ($L/2$), tem-se os momentos fletores dados pelas equações (7) e (8):

$$M_A = M_C = P \left(\frac{L}{2} + x \right) \quad (7)$$

$$M_B = M_D = Px \quad (8)$$

Substituindo as equações anteriores na equação (6), obtém-se a equação (9):

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{kPLc}{4EI} \quad (9)$$

Como é possível observar pela equação (9), a medida da carga P não depende da localização (x) da mesma.

Para vigas de seção retangular, o valor do coeficiente c da equação (9) é dado pela metade da altura da seção e seu momento de inércia (I), é dado pela relação $bh^3/12$, sendo b a largura e h a altura da seção. Substituindo estas relações na equação (9), tem-se a equação (10):

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{3kPL}{2Ebh^2} \quad (10)$$

A partir da equação (10), foi construída uma planilha em Excel (Tabela 1) para realizar cálculos referentes aos valores das dimensões da seção da viga, sendo adotados alguns parâmetros:

- O coeficiente de do extensômetro (k), considerado como 2,0 para projetos – valores em torno de 2,0 para extensômetros (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993);
- A variação da relação entre $\Delta E/V$ considerada na faixa de 0,001 a 0,003 (DALLY; RILEY, 1965);
- A largura (b) mínima e máxima considerada para a célula foi de 10 e 30 mm, respectivamente;

- O módulo de elasticidade do aço, adotado como 200 GPa;
- O módulo de elasticidade do alumínio, adotado como 70 GPa.

Tabela 1 – Modelo da planilha utilizada para cálculos.

Parâmetro		Valor	
L (mm)		140	
P (N)		300	
k		2,0	
Aço		200	
E (GPa)	Alumínio	70	
Material: Alumínio			
$\Delta E/V$ (mV/V)	bh^2 (m³)	b (m)	h (m)
0,0010	1,80E-06	0,010	1,34E-02
0,0015	1,20E-06	0,015	8,94E-03
0,0020	9,00E-07	0,020	6,71E-03
0,0025	7,20E-07	0,025	5,37E-03
0,0030	6,00E-07	0,030	4,47E-03
Material: Aço			
$\Delta E/V$ (mV/V)	bh^2 (m³)	b (m)	h (m)
0,0010	6,30E-07	0,010	7,94E-03
0,0015	4,20E-07	0,015	5,29E-03
0,0020	3,15E-07	0,020	3,97E-03
0,0025	2,52E-07	0,025	3,17E-03
0,0030	2,10E-07	0,030	2,65E-03

De acordo com os cálculos e os resultados da planilha, decidiu-se adotar como material para construção da célula o aço, por motivos de maior facilidade de obtenção e de montagem da célula, bem como o baixo custo. Em relação às medidas da seção da célula, adotaram-se os resultados obtidos para o valor da relação $\Delta E/V = 0,0025$, pois as medidas de altura e de largura ficaram bem próximas de valores comerciais, o que também facilita a construção da célula ($h = 3,175$ mm e $b = 25,4$ mm).

Após terem sido determinados todos os parâmetros de projeto que faltavam, devem-se ainda verificar alguns resultados.

Deve-se verificar a tensão máxima atuante na viga e o deslocamento máximo a fim de garantir que não haja escoamento do material nem um deslocamento exagerado da mesma com a aplicação da carga considerada. Para tanto, deve-se utilizar a equação (5) e a equação (11):

$$y_{\text{máx}} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (11)$$

Realizando os cálculos, tem-se que a tensão máxima será de 984,2 MPa (aproximadamente) e o deslocamento máximo será de, aproximadamente, 20 mm. Portanto, em relação aos aços comuns mais facilmente encontrados (limite de escoamento próximo de 200 MPa) pode ocorrer escoamento do material, sendo necessário utilizar um material mais resistente ou realizar processos térmicos para aumentar a resistência. Devido à indisponibilidade de material mais resistente, impossibilidade de realizar tratamentos térmicos e para reduzir custos, optou-se por reduzir o valor da carga medida. Para tanto, utilizou-se o valor aproximado da tensão de escoamento do material como 200 MPa e utilizou-se tal valor na equação (5) para obter um valor de carga máxima a ser medida em relação às dimensões já escolhidas da célula de carga. Deste modo, obteve-se como carga máxima um valor de 60,96 N. Por segurança, adotou-se uma carga máxima a ser medida de 60 N.

O próximo passo é verificar a tensão máxima de saída da ponte de acordo com a alimentação da mesma. Tomando como base a relação $\Delta E/V$ apresentada na Tabela 1, recalcula-se o valor da sensibilidade da célula para as dimensões determinadas e para a carga de 60 N a ser medida. De acordo com o cálculo, a sensibilidade da célula será de aproximadamente 0,5 mV/V. Tal valor não se apresenta nas faixas recomendadas para o projeto de células de carga, contudo, não será um fator limitante para o uso da célula projetada porque a mesma estará sujeita a um deslocamento máximo de 1,0 mm, calculado

pela equação (4), e a tensão máxima de saída da ponte calculada pela relação de $\Delta E/V$ será de 1,25 mV para alimentação de 2,5 V, que é a tensão fornecida pelo aparelho a ser utilizado no laboratório.

4.2 PREPARAÇÃO E MONTAGEM DA CÉLULA

Neste capítulo, são apresentados os materiais e os métodos para a montagem da célula de carga em questão.

4.2.1 MATERIAIS NECESSÁRIOS

A montagem da célula de carga envolve a colagem dos extensômetros e dos fios de ligação da ponte, basicamente, e, para tanto, foram utilizados:

- 4 extensômetros;
- A barra chata de aço construída com as dimensões calculadas e adotadas;
- 4 bases de terminais de extensômetros;
- Lixas de granulações 220, 320 e 400;
- Acetona;
- Algodão;
- Estilete;
- Durex;
- Pinça;
- Base de acrílico;
- Cola à base de ester de cianoacrilato (adesivo instantâneo Loctite® 496);
- Ponta de solda com estanho;
- Tesoura;
- Régua;
- Lapiseira;
- Fragmentos de borracha;
- Papel toalha;
- Multímetro;
- Resina à base de silicone;
- Fios de 1m de extensão;

- Conectores.

Todos os extensômetros utilizados são de medida uniaxial e suas especificações são dadas na Figura 14.

KYOWA		MADE IN JAPAN			
TYPE	KFG-3-120-C1-11				
GAGE FACTOR (24°C,50%RH)	2.09 ± 1.0%	LOT No.	Y4065S	BATCH	056A M09
GAGE LENGTH	3 mm	TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR	+0.008 % / °C		
GAGE RESISTANCE(24°C,50%RH)	119.8 ± 0.2 Ω	APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A, PC-6		
ADOPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7 PPM/°C	QUANTITY	10		
KYOWA STRAIN GAGES					

Figura 14 – Dados dos extensômetros utilizados na célula de carga (foto da embalagem do extensômetro da KYOWA).

4.2.2 MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas as etapas de montagem da célula de carga.

1. Após ter sido obtida a barra chata nas dimensões desejadas e com a marcação dos pontos de engaste e de sua linha central em relação à superfície que ficará livre, deve-se lixar a região onde serão colados os extensômetros até que se obtenha uma superfície livre de ranhuras consideráveis e que possam ser percebidas a olho nu. O processo de lixamento realizado foi feito com movimentos circulares e da lixa mais grossa para a mais fina. Vale ressaltar que a superfície não deve estar polida, pois neste caso a colagem dos extensômetros é dificultada pela redução da aderência.
2. Nesta etapa é necessário limpar a superfície onde serão colocados os dispositivos com a solução de acetona. Para isto, deve-se prender um pedaço de algodão na ponta da pinça e então molhá-lo com a acetona, passando-o na superfície desejada.
3. A seguir, pode-se partir para a colagem dos extensômetros. Antes de iniciar, deve-se marcar na peça a posição desejada para a colagem: com a régua e a lapiseira, marcaram-se os pontos referentes à $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ da largura da barra nas linhas de início da superfície livre e da metade desta, já riscadas anteriormente. As marcações feitas com a lapiseira representarão as linhas coincidentes com a linha central de cada extensômetro. É

necessário que as marcações sejam feitas fora da área de colagem para que não haja contaminação da superfície com o grafite. Para garantir que isto não ocorra e também para retirar resíduos decorrentes do contato com o local, deve-se limpar novamente a superfície de colagem com a acetona. O próximo passo é posicionar o extensômetro. Para esta etapa, deve-se posicionar o mesmo em cima da base de acrílico com sua grade voltada para cima, colar um pedaço de durex na parte superior do dispositivo e posicionar a extremidade da grade que contém os terminais coincidentemente com a borda de uma das faces da base. Em seguida, com o auxílio de um pedaço de borracha posicionado acima do extensômetro e do durex, encurvar os terminais do extensômetro para cima e cortá-los com a tesoura em um comprimento razoável para soldá-los na base posteriormente. Mantendo os terminais voltados para cima, deve-se então levantar o extensômetro da base, mantendo-o preso ao durex. O posicionamento do conjunto deve ser então realizado em relação às marcações feitas na barra.

4. Após ter sido verificado o posicionamento correto do extensômetro, deve-se cuidadosamente levantar uma das pontas do durex e puxá-la lentamente até que seja levantado o dispositivo com a fita adesiva. Pode-se adicionar um pouco de cola à superfície de contato do dispositivo com a barra e na própria barra, prosseguindo com o posicionamento do mesmo novamente.

5. Logo após posicionar o extensômetro colado à barra, deve-se pressionar o mesmo com ajuda do fragmento de borracha durante, aproximadamente, 5 minutos para garantir a aderência correta.

6. Decorrido o tempo necessário, deve-se retirar o durex puxando-o lentamente para que não seja arrancado o extensômetro.

7. Em seguida, verificar, com ajuda do estilete, se as bordas do extensômetro colaram adequadamente. Para isto, basta passar cuidadosamente a ponta do estilete nas bordas e verificar se ocorre levantamento em algum local. Se for verificado que alguma parte não aderiu à superfície, deve-se adicionar mais um pouco de cola e aguardar alguns minutos. Caso ocorra algum excesso de cola em qualquer momento desta etapa deve-se retirar o mesmo com papel toalha.

8. Após colar o extensômetro, partiu-se para a colagem das bases dos terminais. O procedimento é análogo ao da colagem dos extensômetros.

9. Com a base colada, posicionaram-se os terminais nos pontos de solda.

10. Em seguida, desejou-se soldar os terminais em sua base antes de partir para a colagem dos demais extensômetros. Nesta etapa, basta ligar a ponta de solda e aguardar

alguns minutos para que seja aquecida. A partir de então, deve-se posicionar a ponta na base do terminal e alimentá-la com o estanho até que seja obtido o cordão de solda.

11. Em seguida, realizaram-se os testes de resistência dos extensômetros e de isolamento. O primeiro teste foi feito posicionando as pontas do multímetro (o qual deve estar ligado para medir resistência) uma em cada terminal soldado e verificando se o valor obtido pela medição se adequa aos limites de tolerância fornecidos pelo fabricante do dispositivo (no caso os limites eram de 119,6 – 120,0 Ω). O segundo teste deve ser feito posicionado uma ponta do multímetro em um dos terminais soldados e a outra em contato com a barra, neste teste deve-se obter um valor infinito (indicado por *overflow*) que indica o isolamento correto dos terminais.

12. Repetiram-se os passos de 3 – 11 para os demais extensômetros.

13. A próxima etapa seguida foi a de soldagem dos fios de ligação da ponte. Para tanto, efetuou-se a solda de acordo com as ligações descritas pela configuração de ponte completa (seção 2.2.3 – D).

14. Após soldar os fios, passou-se a resina na região dos extensômetros.

15. Em seguida, foram colocados os conectores nos fios.

16. Após obter a célula praticamente finalizada, montou-se a mesma no engaste, ligou-se a ponte e os aparelhos de medição.

4.2.3 MONTAGEM DA CÉLULA

Após estar pronta, a barra chata com os extensômetros deve ser presa ao suporte em que estará engastada em uma de suas extremidades e devem ser ligados os fios ao equipamento de alimentação da ponte. A montagem inicial (vista superior e lateral, respectivamente) da célula no suporte pode ser vista nas Figuras 15 e 16.

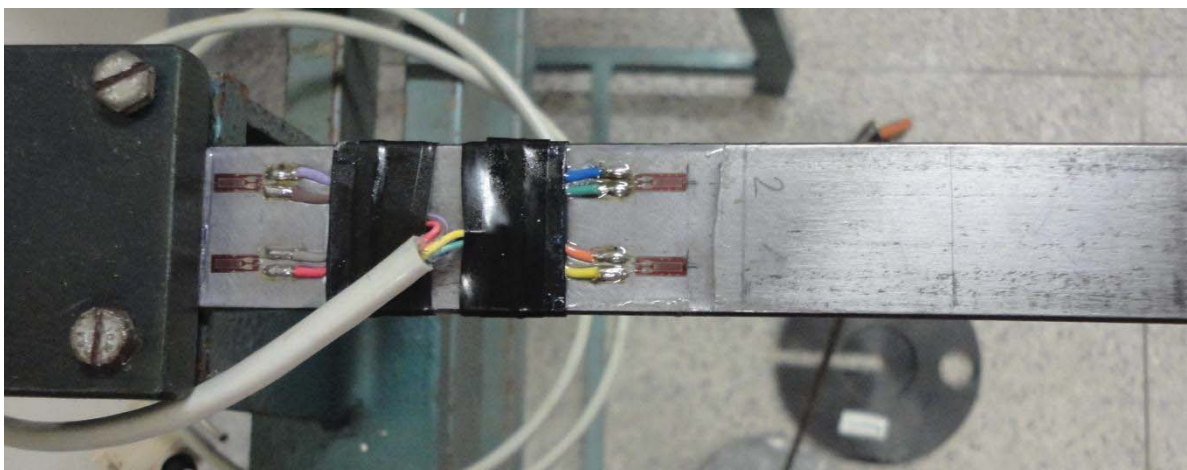


Figura 15 – Vista superior da célula montada no suporte.

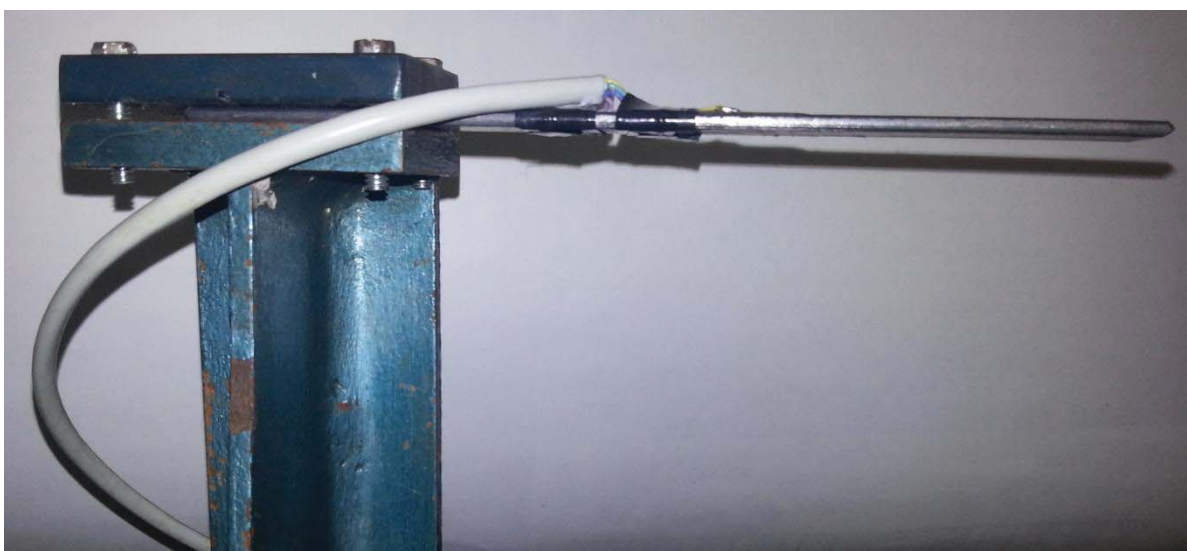


Figura 16 – Vista lateral da barra montada no suporte de engaste.

Os fios brancos na Figura 15 são os que devem ser ligados ao equipamento de alimentação da ponte. O equipamento utilizado foi o Spider 8, produzido pela HBM. Utilizou-se também o *software* Catman®AP V3.3.4, também da HBM, para calibração e aquisição dos dados do ensaio.

Estando toda a montagem da célula finalizada, parte-se para a etapa de ensaios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar os ensaios da célula, deve-se calibrar a mesma para garantir seu funcionamento correto. Para tanto, primeiramente foi gravada a leitura obtida através do *software* para a célula sem carregamento e repetiu-se a medição para três cargas diferentes (de 18,57 N, 48,54 N e de 74,44 N), sendo que as duas cargas menores foram colocadas na extremidade livre da célula (posição zero) e a maior foi colocada a 60 mm da extremidade livre (posição 6). O programa então ajustou os resultados automaticamente por uma curva aproximada e uma equação que possa correlacioná-los, deste modo obteve-se uma curva de calibração conhecida pelo Spider 8.

A partir de então se selecionou a frequência de aquisição de dados em 10 Hz.

Após ter sido feita a calibração basta mudar para o modo de aquisição de dados e colocar a carga a ser medida tal como na Figura 18. Deve-se aguardar alguns segundos para estabilizar o sistema e então clicar na opção de leitura do programa. Para as cargas de 18,57 N e 48,54 N foi realizada uma medida na extremidade livre (posição zero), uma a 30 mm da extremidade livre (posição 3) e outra a 60 mm da extremidade livre (posição 6) – ver Figura 17. Para a carga de 74,44 N foram realizadas somente duas medidas, uma na posição 3 e outra na 6 devido às limitações de carga da célula construída.

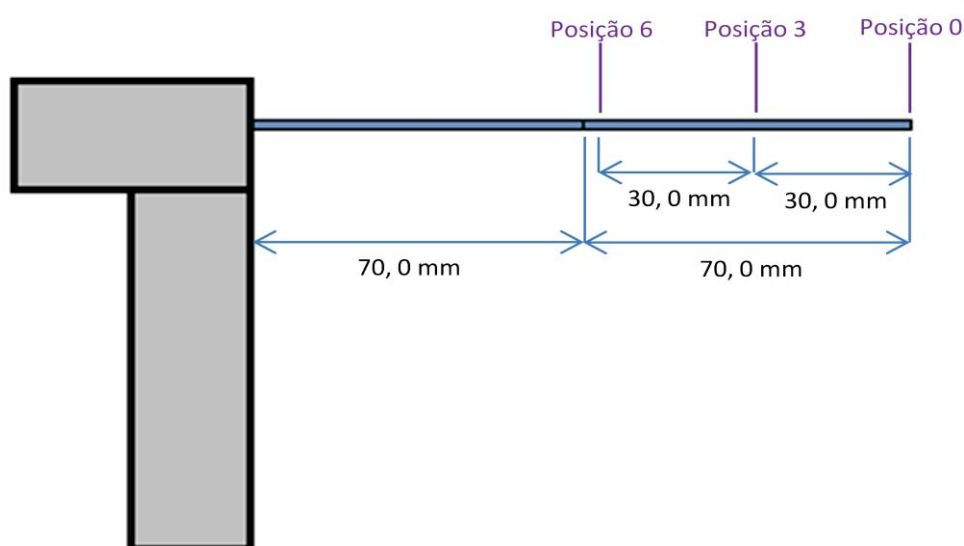


Figura 17 – Esquematisação do posicionamento das cargas para os ensaios da célula.

Os resultados obtidos seguem na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos nos ensaios da célula.

Carga Real (N)	Leitura (N)		
	Posição 0	Posição 3	Posição 6
0,00	0,00	0,00	0,00
18,57	18,07	18,62	18,62
48,54	47,75	48,37	48,37
74,44	-	73,70	74,94



Figura 18 – Posicionamento da carga na célula.

Para melhor verificar os resultados, exportou-se a tabela de aquisição de dados do programa para o Excel e foi traçado o gráfico apresentado na Figura 19.

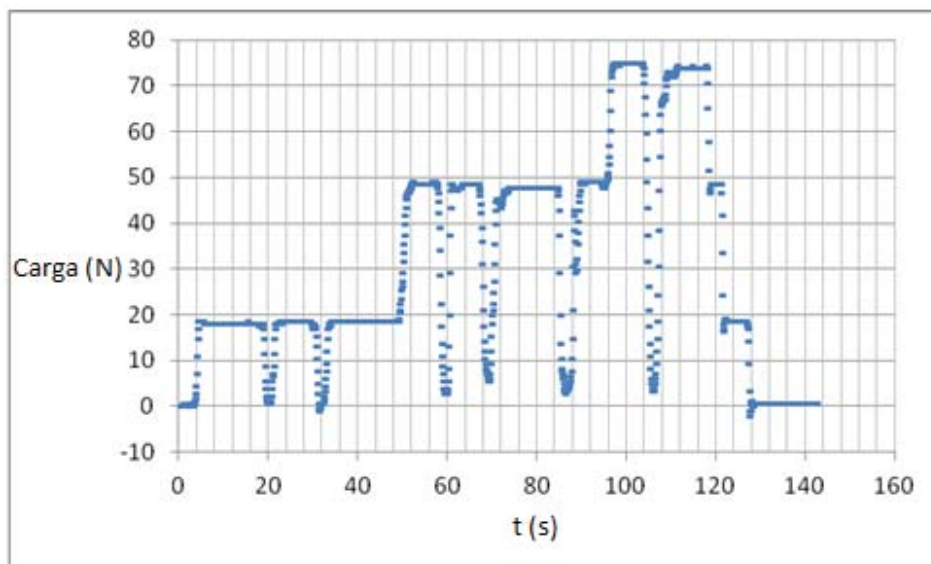


Figura 19 – Gráfico dos resultados de leitura obtidos nos ensaios da célula.

Como é possível perceber pela Tabela 2 e pelo gráfico, as medições das cargas apresentaram pequena variação tanto em relação à mudança de posição quanto em relação aos valores reais das cargas em todos os casos. Para melhor verificar tal variação, foram calculados os erros relativos a cada medição. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Erros percentuais de leitura.

Erros de leitura (%)			
Carga Real (N)	Posição 0	Posição 3	Posição 6
18,57	2,69	-0,27	-0,27
48,54	1,63	0,35	0,35
74,44	-	0,99	-0,67

De acordo com os resultados obtidos é possível verificar que a célula funcionou corretamente medindo as cargas sem depender da localização das mesmas na barra, considerando os pequenos erros percentuais nas medidas. Também é possível perceber que os

erros percentuais se reduzem com o aumento da carga a ser medida, no sentido de aproximação com o valor de projeto de 300 N.

6 CONCLUSÃO

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foi possível alcançar o objetivo de aprofundar os conhecimentos sobre extensômetros de resistência elétrica, células de carga e transdutores. Os conceitos apresentados auxiliaram o projeto da célula bem como o conhecimento sobre detalhes relacionados aos tipos de dispositivos a serem estudados.

Como é possível verificar através dos resultados dos ensaios da célula construída, o objetivo de construir uma célula real a partir dos conhecimentos teóricos apresentados também foi alcançado. Apesar da célula não ter sido inicialmente dimensionada para os valores de carga utilizados, os resultados dos ensaios com a mesma demonstraram seu bom funcionamento uma vez que os erros percentuais foram praticamente desprezíveis, bem como evidenciaram que o projeto realmente permite medir certa carga independentemente de sua localização.

Pode-se perceber inclusive que os erros percentuais diminuem à medida que o valor da carga a ser medida se aproxima do valor de 300 N, para o qual a célula foi dimensionada.

Outro ponto que é possível adicionar é a possibilidade de medir cargas maiores que 60 N (valor máximo estimado para medições na célula construída) existe, sendo necessário somente posicionar a carga mais próxima da região central da barra. Portanto, a célula desenvolvida se apresenta como uma opção versátil para uso no laboratório do Departamento de Mecânica da FEG/UNESP.

REFERÊNCIAS

AMOROS, Roberto Torres. **Avaliação de Tensões Residuais em Chapas Planas de Aço Carbono, Destinadas a Processos de Corte a Laser, Pelo Método da Anisotropia Planar**. 2008. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Lactec, Paraná, 2008.

BECK, João Carlos Pinheiro. **Projeto, Construção e Análise de Células de Carga de Placa e de Anel**. 1983. 175 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1983. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/1348>>. Acesso em: 10 jul. 2012.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JUNIOR, E. Russell. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: Makron Books, 1995.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.. **Experimental Stress Analysis**. Chicago: Mcgraw-hill, 1978.

DALLY, James W.; RILEY, William F.; MCCONNELL, Kenneth G.. **Instrumentation for Engineering Measurements**. United States: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 50014**: climatização.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Instrumentação Industrial**: Conceitos, aplicações e análises. São Paulo: Érica, 2002.

GRANTE. **Apostila de Extensometria**. Disponível em: <<http://www.grante.ufsc.br/download/SG-Apostila.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012.

GRÉDIAC, M.; HACHANI, A.; VAUTRIN, A.. Applying a quadriaxial extensometer to the strain analysis of anisotropic structures. **Elsevier**, França, p.37-49, 19 fev. 2003.

HETËNYI, M. (Ed.). **Handbook of Experimental Stress Analysis**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1966.

MAGALHÃES, D. V.. **Extensometria e Sensores de Aceleração**. Disponível em: <http://www.mecatronica.eesc.usp.br/wiki/upload/c/ca/SEM0539_AulaLab3.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2012.

MSPC. **Introdução:** Esforços Comuns. Disponível em:
<<http://www.mspc.eng.br/matr/resmat0110.shtml>>. Acesso em: 28 out. 2012.

SMART, B. G. D.; SINGH, R. N.; ISAAC, A. K.. Design and development of the magnetic cantilever extensometer. **Elsevier**, Cardiff, p.269-276, 04 mar. 2003.

VISHAY. **Stress Analysis Strain Gages.** Disponível em:
<<http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/>>. Acesso em: 10 jul. 2012.