

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

STHEFANI NEVES MINELA

EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO

Joinville

2017

STHEFANI NEVES MINELA

EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia Automotiva no curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo.

Coorientador: Prof. Dr. Jakerson Ricardo Gevinski.

Joinville

2017

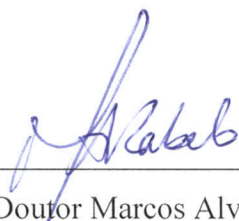
EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO

STHEFANI NEVES MINELA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 24 de Novembro de 2017.

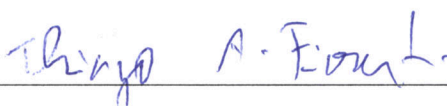
Banca Examinadora:



Doutor Marcos Alves Rabelo
Orientador/Presidente



Doutor Sergio Junichi Idehara
Membro



Doutor Thiago Antonio Fiorentin
Membro

A meus pais, Altamir Santo Minela e Nalzira Neves.

Agradeço grandemente a Deus, por ter estado presente em minha vida em todos os anos de Universidade, me iluminando, me dando sabedoria para superar cada obstáculo e forças para continuar.

A minha amada família. Ao meu pai Altamir, que sempre foi meu grande exemplo de força e honestidade, à minha mãe Nalzira, exemplo de mãe e mulher, minhas rochas sólidas, e à minha irmã Emanoela. Agradeço toda a compreensão, dedicação e amor incondicional. Obrigada por acreditarem em mim. Sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Ao meu orientador Dr. Marcos Alves Rabelo, meu muito obrigada por seu apoio, compromisso e ensinamentos durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu Coorientador Dr. Jakerson Ricardo Gevinski, por todo apoio e incentivo. Agradeço por acreditarem em meu potencial. Vocês foram de grande importância para a realização deste trabalho.

A Willyan Vargas, por estar ao meu lado, sempre disposto a ajudar no que fosse preciso. Obrigada pelo amor, paciência e toda dedicação.

Aos meus amigos, que pude compartilhar minha vida durante esta caminhada. Todos de algum modo fizeram parte desta conquista.

Agradeço aos professores Carlos Mauricio Sacchelli e Modesto Hurtado Ferrer e a equipe Fórmula CEM, que me proporcionaram crescimento acadêmico e profissional.

Ao professor Dr. Alexandro Garro Brito, pelo auxílio e contribuição para a execução das instrumentações.

A professora Dra. Vanessa Aparecida Alves de Lima, por sua contribuição na revisão deste trabalho.

A todos os professores (as) da UFSC, centro tecnológico de Joinville, em especial aos professores do curso de Engenharia Automotiva, por fazerem parte da minha formação acadêmica. Obrigada pelo conhecimento e experiências compartilhadas.

RESUMO

A técnica da extensometria, causou a evolução de análises estruturais, inicialmente com grande impacto nos setores automobilístico, aeronáutico e aeroespacial e hoje presente nos mais diversos segmentos industriais. Com o intuito de simplificar análises estruturais e otimizar a qualidade produtiva e a confiabilidade de componentes mecânicos, os extensômetros tornaram-se dispositivos de análise essenciais para a indústria. Visando a grande importância da extensometria, este trabalho consiste em estudar a técnica e aplicá-la em corpos de prova especificamente preparados. Para se alcançar este propósito um embasamento teórico no tema foi realizado e corpos de prova capazes de reproduzir condições reais de carregamento, foram projetados e fabricados. Os componentes de testes foram submetidos a tensão de flexão e torção, a partir de carregamentos distintos, permitindo a análise de comportamentos diferentes de deformação. As deformações correspondentes aos esforços aplicados foram medidas com a utilização de extensômetros. Utilizou-se o sistema LYNX[®] para aquisição e análise de dados e o Matlab[®] para complementar as análises. Também foram realizados cálculos analíticos das respectivas deformações, embasados na teoria. A partir de ambos os modos de análise, erros, influências e/ou possíveis variações causadas por parâmetros avaliativos adotados, puderam ser comparados. Os resultados demonstram que os corpos de prova desenvolvidos são capazes de reproduzir condições reais de deformação, sendo a linearidade conservada tanto na análise analítica assim como na análise experimental.

Palavras-chave: Extensometria. Tensão. Deformação. Aquisição de sinais. Análise comparativa.

ABSTRACT

The Extensometry technique, caused the evolution of structural analyses, initially with great impact on the automotive, aeronautical and aerospace sectors and today present in the most diverse industrial segments. In order to simplify structural analyses and optimize the productive quality and reliability of mechanical components, the strain gauges have become essential analytical devices for the industry. Aiming at the great importance of extensometry, this work consists of studying the technique and applying it in specially prepared tests specimens. In order to achieve this purpose, a theoretical basis in the theme was accomplished and tests specimens capable of reproducing actual loading conditions were designed and manufactured. The test components have undergone flexion and torsion tension, from distinct loads, allowing the analysis of different deformation behaviors. The deformations corresponding to the efforts applied were measures with the use of strain gauges. The LYNX[®] system was used for data acquisition and analysis and Matlab[®] to complement the analyses. Analytical calculations of the respective deformities were also conducted, based on the theory. From both modes of analysis, errors, influences and/or possible variations caused by the evaluated parameters adopted, they could be compared. The results demonstrate that tests specimens are capable reproducing actual deformation conditions, and the linearity is maintained in both analytical analysis and experimental analysis.

Keywords: Extensometry. Stress. Strain. Data acquisition. Comparative analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Métodos de medição.	17
Figura 2 – Extensômetro mecânico	18
Figura 3 – Representação de extensômetro capacitivo.....	19
Figura 4 – Sensor Piezoelétrico.....	20
Figura 5 – Modelo de extensômetro resistivo.	21
Figura 6 – Modelo de Extensômetro.	22
Figura 7 – Direções efetiva e transversal do extensômetro.	23
Figura 8 – Modelo de codificação de extensômetros.	25
Figura 9 – Extensômetro uniaxial.....	25
Figura 10 – Modelos de extensômetros biaxiais.	26
Figura 11 – Modelos de extensômetros Triaxiais.....	27
Figura 12 – Extensômetro quadriaxial.	27
Figura 13 – Limpeza da superfície para fixação do extensômetro.	29
Figura 14 – Manuseio do extensômetro.	30
Figura 15 – Processo de posicionamento do extensômetro.....	30
Figura 16 – Processo de colagem do extensômetro.....	31
Figura 17 – Extremidades dos fios para ligação do extensômetro e placa de aquisição de sinais	32
Figura 18 – Posicionamento dos cabos ao extensômetro antes da solda.....	33
Figura 19 – Extensômetro soldado.	33
Figura 20 – Etapa após a solda.	34
Figura 21 - Modelo de extensômetro fixado a peça e fios.....	35
Figura 22 – Ligação 3 fios de um extensômetro em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone.	36
Figura 23 - Ligação 3 fios de um extensômetro em $\frac{1}{2}$ de ponte de Wheatstone.....	36
Figura 24 – Fluxo de processamento de dados entre carregamento e Resposta.....	38
Figura 25 – Ponte de Wheatstone.	39
Figura 26 – Barra retangular sob flexão.	46
Figura 27 – barra em flexão com configuração de $\frac{1}{2}$ ponte de Wheatstone.....	47
Figura 28 – Barra em flexão utilizando ponte de Wheatstone completa.....	48
Figura 29 – Torque aplicado ao eixo e o comportamento da tensão cisalhante	49

Figura 30 – Extensômetros com angulações em relação ao eixo x	53
Figura 31 – Rosetas de 45° e 60°	54
Figura 32 – Fluxograma de execução	56
Figura 33 – Equipamento de aquisição de dados LYNX 2002.	57
Figura 34 – Fluxo ilustrativo da instrumentação.	58
Figura 35 - Modelo do corpo de prova para estudo de deformação unidirecional.....	59
Figura 36 – Extensômetro unidirecional utilizado.	60
Figura 37 – Corpo de prova para medição de deformação longitudinal	60
Figura 38 – Utensílios para lixamento, limpeza da barra e manuseio do extensômetro.	61
Figura 39 – Extensômetro e o processo de fixação.	62
Figura 40 – Estação de solda.	63
Figura 41 – Extensômetro soldado	63
Figura 42 – Massa para carregamento.	64
Figura 43 – Gancho e porca.....	64
Figura 44 – Modelo do corpo de prova para estudo de deformação angular.	65
Figura 45 – Extensômetro unidirecional e terminal.	66
Figura 46 – Corpo de prova para medição de deformação angular.....	67
Figura 47 – Eixo em processo de instrumentação.	67
Figura 48 – Extensômetro e terminal fixos a superfície do eixo.	68
Figura 49 – Massas adicionais para carregamento.	68
Figura 50 – Aferição da resistência no extensômetro.....	70
Figura 51 – Aferição da resistência nos fios de extensão.....	71
Figura 52 – Corpo de prova conectado ao sistema de medição.....	72
Figura 53 – Medição de deformação para 162,94 g no corpo de prova.	73
Figura 54 - Medição de deformação para 261,62 g no corpo de prova.	74
Figura 55 – Medição de deformação para 1060,56 g no corpo de prova.	74
Figura 56 – Medição de deformação para 1160,24 g no corpo de prova.	75
Figura 57 - Medição de deformação para 1258,92 g aplicadas ao corpo de prova.	76
Figura 58 – Deformação medida para 1358,6 g aplicadas ao corpo de prova.....	76
Figura 59 – Gráfico de deformações	78
Figura 60 - Aferição nos fios de extensão.	80
Figura 61 – Corpo de prova instrumentado conectado ao sistema de aquisição de dados.	81
Figura 62 - Medição de deformação para 560,95 g no corpo de prova.	82
Figura 63 - Medição de deformação para 759,31 g no corpo de prova.	82

Figura 64 - Medição de deformação para 1060,56 g no corpo de prova.	83
Figura 65 - Medição de deformação para 1558,21 g no corpo de prova.	84
Figura 66 - Medição de deformação para 2053,43 g no corpo de prova.	84
Figura 67 - Medição de deformação para 2351,5 g no corpo de prova.	85
Figura 68 – Gráfico de deformações.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição e fator de sensibilidade (K_G) para ligas metálicas utilizadas em extensômetros.	22
Tabela 2 – Adesivos e respectivas características.	29
Tabela 3 – Agentes de proteção para extensômetros.....	34
Tabela 4 – Configurações de pontes de Wheatstone.	42
Tabela 5 – Coeficientes de expansão térmica para extensômetros auto compensadores.	51
Tabela 6 – Extensômetro utilizado para medição de deformação unidirecional.	59
Tabela 7 – Massas de componentes e utensílios de fixação.	64
Tabela 8 – Extensômetro utilizado para medição de deformação angular.	66
Tabela 9 – Massas adicionais	69
Tabela 10 – Configurações de entrada para $\frac{1}{4}$ de ponte módulo AI-2164.	72
Tabela 11 – Valores de Deformação unidirecional – Cálculo analítico.	77
Tabela 12 – Diferença entre deformação medida e calculada.	78
Tabela 13 – Configurações de entrada para $\frac{1}{2}$ ponte módulo AI 2164.	81
Tabela 14 – Valores de deformação angular – Cálculo analítico.	86
Tabela 15 - Diferença entre deformação medida e calculada.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de dilatação térmica
β	Coeficiente de expansão térmica
b	Largura da barra de seção transversal retangular
γ	Coeficiente de temperatura do elemento resistivo
γ_{θ}	Deformação angular
γ_{at}	Distorção
ΔL	Variação de comprimento
ΔR	Variação de resistência
ΔV	Variação de tensão
d	Diâmetro do eixo
ε	Deformação
E	Módulo de elasticidade
ε_a	Deformação no sentido axial do extensômetro
ε_t	Deformação no sentido transversal do extensômetro
ε_x	Deformação no plano x
ε_y	Deformação no plano y
F	Carregamento
FG	Fator de gage
G	Módulo de elasticidade transversal
i	Corrente elétrica
K_G	Fator de sensibilidade
K_g	Fator de sensibilidade original do extensômetro
K_{gN}	Novo fator de sensibilidade do extensômetro
L	Distância entre o centro do extensômetro e o ponto de aplicação da força
M	Momento de torção
ν	Coeficiente de Poisson

P	Força axial ou de flexão
ρ	Resistividade
σ	Tensão
σ_x	Tensão no plano x
σ_y	Tensão no plano y
R	Resistência
RC	Resistência de calibração
R_c	Resistência do cabo
R_o	Resistência de inicial
$r_{ext.}$	Raio externo do eixo
R_g	Resistência do extensômetro
$r_{int.}$	Raio interno do eixo
RM	Resistência medida
r_{MAX}	Raio máximo ou raio externo do eixo
S_a	Sensibilidade do extensômetro no sentido axial
S_s	Sensibilidade do extensômetro à deformação por cisalhamento
S_t	Sensibilidade do extensômetro no sentido transversal
τ	Tensão de cisalhamento
τ_{MAX}	Tensão cisalhante máxima
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento ou distorção angular no plano xy
T	Torque
t	Espessura da barra de seção transversal retangular
V	Tensão elétrica
V_i	Tensão elétrica de entrada
V_o	Tensão elétrica de saída

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivo Específico.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO.....	16
2.2 ELEMENTO SENSOR - EXTENSÔMETRO RESISTIVO.....	21
2.2.1 Seleção do extensômetro.....	24
2.3 MÉTODO DE MONTAGEM.....	28
2.3.1 Cabeamento.....	32
2.3.2 Efeito da resistência do sistema de ligação.....	35
2.4 MÉTODO DE MEDIÇÃO.....	37
2.4.1 Ponte de Wheatstone.....	38
2.4.2 Ponte de Wheatstone e o efeito da temperatura.....	50
2.5 TRANSFORMAÇÃO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO.....	51
2.5.1 Estado de tensão uniaxial.....	51
2.5.2 Estado biaxial de tensão e deformação.....	52
2.5.3 Estado Geral de Tensões.....	53
3 METODOLOGIA.....	56
3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	57
3.1.1 Fluxo da instrumentação.....	58
3.2 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL.....	58
3.2.1 Preparação da superfície, fixação do extensômetro e instrumentação.....	61
3.3 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO ANGULAR.....	65
3.3.1 Preparação da superfície, fixação do extensômetro e instrumentação.....	67
4 ESTUDOS DE CASO.....	70
4.1 ESTUDO DA DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL.....	70
4.2 ESTUDO DE CASO PARA DEFORMAÇÃO ANGULAR.....	79
5 CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

A extensometria é uma técnica utilizada para a medição de deformação. A deformação de um corpo é causada por influências externas ou internas ao material, como forças, pressões, momentos, calor e alterações estruturais. Estas podem agir isoladamente ou em conjunto, somando efeitos a uma estrutura mecânica ou componente da mesma. (OMEGA, 2017a).

Os extensômetros são uma das ferramentas de medição mais relevantes na técnica de medição de deformação. Em 1938 o professor Arthur C. Ruge, assistente de engenharia e especialista em terremotos no Instituto de Tecnologia em Massachusetts, desenvolveu o primeiro extensômetro. Na invenção, o professor tinha como intuito ajudar seu orientando em pós-graduação, John Meier, a realizar seu estudo sobre tensões sísmicas, em um simulador de terremoto de mesa, constituído de elevados tanques de água, projetado por ele. (FEDER, 2000).

O extensômetro criado por Ruge era composto por um filamento fino de tungstênio com elevada resistência, curvados em padrão de zigzag e fixo sobre uma base rígida na estrutura analisada. Uma corrente elétrica foi imposta sobre o dispositivo, de tal forma que, caso alguma força gerasse assimetria dos filamentos e, portanto, variação da resistência dos fios, o medidor indicava uma tensão equivalente a força aplicada à estrutura analisada. (FEDER, 2000).

Nomeado como SR - 4, o extensômetro ajudou os Estados Unidos e aliados a vencer a segunda guerra mundial. Foi crucial para projetos de aeronaves, armamentos e equipamentos. Além disso, foi utilizado na primeira espaçonave lunar, medindo a deformação na estrutura da aeronave e enviando o primeiro sinal a terra durante o aterrisagem da mesma em território lunar. (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2017).

Sendo uma tecnologia para medição de deformação pontual bem desenvolvida, os extensômetros são aplicados para a medição de toda e qualquer deformação mecânica, sobretudo em locais de difícil acesso e de cargas dinâmicas, em razão de seu sinal elétrico emitido ser facilmente processado e analisado por sistemas computacionais, fator limitante em outros sistemas de medição convencionais existentes. (BORCHARDT; ZARO, 1982).

Na indústria, a busca pela melhoria da produtividade e uso de tecnologias mais eficientes é constante. Projetar equipamentos e componentes com alto grau de confiabilidade exige dos fabricantes o uso de meios auxiliares de análise. A extensometria é um dos meios que permite ao engenheiro do produto e ao engenheiro experimental analisar as deformações no

objeto em estudo, observando se estão de acordo com requisitos e parâmetros de projeto e avaliando modificações necessárias.

O emprego da extensometria em diferentes áreas da indústria é importante nas avaliações e estudos das mais diversas estruturas e máquinas. Fabricantes de extensômetros apresentam uma vasta gama de modelos e tipos de sensores, ajustáveis a diferentes ambientes, condições de medição e carregamento.

Assim, o desenvolvimento deste trabalho visa estudar os extensômetros, suas características construtivas e operacionais, a escolha adequada para a aplicação desejada, o método de medição e suas diferentes configurações, o método de preparação da superfície da peça ou equipamento, o processo de fixação do mesmo à superfície em estudo e a conexão do extensômetro ao sistema de medição. Esse trabalho apresenta como estudo de caso dois testes experimentais feitos com corpos de prova, desenvolvidos para reproduzir condições reais de carregamentos distintos, sendo um de esforço de flexão e outro de torção. Os dados obtidos serão ainda comparados com análises analíticas, embasadas na teoria de euler.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudo e aplicação da extensometria na medição de deformações mecânicas, utilizando corpos de prova instrumentados com extensômetros e uso de equipamento de aquisição de sinais para medições de deformação.

1.1.2 Objetivo Específico

- Desenvolver um estudo sobre extensometria;
- Apresentar estudos de caso para o uso de extensômetros na medição de deformação;
- Aplicar técnicas de extensometria para avaliar corpos de prova desenvolvidos e validar o estudo;
- Conhecer um equipamento de aquisição de sinais e aplica-lo nos ensaios propostos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão dos conceitos fundamentais referente à medição de deformação com o uso da extensometria. Métodos de medição de deformação, particularidades e características construtivas, princípios de funcionamento, configurações de medições e aquisição de dados, são tópicos abordados nesta seção.

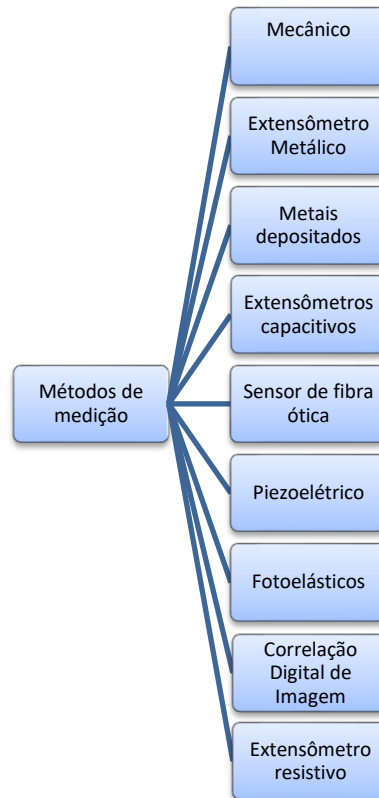
2.1 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

A variação dimensional e geométrica que ocorre em uma peça ou componente, decorrente de uma dada carga aplicada, é denominada deformação. Esta pode ser causada por forças, pressões, momentos, variações térmicas ou alterações estruturais do material. (OMEGA, 2017a).

A deformação pode ser imperceptível a olho nu, quando ocorrem pequenas deformações, como se verifica nos materiais de engenharia. Em todos os tipos de deformação é necessária a utilização de técnicas ou métodos de medição específicos.

A Figura 1 apresenta diferentes métodos de medição não destrutivos de deformação que foram estudados e desenvolvidos ao longo dos anos.

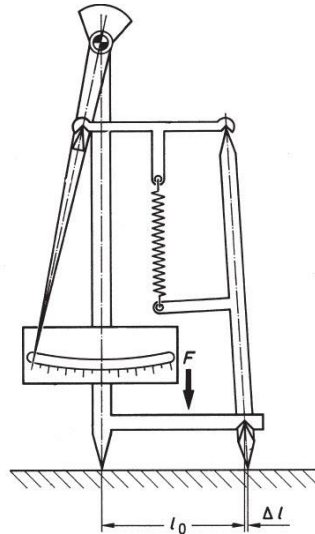
Figura 1 – Métodos de medição.



Fonte: Autora (2017).

Mecânico: O primeiro instrumento de medição de deformação criado (Figura 2) utilizava alavancas e engrenagens ligadas à sua extremidade com escalas de ampliação 1000:1. Era necessária aplicação de força para evitar escorregamentos, o que limitava sua aplicação. Empregado apenas em situações estáticas. A base do instrumento de medição era relativamente grande em relação aos corpos de prova, sendo ainda impossível realizar a análise em geometrias detalhadas ou complexas. (HOFFMANN, 1989).

Figura 2 – Extensômetro mecânico



Fonte: Adaptado de Hoffmann (1989).

A partir destas limitações impostas pelo método e instrumento de medição, foram desenvolvidas novas técnicas com princípio elétrico de funcionamento.

Extensômetro metálico: Este foi o primeiro extensômetro desenvolvido, utilizando como base a ponte de Charles Wheatstone. Era composto por um fio elétrico fino de alguns décimos de milímetro de largura e milésimos de milímetro de espessura, depositado em um papel e conectado a cabos, que poderia ser aderido a qualquer superfície. Após alguns anos e com algumas pequenas modificações foi desenvolvido o circuito impresso, possibilitando formas variadas de desenhos. (HOFFMANN, 1989).

Extensômetros semicondutores: Possuem o mesmo princípio de funcionamento dos extensômetros metálicos, porém, apresentando sensibilidade maior. Empregam o princípio descoberto por Charles S. Smith em 1954, que utilizava primeiramente o Germânio (Ge) e posteriormente o Silício (Si), aplicando-os nos fios do extensômetro. (HOFFMANN, 1989).

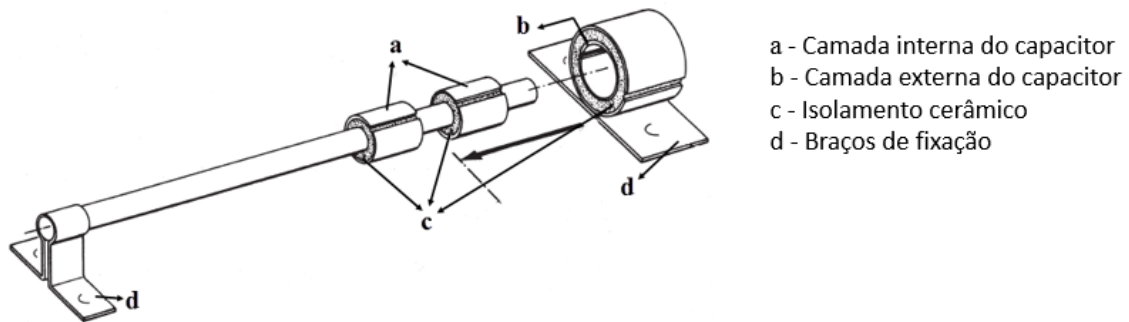
Os extensômetros semicondutores possuem desvantagens e limitações quanto a sua empregabilidade. São necessários a utilização de compensadores, pela sua não linearidade e por serem facilmente afetados por condições externas como a temperatura, além de serem extensômetros de difícil manuseio e alto custo. (HOFFMANN, 1989).

Metais depositados: São aplicados diretamente no local específico da estrutura em que se deseja medir, por meio de vácuo criado pela vaporização da liga. Como vantagem não

necessitam de colas para aderir à superfície e possuem baixo custo. Porém, possuem limitações quanto a precisão de resposta, não apresentando resultados que possam ser considerados confiáveis. (HOFFMANN, 1989).

Extensômetros capacitivos: Estes extensômetros (Figura 3) foram desenvolvidos na Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha simultaneamente. São utilizados para aplicações em que o corpo ou peça a ser analisada encontra-se exposta a elevadas temperaturas, 500 °C a 800 °C, sendo então soldados à superfície da peça a ser medida. (HOLMAN, 1994).

Figura 3 – Representação de extensômetro capacitivo.

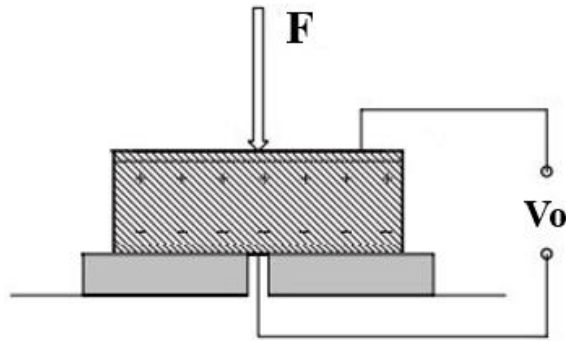


Fonte: Adaptado de Hoffmann (1989).

Sensor de fibra ótica: Método de medição baseado em transmissão por fibra ótica e técnicas de processamento de imagens. Um equipamento ou peça em condição de carregamento são submetidos a luz incidente do laser, de tal forma que qualquer variação do feixe de luz é associada a variação de deformação sofrida pelos mesmos. A luz resultante do laser é direcionada a uma tela que permite a análise detalhada de imagens resultantes. Este método possui desvantagens por ser de elevado custo, além de necessitar de técnicas auxiliares de processamento de imagem. (CARNEIRO; BARBERO, 2014).

Piezoelétrico: Estes tipos de sensores (ativos) de medição podem trabalhar a elevadas temperaturas, além de apresentar considerável sensibilidade a deformação, sendo capazes de medir deformações inferiores a $0,1 \times 10^{-6}$ (Figura 4). Apresentam uma grande variedade de possíveis composições, possibilitando a obtenção de diferentes propriedades físicas e geométricas. Quando esforços ocorrem na peça em baixas frequências, há um grande desvio de sensibilidade, prejudicando a leitura da deformação. (LIMA, 2013).

Figura 4 – Sensor Piezoelétrico.



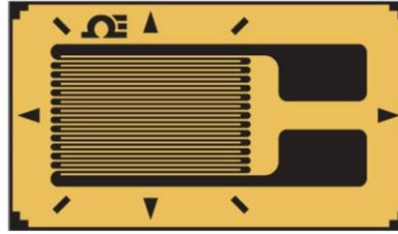
Fonte: Adaptado de Northop (2005).

Fotoelásticos: O método Fotoelástico é baseado na propriedade refletiva de materiais naturais ou de natureza sintética transparente. Sob condição de carga, a luz reflete em diferentes velocidades, dependendo das direções relativas entre as tensões principais e da diferença entre magnitudes das mesmas. Quando visualizados com luz polarizada esses materiais exibem diferentes padrões de cores, que mostram a distribuição de tensão interna do corpo analisado, denominados efeitos fotoelásticos. Este método é muito útil para a localização e avaliação das concentrações de tensão ou redesenho da peça em análise, para o melhor aproveitamento de material. (Doebelin, 1983).

Correlação de imagem digital: Dentre as técnicas de medição, há também a correlação de imagem digital, conhecida como DIC. Este método é uma técnica ótica capaz de medir deformação sem ter contato com a peça em análise, através de um sistema de câmeras que correlacionam imagens combinado ao princípio da fotogrametria. Este método apesar de ser muito preciso, necessita de atenção na preparação da amostra para as medições, com relação às condições do ambiente ou condições de luz adequadas. (HOHMANN et al., 2012).

Extensômetro resistivo: Os extensômetros resistivos ou elétricos (Figura 5) convertem pequenas variações geométricas da estrutura analisada em valores equivalentes de deformação. Em comparação aos outros métodos de medição descritos anteriormente, nenhum é utilizado de forma tão abrangente quanto os extensômetros resistivos, em função de sua precisão de medida em situações estáticas e dinâmicas e fácil aplicação e manuseio. Possuem pequenas dimensões e pouco peso, possibilitando sua aplicabilidade em uma vasta gama de temperaturas, ambientes aquáticos e/ou corrosivos. (WEBER, 2008).

Figura 5 – Modelo de extensômetro resistivo.



Omega (2017b).

Visto ser um método amplamente empregado devido as suas características de medição e vantagens de uso, a extensometria por extensômetros resistivos será estudada neste capítulo.

2.2 ELEMENTO SENSOR - EXTENSÔMETRO RESISTIVO

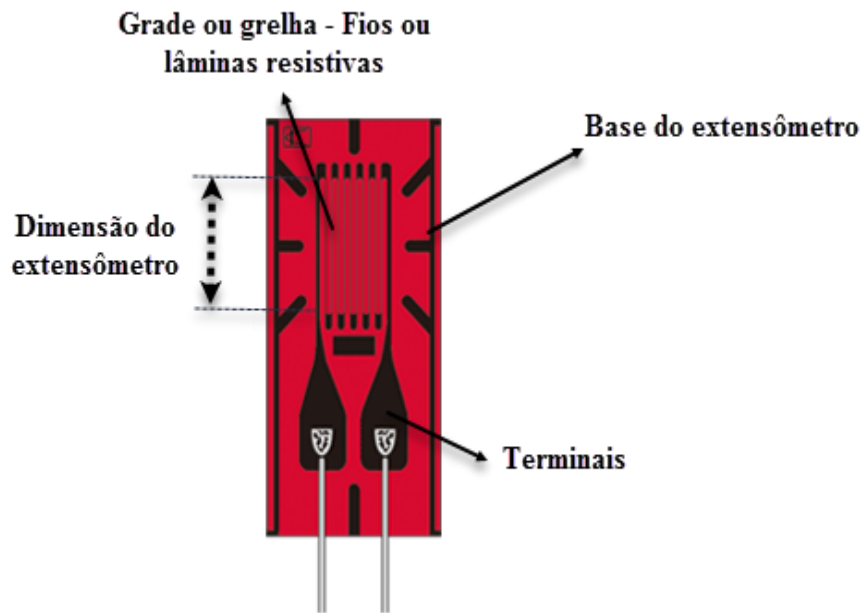
O extensômetro, também conhecido como Strain Gauge, (Figura 6) é um dos sensores responsável pela medição de deformação. Consiste em um conjunto de fios ou tiras metálicas dispostas como uma serpentina ou grelha, de forma a ter o menor espaçamento possível entre os fios ou lâminas, a fim de atenuar os efeitos causados por tensões de cisalhamento (τ)¹ e pelo efeito de Poisson (ν)². O comprimento desta grelha ou serpentina é conhecido como dimensão do extensômetro, por se tratar do comprimento ativo do mesmo. A grelha é colada sobre um suporte com espessura fina (a base do extensômetro) conhecido como *carrier*. Esta é responsável por permitir a colagem do extensômetro na superfície da peça, agindo como proteção e suporte para o manuseio do extensômetro, evitando danos no material resistivo. Sobre a base há terminais onde são conectados/soldados cabos de instrumentação para a transmissão de dados, como se verifica no modelo de extensômetro uniaxial disposto na Figura 6. (VALIDO; SILVA, 1997).

Os extensômetros são produzidos com materiais que apresentam elevada sensibilidade (K_G) e resistividade (ρ), boa soldabilidade e resistência a corrosão. Além disso, é muito importante que o material apresente alta tensão de escoamento, baixa histerese e baixa sensibilidade a variações térmicas. (WEBER, 2008).

¹ A razão entre a força aplicada e área cisalhada.

² A razão entre a deformação transversal e axial.

Figura 6 – Modelo de Extensômetro.



Fonte: Kyowa (2017a).

A base do extensômetro pode ser fabricada em poliamida, fibra de vidro reforçada com resina fenólica, baquelita, poliéster ou ainda papel. Possui fina espessura e flexibilidade, de fácil manuseio e resistente a fadiga. Sua temperatura de operação em geral varia de -50°C a 180°C . Os fios ou lâminas resistentes são produzidas em ligas metálicas específicas para a fabricação de resistores elétricos e instrumentos de medição (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição e fator de sensibilidade (K_G) para ligas metálicas utilizadas em extensômetros.

Material	Composição (%)	K_G
Constantan	57 Cu, 43 Ni	2.05
Karma	73 Ni, 20 Cr, res. Fe + Al	2.1
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2.2
Platina - Tungstênio	92 Pt, 8 W	4.0

Fonte: Adaptado de Hoffmann (1989).

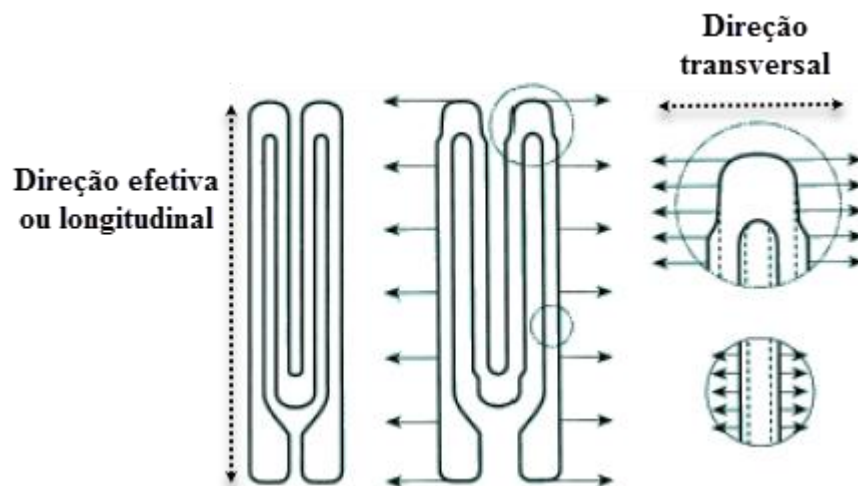
A Tabela 1 apresenta materiais empregados na fabricação dos elementos resistivos de extensômetros, sendo que os materiais comumente utilizados são as ligas Constantan e Karma. O fator de sensibilidade (K_G) é resultante da razão entre a deformação (ε), equivalente a

expressão $\Delta L/L$, e a variação na resistência das ligas metálicas ($\Delta R/R_0$), mostrado na Equação (1). O fator de sensibilidade à deformação varia entre 2 (dois) e 4 (quatro).

$$K_G = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon} \quad (1)$$

Esta sensibilidade pode ser verificada tanto na direção longitudinal ou efetiva de medição como na direção transversal do extensômetro (HOFFMANN, 1989). O valor do fator de sensibilidade é definido pelo fabricante em função do material em que o extensômetro é fabricado. A Figura 7 apresenta as direções em que a sensibilidade do extensômetro pode ser afetada.

Figura 7 – Direções efetiva e transversal do extensômetro.



Fonte: Adaptado de Hoffmann (1989).

Em um estado biaxial de esforços (Figura 7), a resposta do extensômetro é melhor representada pela Equação (2), onde S_a representa a sensibilidade do extensômetro no sentido axial, ε_a a deformação no sentido axial do extensômetro. S_t e ε_t são referentes a sensibilidade e deformação do extensômetro no sentido transversal respectivamente; S_s define a sensibilidade do extensômetro à deformação por cisalhamento e o último termo da equação, γ_{at} representa a distorção. (VALIDO; SILVA, 1997).

$$\frac{\Delta R}{R_0} = S_a \cdot \varepsilon_a + S_t \cdot \varepsilon_t + S_s \cdot \gamma_{at} \quad (2)$$

A sensibilidade do extensômetro à deformação por cisalhamento (S_s) possui valor que pode ser considerado desprezível, sendo pré-definido por fabricantes de extensômetros e seus respectivos modelos. A Equação (2) com estas considerações resume-se na Equação (3), onde $K_t = S_t / S_a$.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = S_a (\varepsilon_a + K_t \cdot \varepsilon_t) \quad (3)$$

O formato simplificado da resposta do extensômetro, expresso na Equação (1), é obtido ao relacionar a variação de resistência com a extensão axial.

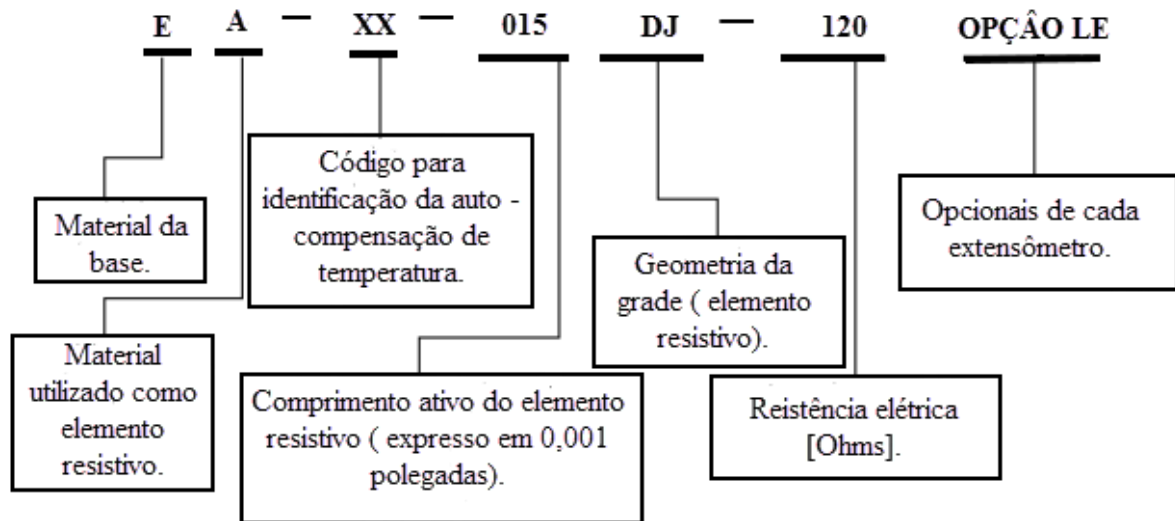
A sensibilidade a temperatura apresenta considerável interferência nas medições com extensômetros e isto está relacionado ao material utilizado na fabricação dos mesmos. Tipos distintos de extensômetros são produzidos com diferentes valores de dilatação térmica (α), para que a variação entre a dilatação térmica do suporte do extensômetro e a dilatação do material a ser medido não resultem na deformação deste suporte, interferindo nos resultados de medição. (WEBER, 2008).

2.2.1 Seleção do extensômetro

Os extensômetros possuem diferentes configurações construtivas com intuito de medir de forma mais eficaz diferentes tipos de esforços, visto que não há um único modelo de extensômetro capaz de medir em diferentes condições e que atenda diferentes requisitos. Há uma grande variedade de formatos, tamanhos (0,2 mm á 150 mm), posições para conectores e valores de resistências (120 Ω , 350 Ω , 600 Ω). (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013).

A Figura 8 ilustra um modelo de codificação de extensômetros, apresentando o detalhamento dos fabricantes em seus catálogos para a seleção correta dos mesmos.

Figura 8 – Modelo de codificação de extensômetros.



Fonte: Adaptado de Vishay Precision Group (2017).

Em todos os catálogos é verificado de forma clara o material dos elementos resistivos e da base dos extensômetros, a geometria e o comprimento dos mesmos, a resistência a qual o extensômetro irá trabalhar e se há ou não auto compensação com relação a temperatura, além de informações adicionais particulares de cada extensômetro e sua respectiva aplicação.

Os diferentes tipos de extensômetros disponíveis no mercado atendem requisitos diferentes de estados de deformação tais como, uniaxial, biaxial, triaxial ou ainda quadriaxial e condições distintas como homogeneidade, não homogeneidade ou descontinuidade das tensões aplicadas à peça, cargas estáticas ou dinâmicas e condições em que a peça está submetida, como temperatura, umidade e pressão. As Figura 9, Figura 10, Figura 11 e Figura 12 apresentam diferentes modelos construtivos de extensômetros.

Para a seleção correta do extensômetro é necessário verificar qual a dimensão que melhor atende a aplicação, visto que um extensômetro maior que o necessário irá resultar em medições errôneas. Fabricantes recomendam o uso de extensômetros em torno de 10% menores em relação a peça ou estrutura a qual o mesmo será instrumentado.

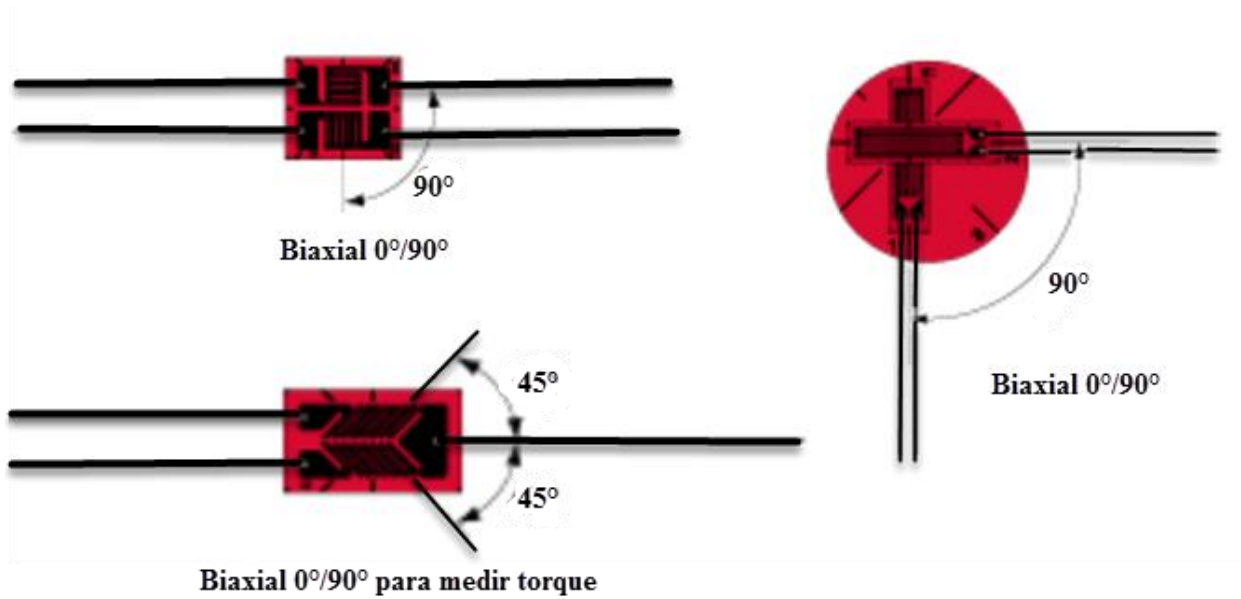
Figura 9 – Extensômetro uniaxial.



Fonte: Kyowa (2017a).

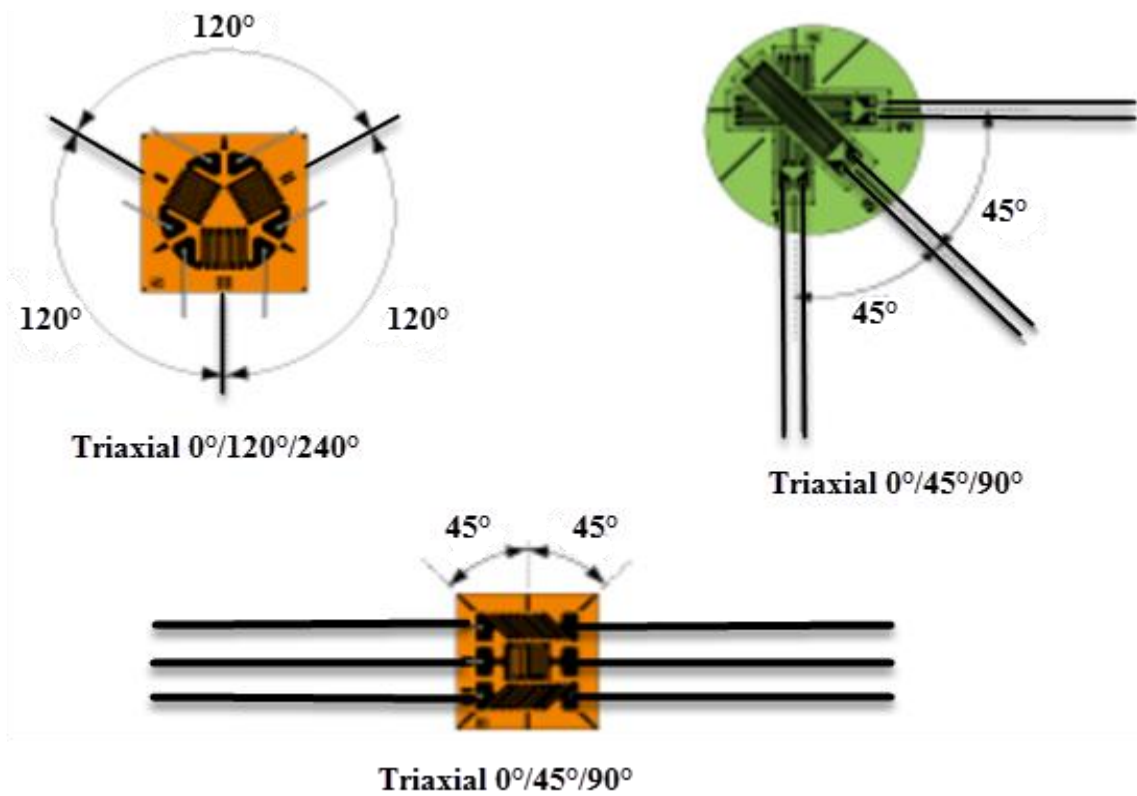
A Figura 9 mostra um modelo de extensômetro uniaxial. Este modelo de extensômetro é utilizado quando se conhece a direção da deformação que se deseja medir. Quando se deseja medir deformações causadas por esforços, as quais peças e equipamentos são submetidos em direções não conhecidas, é comum o emprego de extensômetros biaxiais, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Modelos de extensômetros biaxiais.



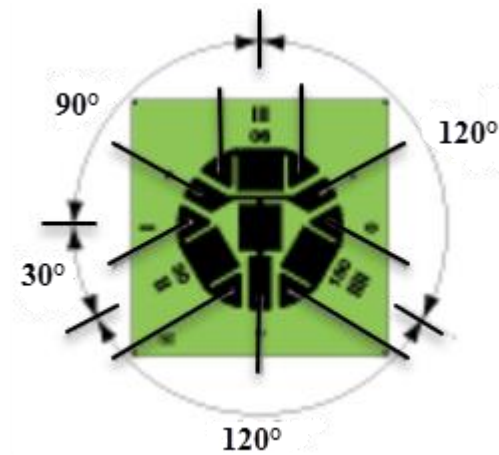
Fonte: Kyowa (2017a).

Figura 11 – Modelos de extensômetros Triaxiais.



Fonte: Kyowa (2017a).

Figura 12 – Extensômetro quadriaxial.



Fonte: Kyowa (2017a).

Os extensômetros biaxiais, em sua estrutura, comportam dois extensômetros sobre a mesma base ou suporte, apresentando sensibilidade para medidas em duas direções. Os extensômetros triaxiais, que apresentam 3 (três) direções sensíveis à medição de deformação,

como apresentado na Figura 11. Há ainda os extensômetros quadriaxiais ou axiais múltiplos ou também conhecidos como diafragmas (Figura 12) que são capazes de captar deformações em diferentes direções.

2.3 MÉTODO DE MONTAGEM

A precisão e eficácia nos resultados obtidos com a utilização de extensômetros possui forte dependência com o modo como é aplicado na peça ou corpo de prova. Para a instalação do extensômetro no local de medição é necessário primeiramente o tratamento da superfície a ser analisada, removendo tinturas, oxidação ou qualquer tipo de impureza que possa influenciar na aquisição de dados. (HOFFMANN, 1989). A superfície deve ser limpa com a aplicação de álcool isopropílico³, freon TF⁴, ou ainda acetona, solvente ou tolueno, deste que estes não reajam com o material a ser analisado. Posteriormente a mesma deve ser lixada com lixa específica para metal (100, 220, 320 ou 400) de forma a obter ranhuras desordenadas para melhor aderência do extensômetro. (BARRETO JUNIOR, 2017).

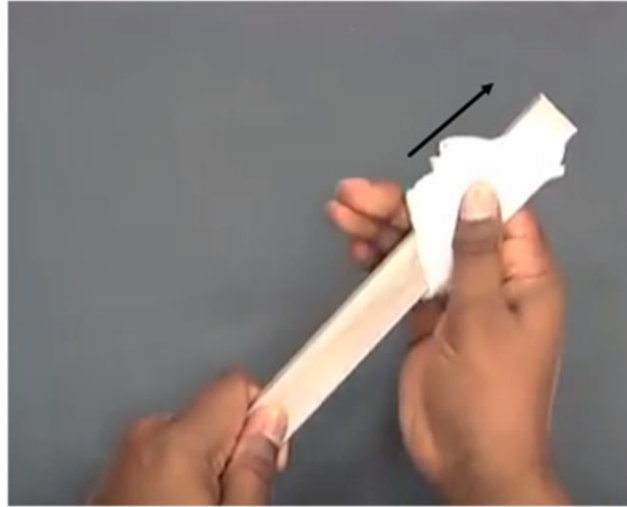
O local onde o extensômetro deverá ser instalado é marcado para que seja colado na posição em que se deseja medir a deformação. O processo de marcação não deve ser realizado a partir de utensílios que possuam grafite, como o lápis por exemplo, em virtude de o grafite ter ação lubrificante. Após a marcação é necessária uma nova limpeza com gaze embebida em solvente, realizando movimentos em uma única direção de forma a friccionar a peça (Figura 13).

Para a fixação do mesmo é necessário que o tipo de adesivo selecionado esteja de acordo com o material de trabalho e tipo de medição a qual se deseja efetuar. A seleção errônea do tipo de adesivo acarretará em medições incorretas. A Tabela 2 apresenta os tipos de adesivos e suas características restritivas ao uso.

³ Usualmente utilizado em materiais que podem reagir com outros solventes.

⁴ Solvente menos ativo.

Figura 13 – Limpeza da superfície para fixação do extensômetro.



Fonte: Vishay Precision Group (2017).

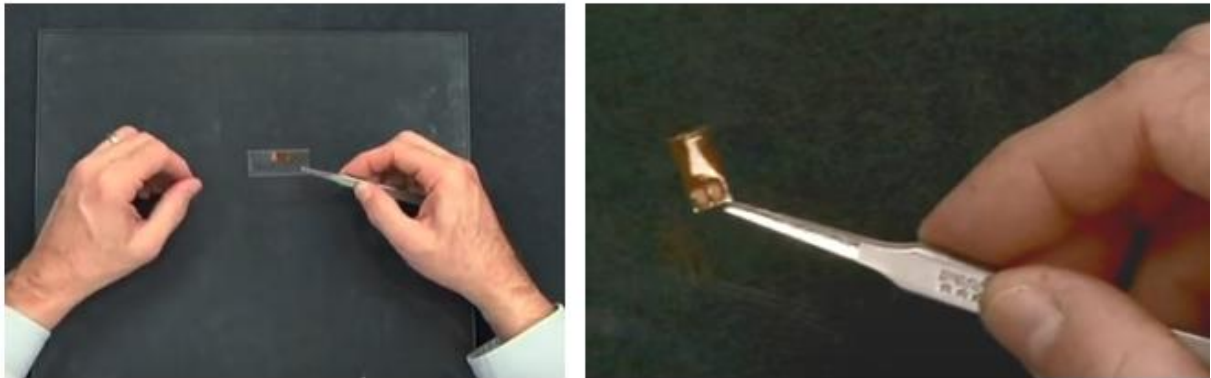
Tabela 2 – Adesivos e respectivas características.

Adesivo	Tempo de cura	Temperatura de trabalho	Extensômetro compatível
Cianoacrilato Observação: Consultar fabricante e suas restrições.	2 minutos à 25°C	-38°C a 70°C	Todos os tipos
Epóxi para baixa temperatura	2 a 16 horas a temperatura ambiente	-160°C a 70°C	Todos os tipos
Epóxi para média temperatura	2 horas à 175°C	-230°C a 200°C	Exceção: Modelos em papel
Epóxi para alta temperatura	6 horas à 130°C ou 2 horas à 180°C	-230°C a 315°C	Extensômetros para utilização em altas temperaturas
Poliamida	2 horas à 250°C	-230°C a 400°C	Extensômetro reforçado com fibra de vidro para utilização em altas temperaturas
Fenólica	3 a 6 horas à 150°C	-160°C a 150°C	Extensômetro reforçado com fibra de vidro para utilização em altas temperaturas

Fonte: Adaptado de Barreto Junior (2017).

No processo de colagem do extensômetro na estrutura a ser medida, o mesmo deve ser manuseado com a utilização de pinças para evitar o contato com as mãos. O local de manuseio deve ser limpo e específico para a etapa de preparação e colagem, prevenindo a contaminação do extensômetro como é ilustrado na Figura 14.

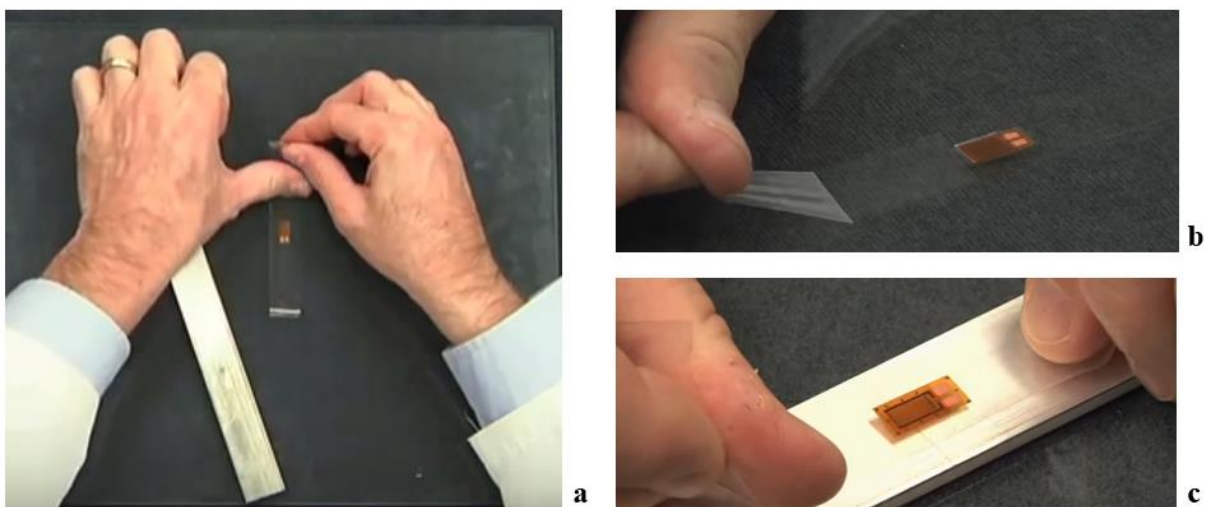
Figura 14 – Manuseio do extensômetro.



Fonte: Vishay Precision Group (2017).

Primeiramente o extensômetro é fixado a um pedaço de fita adesiva sobre uma plataforma de vidro (Figura 15 – a e b). Assim o extensômetro pode ser manuseado mais facilmente e posicionado de forma precisa no local onde foi demarcado (Figura 15 - c).

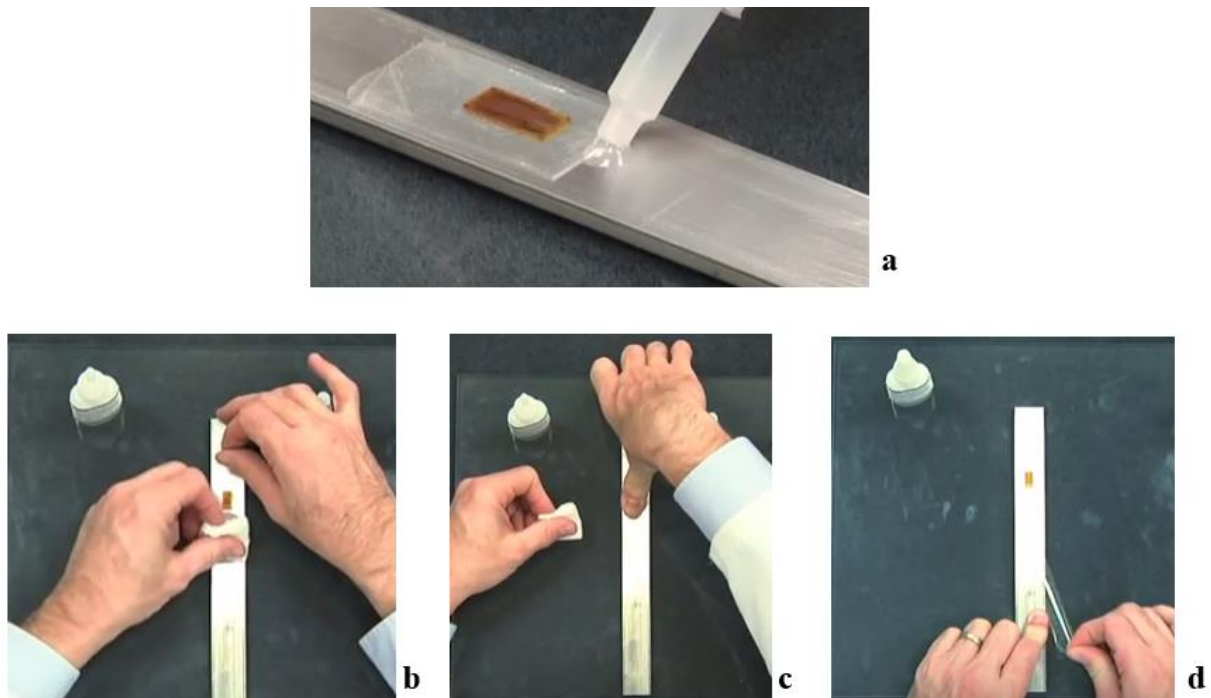
Figura 15 – Processo de posicionamento do extensômetro.



Fonte: Vishay Precision Group (2017).

Com o extensômetro corretamente posicionado, a fita é levemente retirada até a posição para a aplicação do adesivo (Figura 16 - a) e posteriormente a fita com o extensômetro são reposicionados (Figura 16 - b), aplicando pressão contra a peça, para uma melhor fixação (Figura 16 - c). Cada fabricante apresentará o valor de pressão que deverá ser imposto sobre o extensômetro para a colagem efetiva. Com o extensômetro colado, a fita é cuidadosamente removida (Figura 16 - d). (HOFFMANN, 1989).

Figura 16 – Processo de colagem do extensômetro.



Fonte: Vishay Precision Group (2017).

Após a colagem e cura do adesivo do extensômetro na peça, é necessário realizar a verificação da resistência e seu isolamento. Mede-se o valor de resistência nominal dada pelo fabricante, verificando se o extensômetro está bem colado à superfície da peça, o que implica não apresentar variações fora da tolerância indicada pelo fabricante. Sendo assim, o ohmímetro deve apresentar sensibilidade suficiente, para a verificação se há ou não variações no sistema de medição.

A última operação para efetuar a medição é a ligação dos circuitos ou fios, soldados nos terminais dos extensômetros e ao aparelho que efetuará a leitura dos valores fornecidos pelo extensômetro. O isolamento do cabeamento assim como do extensômetro deve ser levado em consideração e ter atenção para que não ocorram curtos circuitos. Impermeabilizantes como cera de abelha filtrada, borracha de silicone não corrosiva, resina poliéster ou resina epóxi são

utilizadas para que o isolamento permaneça eficaz, assegurando o bom funcionamento de todo o sistema de medição.

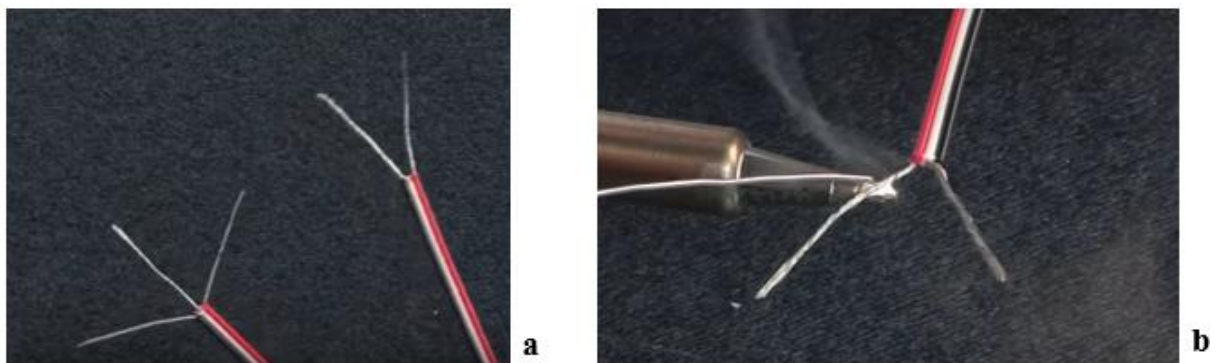
2.3.1 Cabeamento

A ligação entre o extensômetro e a placa de aquisição de sinais é realizada a partir da conexão de fios entre os terminais do dispositivo de medição e os terminais da placa de aquisição. Para esta ligação é necessário que estes fios não estejam ligados de forma tensionada, para que não ocorra o rompimento dos mesmos durante o processo de medição.

A seleção dos cabos deve ser de acordo com as condições de medição. A temperatura, por ser um fator de grande influência, irá ser determinística para a escolha do material correto com o qual o cabo é fabricado e revestido. Para temperaturas de até 130 °C cabos de cobre com revestimento esmaltado a base de poliuretano são empregados. A partir de temperaturas mais elevadas (até 220 °C), revestimentos a base de poliéster, poliamida, fibra de vidro ou teflon devem ser empregados.

Inicialmente o revestimento nas extremidades dos cabos é retirado. Em uma das extremidades o cabo composto de 3 fios é separado, de forma que o fio vermelho fica isolado dos fios preto e branco, os quais são enrolados juntos. Esta extremidade irá ligada ao extensômetro. Na outra extremidade todos os fios são enrolados de forma individual. As duas extremidades são representadas na Figura 17 – a. Ainda com relação aos fios, as extremidades são cobertas com estanho para facilitar a manipulação e fixação nos terminais, como é ilustrado na Figura 17 – b. A configuração acima descrita é uma das possíveis formas de se conectar um extensômetro.

Figura 17 – Extremidades dos fios para ligação do extensômetro e placa de aquisição de sinais

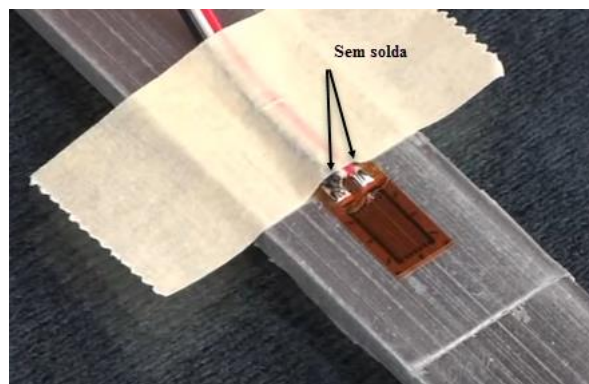


Fonte: Vishay Precision Group (2017).

Para a soldagem são utilizados fios de estanho de diâmetros 0,7 mm ou 0,8 mm que apresentem teor maior de estanho (aproximadamente 60 %) na composição em comparação ao chumbo. Ferros de solda destinados a soldagem de dispositivos eletrônicos podem ser utilizados, porém, há também estações de solda com temperatura controlada destinadas a solda de extensômetros.

A extremidade do fio que será soldada ao extensômetro é fixada utilizando uma fita autoadesiva, para que o processo de solda seja efetuado de tal forma que os fios não deslizem ou movam do lugar adequado (Figura 18).

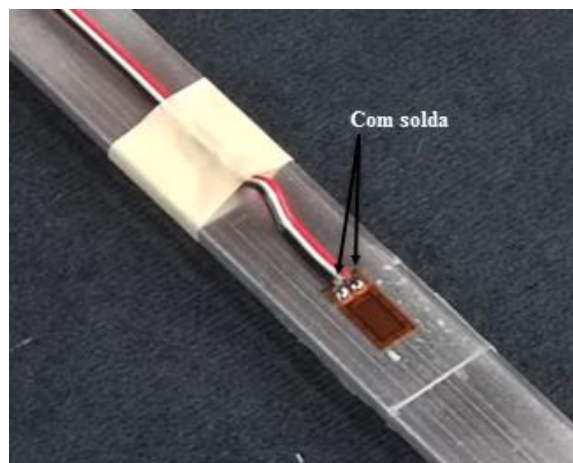
Figura 18 – Posicionamento dos cabos ao extensômetro antes da solda.



Fonte: Vishay Precision Group (2017).

Após o ajuste correto da posição dos fios no extensômetro, os mesmos são soldados de forma que o ponto de solda fique concentrado no local desejado no extensômetro e o material não se espalhe. A Figura 19 apresenta os fios soldados ao extensômetro uniaxial.

Figura 19 – Extensômetro soldado.

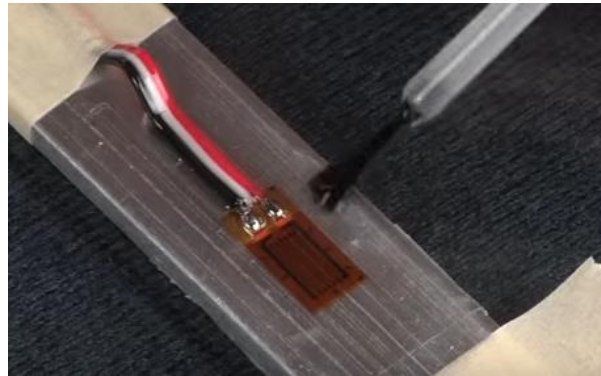


Fonte: Vishay Precision Group (2017).

Para finalizar o processo de soldagem dos fios ao extensômetro, a fita é removida com a aplicação de solvente, para que a mesma solte lentamente sem causar danos e toda a região é limpa para remoção de resíduos e/ou impurezas com a utilização do mesmo produto, com o auxílio de flanela ou gaze.

Na etapa final é realizada a impermeabilização com os fios já posicionados de forma desejada, deixando-se uma curvatura para não os tensionar (Figura 20) - Os três fios também devem ser unidos por fita adesiva ou cola. Esta etapa é crucial para a vida útil da instalação, para prevenir curtos circuitos no sistema.

Figura 20 – Etapa após a solda.



Fonte: Vishay Precision Group (2017).

Fitas autoadesivas são colocadas, com o intuito de formar uma barreira para que o impermeabilizante aplicado não escoe do local de aplicação desejado. Produtos como cera de abelha filtrada, cera amarela, borracha de silicone não corrosiva ou borrachas como butílica e negra, fita de auto fusão, resinas de poliéster, epóxi e massa asfáltica, existem comercialmente e podem ser aplicadas para esta finalidade. A Tabela 3 apresenta Tipos de agentes de proteção para extensômetros e a temperatura de operação.

Tabela 3 – Agentes de proteção para extensômetros

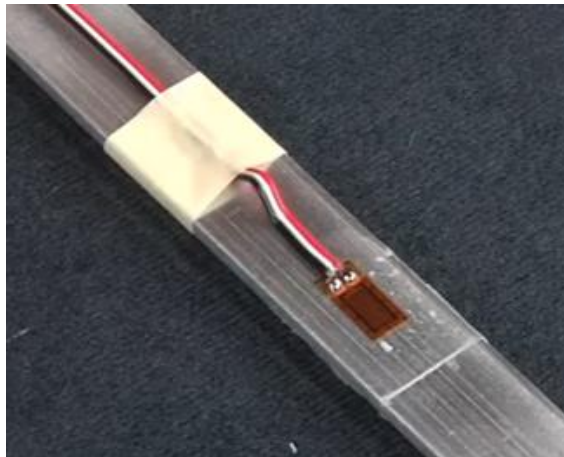
Material	Faixa de temperatura (°C)
Cera amarela (pasta)	-50 a +60
Borracha butílica	-269 a +60
Resina em pasta	-196 a +170
Borracha butílica (fita)	-30 a +80
Epóxi (Araldite – T)	-50 a +100
Borracha negra	-20 a +70
Silicone	-50 a +200

Fonte: Adaptado de Kyowa (2017a).

As ceras quando utilizadas na proteção dos extensômetros não são recomendadas para ensaios dinâmicos, por apresentarem proteção mecânica ineficaz. As borrachas aderem perfeitamente a superfície do extensômetro a temperatura ambiente, com tempo de cura de aproximadamente 24 horas. Este material apresenta resistência mecânica, podendo ser aplicado em medições quando há solicitações mecânicas na peça a qual está sendo analisada. As resinas de silicone em especial são amplamente empregadas em análises extensométricas, em virtude de sua facilidade de aplicação e menor tempo de secagem. Apresenta-se como líquido viscoso, aderindo a superfície e formando uma camada protetora contra interferências mecânicas e do ambiente.

Após o tempo de ação ou cura do produto a fita na extremidade é retirada, permanecendo apenas a fita nos fios, para que os mesmos se conservem em posições fixas, como é apresentado na Figura 21, evitando a ocorrência de danos.

Figura 21 - Modelo de extensômetro fixado a peça e fios.



Fonte: Vishay Precision Group (2017).

2.3.2 Efeito da resistência do sistema de ligação

Os extensômetros trabalham com variações muito pequenas em suas medições e em virtude disso qualquer pequena alteração, aparentemente insignificante ou desprezível, pode acarretar em erros de medição.

Usualmente a fiação entre o extensômetro e o terminal de aquisição de sinais possuem comprimentos significantes. Este modo de ligação com longos fios resulta em perda de sensibilidade na medição, devido a uma resistência em série ser adicionada pelo cabo ao

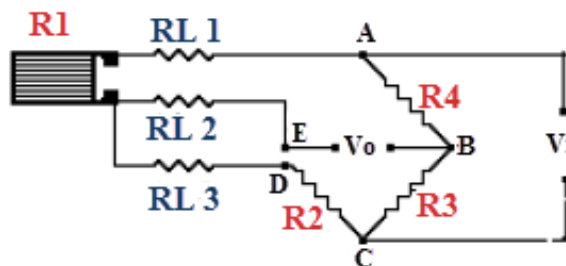
extensômetro, introduzindo uma variação na resistência e produzindo sinal de saída com valor reduzido. A interferência de variações térmicas nas resistências também ocorre devido ao comprimento do cabo.

A sensibilidade pode ser corrigida pela Equação (4), onde K_{gN} representa o novo fator de sensibilidade do extensômetro, K_g o fator de sensibilidade original do extensômetro, R_g e R_c a resistência do extensômetro e a resistência do cabo respectivamente, com unidade em Ω .

$$K_{gN} = \frac{K_g \cdot R_g}{R_g + R_c} \quad (4)$$

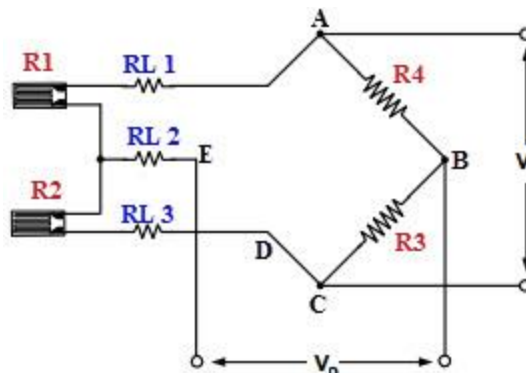
Além da sensibilidade, o efeito térmico é corrigido com a utilização de 3 fios na ligação entre o extensômetro e a placa de aquisição, como é observado na Figura 22 para a ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte e Figura 23 para a ligação em $\frac{1}{2}$ ponte.

Figura 22 – Ligação 3 fios de um extensômetro em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone.



Fonte: Adaptado de Barreto Junior (2017).

Figura 23 - Ligação 3 fios de um extensômetro em $\frac{1}{2}$ de ponte de Wheatstone.



Fonte: Adaptado de Barreto Junior (2017).

Variações causadas pelo efeito térmico no sistema são anuladas pelas resistências dos fios RL 1, RL 2 e RL 3, por estas entrarem em braços adjacentes a ponte. Os fios RL 1, RL 2 e RL 3 utilizados para a ligação entre o extensômetro e a ponte de Wheatstone devem apresentar o mesmo comprimento e diâmetro.

Entre os pontos A e E há a resistência RL 1, RL 2 e a resistência do extensômetro R1. Os pontos C e E são formados pelas resistências dos fios RL 2 e RL 3 e a resistência do resistor R2. R2 representa a resistência do resistor da ponte para a ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte ou a resistência do segundo extensômetro para a ligação em $\frac{1}{2}$ ponte. Possíveis configurações de ligação com 3 fios em extensômetros são apresentadas na seção 2.4.1.

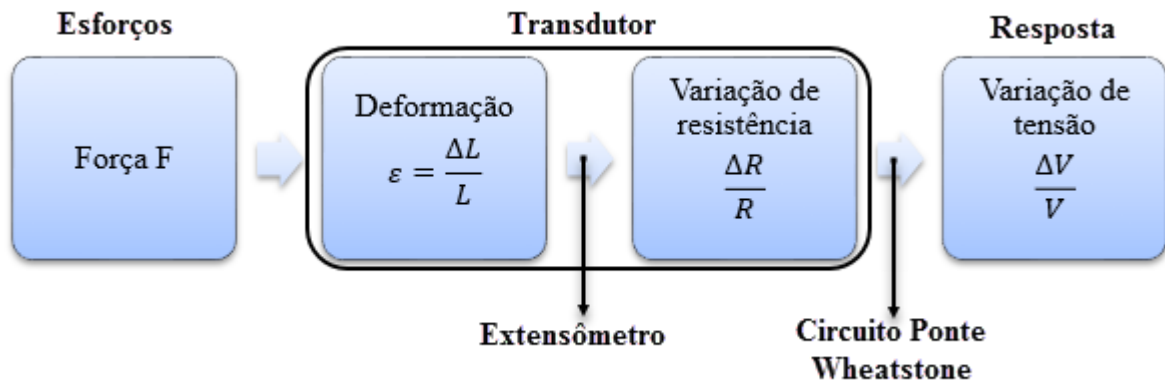
2.4 MÉTODO DE MEDIÇÃO

O método de medição por extensômetros elétricos pode ser dividido em estágio de medição e processamento de sinal. No primeiro estágio uma força ou carregamento é imposto sobre a peça a ser analisada, deformando-a elasticamente. Estas deformações são transformadas em variações de resistências elétricas nos extensômetros, ao quais estão fixos na superfície da peça a ser analisada e lida por um sistema de aquisição de dados, caracterizando o segundo estágio do processamento de dados de medição.

Os extensômetros permanecem ligados a um circuito tipo ponte de Wheatstone, alimentado por uma dada tensão elétrica (V), a qual fornece a variação ocorrida no sinal elétrico (ΔV). A razão entre a variação de tensão elétrica ($\Delta V/V$) é igualmente proporcional à razão existente entre a variação de resistência elétrica ($\Delta R/R$). (WEBER, 2008).

No último estágio do processamento de sinais, ocorre a amplificação dos sinais elétricos medidos. Visto que as deformações nas estruturas e/ou peças analisadas são muito pequenas, (na ordem de 10^{-6}) os sinais e suas variações também serão pequenos, sendo necessário o uso de amplificadores de sinal capazes de medir as pequenas variações ocorridas. A Figura 24 apresenta o fluxo existente desde o processo de esforços ou carregamentos a qual a peça está sujeita, a amplificação e análise de sinais e resposta de medição.

Figura 24 – Fluxo de processamento de dados entre carregamento e Resposta.



Fonte: Adaptado de Weber (2008).

Os transdutores trabalham a partir da variação dimensional ou geométrica na peça, causada pelo carregamento aplicado e as variações de resistência elétrica ocorridas em função da deformação, sendo a razão entre a variação das resistências e a variação dimensional, resultante da deformação ocorrida na peça, denominada fator de sensibilidade, conforme visto na Equação (1).

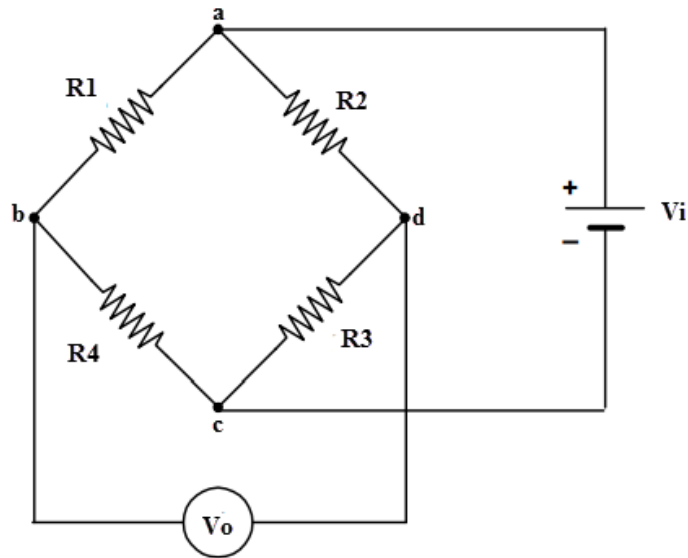
Na Figura 25 é apresentado um circuito de ponte de Wheatstone, que permite medir a variação de resistência de um extensômetro quando submetido a deformações. O circuito de Wheatstone e suas características de funcionamento serão tratados na próxima seção.

2.4.1 Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone, desenvolvida em 1843 por Charles Wheatstone é um circuito capaz de compensar resistores elétricos, através de resistores conhecidos e realizar medições de variações presentes em resistências elétricas com precisão, que raramente envolve medições maiores que 10^{-3} . (HOFFMANN, 1989).

Em sua estrutura o circuito da Ponte de Wheatstone possui quatro braços resistivos, conectados com uma fonte de alimentação entre dois pontos centrais presentes na ponte (Figura 25). Esta estrutura constitui pares divisores independentes, sendo que um deles tem como função comparar e o outro par realizar medições das variações das resistências.

Figura 25 – Ponte de Wheatstone.



Fonte: Adaptado de Adolfato, Camacho e Brito (2004).

A medição com a utilização da ponte de Wheatstone é realizada de forma que cada resistor presente possui sua função no processo de medição. A resistência R_1 representa o extensômetro ativo, fixado sobre a estrutura a qual se deforma. R_2 é um extensômetro que tem como função compensar, ou seja, eliminar ou atenuar efeitos de origem térmica para que estas não influenciem nas medições de deformações mecânicas detectadas. R_3 e R_4 são denominadas resistências elétricas puras. (VALIDO; SILVA, 1997).

Os valores de extensômetros comumente utilizados são os de 120Ω e 350Ω . Resistências com valores baixos são empregadas por emitirem sinais mais fracos, medindo assim com maior grau de precisão e produzidas com tolerâncias de $\pm 0.2\Omega$ aproximadamente. (VALIDO; SILVA, 1997).

Dentro do método de medição de deformação, há 4 (quatro) tipos mais frequentes de ligações da ponte de Wheatstone com extensômetros. A ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte, a ligação com $\frac{1}{2}$ ponte e a ligação em ponte completa (Tabela 4), sendo que a configuração da ponte a ser utilizada depende do estado de tensão no local de medição. (HOFFMANN, 1989).

A ponte de Wheatstone (Figura 25) formada pelos resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 é energizada pela tensão " V_i " nos terminais centrais "ac" e seu sinal de saída, representado por " V_o ", é obtido nos terminais centrais "bd". A resistência de cada braço tem função de manter o equilíbrio da ponte. (HOFFMANN, 1989).

A partir da lei de Ohm $V = Ri$ e considerando a relação que $V_i = V_{abc} = V_{adc} = V_{ac}$ logo,

$$V_{ab} = R_1 \cdot I_{abc} = \frac{R_1}{R_1 + R_4} V_i, \quad V_{bc} = R_4 \cdot I_{abc} = \frac{R_4}{R_1 + R_4} V_i, \quad V_{ad} = R_2 \cdot I_{adc} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_i \quad e$$

$$V_{dc} = I_{adc} \cdot R_3 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_i. \text{ A partir destas relações pode-se obter a tensão de saída } V_o \text{ de}$$

forma genérica, segundo a Equação (5) e (6).

$$V_o = -V_{ab} + V_{ad} \quad (5)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_1 + R_4} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (6)$$

Para que a ponte de Wheatstone esteja balanceada, a tensão de saída V_o da ponte deve ser nula, sendo que todas as resistências devem possuir o mesmo valor, ou seja, $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$

Na condição de uma resistência variável e demais resistores com valores equivalentes, como mostram as Equações (7) e (8), é possível obter a expressão que representa o valor aproximado da tensão lida entre os pontos b e d da ponte de Wheatstone, apresentado na Equação (9).

$$R_1 = R_2 = R_3 = R \quad (7)$$

$$R_4 = R + \Delta R \quad (8)$$

$$V_o = V_i \cdot \frac{((R + \Delta R) \cdot R - R^2)}{(R + (\Delta R + R)) \cdot (R + R)} \quad (9)$$

Sendo ΔR muito pequeno em comparação a R , as interferências de ΔR no equacionamento são consideradas pequenas para pequenas variações de resistência, e a Equação (9) é simplificada, obtendo-se a Equação (10).

$$V_o = V_i \cdot \frac{\Delta R}{4R} \quad (10)$$

A Equação (10) é associada a Equação (1), referente ao fator de sensibilidade a deformação, resultando na Equação (11).

$$V_o = V_i \cdot \frac{1}{4} \cdot K_G \cdot \varepsilon \quad (11)$$

Para variações das diferentes resistências do circuito, os valores das mesmas passam a ser $R_1 = R_1 + \Delta R_1$, $R_2 = R_2 + \Delta R_2$, $R_3 = R_3 + \Delta R_3$ e $R_4 = R_4 + \Delta R_4$. Para condições de deformação causada por tração ΔR possuirá valores positivos e condições de deformação causada por compressão valores negativos.

$$V_o + \Delta V_o = \frac{-(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) + (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{((R_1 + \Delta R_1) + (R_4 + \Delta R_4))((R_2 + \Delta R_2) + (R_3 + \Delta R_3))} \cdot V_i \quad (12)$$

A Equação (12) é utilizada na condição em que todas as resistências da ponte de Wheatstone são variáveis. Considerando a igualdade dos resistores, ou seja, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ e desprezando termos de segunda ordem, a Equação (13) é obtida.

$$V_o = \frac{V_i}{4} \cdot K_G \cdot (-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (13)$$

A Equação (13) apresenta o cálculo para a configuração da ponte de Wheatstone completa, assumindo que todas as resistências são variáveis e $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ e ε_4 representam a deformação de cada um dos extensômetros da ponte.


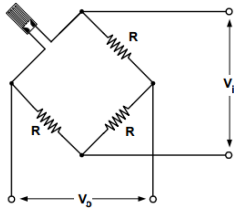
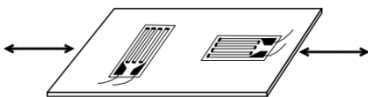
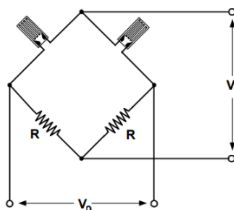
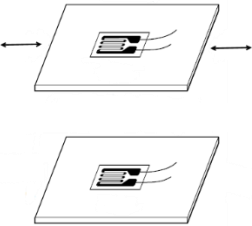
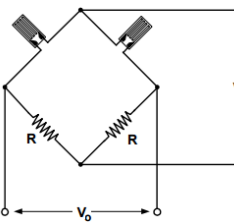
Para medições com a ponte de Wheatstone há diferentes configurações que podem ser adotadas, dependendo do tipo de medição a ser realizada, sensibilidade, amplificação ou compensação de temperatura necessária, apresentando as seguintes configurações: $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte e/ou ponte completa, apresentadas na Tabela 4.


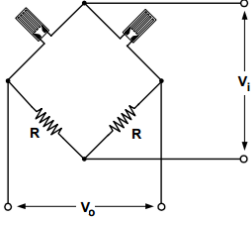

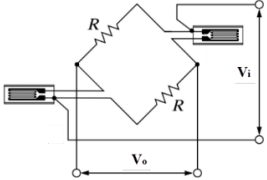
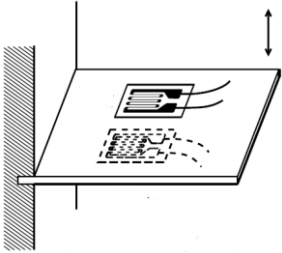
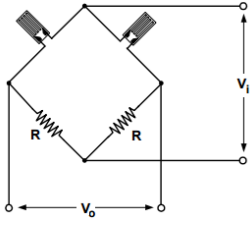
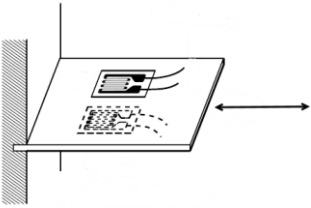
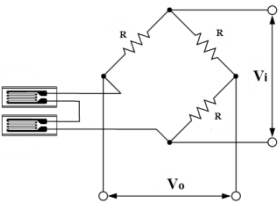
Trabalhando com a configuração de $\frac{1}{4}$ de ponte ativa, o sistema de medição necessitará de maior quantidade de amplificação, visto que o sinal será bem menor em comparação as outras possíveis configurações. É necessário que o medidor possua alta resistência e seja adequado para medir baixas voltagens. Neste modelo de configuração da ponte de Wheatstone

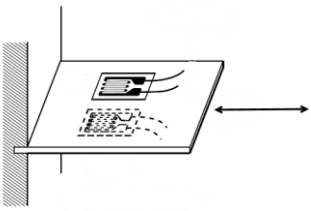
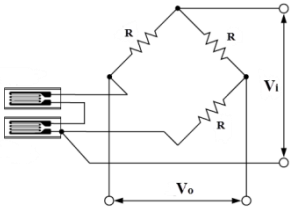
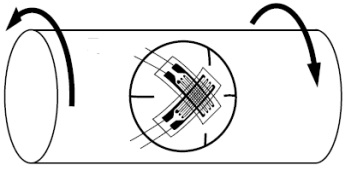
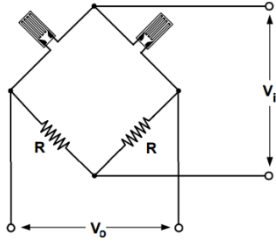
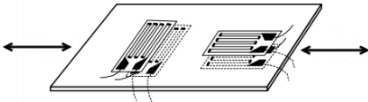
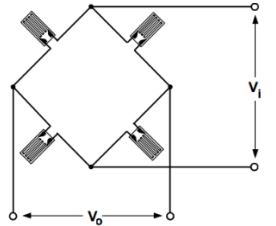
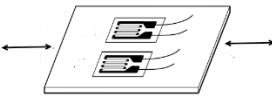
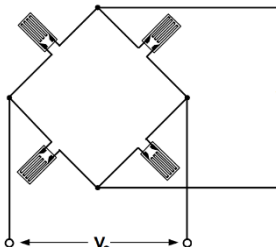
apenas um extensômetro é ativo (R_1) e as demais resistências permanecem em equilíbrio, ou seja, $R_1 \cdot R_4 = R_3 \cdot R_2$, como é verificado na Tabela 4. (WEBER, 2008).

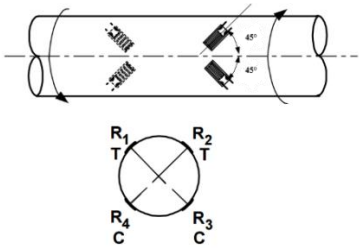
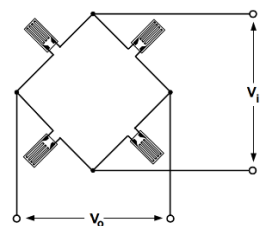
A meia ponte possui dois extensômetros, sendo possível trabalhar com ambos ativos ou um ativo e um compensador. A ligação em $\frac{1}{2}$ ponte com um dos extensômetros ativo (R_1) e outro (R_2) compensador são ambos fixados à superfície a qual se deseja obter informações de deformação, ou em superfícies diferentes de mesmo material, devendo ambos serem idênticos. No entanto R_1 sofrerá solicitações mecânicas e R_2 possuirá função de compensar efeitos de temperatura (Tabela 4). (BARRETO JUNIOR, 2017).

Tabela 4 – Configurações de pontes de Wheatstone.

Configuração	Extensômetros	Configuração da ponte	Sinal de saída
	Ligação		
$\frac{1}{4}$ de Ponte			
	1 Ativo		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{4} \cdot \mathcal{E}$
	2 Fios		
	Sem compensação de temperatura		
$\frac{1}{2}$ Ponte			
	1 Ativo 1 Compensador		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(1 + \nu) \cdot K_G}{4} \cdot \mathcal{E}$
	1 Ativo 1 Compensador		
	Compensação de Temperatura		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{4} \cdot \mathcal{E}$
	1 Ativo 1 Compensador		

Configuração	Extensômetros	Configuração da ponte	Sinal de saída
	Ligação		
	2 Ativos		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{2} \cdot \mathcal{E}$
	Compensação de Temperatura		
	2 Ativos		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{2} \cdot \mathcal{E}$
	3 Fios		
	Efeito térmico cancelado; Tensão de flexão cancelado		
	1 Ativo 1 Compensador		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{2} \cdot \mathcal{E}$
	Compensação de temperatura; Efeitos térmicos cancelados nos fios condutores		
	1 Ativo 1 Compensador		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{4} \cdot \mathcal{E}$
	2 Fios		
	Efeitos de flexão cancelados		

Configuração	Extensômetros	Configuração da ponte	Sinal de saída
	Ligação		
	1 Ativo 1 Compensador		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{4} \cdot \varepsilon$
	3 Fios		
	Efeitos de flexão cancelados Efeitos térmicos cancelados nos fios condutores		
1/2 Ponte para medição de Torque			
	2 Ativos		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{2} \cdot \varepsilon$
	Compensação de temperatura		
Ponte completa			
	4 Ativos		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(1+\nu) \cdot K_G}{2} \cdot \varepsilon$
	Compensação de Temperatura		
	4 Ativos		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{2} \cdot \varepsilon$
	Compensação de Temperatura		

Configuração	Extensômetros	Configuração da ponte	Sinal de saída
	Ligação		
	4 Ativos		$\frac{V_o}{V_i} = K_G \cdot \varepsilon$
	Compensação de temperatura		

Fonte: Adaptado de Kyowa (2017b).

Quando utilizada a configuração de $\frac{1}{2}$ ponte com ambos os extensômetros (R_1 e R_2) ativos, o extensômetro auxiliar não se limita apenas a compensar flutuações térmicas e a balancear sensibilidade. O sistema de medição neutraliza os efeitos de temperatura e deformação normal, medindo apenas deformações mecânicas resultantes de flexão. As resistências R_3 e R_4 são resistores fixos.

Há ainda o modo de ligação da ponte de Wheatstone com o intuito de medir deformação angular, sendo que os extensômetros são fixados na superfície a qual deseja-se analisar à 45° do sentido longitudinal do corpo analisado, como é verificado na Tabela 4.

A ligação completa com 4 (quatro) extensômetros é a configuração que anula efeitos provenientes de flexão e temperatura, sendo sensível a deformações causadas por forças normais, tração e compressão. (BARRETO JUNIOR, 2017).

Na condição em que a barra estiver submetida à esforços trativos, diferentes formas de ligação da ponte de Wheatstone podem ser utilizadas, $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte ou a ligação em ponte completa. Da mesma forma a análise de deformações angulares, decorrente de esforços torcionais pode ser realizada a partir de configurações em $\frac{1}{2}$ ponte ou em ponte completa, como verifica-se na Tabela 4.

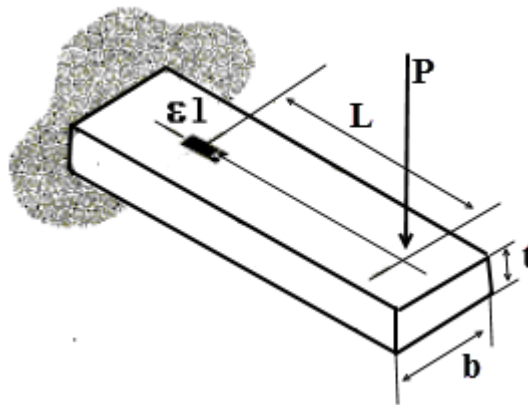
Para o equacionamento matemático geral quando uma barra é solicitada a carregamentos de flexão ou axiais, a deformação é calculada com a Equação (14) onde o valor

de P é referente a força axial ou de flexão aplicada a barra, E o módulo de elasticidade do material da barra e b , t e L , valores dimensionais da barra.

$$\varepsilon = \frac{6.P.L}{E.b.t^2} \quad (14)$$

Em barra sob condições de tensão de flexão e tensão axial, o extensômetro deve ser posicionado na linha central da barra, para que o mesmo não sofra cargas torcionais (Figura 26).

Figura 26 – Barra retangular sob flexão.



Fonte: Barreto Junior (2017).

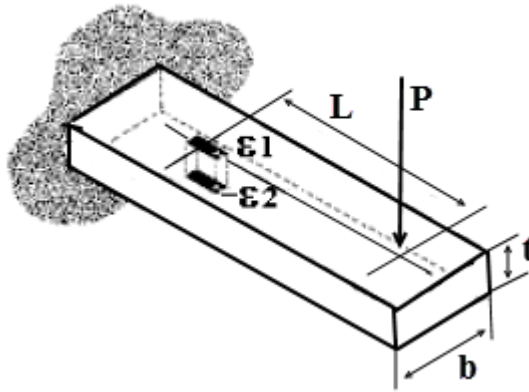
Para esta configuração e condição de análise, um valor de não linearidade é produzido, 0,1 % a cada 1000×10^{-6} , sendo também sensível a variações de temperatura. O equacionamento matemático para esta condição de trabalho é apresentado na Equação (15), para a ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte, onde V_i e V_o representam a tensão de entrada e saída da ponte, K_G o fator de sensibilidade do extensômetro e ε_1 a deformação no extensômetro 1.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{4} \cdot \varepsilon \quad (15)$$

Utilizando uma configuração de $\frac{1}{2}$ ponte para o caso de uma barra em flexão, dois extensômetros de mesma deformação são utilizados para a realização da medição, sendo que

um dos extensômetros é posicionado na superfície superior da barra com sinal positivo⁵ e outro extensômetro na superfície inferior da barra, apresentando sinal negativo⁶. Ambos os extensômetros são posicionados de forma precisa um sobre o outro, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – barra em flexão com configuração de ½ ponte de Wheatstone.



Fonte: Barreto Junior (2017).

A Equação (16) e a Tabela 4 apresentam o cálculo para a configuração sugerida na Figura 27, sendo ε_1 calculado através da Equação (14) e ε_2 com o mesmo valor de ε_1 , porém, com sinal oposto ($\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$). A deformação proveniente de esforços de flexão apresentará valores duplicados em relação ao valor real de deformação, permanecendo o sinal de saída linear.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G \cdot \varepsilon_1}{2} \quad (16)$$

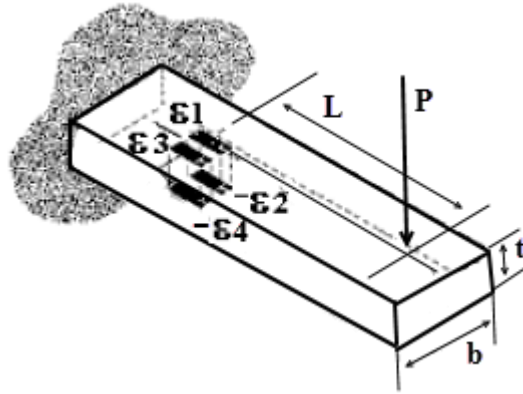
Para o caso da ponte de Wheatstone completa, a disposição dos extensômetros é apresentada na Figura 28. Nesta configuração dois extensômetros, ε_1 e ε_3 , são fixados a superfície superior da barra, de forma a apresentar sinal positivo e dois extensômetros, ε_2 e ε_4 são posicionados na face inferior, apresentando sinal negativo, por estarem sob compressão,

⁵ Indicação positiva quando $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ e/ou $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$

⁶ Indicação negativa quando $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ e/ou $\varepsilon_3 < \varepsilon_4$

formando assim a ponte completa. O valor da deformação será aumentado em 4 (quatro) vezes do valor real e o sinal de saída será linear como na ligação de $\frac{1}{2}$ ponte.

Figura 28 – Barra em flexão utilizando ponte de Wheatstone completa.



Fonte: Barreto Junior (2017).

$$\frac{V_0}{V_i} = K_G \cdot \varepsilon_1 \quad (17)$$

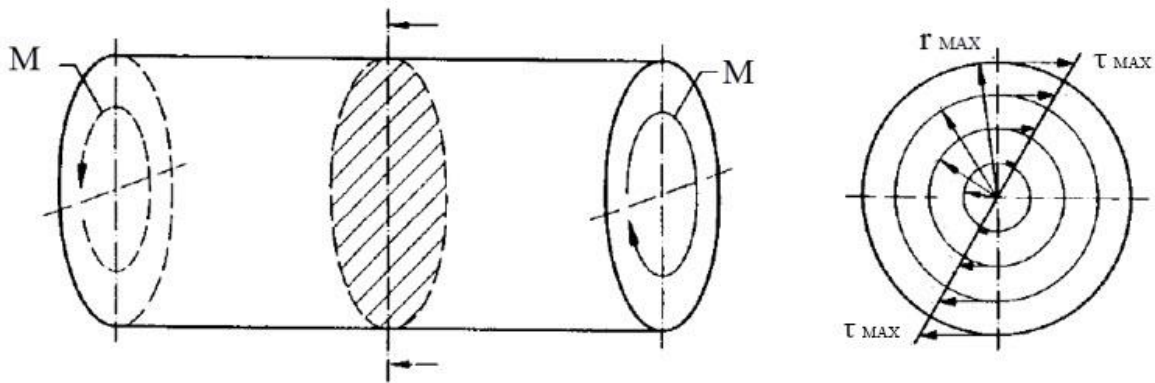
A Equação (17) apresenta o cálculo para a barra sob flexão, com a ligação completa da ponte de Wheatstone para uma barra em flexão. Para este caso ε_1 possui mesmo valor de ε_3 ($\varepsilon_1 = \varepsilon_3$), sendo seu cálculo correspondente a Equação (14). Os extensômetros ε_2 e ε_4 dispõem de valores iguais a ε_1 e ε_3 , porém, com sinais opostos. Tanto os extensômetros ε_1 e $-\varepsilon_2$ são posicionados de forma exata um sobre o outro e da mesma forma ocorre para ε_3 e $-\varepsilon_4$.

Quando uma barra com seção transversal circular é solicitada com carregamentos torcionais, a deformação principal no eixo (ε_{45°) é calculada a partir da Equação (18), onde M é referente ao momento de torção ou torque aplicado ao eixo, $r_{ext.}$ ao raio externo do eixo, $r_{int.}$ ao raio interno do eixo, caso a estrutura seja vazada e G representa o módulo de elasticidade transversal do material analisado.

$$\varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{M \cdot r_{ext.}}{\pi \cdot G \cdot (r_{ext.}^4 - r_{int.}^4)} \quad (18)$$

A análise de deformação em um eixo, sendo ele maciço ou não, difere-se de uma análise unidirecional. A Figura 29 representa o torque (M) aplicado ao eixo e o comportamento da respectiva tensão cisalhante (τ).

Figura 29 – Torque aplicado ao eixo e o comportamento da tensão cisalhante



Fonte: Hoffmann (1989).

Observa-se pela Figura 29 que a tensão cisalhante é proporcional ao raio do eixo. A deformação angular (γ_θ) é dependente da tensão cisalhante, sendo proporcional ao raio do eixo, ou seja, a deformação por cisalhamento varia de 0 (zero) no centro do eixo, até um valor máximo na superfície externa do mesmo. (HIBBELER, 2009).

$$\tau_{MAX} = \frac{M}{(0,2) \cdot d^3} \quad (19)$$

$$\gamma_\theta = \frac{\tau_{MAX}}{G} \quad (20)$$

A deformação angular para uma viga de seção transversal circular é calculada pela Equação (20), onde a tensão cisalhante máxima (τ_{MAX}) é obtida através da Equação (19) e refere-se ao diâmetro do eixo.

No estudo da deformação angular, os extensômetros unidirecionais quando aplicados devem ser fixados com angulação de 45° em relação ao sentido longitudinal da peça, como é também verificado na Tabela 4.

2.4.2 Ponte de Wheatstone e o efeito da temperatura

Relacionando o método de medição com a ponte de Wheatstone, são necessárias compensações como a temperatura. Para minimizar os efeitos causados pela expansão térmica na sensibilidade de medição de extensômetros, a auto compensação térmica pode ser calculada pela Equação (21). (DALLY; RILEY, 1978).

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha) \cdot K_G \cdot \Delta T + \gamma \cdot \Delta T \quad (21)$$

A Equação (21) apresenta a resistência e suas variações, dependentes das variações térmicas no processo de medição, onde β representa o coeficiente de expansão térmica do material analisado, α representa o coeficiente de dilatação térmica do extensômetro e γ representa o coeficiente de temperatura do elemento resistivo.

As variações na resistência devido a deformações são bastante pequenas, porém, o efeito da temperatura pode assumir proporções maiores. Quando não há compatibilidade entre os coeficientes de expansão térmica α e β , uma tensão ocorre causando a mudança de resistência no extensômetro, sem que haja deformação na peça ou equipamento analisado. (Doebelin, 1983). Assim o extensômetro soma a deformação proveniente da variação térmica com a deformação efetivamente medida no material em ensaio, resultando em uma deformação final indesejada e valores incorretos para serem analisados. O extensômetro é considerado compensador de temperatura se os dois termos presentes na Equação (21) resultam em valores iguais a zero ou anulam-se entre si.

Tabela 5 – Coeficientes de expansão térmica para extensômetros auto compensadores.

Material	$\alpha \cdot \frac{10^{-6}}{^{\circ}K}$
Aço ferrítico	10,8
Alumínio	23
Aço austenítico (Aço inoxidável)	16
Sílica/Composto	0,5
Titânio/ferro fundido	9
Plástico	65
Molibdênio	5,4

Fonte: Adaptado de HBM (2017).

A Tabela 5 retrata a relação entre possíveis materiais a serem analisados e a auto compensação de expansão térmica dos extensômetros. Com a adição de elementos de liga ou tratamento térmico ao material da grade de medição, modifica-se o coeficiente de temperatura compensando a deformação proveniente de efeitos térmicos, sendo que cada extensômetro é selecionado de acordo com a resposta adequada a sua aplicação. (HOFFMANN, 1989).

2.5 TRANSFORMAÇÃO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

O carregamento ou sollicitação mecânica imposta à peça causa deformação na mesma. O material do extensômetro e elemento de teste e suas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, influenciam o comportamento mecânico da estrutura em análise.

A lei de Hooke é aplicada em estados de tensão uniaxial, biaxial ou multiaxial, possibilitando o cálculo de tensões em locais específicos da peça analisada. Os estados de tensão e deformação uniaxial, biaxial e multiaxial serão tratados nas seções seguintes:

2.5.1 Estado de tensão uniaxial

O estado de tensão uniaxial é o mais simples modo de ocorrência de tensão na peça ou corpo em análise. Neste, a tensão (σ) no plano x é definida como $\sigma_x \neq 0$ e a tensão normal em y e tensão de cisalhamento ou distorção angular são definidas por $\sigma_y = 0$ e $\tau_{xy} = 0$

respectivamente. A Equação (22) e (23) expressam a relação para o cálculo de tensão e deformação uniaxial, obtidas a partir da forma uniaxial da lei de Hooke. (HIBBELER, 2009).

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (22)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (23)$$

Nas equações (22) e (23) é expresso o formato mais simplificado da lei de Hooke, onde o coeficiente σ representa a tensão, E o módulo de elasticidade e ε a deformação.

A deformação existente em solicitações unidimensionais é medida por um extensômetro unidirecional, colado na direção da solicitação mecânica (tração, compressão ou flexão pura).

2.5.2 Estado biaxial de tensão e deformação

O estado de tensão biaxial deve ser tratado de forma diferente de uma abordagem simplista como no caso de tensão uniaxial. Neste caso as tensões principais σ_1 e σ_2 ocorrem em direções perpendiculares. A condição de tensão biaxial pode ser definida pela teoria de Euler, para um material isotrópico, homogêneo linear e elástico, como mostram as equações (24) e (25), onde $\sigma_{xx} \neq 0$, $\sigma_{yy} \neq 0$ e $\tau_{xy} = 0$. (HIBBELER, 2009).

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \quad (24)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1) \quad (25)$$

De outra forma as tensões e deformações podem ser calculadas a partir das Equações (26) e (27), referentes as tensões e deformações principais.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (26)$$

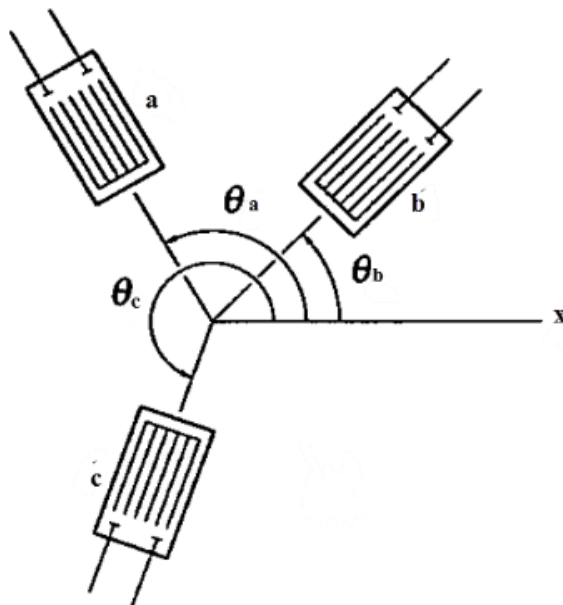
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{2}\right)^2} \quad (27)$$

Para a condição de estado em análise rosetas $0^\circ/90^\circ$ modelos T, X ou L, usualmente empregadas para estados de tensão biaxial com direções principais conhecidas, são aplicadas. Além de rosetas biaxiais, podem ser empregados ainda dois extensômetros uniaxiais com angulação entre si, que permitirão analisar biaxialmente a estrutura. (HOFFMANN, 1989).

2.5.3 Estado Geral de Tensões

No estado geral de tensões em um corpo de prova, as direções de tensões não são conhecidas. Para este estado geral de tensão três extensômetros unidirecionais podem ser empregados, porém, sendo mais comumente utilizadas as rosetas de três pontas, posicionadas em ângulos θ_a, θ_b e θ_c (Figura 30) com padrões de 45° ou 60° (Figura 31).

Figura 30 – Extensômetros com angulações em relação ao eixo x .

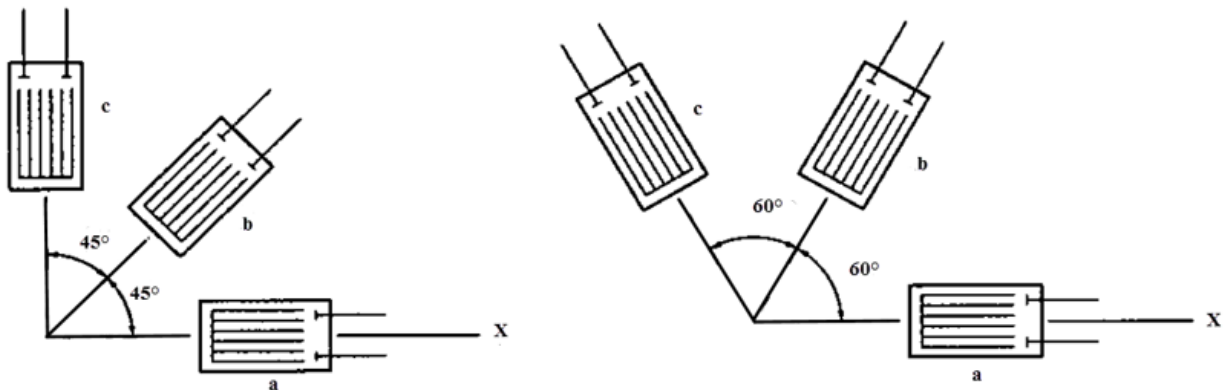


Fonte: Hibbeler (2009).

A Equação (28) apresenta os cálculos de ε_a , ε_b e ε_c . As leituras são realizadas a partir dos extensômetros aferidos em 3 eixos distintos. (HIBBELER, 2009).

$$\begin{aligned}\varepsilon_a &= \varepsilon_x \cdot \cos^2 \theta_a + \varepsilon_y \cdot \sin^2 \theta_a + \gamma_{xy} \cdot \sin \theta_a \cdot \cos \theta_a \\ \varepsilon_b &= \varepsilon_x \cdot \cos^2 \theta_b + \varepsilon_y \cdot \sin^2 \theta_b + \gamma_{xy} \cdot \sin \theta_b \cdot \cos \theta_b \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_x \cdot \cos^2 \theta_c + \varepsilon_y \cdot \sin^2 \theta_c + \gamma_{xy} \cdot \sin \theta_c \cdot \cos \theta_c\end{aligned}\tag{28}$$

Figura 31 – Rosetas de 45° e 60°.



Fonte: Hibbeler (2009).

Analisando as rosetas posicionadas a 45° e 60°, ilustradas na Figura 31 e o equacionamento apresentado na Equação (28), as deformações normais e cisalhantes são obtidas para cada angulação em específico.

Rosetas posicionadas em padrões de 45°, assumem valores de $\theta_a = 0^\circ$, $\theta_b = 45^\circ$ e $\theta_c = 90^\circ$ de acordo com a Figura 31 e Equação (29).

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_c \tag{29}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)$$

Para rosetas com valores padrões de 60° a Equação (30) define as deformações ε_x , ε_y e γ_{xy} respectivamente. (HIBBELER, 2009)

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \varepsilon_b + 2 \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_a) \tag{30}$$

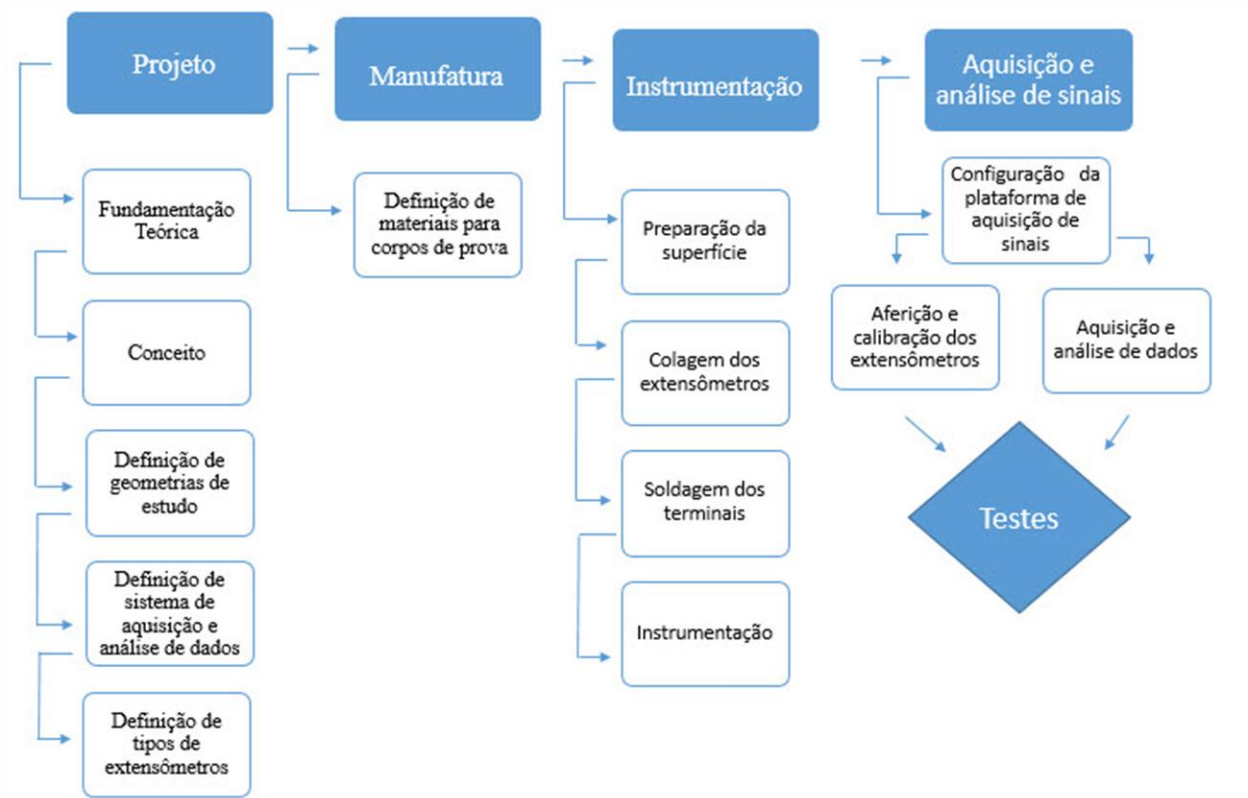
$$\gamma_{xy} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)$$

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve as definições e requisitos para a realização dos estudos de caso em extensometria, como geometrias, materiais, sistema de fixação ao corpo de prova, bem como os extensômetros adotados para o estudo e sistema de aquisição de dados.

A Figura 32 apresenta o fluxograma de atividades desempenhadas.

Figura 32 – Fluxograma de execução.



Fonte: Autora (2017).

O objetivo dos ensaios é proporcionar uma melhor compreensão dos fenômenos fundamentais envolvidos na medição de deformação, a partir da extensometria e uso de equipamentos de aquisição de dados. Os ensaios consistem em avaliar a aproximação dos valores de deformação medidos experimentalmente com os obtidos através de cálculos analíticos.

Para a concepção do experimento, algumas premissas relevantes são enumeradas a seguir:

- Serão ensaiadas duas vigas distintas, uma com seção transversal retangular e outra com seção transversal circular;

- Ambas serão engastadas e submetidas a carregamentos;
- A estrutura com seção transversal retangular será submetida a carregamentos que causam a flexão da mesma, enquanto a estrutura com seção transversal circular será submetida a carregamentos que resultam em torque;
- As geometrias das estruturas devem ser compactas e simétricas;

3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados utilizado para a conexão dos sensores e gravação dos sinais foi o sistema LYNX ADS 2002, com controlador AC2122VB e condicionador AI2164 contendo 16 canais. A Figura 33 apresenta a foto do equipamento.

Figura 33 – Equipamento de aquisição de dados LYNX 2002.



Fonte: Autora (2017).

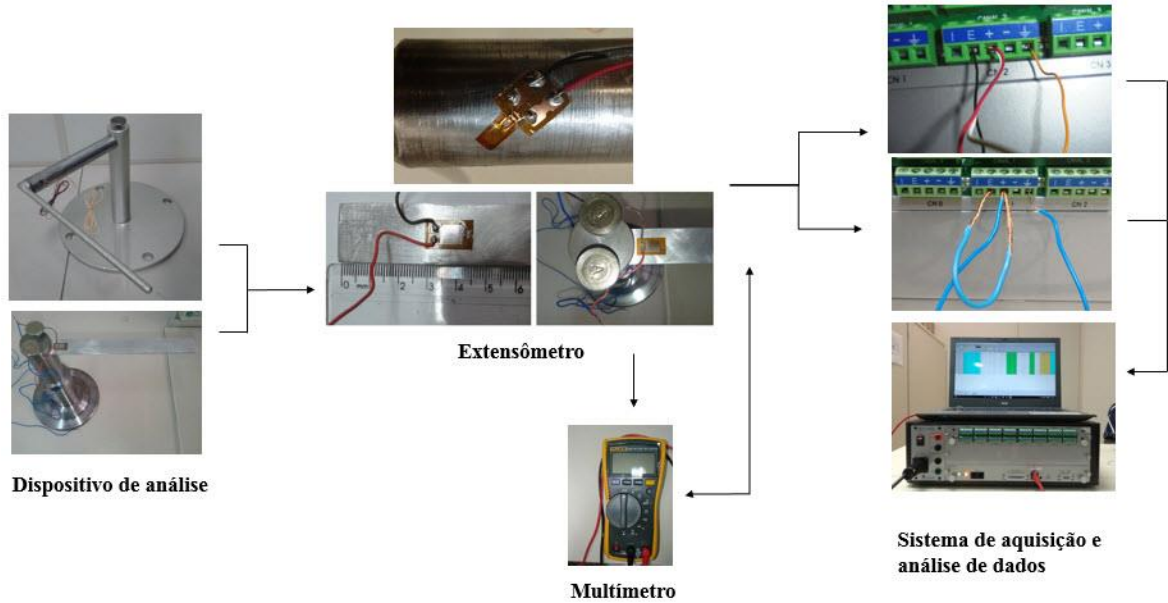
O sistema de aquisição de dados é comandado por um programa de aquisição, que opera em um microcomputador em conjunto com o equipamento. O LYNX 2002 capta os sinais medidos pelo extensômetro e os envia ao programa AqDados. O programa de aquisição de dados, AqDados, possibilita todo o processo de calibração e aferição dos extensômetros de forma eficiente.

A partir dos sinais armazenados é possível analisá-los com o programa AqAnalysis, também desenvolvido pela LYNX, que realiza todo o processamento dos sinais e elaboração de relatórios de análise a partir dos dados adquiridos, avaliando a qualidade do sinal e variações ocorridas durante a medição.

3.1.1 Fluxo da instrumentação

O fluxo que ilustra a conexão dos sensores de medição e equipamentos empregados para a realização dos ensaios experimentais é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Fluxo ilustrativo da instrumentação.



Fonte: Autora (2017).

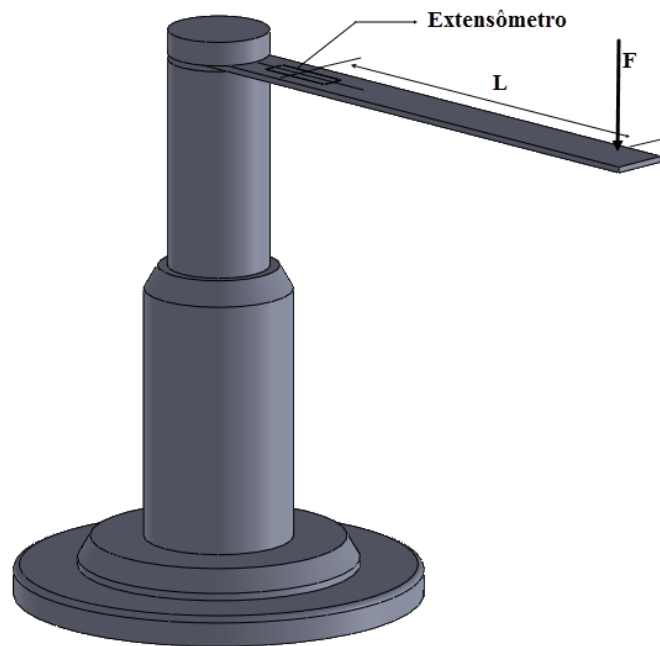
3.2 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL

Para o desenvolvimento do experimento com a finalidade de medir deformação longitudinal de uma viga engastada, através de extensômetros, um corpo de prova que simulasse condições reais de carregamento foi desenvolvido e construído.

O equipamento projetado para a medição de deformação é apresentado na Figura 35.

A viga selecionada para a realização dos testes possui 200 mm de comprimento total, 20 mm de largura e 2 mm de espessura, fabricada em alumínio. A mesma é engastada em uma das extremidades e é submetida a carregamentos distintos (F) na extremidade livre.

Figura 35 - Modelo do corpo de prova para estudo de deformação unidirecional.



Fonte: Autora (2017).

Ainda com relação a Figura 35, pode-se observar que há um extensômetro unidimensional fixo a superfície da estrutura analisada. Este tipo de extensômetro possibilita a medição de deformações provenientes de cargas compressivas e/ou trativas unidirecionais. Para esta montagem utilizou-se uma ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone, como estudado no capítulo anterior. O extensômetro é colado com distância (**L**) de 155 mm até o ponto de aplicação do carregamento (**F**).

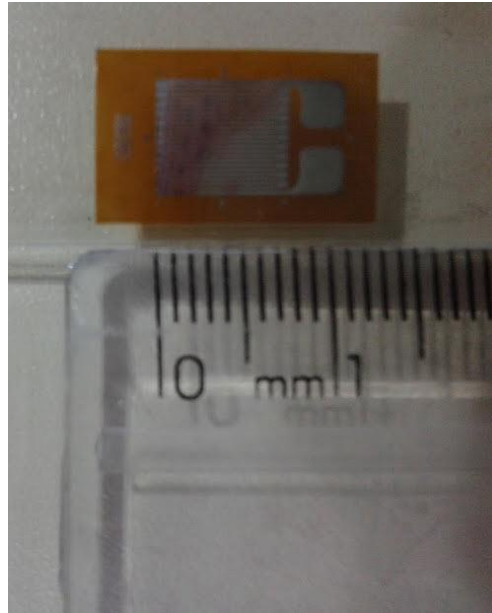
As especificações do extensômetro elétrico uniaxial, selecionado para a medição de deformação longitudinal na superfície da viga, estão listadas na Tabela 6, sendo o mesmo apresentado na Figura 36.

Tabela 6 – Extensômetro utilizado para medição de deformação unidirecional.

Marca	MICRO MEASUREMENTS®
Tipo de extensômetro	EA – 06 – 250AF - 120
Resistência elétrica	120.0 +/- 0.15% Ω
Fator de gage a 75° F	2,025 +/- 0.5%
Comprimento	6,35 mm
Range de temperatura	-75° C a 175° C medições estáticas -195° C a 205° C pequenas exposições térmicas

Fonte: Adaptado de Vishay Precision Group (2016).

Figura 36 – Extensômetro unidirecional utilizado.



Fonte: Autora (2017).

O corpo de prova fabricado é apresentado na Figura 37. A viga de alumínio é engastada a uma estrutura de aço 1020. A partir desta estrutura, foi realizado o preparo da superfície para a fixação do extensômetro e instrumentação, para posterior aquisição de dados.

Figura 37 – Corpo de prova para medição de deformação longitudinal

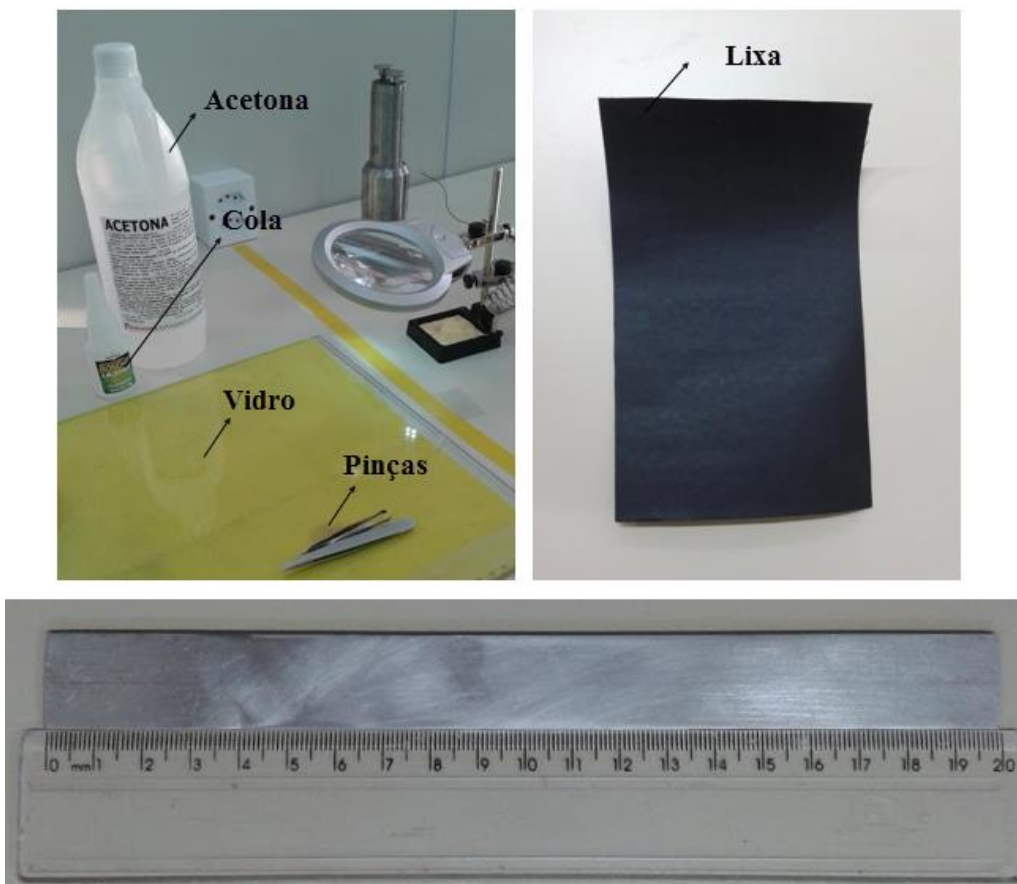


Fonte: Autora (2017).

3.2.1 Preparação da superfície, fixação do extensômetro e instrumentação.

A região de fixação do extensômetro foi primeiramente lixada utilizando lixa de rugosidade 400, com angulações de 45° em relação ao sentido longitudinal da barra, até a mesma apresentar ranhuras favoráveis para a correta fixação do extensômetro. Após o processo de lixamento da superfície da barra, a mesma foi limpa com a aplicação de acetona e gaze para a retirada de fragmentos do material lixado (Figura 38).

Figura 38 – Utensílios para lixamento, limpeza da barra e manuseio do extensômetro.



Fonte: Autora (2017).

Com a superfície do corpo de prova limpa, realizou-se a demarcação da mesma para a correta localização de aplicação do extensômetro. A marcação da peça foi realizada com uma ferramenta pontiaguda e o auxílio de régua, realizada sem a aplicação de pressão sobre a peça.

Após as demarcações realizadas, a peça foi limpa novamente com a utilização de acetona e gaze, friccionando a gaze à superfície para retirada de toda e qualquer impureza. A limpeza foi repetida até que a gaze permanecesse limpa. Para finalizar, foi utilizado cotonete

embebido em acetona, friccionando-o também à superfície da peça, para a verificação da estrutura limpa.

Posteriormente à correta limpeza da superfície do corpo de prova, a etapa de fixação do extensômetro foi realizada. Todo o manuseio da barra foi efetuado sobre uma placa de vidro (Figura 38), cuidadosamente limpa da mesma forma que a superfície da barra, para não haver contaminação do equipamento e do extensômetro.

Primeiramente o extensômetro foi retirado da embalagem com a utilização de pinças (Figura 38), para não haver o contato com as mãos, manuseando-o também sobre a placa de vidro. Sobre o extensômetro foi aplicado fita adesiva transparente, fixando-o à superfície do vidro (Figura 39). Com o extensômetro colado a fita foi possível manuseá-lo e ajustá-lo na demarcação correta para colagem e fixá-lo a superfície da barra com maior facilidade.

Figura 39 – Extensômetro e o processo de fixação.



Fonte: Autora (2017).

Para a fixação do extensômetro foi utilizado cola instantânea *Bond it* ultra de marca Brascola. Posteriormente a aplicação da cola, o extensômetro foi pressionado contra a superfície por cerca de 1 minuto, e em seguida a fita foi então lentamente retirada, para não danificar o extensômetro.

Com o extensômetro fixo ao corpo de prova, a superfície do mesmo foi novamente limpa com a utilização de cotonetes e acetona para a retirada de qualquer vestígio de cola proveniente da fita adesiva, proporcionando uma solda efetiva nos terminais do extensômetro. Foi realizada a soldagem dos fios aos terminais do extensômetro, utilizando material de solda com 63% de estanho na composição e temperatura de 300 °C na ponta de solda.

A estação de soldagem utilizada foi a Yaxum 702B⁺ (Figura 40). Além dos fios soldados aos terminais foram utilizados fios de extensão, que aumentam a resistência do circuito de medição, sendo necessária a correção no sistema de aquisição de dados.

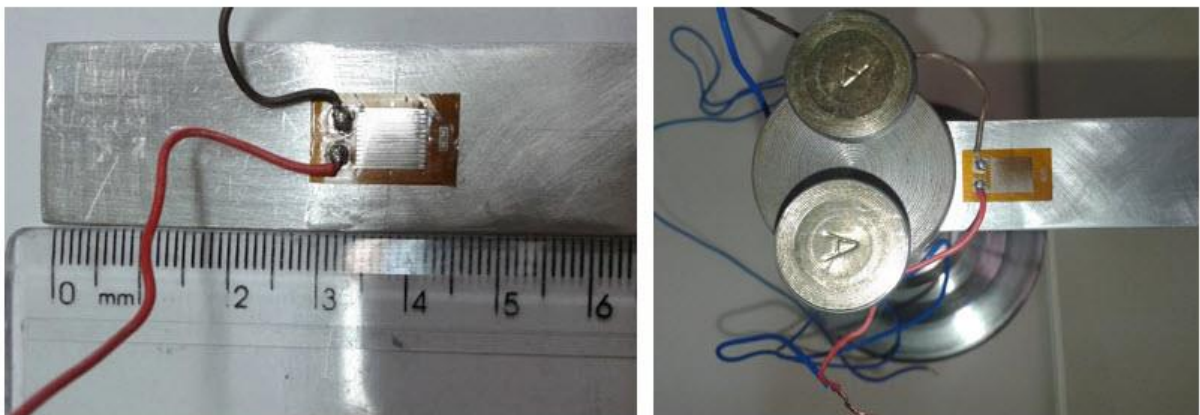
Figura 40 – Estação de solda.



Fonte: Autora (2017).

O extensômetro já fixo a superfície do corpo de prova e com seus terminais soldados é apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Extensômetro soldado



Fonte: Autora (2017).

Para a aplicação do carregamento foram fabricadas 3 (três) massas distintas (Figura 42), que foram pesadas em balança com precisão de duas casas decimais por três vezes e então adotado o valor da média entre as medições. O conjunto gancho e porca (Figura 43), que suportam e fixam as massas à barra, foram pesados com o mesmo processo de medição, em

virtude de haver interferência na massa total do sistema. O valor das massas de cada componente (Figura 42 e Figura 43) é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Massas de componentes e utensílios de fixação.

Peso 1	99,68 g
Peso 2	198,36 g
Peso 3	997,30 g
Gancho	48,78 g
Porca	14,48 g

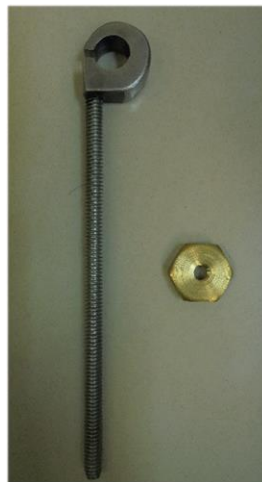
Fonte: Autora (2017).

Figura 42 – Massa para carregamento.



Fonte: Autora (2017).

Figura 43 – Gancho e porca.

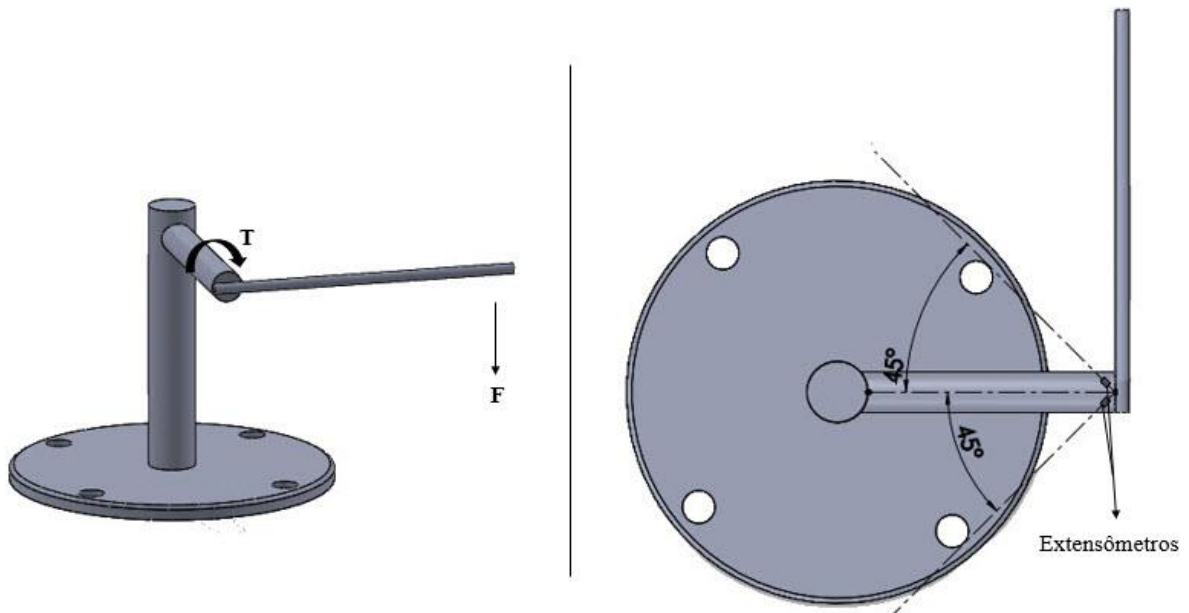


Fonte: Autora (2017).

3.3 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO ANGULAR

A deformação proveniente do torque aplicado a um eixo maciço foi analisada. Um corpo de prova foi projetado e desenvolvido a fim de simular condições reais de torque aplicado no eixo. O dispositivo projetado é representado na Figura 44. Fabricado em aço 1020, o eixo engastado a uma estrutura suporte possui 23 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, sendo submetido a torques provenientes de carregamentos distintos (F), aplicados na extremidade de um braço de alavanca com 200 mm comprimento.

Figura 44 – Modelo do corpo de prova para estudo de deformação angular.



Fonte: Autora (2017).

Ainda considerando a Figura 44, dois extensômetros (identificados na Figura 44) devem ser colados a superfície do eixo de teste, com angulação de 45° em relação ao eixo longitudinal da peça. Os mesmos devem ser fixos na extremidade mais próxima ao braço de alavanca, pois neste ponto há maior sensibilidade com a deformação ocorrida, quando se tratando de eixos maciços.

As especificações do extensômetro elétrico uniaxial selecionado para a análise de deformação no eixo estão elencadas na Tabela 8.

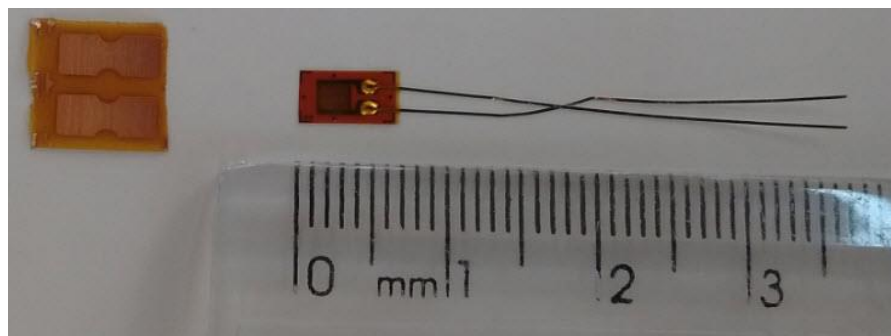
Tabela 8 – Extensômetro utilizado para medição de deformação angular.

Marca	PANTEC®
Tipo de extensômetro	BE120 – 2AA – A (11)
Resistência elétrica	120.0 +/- 0.1%
Fator de gage a 75° F	2,17 +/- 1 %
Comprimento	1.9 mm
Range de temperatura	-30°C A + 80°C

Fonte: Adaptado de Panambra (2017).

O extensômetro selecionado para o experimento possui uma configuração diferente. Por ser pequeno e assim mais frágil, o extensômetro que é fornecido pelo fabricante com pequenos fios soldados a seu corpo, é acompanhado de um terminal, que também deve ser colado a superfície a qual se deseja analisar. Os fios finos e sensíveis que acompanham o extensômetro são soldados em uma das extremidades do terminal. Na outra extremidade deste terminal cabos, que serão ligados ao sistema de aquisição de dados, também são soldados. A Figura 45 exibe o extensômetro e o seu respectivo terminal.

Figura 45 – Extensômetro unidirecional e terminal.



Fonte: Autora (2017).

O corpo de prova fabricado é apresentado na Figura 46. O eixo em aço 1020 é engastado na estrutura que o suporta, de forma que não apresente variações geométricas ou deslocamentos involuntários que poderiam influenciar nas medições.

Figura 46 – Corpo de prova para medição de deformação angular.

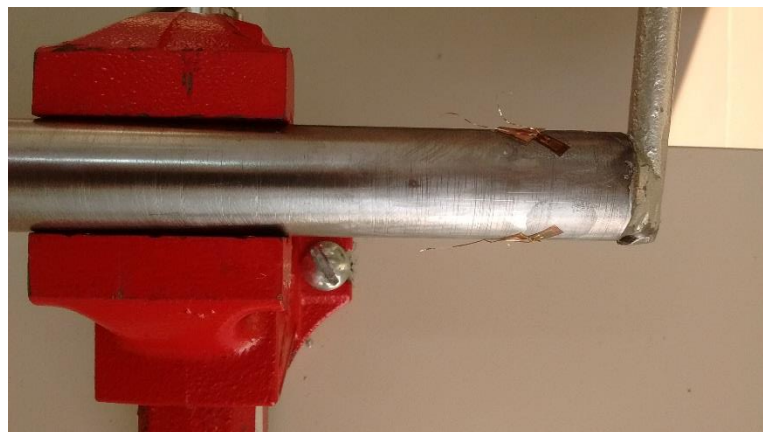


Fonte: Autora (2017).

3.3.1 Preparação da superfície, fixação do extensômetro e instrumentação.

Todo o processo de preparo da superfície para a fixação do extensômetro e materiais empregados para tal fim, foi realizado com o mesmo padrão e critérios adotados no ensaio apresentado na seção anterior, referente a análise de deformação de uma viga de seção transversal. Para o trabalho de preparação da superfície foi utilizado uma morsa, para a fixação e centralização do eixo, a fim de garantir a correta demarcação do local de fixação e precisa colagem dos extensômetros ao mesmo (Figura 47).

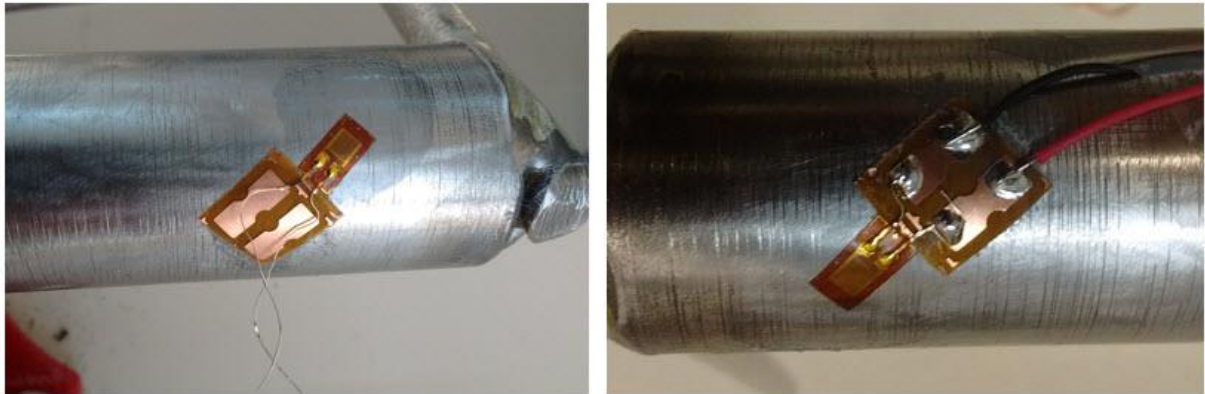
Figura 47 – Eixo em processo de instrumentação.



Fonte: Autora (2017).

Um dos extensômetros fixo à superfície de análise juntamente com o terminal em ângulo de 45° com relação ao sentido longitudinal do eixo é apresentado na Figura 48. É observado a função do terminal, sendo os filamentos do extensômetro fixos em uma das extremidades e os fios que ligam os extensômetros ao sistema de aquisição de sinais na outra extremidade do mesmo.

Figura 48 – Extensômetro e terminal fixos a superfície do eixo.



Fonte: Autora (2017).

No estudo de deformação angular além das massas adotadas para o carregamento, apresentadas na Figura 42, foram fabricadas duas massas adicionais (Figura 49), para agregar peso a estrutura e obter deformações mais significativas, considerando o tipo de material o qual o eixo é fabricado.

Figura 49 – Massas adicionais para carregamento.



Fonte: Autora (2017).

A massas nomeadas de **Peso 4** e **Peso 5** foram pesadas na mesma balança e com o mesmo procedimento adotado para pesagem das massas já fabricadas. A Tabela 9 enumera os valores das respectivas massas.

Tabela 9 – Massas adicionais

Peso 4	497,69 g
Peso 5	495,22 g

Fonte: Autora (2017).

4 ESTUDOS DE CASO

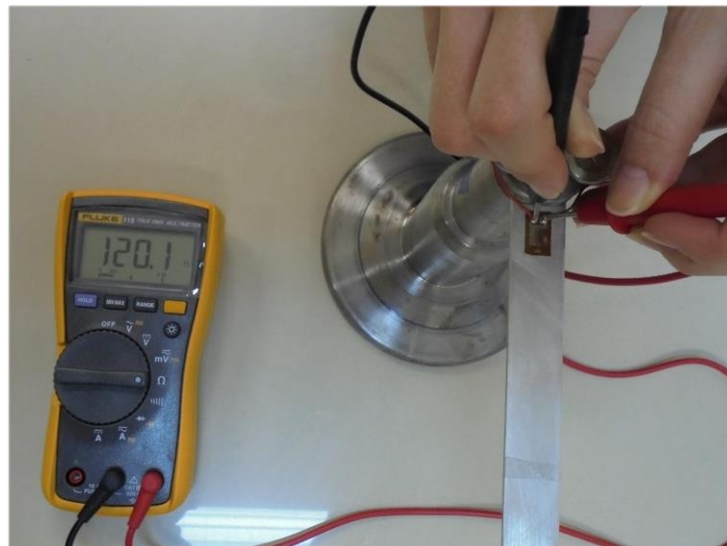
O estudo experimental para os problemas propostos foi realizado seguindo todos os parâmetros e condições de contorno para ambas as análises.

4.1 ESTUDO DA DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL

Para os ensaios realizados com a viga de seção transversal retangular, foram efetuados primeiramente os estudos experimentais. Considerando os valores de três massas distintas em diferentes combinações, somando na totalidade as massas do gancho e porca, os quais possuem influência constante no conjunto de pesos (valores apresentados na Tabela 7). Foi considerando a ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte, como mencionado no capítulo anterior.

O estudo experimental foi iniciado com a aferição da resistência do extensômetro. Um multímetro foi utilizado, posicionando suas ponteiros sobre os terminais do extensômetro, como é observado na Figura 50.

Figura 50 – Aferição da resistência no extensômetro.

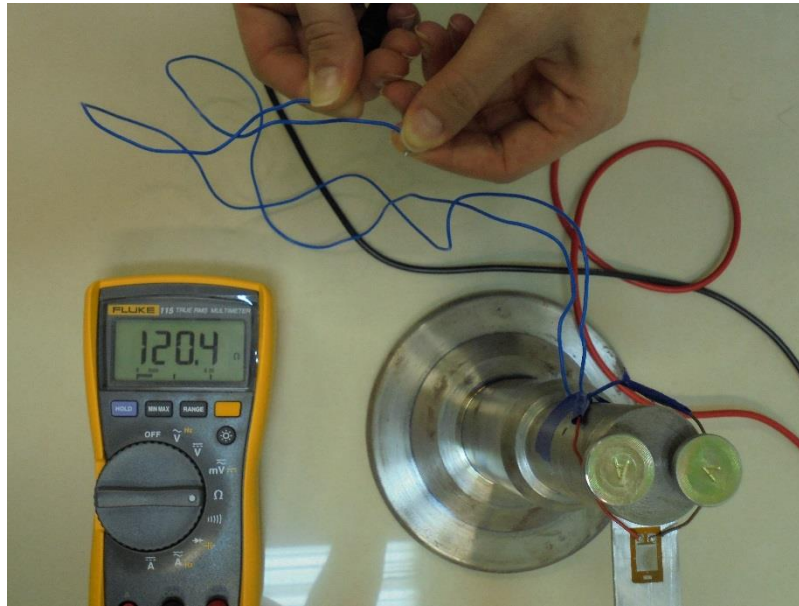


Fonte: Autora (2017).

A resistência obtida a partir da medição realizada de $120,1 \Omega$, indicou que o extensômetro estava em perfeito estado de funcionamento e dentro de sua faixa de tolerância de $120.0 \pm 0.15 \% \Omega$.

Como foram adicionados fios de extensão ao circuito, a resistência na extremidade dos fios foi aferida. O multímetro indicou resistência de 120,4 Ω , como mostra a Figura 51, representando um aumento de 0,3 Ω ao circuito, devendo ser compensado pelo sistema de aquisição de dados.

Figura 51 – Aferição da resistência nos fios de extensão.



Fonte: Autora (2017).

Aferido o sensor, os canais do sistema de aquisição são habilitados e balanceados. A calibração do valor de engenharia foi calculada a partir do fator de gage (FG) de 2,025, da resistência medida (RM) de 120,4 Ω e da resistência de calibração (RC), fornecida pelo fabricante do sistema de aquisição de 581939 Ω . O cálculo do valor de engenharia é exibido na Equação (31).

A calibração dos extensômetros é realizada utilizando um resistor chamado Shunt Eng. Este é um resistor interno do equipamento de medição com alta precisão, que calibra as tensões e grandezas escolhidas para medição.

$$\text{valor de engenharia} = \left(\frac{1}{\text{FG}} \cdot \left(\frac{\text{RM}}{\text{RM} + \text{RC}} \right) \right) \cdot 10^6 \quad (31)$$

A Tabela 10 apresenta a interface de configuração de entrada analógica do módulo de aquisição.

Tabela 10 – Configurações de entrada para ¼ de ponte módulo AI-2164.

Unidade	10^{-6}
Tipo de Entrada	¼ ponte 120
Ganho	x 1000
Excitação	125 mV
Valor de Engenharia	102,15
Frequência de amostragem	100 Hz

Fonte: Autora (2017).

Com o sensor aferido, balanceado e calibrado, procederam-se as medições. A gravação do ensaio iniciou-se, acionando o ícone de leitura e gravação do sinal com o dispositivo sem carga. Esta leitura é gravada e vinculada ao valor zero da grandeza a ser medida. Em seguida as massas foram colocadas na marcação de 155 mm feita na barra (Figura 52), esperando alguns segundos para a medição da deformação da barra com o peso. Posteriormente ao tempo de medição a massa era então retirada e novamente aguardavam-se alguns segundos para a estabilização da barra no valor zero e finalizava-se a gravação do sinal. Este procedimento foi repetido para cada massa, a fim de estudar o comportamento do corpo de prova com cada massa individualmente.

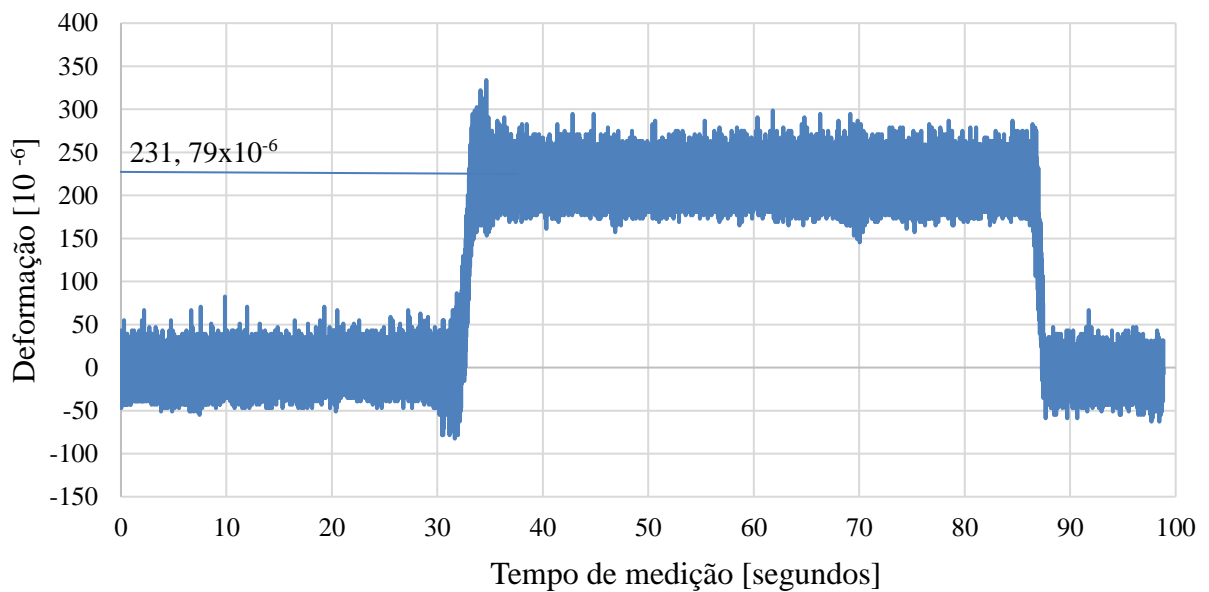
Figura 52 – Corpo de prova conectado ao sistema de medição.



Fonte: Autora (2017).

Com as medições realizadas foi possível analisar os dados gerados pelo sistema de análise. Os gráficos apresentados foram convertidos utilizando o Matlab[®], para uma melhor visualização da representação gráfica. O resultado da medição feita utilizando a massa total de 162,94 g é apresentado na Figura 53. O sinal inicial mostra o corpo de prova sem solicitação mecânica, variando em torno do marco zero. Quando a massa é colocada ao corpo de prova, o sinal apresenta um leve pico e estabiliza com média de $231,79 \times 10^{-6}$. Ao retirar a massa o sinal retorna ao valor inicial.

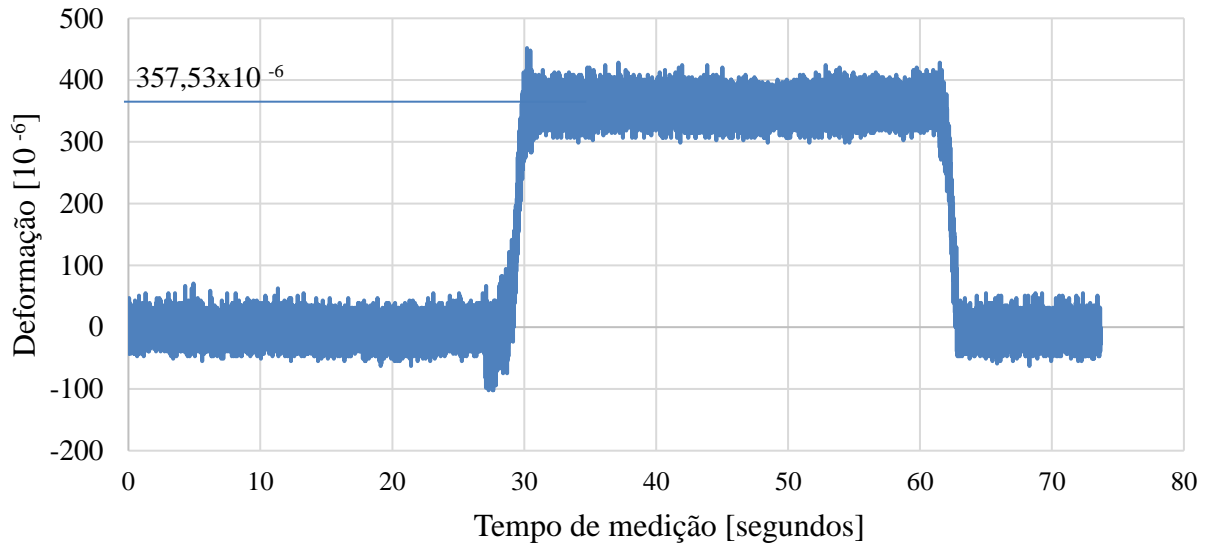
Figura 53 – Medição de deformação para 162,94 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

Para a medição com massa total de 261,62 g (apresentada na Figura 54), é observado que a deformação obteve uma média de $357,53 \times 10^{-6}$.

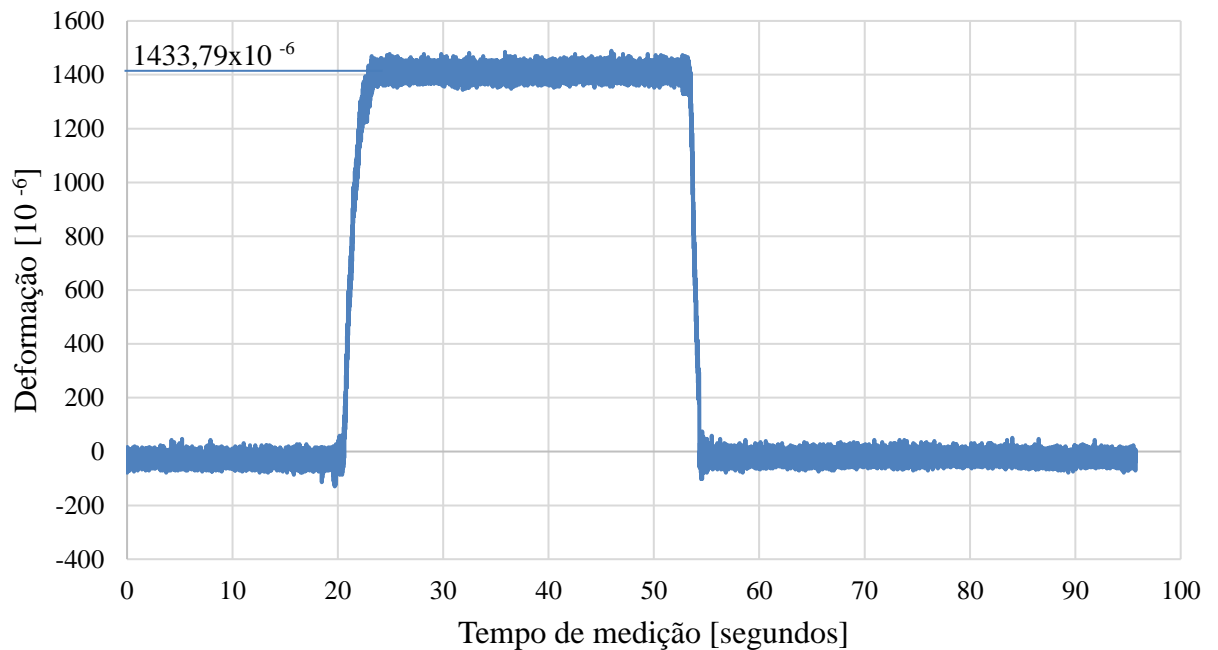
Figura 54 - Medição de deformação para 261,62 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

Aplicando a massa de 1060,56 g, a Figura 55 apresenta a deformação total obtida, com valor de $1433,79 \times 10^{-6}$.

Figura 55 – Medição de deformação para 1060,56 g no corpo de prova.

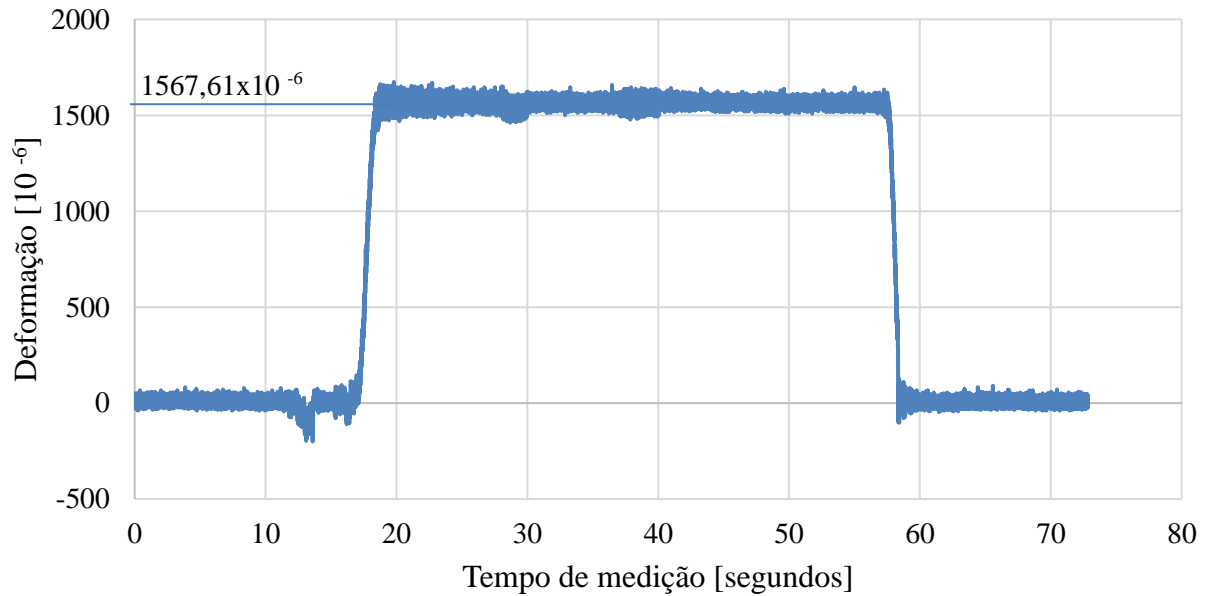


Fonte: Autora (2017).

Após as medições utilizando os pesos individualmente, os mesmos foram combinados em pares de massas de 1160,24 g ,1258,92 g e 1358,6 g.

O valor de deformação calculado, aplicando carregamento de 1160,24 g causou uma deformação total no corpo de prova de $1567,61 \times 10^{-6}$, como é observado na Figura 56.

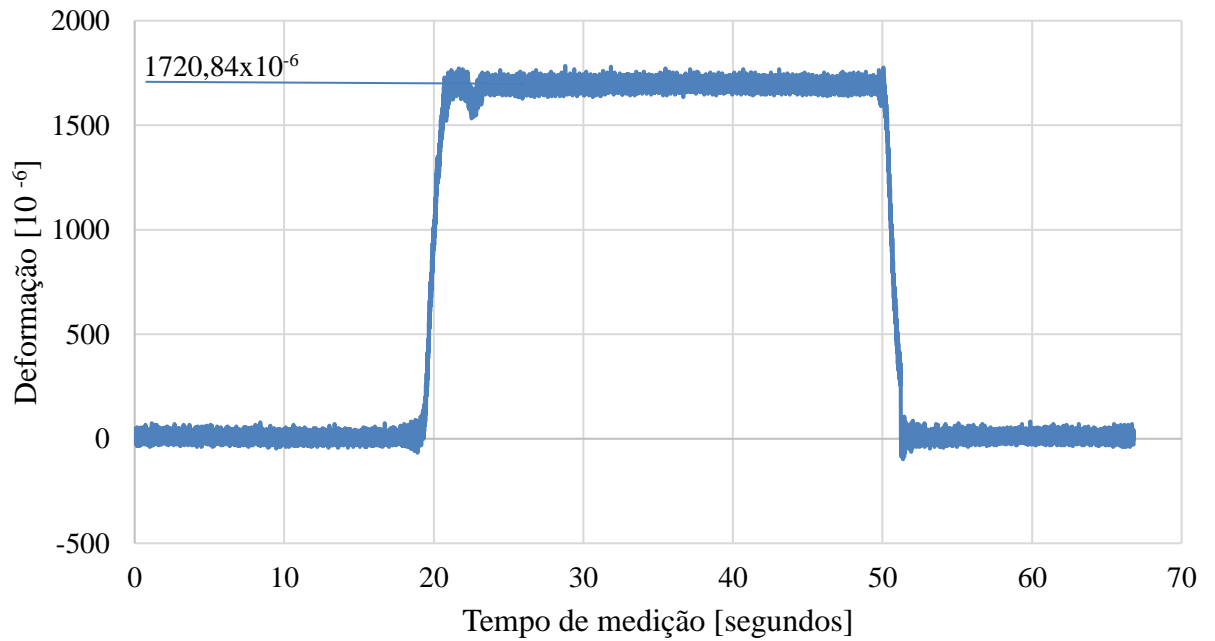
Figura 56 – Medição de deformação para 1160,24 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

A massa de 1258,92 g causou um pequeno acréscimo na deformação total da barra. A deformação medida foi de $1720,84 \times 10^{-6}$ e é apresentada na Figura 57.

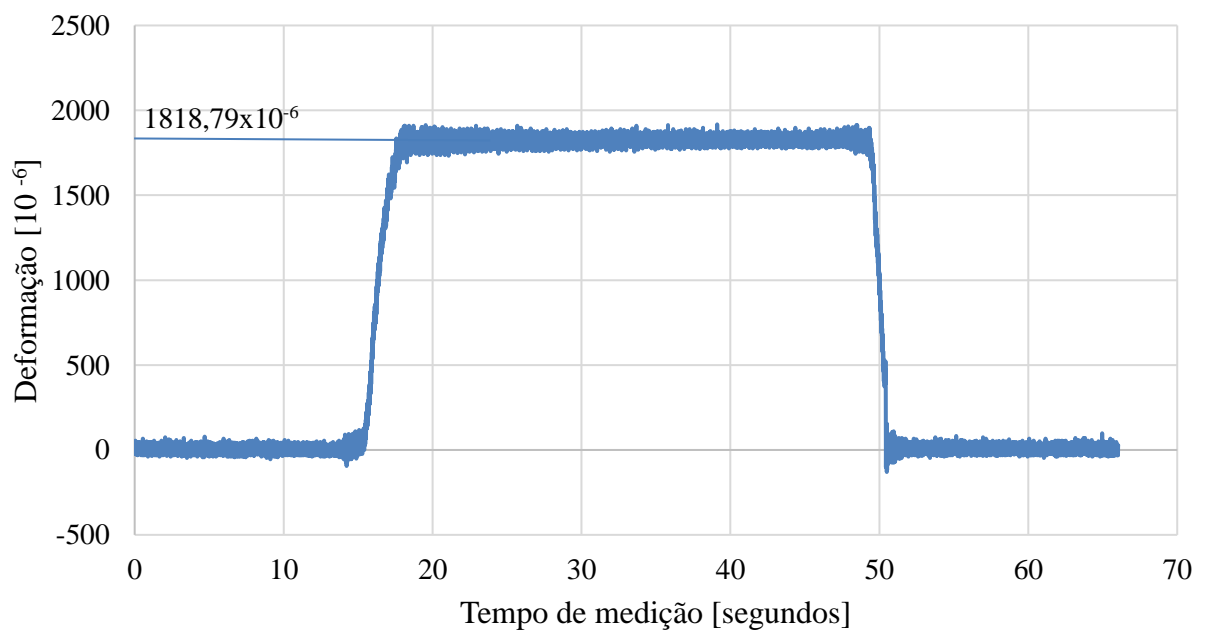
Figura 57 - Medição de deformação para 1258,92 g aplicadas ao corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

A maior deformação medida no experimento foi proveniente da massa de 1358,6 g aplicada ao corpo de prova. Saindo do valor zero o sinal foi até a deformação de $1818,79 \times 10^{-6}$ (Figura 58).

Figura 58 – Deformação medida para 1358,6 g aplicadas ao corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

O estudo analítico foi realizado, calculando-se os valores de deformação respectivos aos carregamentos atribuídos a partir da Equação (14). Como o módulo de elasticidade (E) do material do corpo de prova é desconhecido, o valor de 75 GPa para o alumínio foi adotado, porém, em virtude do mesmo possuir variação considerável nas tabelas de propriedades, ajustou-se o modelo a partir do valor de deformação obtido no estudo experimental de $1818,79 \times 10^{-6}$ e então o módulo de elasticidade ajustado foi atribuído aos cálculos. O módulo de elasticidade (E) calculado e adotado foi de 85,19 GPa. Os valores de deformação longitudinal obtidos analiticamente são apresentados na Tabela 11.

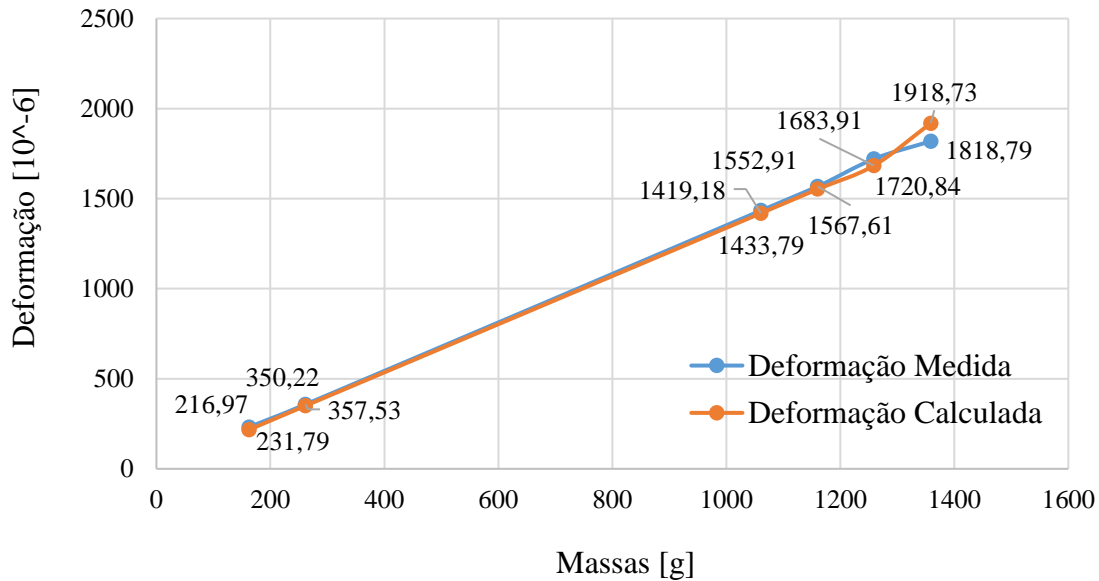
Tabela 11 – Valores de Deformação unidirecional – Cálculo analítico.

Deformação para 162,94 g	10^{-6}
ε	216,97
Deformação para 261,62 g	10^{-6}
ε	350,22
Deformação para 1060,56 g	10^{-6}
ε	1419,18
Deformação para 1160,24 g	10^{-6}
ε	1552,91
Deformação para 1258,92 g	10^{-6}
ε	1683,91
Deformação para 1358,6 g	10^{-6}
ε	1818,73

Fonte: Autora (2017).

Em todas as medições o comportamento do sinal apresentou flutuação de carga, sendo que quanto maior o valor da massa, mais estável apresentou-se o sinal medido, com menor distância entre os picos máximo e mínimo. A Figura 59 mostra graficamente a diferença entre valores de deformação medidos e calculados para cada massa aplicada ao corpo de prova.

Figura 59 – Gráfico de deformações



Fonte: Autora (2017).

A diferença entre os valores obtidos teoricamente e de forma experimental com o equipamento de aquisição de sinais é proveniente de influências do meio. Os valores de deformação calculados são baseados na teoria e simplificações são assumidas, não havendo considerações importantes que são ocorridas em testes reais.

Experimentalmente interferências como a umidade relativa do ar, a temperatura, a vibração na mesa de teste, a solda do extensômetro ou fixação do mesmo ao corpo de prova, assim como a intervenção humana são fatores influenciáveis. Outro fator que deve ser levado em consideração é que o sistema de aquisição de dados não estava aterrado.

A Tabela 12 apresenta de forma comparativa a diferença percentual entre ambos os meios de análise.

Tabela 12 – Diferença entre deformação medida e calculada.

Massa [g]	Deformação [10 ⁻⁶]		Diferença Tensão [Pa]	Diferença %
	Deformação Calculada	Deformação Medida		
162,94	216,97	231,79	1,26E+06	6,39
261,62	350,22	357,53	6,23E+05	2
1060,56	1419,18	1433,79	1,24E+06	1,019
1160,24	1552,91	1567,61	1,25E+06	0,93
1258,92	1683,91	1720,84	3,15E+06	2
1358,6	1818,73	1818,79	5,11E+03	0,003

Fonte: Autora (2017).

Além de possíveis variações do meio, há também um fator de grande relevância – a propriedade do material em que o corpo de prova foi fabricado. O mesmo foi especificado, porém não se teve um controle da composição do material utilizado na fabricação do equipamento, assim variações dependentes do material do dispositivo de teste podem ocorrer.

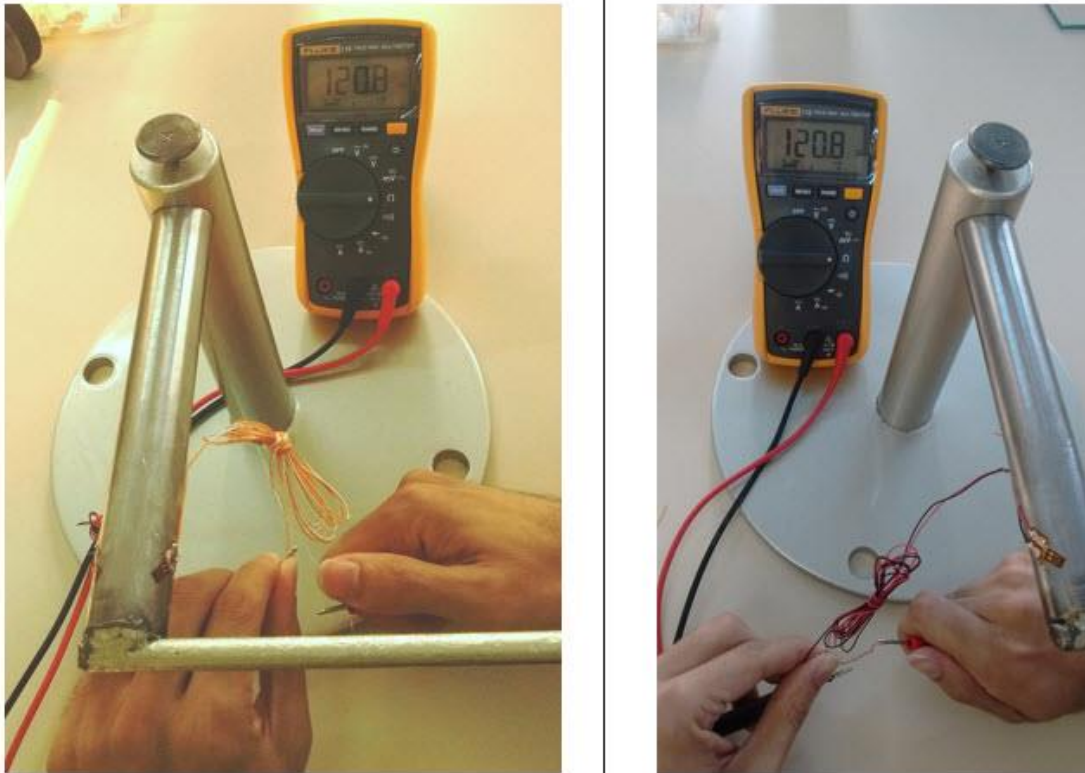
Ao retirar os pesos, o sinal sempre retornou para o valor médio zero, o que indica que variações nas medições devido a deformação da estrutura são desprezíveis. Este fato confirmou-se pela lei de Hooke. Sendo um material homogêneo e por trabalhar na sua região elástica, sua recuperação ocorre ao retirar o carregamento do corpo de prova, visto que a carga aplicada não provocou o escoamento da peça em estudo.

4.2 ESTUDO DE CASO PARA DEFORMAÇÃO ANGULAR

Os estudos realizados com a viga de seção circular para avaliação de deformações angulares, resultantes de momentos de torção foram iniciados com análise experimental. Para tal estudo foram considerados valores de massas distintas em diferentes combinações, somando na totalidade as massas do gancho e porca, os quais agregam peso ao sistema, influenciando constantemente na medição. Os experimentos foram efetuados considerando a ligação em $\frac{1}{2}$ ponte de Wheatstone.

A sequência de aferições, configuração e medições seguiu o mesmo padrão do experimento anterior já realizado. Primeiramente a aferição da resistência no extensômetro foi feita. Foram também aferidas as extremidades dos fios de extensão, soldados aos terminais dos extensômetros, como mostra a Figura 60.

Figura 60 - Aferição nos fios de extensão.

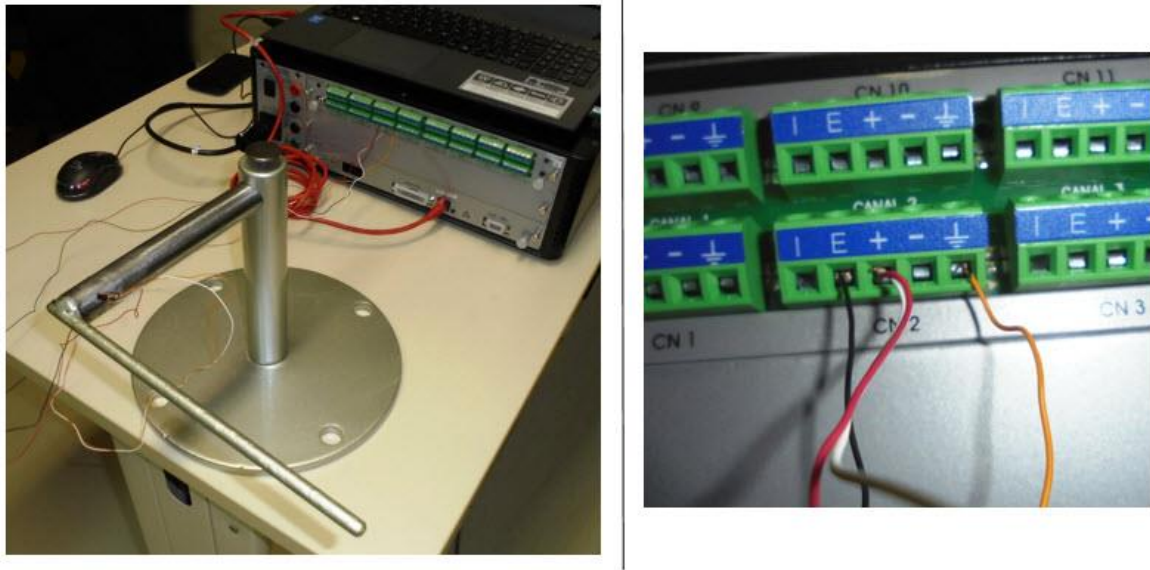


Fonte: Autora (2017).

O multímetro indicou resistência de $120,8 \Omega$ em ambos os fios de extensão, fixados aos extensômetros (Figura 60). A resistência no sistema obteve um aumento esperado, devido aos fios de extensão. Este valor de resistência será compensado pelo sistema de aquisição de dados, no processo de configuração prévio as medições.

Com as resistências aferidas, o corpo de prova foi instrumentado e conectado ao equipamento de aquisição de dados (Figura 61) sendo em seguida configurado para o tipo de ligação de $\frac{1}{2}$ ponte de Wheatstone. A Tabela 13 apresenta a interface de configurações de entrada analógica do módulo de aquisição utilizado no teste.

Figura 61 – Corpo de prova instrumentado conectado ao sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autora (2017).

Tabela 13 – Configurações de entrada para ½ ponte módulo AI 2164.

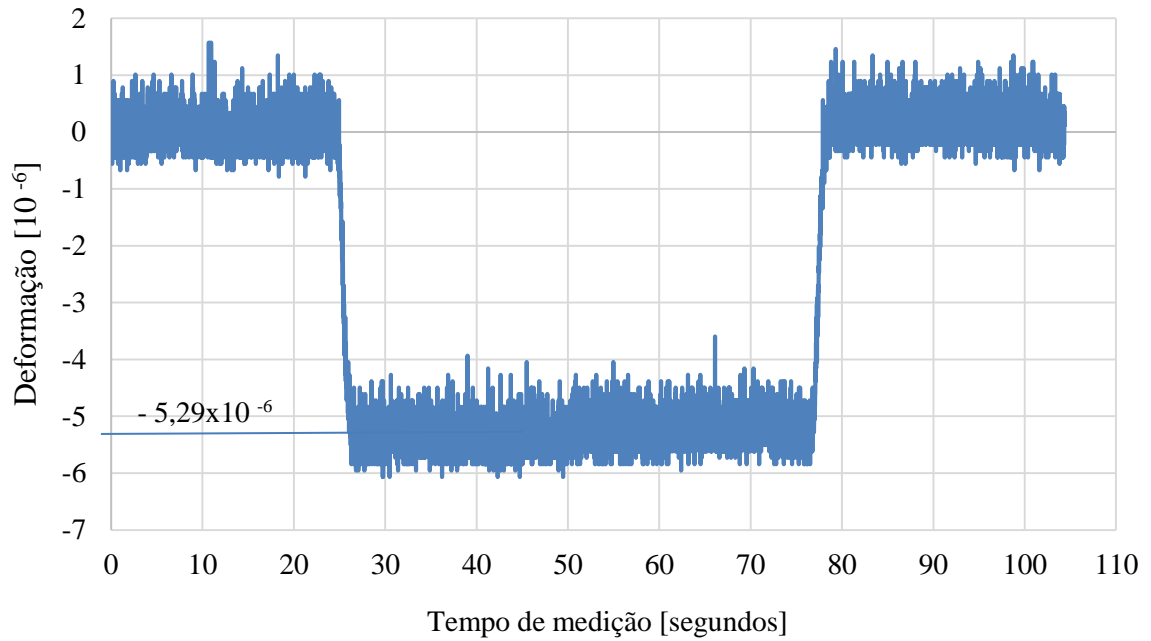
Unidade	10^{-6}
Tipo de Entrada	½ ponte 120 Ω
Ganho	x 1000
Excitação	125 mV
Valor de Engenharia	95,64
Frequência de amostragem	100 Hz

Fonte: Autora (2017).

O processo de medição e aquisição de dados foi realizado. A partir do sistema de análise de dados presente no equipamento, dados gráficos foram gerados para análise do comportamento das medições de deformação. Como parâmetros foram considerados as massas aplicadas e tempo de teste.

Ao total foram 6 (seis) testes realizados com massas distintas. A primeira massa aplicada ao corpo de prova foi de 560,95 g. A medição foi realizada gerando o gráfico representado na Figura 62. É perceptível que a deformação é negativa e se dá em virtude do sentido do torque aplicado ao eixo.

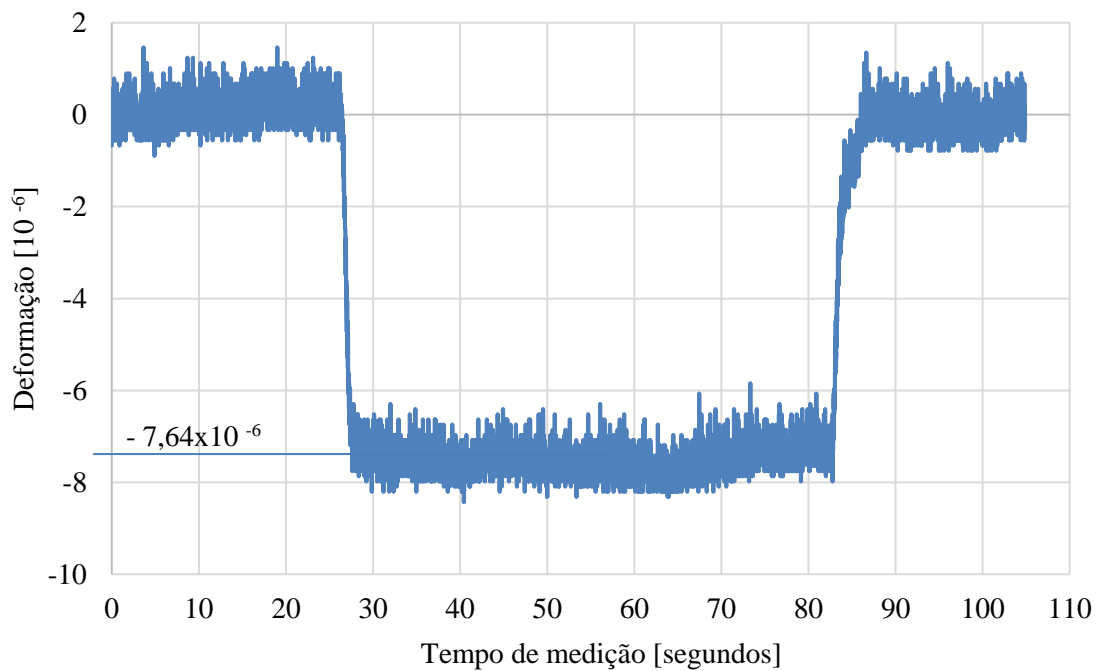
Figura 62 - Medição de deformação para 560,95 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

O torque gerado no eixo pela massa de 759,31 g resultou em uma deformação total angular de $7,64 \times 10^{-6}$ como é observado na Figura 63.

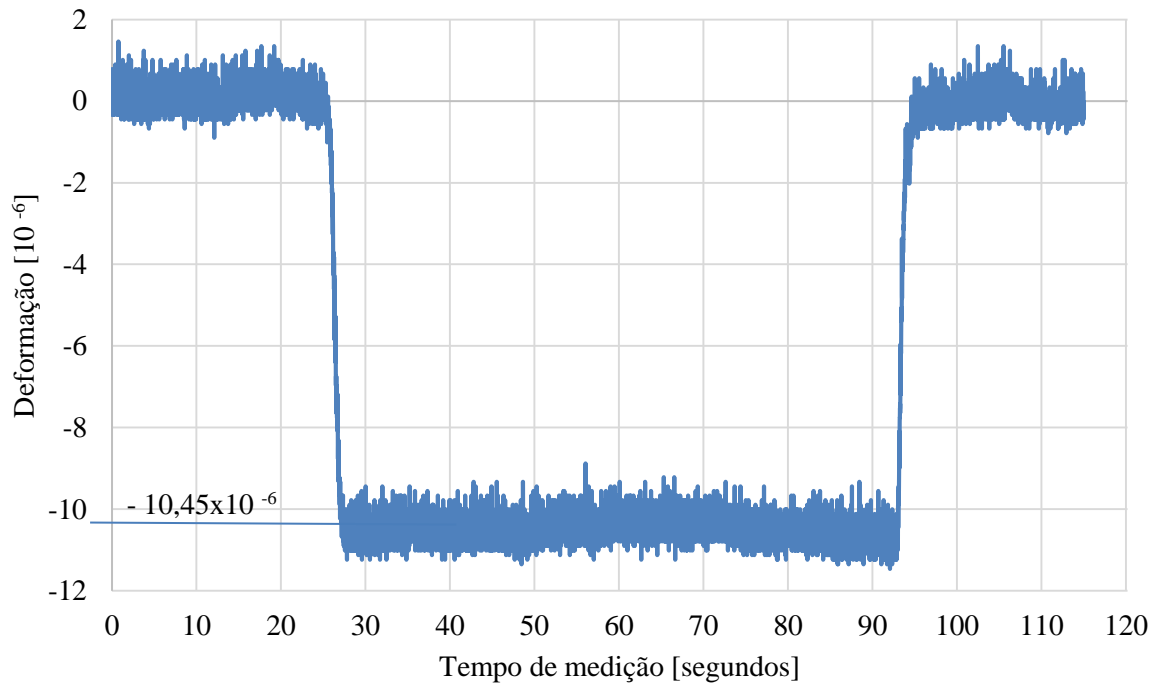
Figura 63 - Medição de deformação para 759,31 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

A deformação angular causada pela massa de 1060,56 g foi de $10,45 \cdot 10^{-6}$ (Figura 64).

Figura 64 - Medição de deformação para 1060,56 g no corpo de prova.

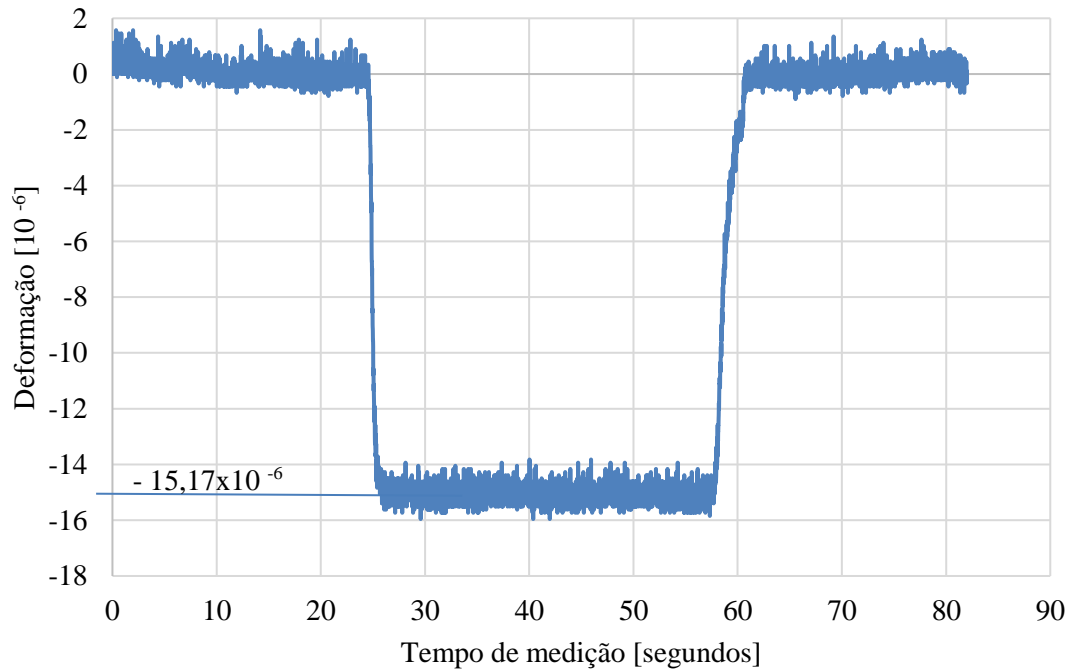


Fonte: Autora (2017).

É possível perceber que para o teste de deformação torcional foram aplicadas massas maiores. Isto se dá em virtude da configuração do teste e material de corpo de prova serem diferentes, quando comparado ao teste anterior, havendo a necessidade de maiores carregamentos aplicados com o intuito de obter resultados significativos.

A Figura 65 apresenta a deformação angular quando aplicada massa de 1558,21 g.

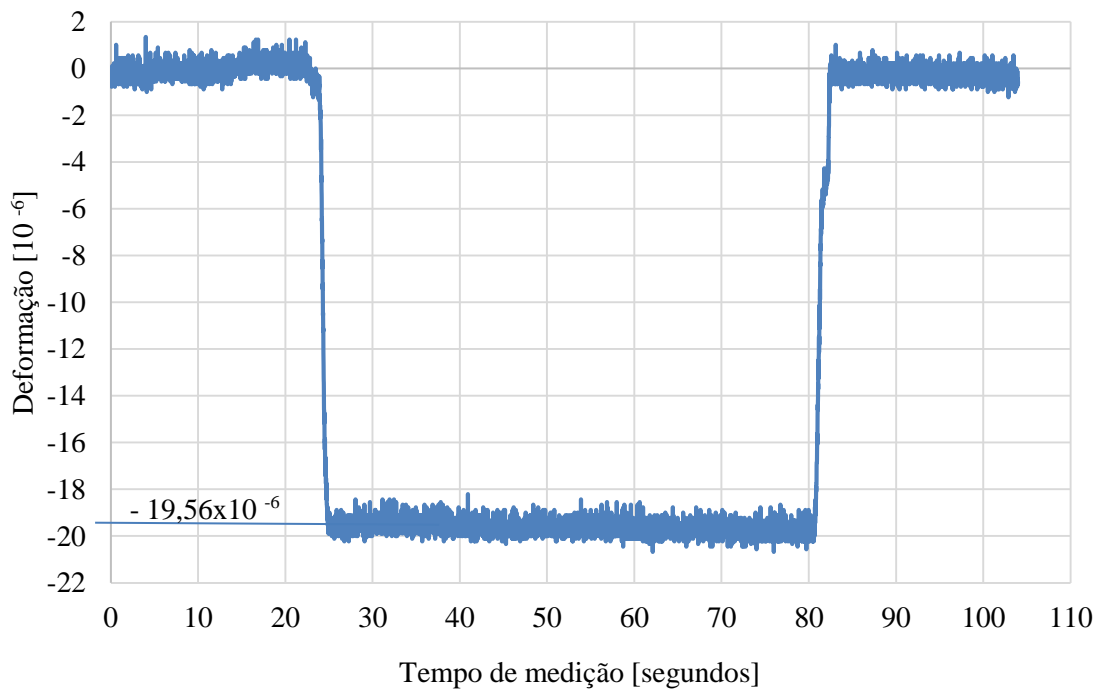
Figura 65 - Medição de deformação para 1558,21 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

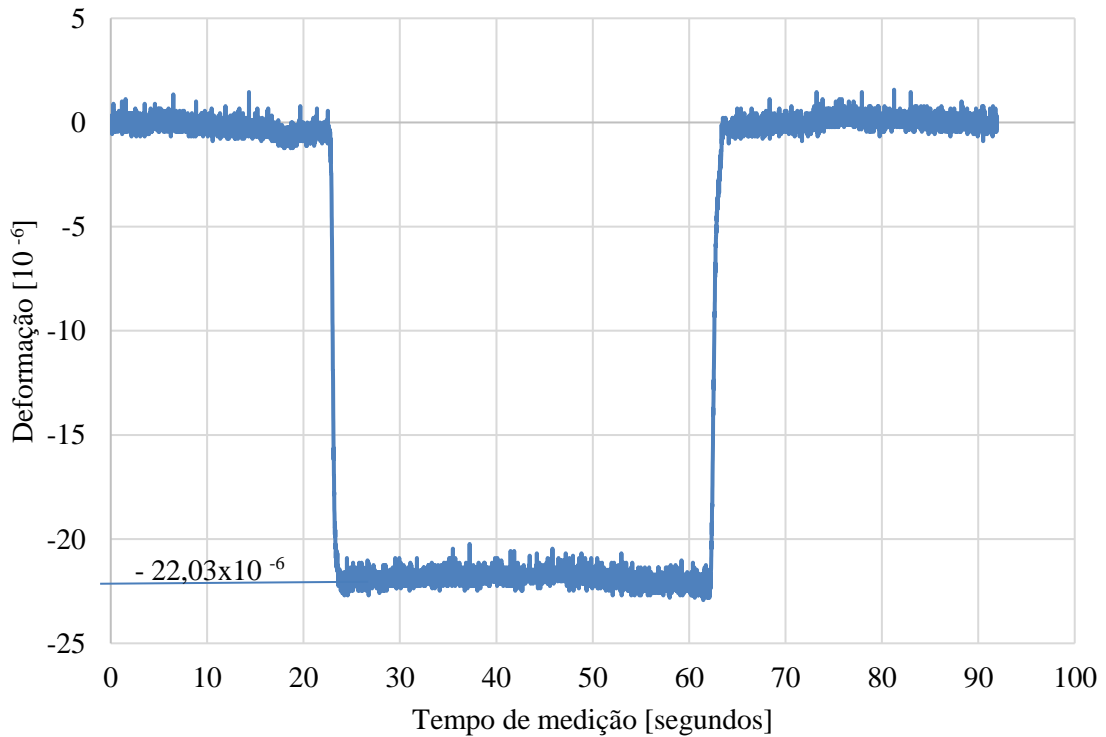
Para a deformação causada pela massa aplicada de 2053,43 g, o comportamento da deformação no corpo de prova é apresentado na Figura 66.

Figura 66 - Medição de deformação para 2053,43 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

Figura 67 - Medição de deformação para 2351,5 g no corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

A última análise de deformação angular realizada foi a partir da aplicação da massa de 2351,5 g como mostra a Figura 67, onde o corpo de prova sofre a maior deformação com valor de $-22,03 \times 10^{-6}$.

A segunda etapa de análises foi realizada utilizando relações matemáticas (Equações (19) e (20) para a determinação da deformação angular. Da mesma forma que no experimento anterior, não havia a especificação do módulo de elasticidade transversal do eixo fabricado, sendo necessário o ajuste do modelamento matemático a partir do valor de deformação medido de $5,29 \times 10^{-6}$. O módulo de elasticidade transversal calculado e adotado para o eixo foi de 85,5 GPa.

Os valores de deformação calculados são apresentados na Tabela 14.

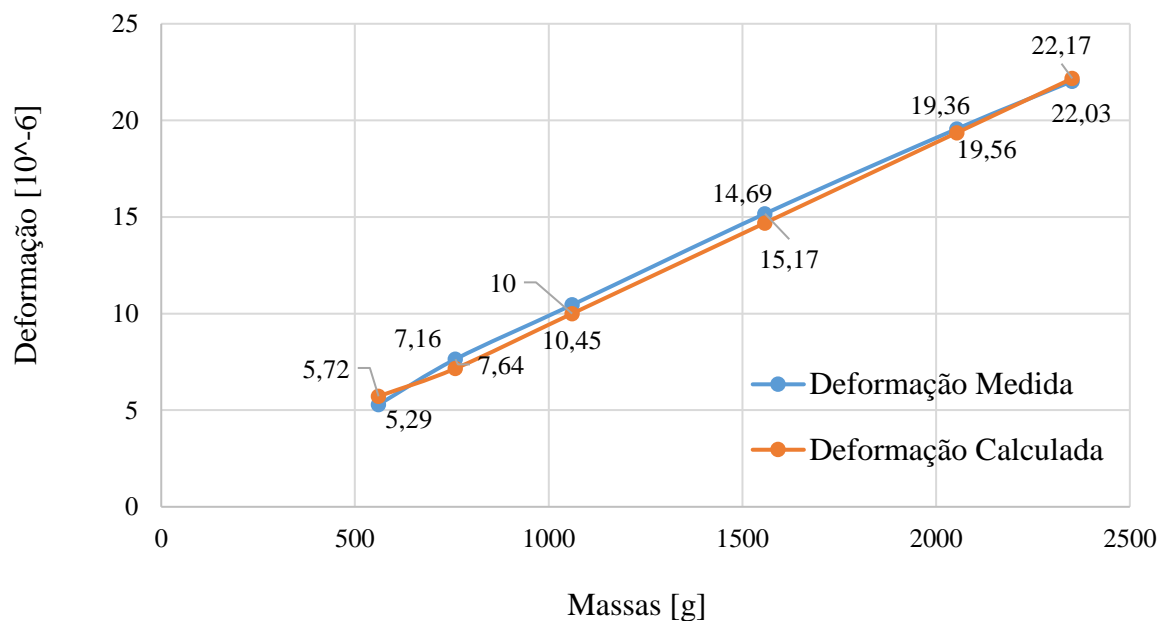
Tabela 14 – Valores de deformação angular – Cálculo analítico.

Deformação para 560,96 g	10^{-6}
γ_{θ}	5,29
Deformação para 759,31 g	10^{-6}
γ_{θ}	7,16
Deformação para 1060,56g	10^{-6}
γ_{θ}	10
Deformação para 1558,21 g	10^{-6}
γ_{θ}	14,69
Deformação para 2053,43 g	10^{-6}
γ_{θ}	19,36
Deformação para 2351,5 g	10^{-6}
γ_{θ}	22,17

Fonte: Autora (2017).

Para uma melhor visualização, o gráfico representado na Figura 68 ilustra em linhas distintas os valores de deformações obtidas através de cálculos analíticos e através de testes experimentais aplicados.

Figura 68 – Gráfico de deformações.



Fonte: Autora (2017).

A Figura 68 retrata o comportamento das deformações ao longo das medições. Uma observação muito importante e que deve ser ressaltada é a conservação da linearidade em ambos

os modos de análise. Esta característica se manteve tanto nos ensaios de flexão assim como em torção.

A Tabela 15 correlaciona as medições das deformações de forma matemática e experimental, indicando a variação percentual ocorrida entre as análises de forma individual.

Tabela 15 - Diferença entre deformação medida e calculada.

Massa [g]	Deformação [10^{-6}]		Diferença Tensão [Pa]	Diferença %
	Deformação Calculada	Deformação Medida		
560,95	5,29	5,29	0,00E+00	0
759,31	7,16	7,64	4,10E+04	6,27
1060,55	10	10,45	3,85E+04	4,29
1558,21	14,69	15,17	4,10E+04	3,13
2053,43	19,36	19,56	1,71E+04	1,02
2351,5	22,17	22,03	-1,20E+04	0,65

Fonte: Autora (2017).

Os dados apresentados no gráfico da Figura 68 e Tabela 15 mostram a diferença existente entre as deformações calculadas e obtidas de forma experimental. Assim como no experimento realizado para analisar deformações unidirecionais, houve diferenças entre ambas as formas de análise (experimental e analítica) e os valores de deformação, embora não significativas.

A desigualdade entre as medições e cálculos se dá pelas mesmas razões mencionadas na seção anterior. Nos gráficos que foram gerados durante as medições é perceptível que quanto maior o valor do carregamento aplicado ao corpo de prova, menor era a oscilação do sinal de pico a pico, ou seja, menor o ruído da medição. Este fato se deve ao sinal eletrônico juntamente com a estabilização do material quando submetido carregamentos maiores.

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos, analisados e descritos neste trabalho é possível enumerar as seguintes conclusões:

- Os aparatos experimentais desenvolvidos atenderam as necessidades e requisitos almejados para o estudo. Os corpos de prova desenvolvidos ao longo deste trabalho são capazes de reproduzir condições reais. Esta afirmação é comprovada através dos resultados obtidos nas medições de deformação nos ensaios experimentais;
- A técnica e procedimento empregado na preparação superficial dos corpos de prova, colagem e soldagem dos extensômetros e terminais mostrou-se adequada;
- Todos os ensaios foram executados dentro do limite elástico do material, possibilitando o uso dos corpos de prova diversas vezes, sem alterar as suas propriedades mecânicas e/ou estruturais iniciais;
- O equipamento de aquisição de dados mostrou-se sensível e adequado a aplicação;
- Os resultados experimentais apresentam pequena diferença em relação aos cálculos analíticos. Esta variação se dá em virtude das condições reais de teste e dos materiais de construção dos corpos de prova, pois não foi possível realizar ensaios de caracterização dos materiais e com isso obter os reais valores dos parâmetros usados nos cálculos analíticos. Para estes cálculos utilizaram-se valores calculados a partir das deformações experimentais obtidas;
- Em todas as medições feitas, ruídos decorrentes da rede elétrica e eventuais ruídos de outros equipamentos eletroeletrônicos nas proximidades foram perceptíveis nos gráficos gerados. A influência dos ruídos nas medições diminuiu de acordo com o aumento das cargas aplicadas;
- A linearidade se conservou em ambos os experimentos, tanto na análise analítica assim como na análise experimental. A linearidade é a grande razão para a aplicação da extensometria e a mesma se confirma neste trabalho.

Como sugestões a trabalhos futuros, pode-se citar:

- Simulações em elementos finitos, utilizando condições de contorno e carregamentos empregados no experimento;
- Realizar estudo das incertezas inerentes às deformações obtidas analiticamente e experimentalmente;
- Realizar análise espectral nos dados experimentais;
- Ensaiai corpos de prova confeccionados com outros materiais e empregar configurações de extensometria diferentes as já empregadas;
- Caracterização dos materiais de confecção dos corpos de prova, a fim de aplicar os parâmetros obtidos nos cálculos analíticos e na calibração dos modelos de elementos finitos;
- Extrapolação do estudo e da aquisição de dados através de dispositivos wireless e estudo aplicado à dinâmica do movimento.

REFERÊNCIAS

ADOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, Gilberto Antonio de. **Extensometria básica**. Ilha Solteira: UNESP, 2004.

BARRETO JÚNIOR, Euler. Extensometria: Manual prático. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAARQAK/extensometria-manual-pratico>>. Acesso em: 07 mar. 2017.

BORCHARDT, Ildon G.; ZARO, Milton A. **Extensômetros de resistência elétrica (strain gauges)**: Princípios de operação e utilização em transdutores. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1982.

CARNEIRO, Alexander Cascardo; BARBERO, Andres Pablo Lopez. Princípio de funcionamento dos sensores ópticos baseado em grades em fibra ópticas e sua importância nas diferentes áreas tecnológicas. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p.389-403, dez. 2014.

DALLY, James W.; RILEY, William Franklin. **Experimental stress analysis**: International student edition. Universidade de Michigan: McGraw-hill, 1978. 571 p.

DOEBELIN, Ernest O. **Measurement system**: Application and design. 3. ed. Ohio: McGraw - Hill, 1983.

FEDER, Barnaby J. Arthur C. Ruge, Inventor of vital stress gauge, dies at 94. **The New York Times**. New York, 08 abr. 2000. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2000/04/08/business/arthur-c-ruge-inventor-of-vital-stress-gauge-dies-at-94.html>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

HBM. **Compensação de temperatura de strain gages**. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6725/artigo-compensacao-de-temperatura-de-strain-gages/>>. Acesso em: 29 jul. 2017.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

HOFFMANN, Karl. **An introduction to measurements using strain gauges**. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

HOHMANN, Brian P. et. al. Digital Image Correlation (DIC): An advanced nondestructive testing method for life extension of nuclear power plants. **IAEA**, Salt Lake, maio 2012.

HOLMAN, Jack Philip. **Experimental methods for engineers**. 6. ed. United States of America: McGraw - Hill, 1994.

KYOWA. **General-purpose foil strain gages**. Disponível em: <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/kfg/index.html>. Acesso em: 06 mar. 2017a.

_____. **Strain gages**. Disponível em: <<https://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/bridge.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2017b.

LIMA, Washington Batista de. **Transdutores de deformação a base de sensores piezoelétricos**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação Francisco Eduardo Mourão Saboya, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2013.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Massachusetts). **Invention of the Strain Gauge, Arthur Ruge, 1938**. Disponível em: <<http://museum.mit.edu/150/82>>. Acesso em: 16 set. 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Medindo distensão com Strain Gauges**. Publicação: 09 jan. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

NORTHROP, Robert B.. **Introduction to instrumentation and measurements**. 2. ed. London: Taylor & Francis, 2005.

OMEGA (Brasil). **Introdução a sensores de deformação**. Disponível em: <<http://br.omega.com/prodinfo/sensores-de-deformacao.html>>. Acesso em: 08 fev. 2017a.

_____. **Extensômetro de precisão padrão linear de precisão para aplicações dinâmicas e estáticas**. Disponível em: <https://br.omega.com/googlebase/product.html?pn=SGD-10/350-LY41&gclid=CjwKCAiAr_TQBRB5EiwAC_QCq2S2T65CM7hOcFckPDqKqxBLdf6TtKM ybeWNVYypzMgiZ7hKk6dBTxoCoS0QAvD_BwE>. Acesso em: 28 nov. 2017b.

PANAMBRA. **Strain gages data sheet**. Cambuci: Pantec Strain Gages, 2017.

VALIDO, Aníbal; SILVA, José Duarte. **Introdução à extensometria eléctrica de resistência**. 1997. Científica de Mecânica dos Meios Sólidos, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Superior Tecnologia. Setúbal, 1997.

VISHAY PRECISION GROUP (Pensilvânia). **Micro measurements: strain gage installation**. Disponível em: <<http://www.vishaypg.com/micro-measurements/videos/?video=13>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

_____. **Engineering Data Sheet: Micro measurements**. Michigan, 2016.

WEBER, Albano Luiz. **Metrologia e instrumentação: Extensometria (Instrumentação)**. 2008. 15 p. Trabalho acadêmico (Artigo) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2008.