

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Romar Selli

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS UTILIZANDO EXTENSÔMETROS
ELÉTRICOS**

Santa Cruz do Sul
2015

Romar Selli

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS UTILIZANDO EXTENSÔMETROS
ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade de Santa Cruz do Sul para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. M.Sc. Christian Donin

Santa Cruz do Sul

2015

Romar Selli

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS UTILIZANDO EXTENSÔMETROS
ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade de Santa Cruz do Sul para obtenção do título de Engenheiro Civil.

M.Sc. Christian Donin
Professor Orientador - UNISC

M.Sc. Henrique Luiz Rupp
Professor Examinador - UNISC

Dr. Eduardo Rizzatti
Professor Examinador – (UFSM)

Santa Cruz do Sul

2015

Dedico a meus familiares.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado a oportunidade de realizar um curso superior, por ter me dado saúde e força para vencer os desafios e obter as conquistas ao longo desse período.

Agradeço a toda minha família pela educação, incentivo e auxílio nos estudos, sempre me motivando a alcançar minhas metas.

Agradeço ao professor Imar de Souza Soares Junior, professor do Curso de Engenharia Mecânica-UNISC pela cedência de equipamentos e ao laboratorista Rafael Fernando Henn pela sua ajuda nos ensaios.

Também agradeço ao professor M. Sc. Christian Donin por ter sugerido, auxiliado e orientado sobre o tema da pesquisa, bem como pela inestimável ajuda e competência em resolver os problemas que surgiram ao longo deste trabalho.

Agradeço aos demais professores e colegas que me ajudaram de uma forma ou de outra e pelo companheirismo nos estudos durante todo esse período de graduação.

Agradeço também a todas as pessoas que colaboraram de uma forma ou de outra, direta ou indiretamente, desde ser humano mais humilde até o mais graduado, para que eu obtivesse sucesso nesta longa jornada.

Se fracassar, ao menos que fracasse ousando grandes feitos, de modo que a sua postura não seja nunca a dessas almas frias e tímidas que não conhecem nem a vitória nem a derrota. (Theodore Roosevelt).

RESUMO

No presente trabalho são demonstrados os aspectos teóricos e práticos da utilização dos extensômetros elétricos na análise experimental de tensões, descrevendo aplicações práticas e a evolução ocorrida na extensometria elétrica ao longo do tempo. Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os assuntos ligados ao tema. Discorre-se sobre os tipos de extensômetros, suas aplicações em análise de estruturas, critérios de seleção, e a desmistificação da sua utilização. Foram realizados ensaios comparações entre os métodos teóricos e ensaios práticos. Ao longo do trabalho é possível perceber que a extensometria elétrica é uma técnica com relativa facilidade de emprego, sendo ainda pouco usual, talvez por desconhecimento da técnica. Na atualidade, é possível encontrar no mercado uma grande variedade de *strain gages* para as mais variadas aplicações, desde equipamentos simples até os mais sofisticados, bem como programas computacionais para o tratamento do sinal obtido, por preços razoáveis. É uma técnica que não pode ser desprezada por pesquisadores em suas análises e estudos, que apresenta boa precisão quando comparada com outros métodos de análises em estruturas.

Palavras-chave: Análise de tensões; Análise de estruturas; Extensômetros elétricos.

SUNTO

In questo lavoro gli aspetti teorici e pratici di utilizzo di estensimetri in analisi sperimentale delle sollecitazioni vengono presentati, descrivendo le applicazioni pratiche e gli sviluppi dell'estensimetro elettrico nel corso del tempo. Abbiamo condotto una revisione della letteratura sulle questioni relative al tema. Si parla sui tipi di indicatori, le loro applicazioni di analisi strutturale, criteri di selezione, e la demistificazione del suo utilizzo. Test sono stati condotti confrontando i metodi di prova teorici e pratici. In tutto il lavoro si può vedere che l'estensimetro elettrico è una tecnica con relativa facilità d'impiego, ancora insolito, forse ignaro della tecnica. Al giorno d'oggi, è possibile trovare sul mercato una vasta gamma di estensimetri per le più svariate applicazioni, dalle più semplici alle più sofisticate attrezzature e programmi informatici per il trattamento del segnale ottenuto, a prezzi ragionevoli. Si tratta di una tecnica che non può essere trascurata dai ricercatori nelle loro analisi e studi, che mostrano buona precisione rispetto ad altre strutture dei metodi di analisi .

Parole chiave: Analisi delle sollecitazioni; Analisi strutturale; Gli estensimetri.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Representação do diagrama do processamento da informação desde a excitação até a resposta.....	19
Figura 2 -	Extensômetro	21
Figura 3 -	Extensômetro axial único	24
Figura 4 -	Extensômetro biaxial	25
Figura 5 -	Extensômetro triaxial.....	25
Figura 6 -	Extensômetro diafragma	26
Figura 7 -	Extensômetro para medida de tensão residual	26
Figura 8-	Célula de carga	27
Figura 9 -	Fator de Sensibilidade (Gage Factor)	28
Figura 10 -	Extensômetro	29
Figura 11 -	Ponte de Wheatstone.....	30
Figura 12 -	Amplificador de Instrumentação.....	30
Figura 13 -	Diagrama do sistema de medição para medição de deformação através de extensômetros	31
Figura 14 -	Resposta para vibração livre não amortecida	35
Figura 15 -	Viga de seção transversal retangular com carregamento na extremidade	36
Figura 16 -	Diagrama convencional tensão e deformação dos aços ATSM A36, A242, A235, A490.....	37
Figura 17 -	Trecho inicial dos diagramas x tensão deformação dos aços com patamar de escoamento.....	38
Figura 18 -	Aquisitor de dados Quantum X e o adaptador tipo quarter-bridge	41
Figura 19 -	Esquema de medição via extensômetro elétrico tipo strain gage empregado	42
Figura 20 -	Barra de aço sendo tracionada e analisada com <i>strain gage</i>	44
Figura 21 -	Esquema de teste estático para viga de aço.....	46
Figura 22 -	Ensaio estático de flexão	46

Figura 23 - Imagem da medição da flecha com defletômetro.....	47
Figura 24 - Esquema do ensaio de vibração	51
Figura 25 - Gráfico mostrando a deformação em função da tensão medida com strain gage do ensaio de tração	54
Figura 26 - Gráfico obtido usando software Catman durante o ensaio de vibração.....	55
Figura 27 - Gráfico obtido usando software Catman durante o ensaio de vibração para determinação da frequência	56
Figura 28 - Gráfico obtido usando software Catman durante o ensaio de vibração para determinação da frequência para um tempo de 1 segundo	57
Figura 29 - Gráfico de comparação dos resultados obtidos	59

LISTA DE ABREVIATURAS

FEM	Força Eletro Motriz
EDO	Equação Diferencial Ordinária

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Deformação específica
Δ	Variação
R	Resistência
K	Constante característica
μm	Micrometro
P	Resistividade
α	Coefficiente de dilatação térmica linear
Ω	Ohm
M	Metro
$^{\circ}C$	Grau Celsius
E	Módulo de elasticidade
A	Área
F	Força aplicada
kgf	Quilograma força
P	Carga
m	Momento fletor
I	Momento de inércia
MPa	Mega Pascal
M	Massa
s	Segundo
T	Período
F	Frequência
K	Rigidez
ω	Frequência circular
ℓ	Vão
σ	Tensão
f	Flecha
b	Base do elemento
h	Altura do elemento
y	Altura do elemento
cm	Centímetro

cm^2 Centímetro quadrado

\ddot{u} Aceleração

\dot{u} Velocidade

u Deslocamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Área e Limitação do Tema	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos da pesquisa.....	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivo Específico	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Extensometria.....	18
2.1.1	O transdutor	18
2.1.2	Conceitos básicos de extensometria elétrica	19
2.1.3	O Strain Gage.....	20
2.1.4	Princípio de funcionamento de um Strain Gage	21
2.1.5	Tipos de extensômetros elétricos.....	22
2.1.5.1	O extensômetro de fio	22
2.1.5.2	O extensômetro de lâmina (metal foil strain gages)	22
2.1.5.3	O extensômetro de material semicondutor	23
2.1.6	O material da base.....	23
2.1.7	A configuração da grade.....	24
2.1.8	Características dos extensômetros elétricos	27
2.1.9	Sistema de Codificação	28
2.1.10	Sistema de medição	28
2.1.10.1	Descrição do sistema de medição.....	29
2.1.11	Acoplamento dos Extensômetros ao Corpo de Prova	32
2.1.12	Interferências	32
2.1.13	Precisão e temperatura	33
2.2	Análise de Vibrações.....	33
2.3	Parâmetros mecânicos para o aço	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Material empregado nos teste	42
3.2	Métodos de teste e cálculo utilizados para a determinação do módulo de elasticidade do aço	43
3.2.1	Método 1 – Ensaio estático – Teste de tração direta.....	43
3.2.2	Método 2 – Ensaio estático – Teste flexão de viga engastada e em balanço com flecha medida com defletômetro mecânico	45
3.2.3	Método 3 – Ensaio estático – Teste flexão de viga engastada e em balanço com deformação medida por meio de um strain gage	48

3.2.4	Método 4 – Ensaio Dinâmico – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 1	49
3.2.5	Método 5 – Ensaio Dinâmico – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 2	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Métodos estáticos	53
4.1.1	Método 1 – Teste de tração direta	53
4.1.2	Método 2 – Teste flexão de viga engastada e em balanço com flecha medida com defletômetro mecânico	54
4.1.3	Método 3 – Teste flexão de viga engastada e em balanço com deformação medida por meio de um strain gage	54
4.2	Métodos dinâmicos	55
4.2.1	Método 4 – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 1	58
4.2.2	Método 5 – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 2	58
4.3	Comparações	58
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

Os projetos e as análises estruturais fazem uso de técnicas de cálculo que determinam o quanto os materiais resistem quando carregamentos são aplicados sobre eles. É comum esses carregamentos serem presumidos. Sendo assim, podem ocorrer falhas por aplicação de uma carga maior do que a suportada, ocasionando uma diminuição da vida útil do elemento ou até sua ruína. Uma avaliação incorreta das forças atuantes pode levar ao erro na determinação dos parâmetros de projeto.

Na atualidade, o projetista busca a redução dos custos, mas mantendo a qualidade. Assim, surgiu a necessidade de uma avaliação mais criteriosa das forças atuantes sobre os elementos da estrutura.

Os cálculos dos esforços são fundamentados na Lei de Robert Hooke (1678), que relacionam os esforços aplicados, através da tensão gerada no material, com a deformação resultante.

Vários métodos e equipamentos foram criados com a finalidade de medir as deformações. Antigamente os aparelhos eram essencialmente mecânicos, sendo limitados e relativamente imprecisos. Com o desenvolvimento da eletroeletrônica, verificou-se que havia uma variação da resistência em um condutor elétrico causada pela aplicação de uma tensão mecânica (Charles Wheatstone – 1843). Mais tarde Willian Thomson (1856) conseguiu medir esse efeito. Após estudos e construção de protótipos, realizados por Eduard E. Simons e Artur Claude Ruge foram desenvolvidos os primeiros extensômetros de resistência elétrica ou *strain gages*. Surge então, a extensometria elétrica, que é uma técnica utilizada para a análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas e de alvenaria. É importante conhecer a extensão destas deformações, sendo que muitas vezes precisam ser monitoradas constantemente, o que pode ser feito de diversas formas (GRANTE, 2004).

Na atualidade os extensômetros elétricos são amplamente utilizados para medir deformações e esforços em pontes, edificações, estruturas metálicas e de concreto armado, componentes mecânicos, etc. Tendo-se o apoio do grande desenvolvimento da eletrônica, pode-se dispor do sensor ou equipamento de medidas adequadas as mais variadas finalidades.

1.1 Área e Limitação do Tema

Esta pesquisa limita-se a fazer uma exposição sobre a utilização de extensômetros elétricos na avaliação dos esforços e carregamentos em elementos estruturais. Serão analisados aspectos teóricos e aplicações práticas, assim como apontamentos da viabilidade de aplicações práticas e avanços nos sensores e nos equipamentos de aquisição de dados.

1.2 Justificativa

O conhecimento da variação da resistência elétrica de um condutor já é conhecido desde o século XIX. Desde então foram feitos estudos e avanços tecnológicos muito significativos nesta área, principalmente no desenvolvimento de sensores conhecidos como *strain gages* e equipamentos capazes de medir com precisão a variação de sua resistência durante os esforços a que são submetidos os elementos estruturais. No entanto, mesmo nos dias atuais a técnica ainda é muito pouco utilizada ou até mesmo desconhecida entre alunos e engenheiros da construção civil. Desta maneira a pesquisa visa esclarecer e demonstrar que a extensometria elétrica na atualidade não apresenta maiores dificuldades para ser implementada, visto que todos os seus componentes podem ser encontrados com relativa facilidade no mercado.

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é demonstrar algumas aplicações de sensores de deformações mecânicas, mais precisamente de extensômetros elétricos resistivos, também conhecidos como *strain gages*, na análise de estruturas da construção civil.

1.3.2 Objetivo Específico

- Estudar a partir de uma revisão nas literaturas técnicas, os aspectos teóricos e práticos que indicam a utilização dos *strain gages*, na análise experimental de tensões e deformações;
- Explicitar de algumas aplicações práticas dos *strain gages* na análise experimental de tensões e deformações;
- Demonstrar a evolução ocorrida na extensometria, avanço dos equipamentos utilizados e suas aplicações práticas;
- Demonstrar a aplicabilidade prática dos extensores elétricos na análise de elementos estruturais;
- Realizar a aplicação da extensometria elétrica por meio de *strain gages* em casos de análises estática e dinâmica de estruturas.
- Comparar os resultados obtidos entre os diversos métodos de análise de modo a verificar a precisão dos métodos estudados.
- Expor o potencial verificado da extensometria elétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maneira comum de verificação dos componentes de estruturas é baseada no método dos cálculos de Resistência dos Materiais. Entretanto, esse método é aceitável quando as cargas sobre os elementos são conhecidas tanto em quantidade como em qualidade. Os problemas ocorrem quando as cargas não são conhecidas ou quando elas somente podem ser estimadas. O risco de colapso é reduzido com aplicação de margens de segurança elevadas, resultando em um superdimensionamento.

Entretanto, atualmente os projetos necessitam que obtenha-se o máximo aproveitamento dos materiais empregados. Visando atender as especificações de segurança e proporcionar uma vida útil satisfatória ao elemento, as forças atuantes no material devem ser conhecidas pelo projetista. Conforme Kobayashi (1993) apud Gallina (2003) são necessárias aferições em condições de serviço. A magnitude utilizada na verificação das tensões sobre os elementos estruturais é a tensão mecânica a qual o componente está sujeito. As tensões mecânicas são praticamente impossíveis de determinação sob condições de serviço. Um método prático, não destrutivo para a determinação experimental das tensões nos materiais é baseado na descoberta realizada em 1678 pelo cientista Robert Hooke (1635-1703). Hooke observou uma relação entre a tensão no material e a deformação resultante. Essa deformação ocorre também na superfície dos objetos, sendo possível sua medição. Na evolução desse princípio, umas séries de dispositivos mecânicos foram sendo criados e utilizados, no entanto apresentavam várias restrições quando utilizados em medições dinâmicas. Verificações usando sensores elétricos surgiram para melhor resolver esse problema (GALLINA, 2003).

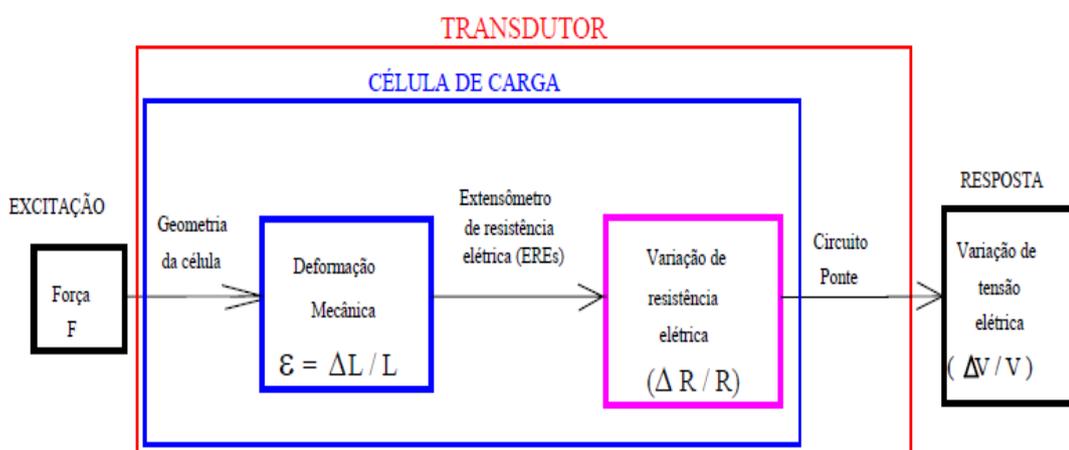
2.1 Extensometria

2.1.1 O transdutor

Transdutores são dispositivos que tem a capacidade de transformar um tipo de energia em outra, através de um estímulo e ou por uma reação de uma grandeza física (Figura 1). Um transdutor ideal, segundo Weber (2008) deve apresentar as seguintes características:

- Medir com precisão e confiabilidade a intensidade do fenômeno físico;
- Reproduzir com fidelidade o evento físico em tempo real;
- Responder em toda a faixa de frequência do fenômeno físico sem alteração ou perda em qualquer faixa do espectro a ser medido;
- Capacidade de funcionamento sob condições indesejáveis, tais como: umidade, temperatura, choque e/ou vibração;
- Capacidade de fornecimento de um sinal de saída que seja compatível com o equipamento de condicionamento do sinal, com distorções desprezíveis nas características originais do evento;
- Construção robusta e fácil operação, para que possa ser manejado por pessoas inexperientes, não sendo danificado e nem alterar suas características.

Figura 1 - Representação do diagrama do processamento da informação desde a excitação até a resposta



Fonte: WEBER (2008, p. 2).

2.1.2 Conceitos básicos de extensometria elétrica

Segundo Almeida (1996a), na observação experimental de tensões, as deformações específicas podem ser conhecidas por meio da variação da resistência elétrica dada pela seguinte equação:

$$\Delta R = k \cdot \epsilon \cdot R \quad (1)$$

Onde:

ΔR é a variação da resistência elétrica do fio, em Ω ;

K é uma constante característica do extensômetro;

ε é deformação específica (m/m) do fio.

R é a resistência elétrica do fio, em Ω ;

Sendo considerado como fio, o condutor da grade do extensômetro.

Para verificação de deformações em peças metálicas, com deformações específicas de $\varepsilon=0,001$ m/m, utilizando extensômetros com resistência de 150Ω e constante característica $K=1,5$ a alteração de resistência será da ordem de:

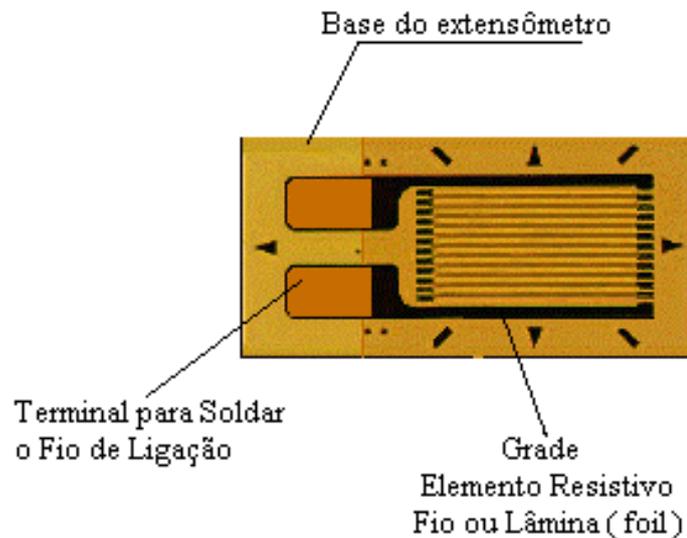
$$\Delta R = 1,5 \cdot 0,001 \cdot 150 \rightarrow \Delta R = 0,225\Omega$$

Sendo $0,225\Omega$ um valor muito baixo, não pode ser medido com precisão com multímetros comuns, necessitando para tal um Microhmímetro, sendo que este instrumento tem um preço bastante elevado. Uma alternativa faz o uso de amplificadores de sinais, onde a alteração da resistência elétrica é medida pela diferença de potencial em circuitos elétricos projetados para este fim. Tais circuitos são denominados de condicionadores de extensometria, compostos de amplificadores com capacidade de ganho variando de $1x$ até n vezes.

2.1.3 O Strain Gage

O extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível que transforma pequenas variações de dimensões em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Sua utilização constitui um meio de se medir e registrar o fenômeno da deformação como sendo uma grandeza elétrica. Podendo ainda ser definido como um “medidor de deformação”. Fundamentalmente, todos os medidores de deformação são projetados para converter o movimento mecânico em um sinal elétrico. Este sinal pode ser posteriormente amplificado e medido, tornando possível calcular a quantidade de deformação ocorrida (BARRETO JR., 1998).

Figura 2 – Extensômetro



Fonte: disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>.

Os *strain gages* são produzidos com diversos materiais que atendam aos seguintes fatores:

- alta sensibilidade K ;
- alta resistividade ρ ;
- baixa sensibilidade à variação com temperatura;
- alta tensão de escoamento;
- fácil manuseio;
- boa soldabilidade;
- baixa histerese;
- baixa f.e.m. térmica quando ligada com outros materiais;
- boa resistência à corrosão.

2.1.4 Princípio de funcionamento de um Strain Gage

Quando forças externas são aplicadas a um objeto estacionário, os resultados são estresse e tensão. O estresse é definido como as forças de resistência interna do objeto, e a tensão é definida com o deslocamento e a deformação que ocorrem no mesmo. Uma mudança na capacitância, indutância ou resistência é proporcional

à deformação experimentada pelo sensor. Se um fio é submetido a tensão, torna-se ligeiramente mais longo e a sua área transversal é reduzida, alterando a sua resistência. A variação da resistência ôhmica do sensor pode ser medida com ajuda de aparelhos especiais, e com base nesta variação é possível verificar a quantidade de alteração do elemento que está sendo verificado.

2.1.5 Tipos de extensômetros elétricos

A disponibilidade dos diversos tipos de extensômetros elétricos atualmente no mercado é satisfatória. Podem ser conseguidos os mais variados tipos para as mais diversas aplicações, sendo classificados de acordo com:

- a) Os materiais utilizados como elemento resistivo - podem ser extensômetros de: fio, lâmina, materiais semicondutores;
- b) Os materiais utilizados como base - podem ser encontrados com base de: baquelita, epóxica, papel, poliamida, poliéster;
- c) A configuração da grade - são fabricados extensômetros com formato: axial único, axial múltiplo (roseta de extensômetro) e ainda com modelos especiais.

2.1.5.1 O extensômetro de fio

O extensômetro de fio é constituído de um condutor resistivo, colado em uma base, a qual serve para transmitir as deformações do elemento em estudo, para o fio, que se constitui o elemento sensível, e também deve servir de isolante elétrico para esse mesmo fio. Antigamente, era constituído de uma bobina de fio achatada. Isto dificultava a fabricação de extensômetros de pequenas dimensões (BARRETO JR., 1998).

2.1.5.2 O extensômetro de lâmina (metal foil strain gages)

Estes extensômetros são muito semelhantes aos de fio. A diferença está no processo de fabricação, na qual se usa uma finíssima lâmina de uma liga resistiva, da ordem de 3 a 10 μm . O primeiro extensômetro de lâmina foi fabricado na Inglaterra em 1952 por Saunders e Roe. Nos dias atuais são fabricados extensômetros de lâmina para os mais variados fins, com diversos tipos de grades,

tendo vantagens sobre os de fios, além da versatilidade de fabricação, possuem uma área maior de colagem, permitindo uma diminuição da tensão no adesivo, obtendo-se assim deformação lenta e histerese bem menores. Outra vantagem é baixa dissipação térmica, menor que nos extensômetros de fio, sendo possíveis circuitos mais sensíveis, já que o nível de excitação do extensômetro depende da dissipação sua térmica. As lâminas são montadas em base de epóxi, tornando-se bastante flexíveis e permitindo uma colagem perfeita nas mais variadas superfícies (BARRETO JR., 1998).

2.1.5.3 O extensômetro de material semicondutor

O extensômetro de material semicondutor é composto de um pequeno e finíssimo filamento de cristal de silício que normalmente é montado em um suporte epóxico ou fenólico. As características principais dos extensômetros elétricos de semicondutores são: sua grande capacidade de variação de resistência em função da deformação e seu alto valor do fator de extensômetro, que é de aproximadamente 150, podendo ser positivo ou negativo. Para um extensômetro ideal, seu fator deveria ser uma constante, e de maneira geral os extensômetros metálicos possuem um fator que pode ser considerado como tal. Nos extensômetros semicondutores, entretanto, o fator do extensômetro varia com a deformação, numa relação não linear. Isto dificulta quando da interpretação das leituras desses dispositivos. Entretanto é possível se obter circuitos eletrônicos que linearizem esses efeitos. Atualmente, os extensômetros semicondutores são bastante utilizados quando se deseja uma saída em nível de sinal mais elevado (BARRETO JR., 1998).

2.1.6 O material da base

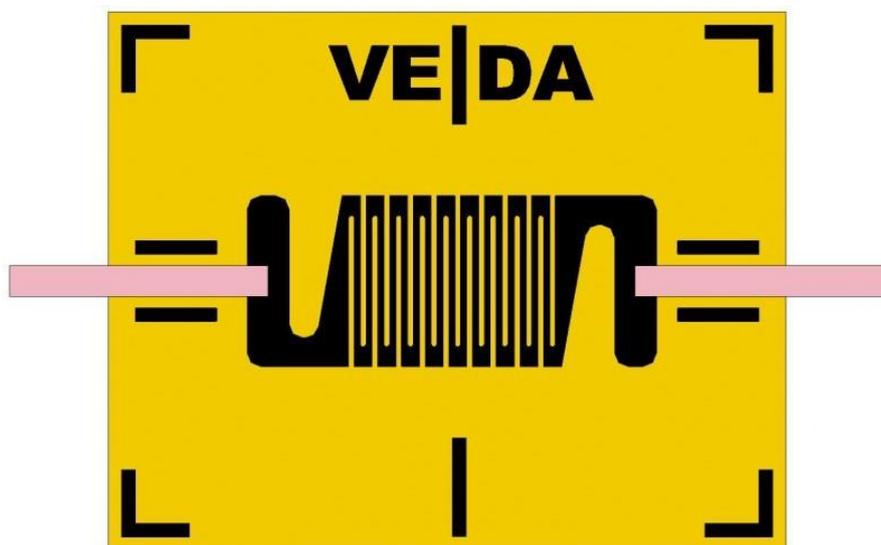
Antigamente a base do extensômetro era feita de papel, sendo que até os dias atuais ainda são fabricados com este material. Com o avanço da tecnologia dos materiais, os extensômetros atualmente são fabricados com uma variedade de materiais de base que são: poliamida, epóxi, fibra de vidro reforçada com resina fenólica, baquelita, poliéster. Conforme o tipo de material utilizado como suporte, em conjunto com o material utilizado na confecção da lâmina, faz com que o extensômetro tenha um emprego específico para medição dinâmica, medição

estática, e para alta temperatura. Os fabricantes têm à disposição uma variedade de tamanhos e modelos de extensômetros, tornando possível a escolha correta para cada caso específico (BARRETO JR., 1998).

2.1.7 A configuração da grade

Extensômetro axial único: deve ser utilizado quando a direção da deformação é conhecida e se tem um único sentido (BARRETO JR., 1998).

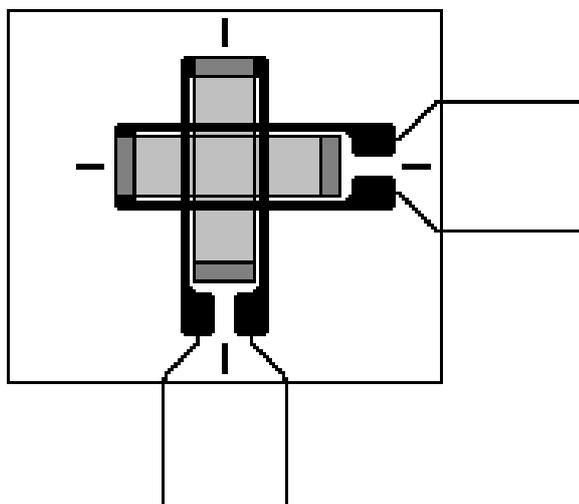
Figura 3 - Extensômetro axial único



Fonte: disponível: <<http://veda.com.ua/en/catalogue/tenzorezistory/rozetka>>.

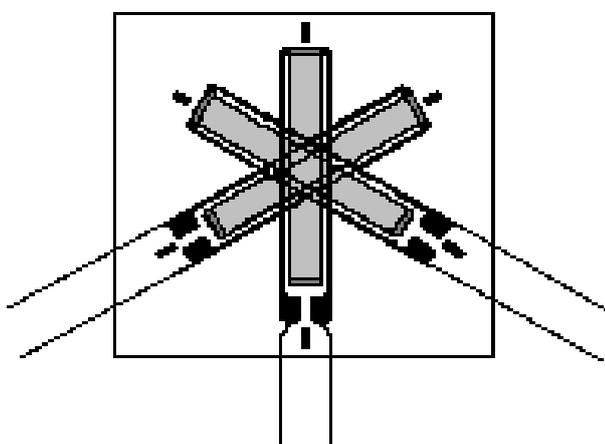
Extensômetro axial múltiplo:

a) **Roseta de duas direções:** extensômetros de duas direções nada mais e do que duas unidades montados sobre a mesma base, tendo sensibilidade em duas direções. São utilizados para medir as deformações principais quando as direções são conhecidas (BARRETO JR., 1998).

Figura 4 - Extensômetro biaxial

Fonte: disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>.

b) Roseta de três direções: são três extensômetros montados sobre uma mesma base, sensíveis a três direções. São utilizados quando as direções principais das deformações são desconhecidas (BARRETO JR., 1998).

Figura 5 – Extensômetro triaxial

Fonte: disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>.

c) Extensômetros com modelos especiais:

Tipo diafragma: são quatro extensômetros sobre uma mesma base, sensíveis a deformações em duas posições diferentes. É utilizado para transdutores de pressão (BARRETO JR., 1998).

Figura 6 - Extensômetro diafragma

Fonte: disponível em: <<http://veda.com.ua/en/catalogue/tenzorezistory/membrana/54.html>>.

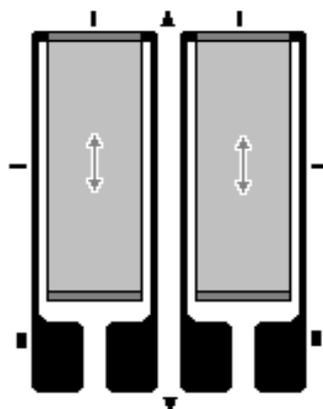
d) Extensômetro para medida de tensão residual: são três extensômetros montados em um mesmo suporte corretamente posicionados para utilização em método de medida de tensão residual (BARRETO JR., 1998).

Figura 7 - Extensômetro para medida de tensão residual

Fonte: disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>.

e) **Extensômetro para transdutores de carga:** são dois extensômetros colocados lado a lado, sobre uma mesma base, para utilização em células de cargas (BARRETO JR., 1998).

Figura 8- Célula de carga



Fonte: disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>.

Os fabricantes de materiais para extensometria fornecem gratuitamente folhetos e catálogos técnicos com todos os modelos e tamanhos de extensômetros, dos produtos utilizados para colagem, impermeabilização, bem como dos equipamentos para realização das leituras (BARRETO JR., 1998).

2.1.8 Características dos extensômetros elétricos

As características desejáveis de um extensômetro elétrico de resistência podem ser resumidas em:

- Alta precisão;
- Baixo custo;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Ótima resposta dinâmica;
- Excelente linearidade;
- Fácil instalação;
- Podem ser utilizados imersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo, desde que se faça o tratamento adequado;

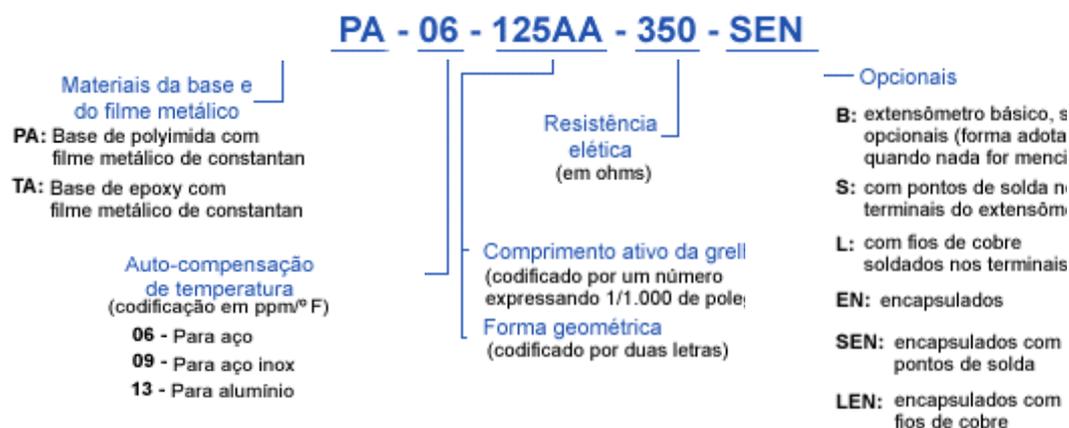
- Possibilitam medidas à distância.

Atualmente o extensômetro elétrico de resistência é imprescindível a qualquer pesquisador que se dedique ao estudo experimental de medições em deformações (BARRETO JR., 1998).

2.1.9 Sistema de Codificação

A codificação é feita por um conjunto de letras e números que identifica o extensômetro, conforme suas características (EXCEL, 2015).

Figura 9 - Fator de Sensibilidade (Gage Factor)



Fonte: disponível em: <<http://www.excelsensor.com.br/>>.

Fator de Sensibilidade (Gage Factor):

- o valor teórico do Fator de Sensibilidade é $K = 2,1$
- o valor real apresenta pequenas variações, de lote para lote, em torno do valor teórico (EXCEL, 2015).

2.1.10 Sistema de medição

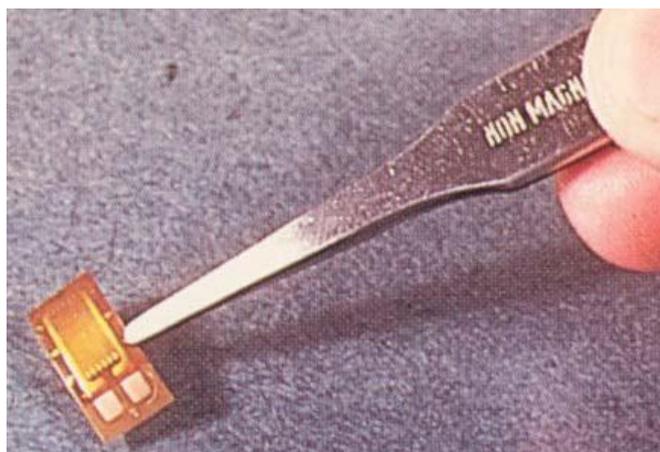
As deformações medidas com extensômetros são geralmente muito pequenas. Consequentemente os diferenciais de resistência são também muito baixos não podendo ser medidos com precisão diretamente com um ohmímetro comum. O extensômetro deve ser colocado em um sistema de medição onde a quantificação

exata da variação de sua resistência seja possível de obter uma leitura através de equipamentos apropriados (WEBER, 2008).

2.1.10.1 Descrição do sistema de medição

Num circuito de extensometria elétrica o primeiro componente no sistema é o extensômetro (figura 8), este transforma a deformação mecânica em uma mudança na resistência elétrica do sensor utilizado. Esta deformação depende da geometria, do material e da elasticidade do elemento, bem como da força nele aplicada. Assim, o extensômetro, é o elemento sensível e que deve ser escolhido para cada aplicação específica (WEBER, 2008, p. 2).

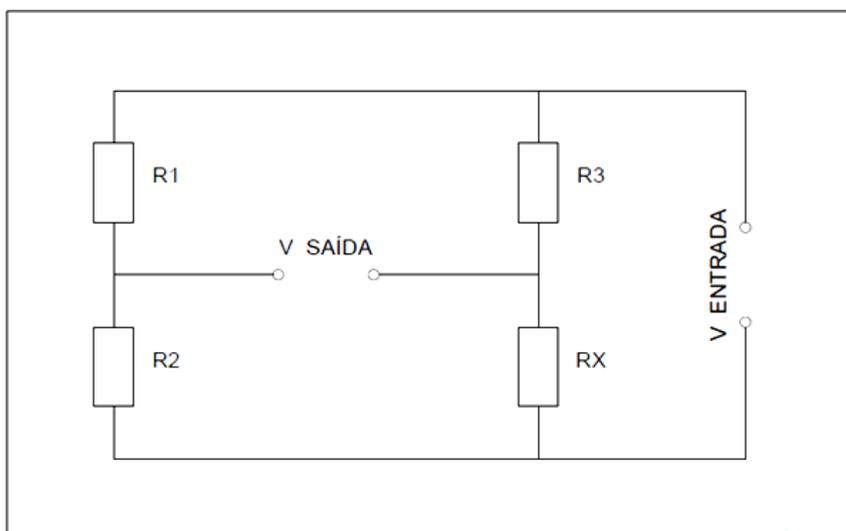
Figura 10 – Extensômetro



Fonte: WEBER (2008, p. 4).

O próximo componente no sistema é um circuito de medição, que é normalmente uma ponte de *Wheatstone* (figura 11), sendo o extensômetro uma das resistências dos componentes do circuito. Tanto o extensômetro como a ponte de *Wheatstone* são componentes passivos. Uma corrente elétrica flui por esses componentes obtendo-se um sinal útil, essa tensão é obtida de uma fonte elétrica separada. No momento em que a resistência do extensômetro se modifica devido a uma deformação, o circuito da ponte perde sua simetria e torna-se desbalanceada. A saída de tensão dessa ponte é proporcional ao desbalanceamento da mesma (GALLINA, 2003, p. 17).

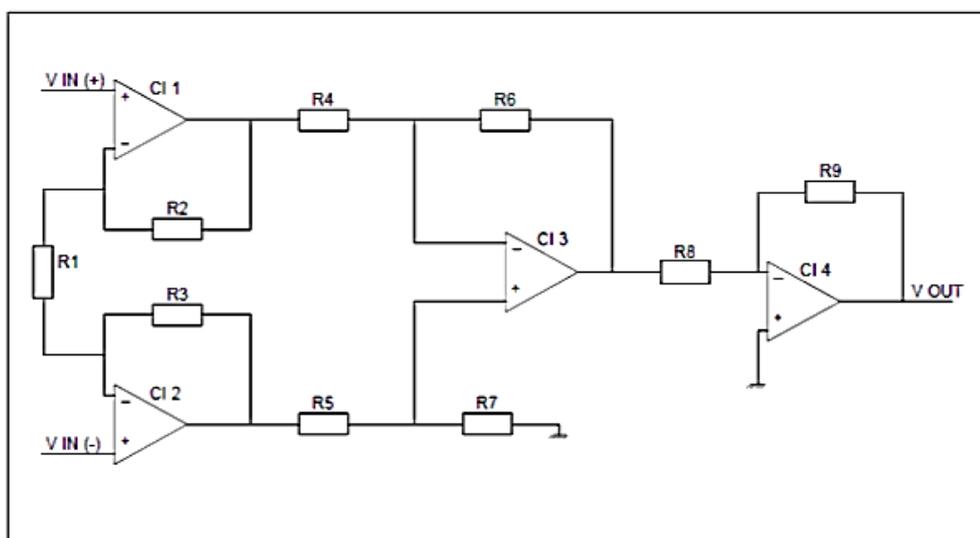
Figura 11 - Ponte de *Wheatstone*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um amplificador é acrescentado ao sistema de medição como um terceiro componente, tendo a finalidade de amplificar a tensão de saída da ponte a um nível adequado para os instrumentos de indicação (GALLINA, 2003, p. 17).

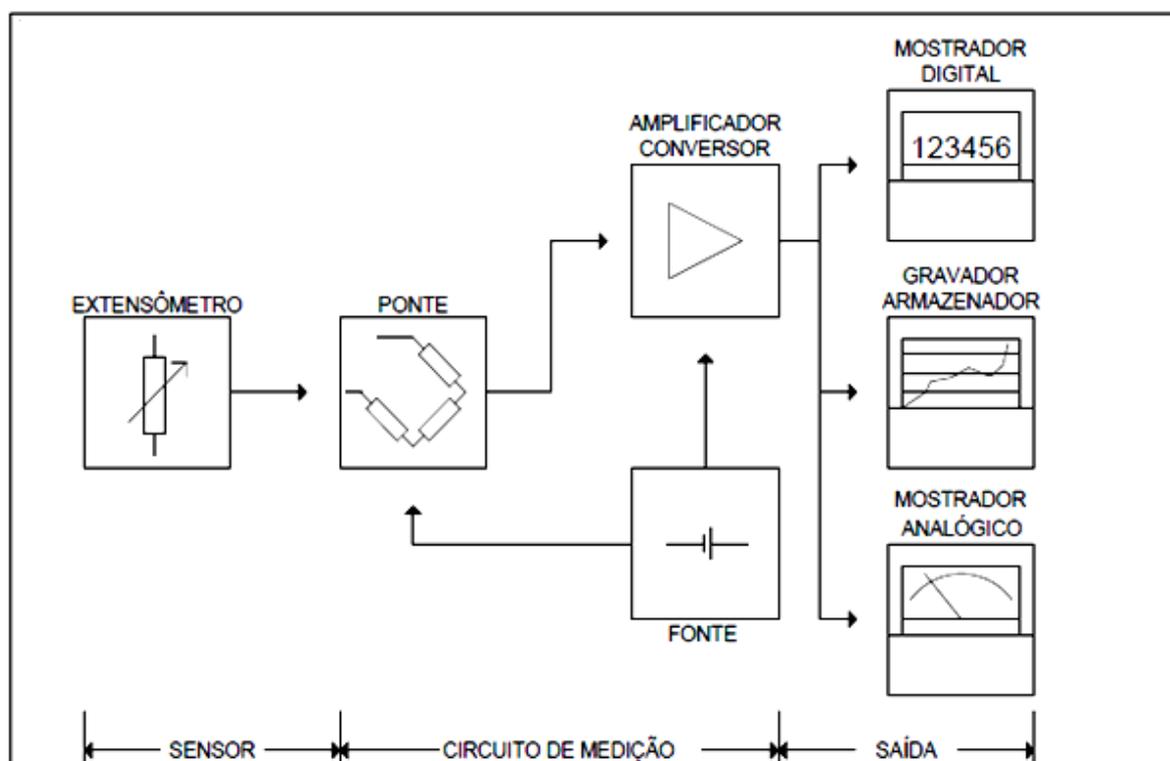
Figura 12 - Amplificador de Instrumentação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos amplificadores lineares a tensão de saída é proporcional à tensão de entrada, sendo esta a tensão que sai da ponte, que é proporcional à deformação medida. O quarto componente no sistema de medição é o *display*. O mesmo apresenta o sinal de saída do amplificador em forma que pode ser facilmente observada e também armazenada. No caso mais simples a medida é mostrada numa escala indicadora de um voltímetro ou através de um equipamento de medição digital. Sendo necessário conhecer a alteração das deformações ao longo do tempo, como num processo dinâmico, instrumentos que fazem o registro são mais indicados do que simplesmente os instrumentos de indicação. A maioria dos amplificadores podem ser usados em conjunto com os dois tipos de instrumentos. Mesmo a informação sofrendo três estágios de processamento, é possível construir dispositivos de baixo custo e que conseguem efetuar medições com precisão melhor do que 2% (GALLINA, 2003, p. 18).

Figura 13 - Diagrama do sistema de medição para medição de deformação através de extensômetros



Fonte: Esquema elaborado pelo do autor.

Essa descrição, do sistema de medição, enfoca somente os elementos principais. Na prática o sistema pode envolver o uso de outros equipamentos tais como: scanners, filtros, armazenamento dos valores de pico, etc. Equipamentos eletrônicos de processamento de dados também podem ser colocados no sistema em substituição aos simples instrumentos de indicação, aumentando a capacidade e versatilidade do sistema de forma muito significativa (GALLINA, 2003, p. 18).

2.1.11 Acoplamento dos Extensômetros ao Corpo de Prova

Esta etapa é de vital importância para o sucesso da medição com a precisão necessária. Os extensômetros devem ser posicionados após um bom planejamento, na peça em que se deseja efetuar a avaliação. Convém lembrar que a esta altura já se tenham sido escolhidos os *strain gages* mais apropriados para a situação. Após selecionados os locais de fixação é necessário preparar a superfície do elemento, deixando com condições adequadas para que obtenha uma boa aderência entre o sensor e o material, deixando a superfície livre de sujeiras, resíduos e corrosão. Deve-se ter atenção especial com o alinhamento aos eixos dos quais se deseja efetuar as medições. A fixação do sensor é feita usando adesivos, normalmente indicados pelo fabricante do extensômetro. Existem ainda alguns produtos preparadores da superfície para colagem. Após a aplicação do adesivo e o correto posicionamento do sensor é necessário aguardar sua cura, o que pode levar de 2 minutos a mais de 24 horas dependendo do tipo de adesivo e da temperatura. Após este período o extensômetro estará pronto para o uso.

2.1.12 Interferências

Fatores externos podem comprometer a medição. É preciso atenção ao nível de temperatura bem como a sua variação durante o processo de medida, monitorando o tempo de exposição. A alteração da temperatura provoca alterações nos componentes do sistema de medida. Um aumento substancial da temperatura pode provocar dilatação, variação da resistividade e do fator K do extensômetro, também podendo interferir no efeito do adesivo. Além disso, a fiação também sofre variações da sua resistência ôhmica, que mesmo pequenas vão produzir modificações na leitura, pois pode-se trabalhar com variações do *strain gage*

menores do $1/1000\Omega$. Pode-se utilizar extensômetros com compensação de temperatura e ainda métodos para correção nos outros componentes do sistema de medição.

Deve-se tomar os devidos cuidados com os cabos e demais componentes que ligam os sensores aos equipamentos de amplificação e leitura, devendo estes serem blindados contra interferência eletromagnética e protegidos de fatores como umidade e exposição ao sol a outros agentes agressivos.

Convém lembrar que a medida da deformação é resultado da comparação entre uma leitura inicial sem a carga, e outra após o carregamento.

2.1.13 Precisão e temperatura

Dependendo do tipo de aplicação os extensômetros devem ser selecionados de acordo com a precisão desejada. Para extensômetros em *constantan* (cobre-níquel) a faixa útil é de -200°C à $+200^{\circ}\text{C}$. Para transdutores de maior qualidade recomenda-se faixa de -20°C à $+70^{\circ}\text{C}$, o que cobriria a maior parte das análises da construção civil. Para necessidade de precisão ainda maior, como célula de cargas, recomenda-se utilizar de -10°C à $+40^{\circ}\text{C}$. Extensômetros elétricos metálicos podem ser substituídos pelos capacitivos, onde se faz necessária uma maior precisão em uso sob altas temperaturas.

2.2 Análise de Vibrações

Normalmente as vibrações presentes em estruturas metálicas ou de concreto armado são indesejadas, pois podem comprometer sua estabilidade e segurança. Vibrações excessivas, ou não previstas em projeto podem levar a ruína uma estrutura dependendo da sua amplitude. Um projeto bem elaborado pode minimizar esses efeitos, mas forças não previstas ou muito superiores para as quais foram calculadas no projeto podem agir sobre todos ou parte dos seus componentes. Diante destas possibilidades, é altamente recomendável o monitoramento constante destas estruturas, principalmente às mais críticas. O monitoramento pode ser feito de diversas formas, sendo uma delas a que faz uso dos *strain gages*, pois podem ser feitas a distância e ao longo do tempo.

Um sistema de infinitos graus de liberdade pode ser reduzido a um modelo conceitual, com apenas um grau de liberdade. A equação do equilíbrio dinâmico de um sistema pode ser definida da seguinte forma:

$$M.\ddot{u} + C.\dot{u} + K.u = P(t) \quad (2)$$

Onde:

\ddot{u} = Aceleração

\dot{u} = Velocidade

u = Deslocamento

K = Rigidez

M = Massa

P = Carga

C = Coeficiente de Amortecimento

t = tempo

Para sistemas sujeitos a vibrações livres não amortecidas, desprezando-se o amortecimento e adotando o carregamento nulo, os únicos movimentos possíveis se devem às condições iniciais de deslocamento, u_0 , e de velocidade, \dot{u}_0 . A EDO passa a ser:

$$M.\ddot{u} + K.u = 0 \quad (3)$$

ou

$$\ddot{u} + \omega^2.u = 0 \quad (4)$$

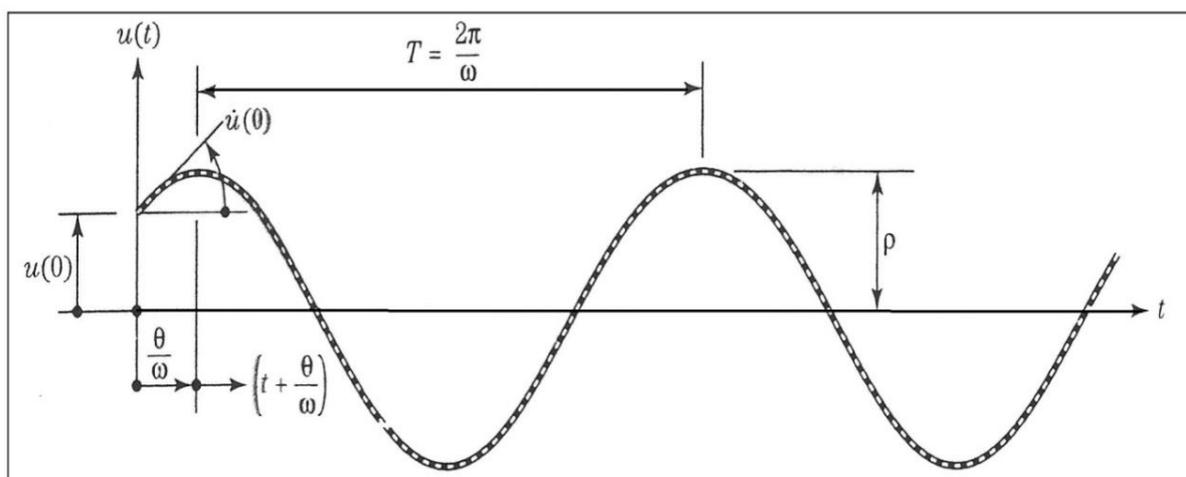
onde a frequência de vibração não amortecida do sistema (em rad/s) é dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ cujo inverso é o período de vibração livre (em s), } T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (6)$$

Assim, a estrutura vibrará harmonicamente com a frequência f , repetindo o movimento nesse número de vezes por segundo. T é o período de intervalo de tempo entre dois picos do movimento. A resposta harmônica pode ser escrita como sendo $u(t) = \rho \cos(\omega t + \theta)$ (BRASIL, 2013, p. 23).

Figura 14 - Resposta para vibração livre não amortecida



Fonte: Brasil (2013, p. 26).

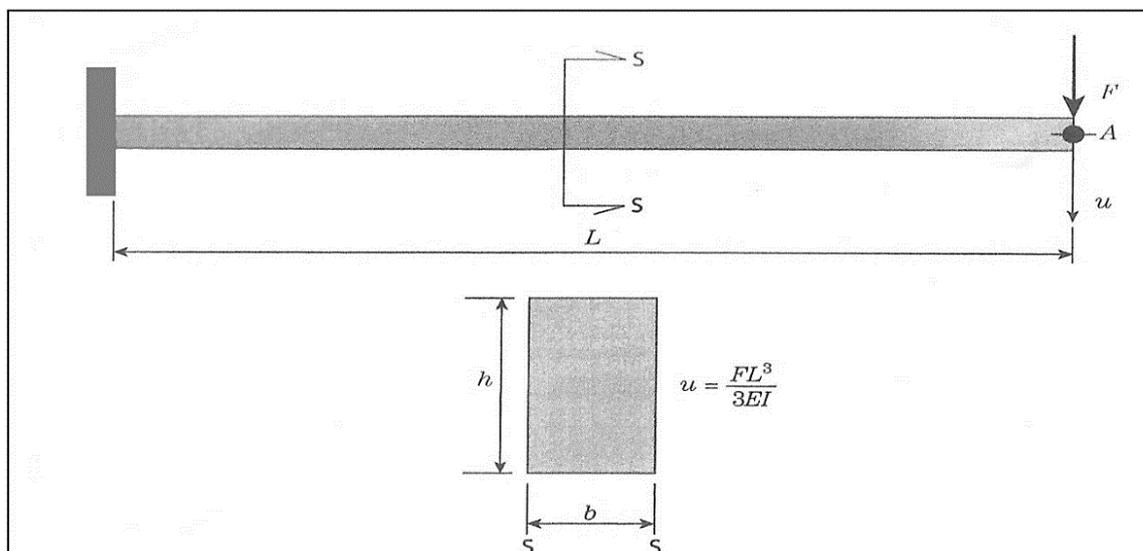
Para o caso de vigas engastadas e em balanço, conforme detalhado na Figura 15, a rigidez, ou constante elástica, da viga pode ser calculada considerando uma viga com carga aplicada na extremidade em balanço da por meio da equação 7.

$$K = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (7)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material da viga, L é o comprimento da viga, e I o momento de inércia da seção transversal da viga, o qual, para uma seção retangular, pode ser calculado pela equação 8:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (8)$$

Figura 15 - Viga de seção transversal retangular com carregamento na extremidade



Fonte: Brasil (2013, p. 30).

Assim, tendo-se definido o valor da rigidez K da viga, pode-se calcular a frequência de vibração utilizando a equação 6. Entretanto, como este modelo simplificado considera a rigidez de uma viga com carga concentrada em sua extremidade em balanço, porém, deve-se utilizar como carga concentrada uma carga equivalente a $\frac{1}{4}$ da massa total da viga.

Clough e Penzien (1993) *apud* Brasil (2013) definem que a frequência cíclica exata de uma viga prismática engastada e em balanço é dada por:

$$\omega = 1,875^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{ma L^4}} \quad (9)$$

onde:

ω = Frequência cíclica

E = Módulo de elasticidade

I = momento de inércia

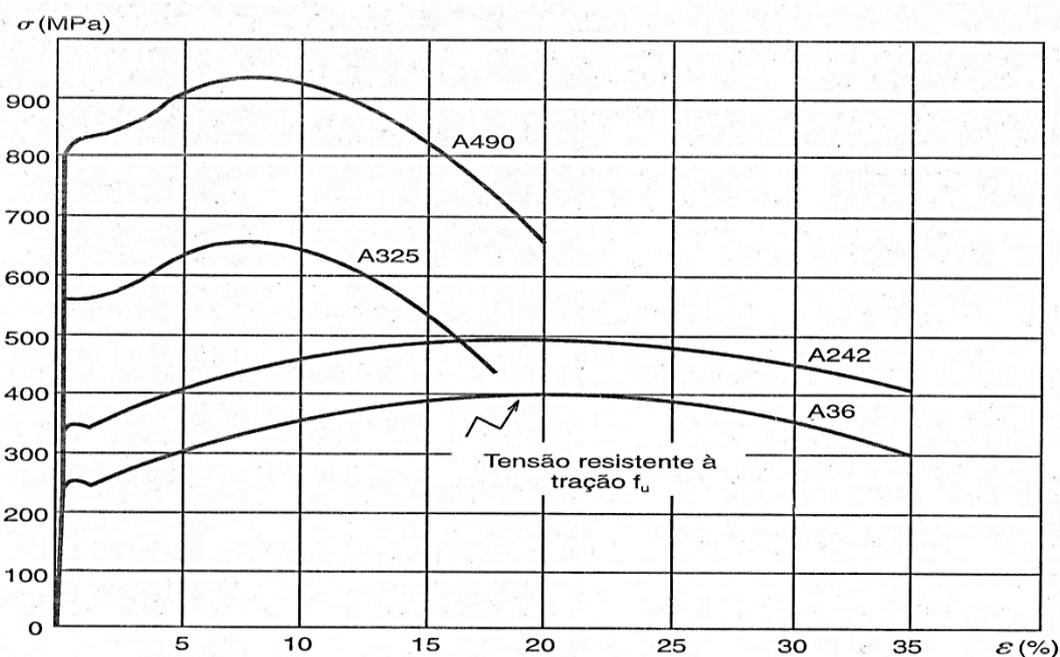
ma = massa por unidade de comprimento

L = Comprimento da barra

2.3 Parâmetros mecânicos para o aço

Cada tipo de aço apresenta um comportamento específico quanto ao seu padrão de tensão e deformação específica, conforme pode ser observado no gráfico da figura 16. A diferença entre os diversos tipos de aço é resultado do processo de fabricação. O comportamento quanto à tensão apresenta variação mais significativa, enquanto o módulo de elasticidade apresenta valores mais próximos independente do tipo de aço. O aço mais comumente empregado em estruturas de aço é o aço classificado como A36 pela *ASTM - American Standard Testing Materials*, o qual corresponde no Brasil ao aço denominado MR250 pela NBR 8800:2008.

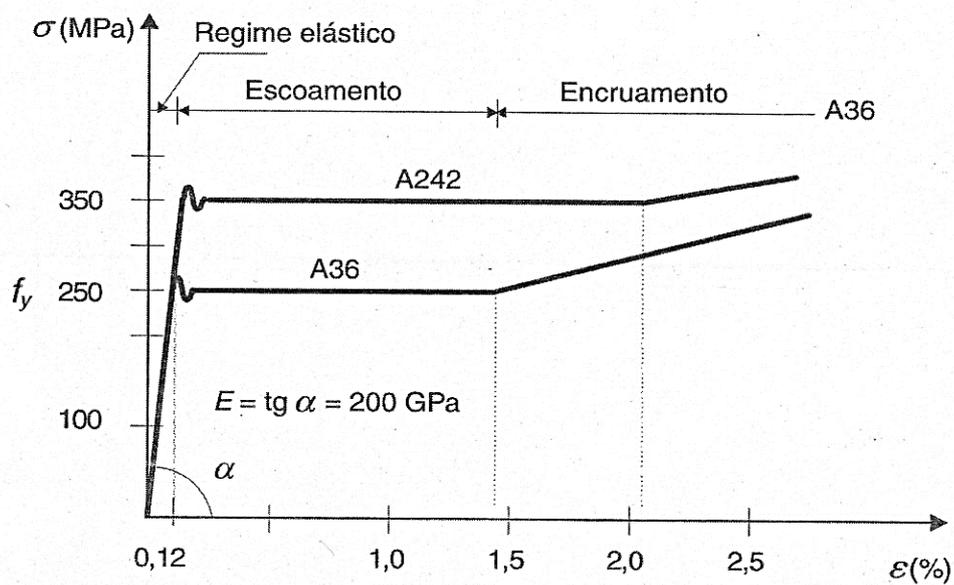
Figura 16 - Diagrama convencional tensão e deformação dos aços ATSM A36, A242, A235, A490



Fonte: Pfeil (2009, p. 14).

Conforme se pode observar no gráfico da figura 17 o módulo de elasticidade do aço é de 200GPa.

Figura 17 - Trecho inicial dos diagramas x tensão deformação dos aços com patamar de escoamento



Fonte: Pfeil (2009, p. 14).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Existem diferentes procedimentos metodológicos cada um deles aplicado a um tipo de pesquisa específico. O caminho a ser seguido é indicado pelo procedimento metodológico, visando atingir os objetivos desejados. Para cada tipo de pesquisa deve ser desenvolvida uma metodologia específica, e a mesma tem a função de indicar o caminho para chegar aos resultados esperados. Na escolha da metodologia a ser adotada é fundamental que o pesquisador leve em consideração o assunto ao qual vai realizar a pesquisa, bem como as respostas que pretende obter com o desenvolvimento da mesma (OLIVEIRA, 2013).

Nesta etapa foram utilizados *strain gages* que transformam as variações micrométricas das deformações mecânicas em alterações de sua resistência ôhmica, podendo esta ser amplificada e convertida em um sinal utilizável. Foram efetuados alguns ensaios no laboratório do curso de Engenharia Civil, na UNISC, utilizadas ferramentas e equipamentos presentes no bloco 50 da instituição citada. Nesta etapa, ocorreram algumas aplicações práticas que serão descritas a seguir. Para tanto, foi utilizado o módulo de aquisição de dados Quantum X, modelo MX840B, da HBM. Este equipamento é um aquisitor universal de dados, que realiza amplificação e conversão do sinal. O Quantum X, modelo MX840B da figura 18, possui 8 canais de entrada que podem ser configurados individualmente de acordo com o tipo de sensor utilizado.

Durante a execução da pesquisa foram apresentadas as etapas necessárias para o estudo da simulação de corpos de prova e validação dos mesmos por extensometria. A metodologia foi desenvolvida baseada na necessidade de um padrão para desenvolvimento de ensaios voltados a validação de uma determinada estrutura, conforme segue:

1ª Etapa - Definição do componente para estudo:

No primeiro momento foram definidos quais os elementos a serem estudados. Na escolha dos componentes a serem analisados foram observados os seguintes critérios:

Tamanho - Peças muito grandes ou muito pequenas são difíceis de serem estudadas em uma bancada.

Complexidade da peça - Peça que tenha uma estrutura muito complexa pode apresentar dificuldade durante a simulação.

Carga aplicada sobre o corpo da peça - Deve ser calculada ou medida a carga que vai atuar ou está atuando sobre a estrutura.

Viabilidade de execução do ensaio na mesma - Algumas estruturas acabam por não ser ensaiadas devido seu tamanho ou equipamentos indisponíveis para executar o procedimento.

Após analisar os itens, é definido o componente ou estrutura para ser realizado o estudo.

2ª Etapa - Estimar as forças atuantes sobre o componente em estudo.

Após a definição do elemento, foram estimadas as forças que atuam o sobre o mesmo. As cargas atuantes sobre a estrutura pode ser um valor desejado ou um valor que já atua sobre o sistema.

3ª Etapa - Obtenção dos componentes para realização dos ensaios.

Tomou-se todas as providências para que todos os elementos necessários para realização do experimento estivessem disponíveis e reunidos no local do ensaio.

4ª Etapa - Preparação do elemento a ser estudado.

Nesta etapa, foram definidas as ações a serem executadas, sendo que neste momento foi colocado em prática o ensaio. Após obter o objeto de estudo nas dimensões necessárias, o mesmo foi deixado em condições adequadas. Foram seguidos os seguintes passos:

Definiu-se o local para posicionamento do extensômetro.

Lixou-se a superfície no local a ser instalado o *strain gage*.

Com a superfície limpa e regular, procedeu-se uma limpeza final com produto adequado.

Fixou-se o *strain gage* com adesivo apropriado, tendo-se o cuidado de manter o alinhamento na direção do eixo desejado.

5ª Etapa - Interligações.

Com o sensor já aderido corretamente, efetuou-se a interligação do mesmo ao módulo de aquisição de dados, e este ao computador. O software para esta etapa deve ter sido instalado previamente. Com o cuidado para a soldagem dos

condutores ao sensor, pois este é bastante sensível ao excesso de calor e a esforços mecânicos.

6ª Etapa - Configuração e calibração.

Foi configurada a porta a qual o sensor estava ligado. Calibrou-se a leitura do sensor. Conectado o sensor, fez-se a leitura de uma tensão na superfície da peça, para que a mesma não influencie nos resultados da pesquisa, esta foi zerada.

7ª Etapa - Aplicação de carga.

Aplicou-se uma carga previamente estimada e conhecida.

8ª Etapa - Resultados.

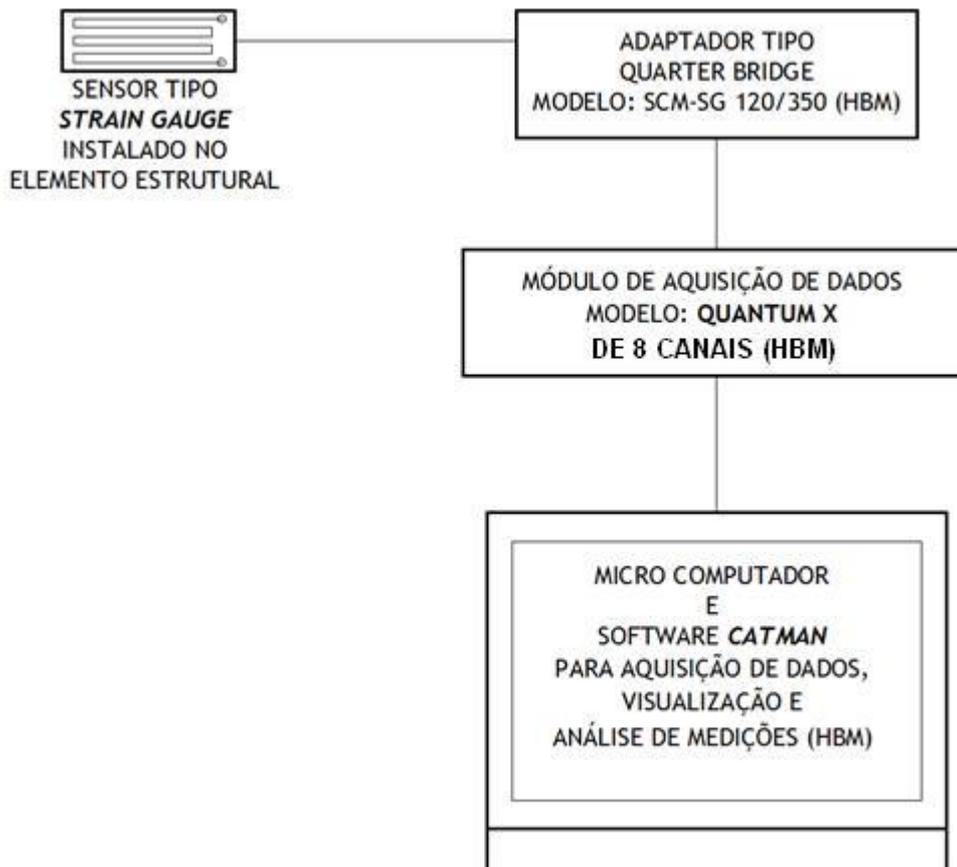
Efetou-se a observação dos dados, sendo estes armazenados para posterior análise e comparações.

Figura 18 - Aquisitor de dados Quantum X e o adaptador tipo *quarter-bridge*



Fonte: foto do autor.

Figura 19 – Esquema de medição via extensômetro elétrico tipo *strain gage* empregado



Fonte: elaborada pelo autor.

Para a leitura destes dados, foi instalado o software *Catman Easy-AP* desenvolvido pelo mesmo fabricante do aquisitor de dados. Este software foi programado para configurar as portas do aquisitor de dados, visualizar seus resultados, montar gráficos, entre outras funções que são utilizadas de acordo com o tipo de aquisição de dados desejados.

3.1 Material empregado nos testes

Para os diferentes testes realizados, posteriormente definidos neste trabalho, empregou-se como material dos elementos estruturais o aço padrão ASTM A36, conforme caracterizados no capítulo 2. A partir da escolha do aço, definiu-se como

padrão para todos os elementos testados, barras chatas de aço de seção 25,4mm x 4,76mm.

3.2 Métodos de teste e cálculo utilizados para a determinação do módulo de elasticidade do aço

De modo a viabilizar a comparação tanto de testes estáticos como dinâmicos realizados neste estudo, utilizou-se como parâmetro final a ser obtido, o módulo de elasticidade do material aço ensaiado. Assim, para os testes estáticos realizou-se um teste de tração direta e dois testes de flexão em viga engastada e em balanço, enquanto para o ensaio dinâmico realizou-se um teste de medição de frequência de vibração em uma viga engastada e em balanço. O detalhamento dos testes e o consequente processo para obtenção do módulo de elasticidade do aço é descrito na sequência deste capítulo.

3.2.1 Método 1 – Ensaio estático – Teste de tração direta

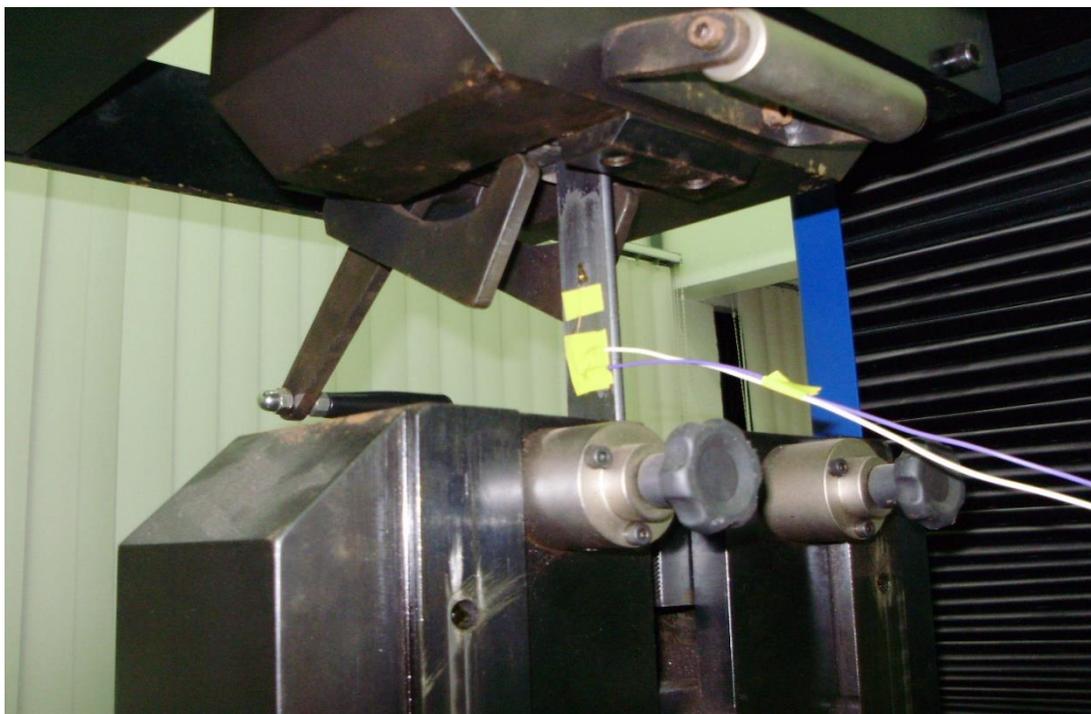
No ensaio de tração procurou-se verificar a resistência do material em análise e seu módulo de elasticidade. Para tanto foi utilizada uma barra de aço em conjunto com um *strain gage*, colocados na Máquina Universal de Ensaio DL-30000 fabricada pela EMIC, para aplicação da carga em valores conhecidos.

A sequência do ensaio de tração realizado é a seguinte:

- 1º- Inicialmente foi o *strain gage* foi fixado na viga de aço.
- 2º- O elemento em análise foi colocado na Máquina Universal de Ensaio.
- 3º- Foi aplicada a carga na barra.
- 4º- Obteve-se o gráfico da deformação específica.
- 5º- Paralelamente efetuou-se a leitura com *strain gage*.
- 6º- Obteve-se os dados do tabela 1 que consta no Capítulo 5.

A figura 20 apresenta o procedimento de ensaio de tração realizado, assim como, o sensor tipo *strain gage* instalado na barra de aço para realizar medida de deformação específica da mesma.

Figura 20 – Barra de aço sendo tracionada e analisada com *strain gage*



Fonte: foto do autor.

Os parâmetros do teste de tração para a barra de aço foram os seguintes:

Dimensões da barra de aço= 25,54 x 4,76mm.

Comprimento= 20cm.

Área = 1,209cm².

Baseando-se na teoria clássica dos materiais foram utilizados os seguintes conceitos da mecânica, para que após medidas as deformações se obtenha o diagrama tensão x deformação que possibilite encontrar o módulo de elasticidade do material, com segue:

Módulo de elasticidade do material (E):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (10)$$

Onde:

σ = Tensão;

ε = deformação específica.

Calculando-se a tensão de tração pela equação (11):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (11)$$

Onde:

F = Força aplicada

A = Área da seção transversal da barra

Em que, é possível ainda, definir a deformação específica longitudinal pela equação (12):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (12)$$

A tensão aplicada máxima aplicada neste ensaio foi de 91,81 MPa, para assegurar que o aço estivesse em um nível de tensão inferior ao de escoamento.

3.2.2 Método 2 – Ensaio estático – Teste flexão de viga engastada e em balanço com flecha medida com defletômetro mecânico

O teste realizado consiste no ensaio de flexão em barra chata de aço engastada e em balanço, conforme esquematizados na figura 21, para verificação da flecha por meio de um defletômetro mecânico, marca *Mitutoyo*, de precisão de 0,01mm, conforme apresentado nas figuras 22 e 23.

Para os testes 2 e 3 foi aplicada uma carga de 0,75Kgf na extremidade livre, sendo efetuada a medida da flecha.

Os parâmetros para ensaio foram:

Vão total: 52,5cm

Largura: 2,54cm (b)

Espessura: 0,476cm (h)

Carga aplicada: 0,75 kgf

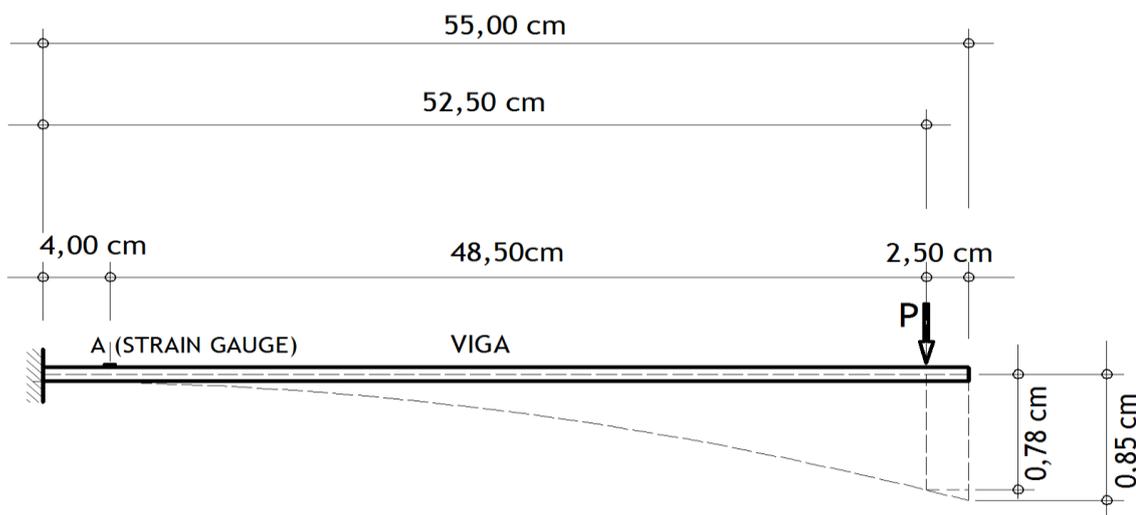
Este ensaio de flexão consistiu basicamente em:

1º- O elemento analisado foi engastado em uma das extremidades.

2º- Foram efetuadas medições do vão da peça.

- 3º- O elemento foi carregado com uma força vertical de 0,75 kgf.
- 4º- Efetuou-se a medida da flecha com defletômetro.
- 5º- Efetuados cálculos teóricos e feitas comparações entre os métodos.

Figura 21 – Esquema de teste estático para viga de aço



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 - Ensaio estático de flexão



Fonte: foto autor.

Figura 23 - Imagem da medição da flecha com defletômetro



Fonte: foto autor.

A partir da flecha experimental medida, por meio da equação de flecha para uma viga engastada e em balanço (equação 14) foi possível obter o módulo de elasticidade do material.

$$f = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (14)$$

Onde:

P = Carga pontual aplicada na extremidade da viga

l = Vão da viga

E = Módulo de elasticidade

I = Momento de inércia da seção transversal da viga

Desta forma, isolando-se o módulo de elasticidade (E) do material, na equação 14, obtém-se o valor do mesmo.

3.2.3 Método 3 – Ensaio estático – Teste flexão de viga engastada e em balanço com deformação medida por meio de um strain gage

O teste realizado consiste no ensaio de flexão em barra chata de aço engastada e em balanço, conforme esquematizados na figura 21, para verificação da deformação específica no ponto “A”, onde o sensor tipo *strain gage* foi posicionado conforme figura 21 e figura 22. Da mesma forma que no teste anterior, foi aplicada uma carga de 0,75 kgf na extremidade livre, sendo efetuada a medida de deformação por meio do *strain gage*.

Os parâmetros para ensaio foram:

Vão (entre o ponto A e o ponto de aplicação da carga = 48,50cm

Distância entre o *strain gage* e ponto de aplicação da carga= 48,5cm

Largura= 2,54cm (b)

Espessura= 0,476cm (h)

Carga aplicada= 0,75 kgf

Sendo que o ensaio consistiu basicamente em:

- 1º- Inicialmente o *strain gage* foi fixado na viga de aço.
- 2º- O elemento analisado foi engastado em uma das extremidades.
- 3º- Foram efetuadas medições do vão da peça.
- 4º- O elemento foi carregado com uma força vertical de 0,75 kgf.
- 5º- Obteve-se a leitura da deformação específica através do *strain gage*.
- 6º- Efetuados cálculos teóricos e feitas comparações entre os métodos.

Com o valor da deformação específica no ponto A, pode-se obter o valor do módulo de elasticidade do material por meio da equação 12, isolando-se o valor do módulo de elasticidade na mesma e considerando que os demais parâmetros são:

A tensão normal de tração na face superior da barra onde foi realizada a medição, oriunda da flexão resultante do momento fletor, pode ser definida pela equação 15.

$$\sigma = \frac{m \cdot y}{I} \quad (15)$$

Onde:

m = Momento fletor resultante da carga pontual aplicada.

y = Distância entre o centro de gravidade da seção até a face tracionada da mesma.

I = Momento de inércia da seção transversal em relação ao seu centro de gravidade.

Podendo o momento fletor resultante da carga pontual aplicada, ser definido pela equação 15.

$$m = P \cdot \ell \quad (15)$$

Onde:

P = Carga

ℓ = Vão

Com isso, o momento fletor calculado para a seção "A" resulta em:

$$m = 0,75Kgf \cdot 48,5 \text{ cm} = 36,375Kgf \cdot \text{cm}$$

E a tensão normal:

$$\sigma = \frac{m \cdot y}{I} \rightarrow \sigma = \frac{36,375 \cdot 0,238}{0,02282828725} = 379,23Kgf/cm^2 ; \text{ sendo } y = \frac{0,476}{2}$$

Sendo que a deformação específica experimental no ponto "A" é:

$$\varepsilon = 180\mu\text{m}/\text{m}$$

Obtém-se o então o módulo de elasticidade:

$$E = 214765,80\text{MPa}$$

3.2.4 Método 4 – Ensaio Dinâmico – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 1

Inicialmente, para o ensaio dinâmico de vibração foi utilizado o mesmo arranjo do ensaio estático, com o comprimento da barra sendo o total da mesma, conforme figura 21. Neste método, o procedimento consistiu basicamente em:

1º- Inicialmente o *strain gage* foi fixado na viga de aço.

2º- O elemento analisado foi engastado em uma das extremidades.

3º- Foram efetuadas medições do vão da peça.

4º- Foi aplicada uma carga qualquer na extremidade da barra e removida rapidamente de modo a gerar uma vibração na barra.

5º- Obteve-se a leitura da deformação específica através do *strain gage*.

6º- Efetuados cálculos teóricos e feitas comparações entre os métodos.

Assim, com as medidas de deformação ao longo do tempo, conforme diagrama deformação x tempo, apresentado no item que trata dos resultados deste trabalho, foi possível obter o módulo de elasticidade do aço empregando a teoria simplificada de cálculo proposta por Brasil (2013). Para tanto, fez-se necessário obter o período de vibração (0,07717 s) por meio da análise do diagrama deformação x tempo, para então (via equação 5) encontrar a rigidez da barra e, assim (via equação 7), obter o módulo de elasticidade, considerando os seguintes parâmetros:

Área= 1,209cm²

Comprimento= 55cm

Espessura= 0,476cm

Largura= 2,54cm

Massa total da barra= 0,522kg

O cálculo realizado por ser assim demonstrado:

$$T = \frac{1}{f} \quad \therefore \quad f = \frac{1}{0,07717} \rightarrow f = 12,9584Hz$$

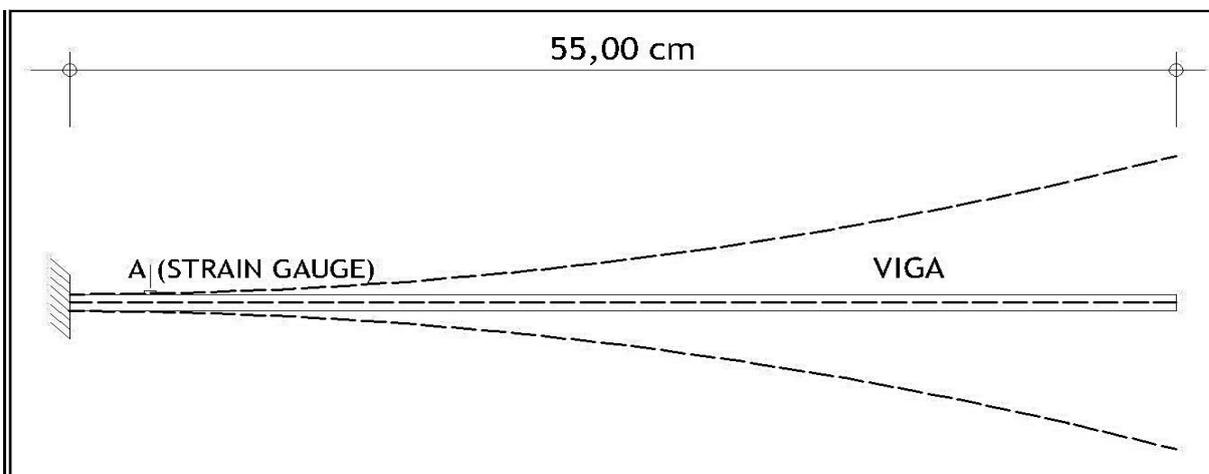
$$f = \frac{\omega}{2.\pi} \rightarrow 12,9584 = \frac{\omega}{2.\pi} \quad \therefore \quad \omega = 81,42 \text{ rad/s}$$

$$I = \frac{b.h^3}{12} = \frac{2,54 \cdot 0,476^3}{12} = 0,02282828725cm^4$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \rightarrow \therefore K = 865,12 \text{ N/m}$$

$$E = \frac{k \cdot L^3}{3 \cdot I} = 210169,21MPa$$

Figura 24 - Esquema do ensaio de vibração



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.5 Método 5 – Ensaio Dinâmico – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 2

O procedimentos de ensaio são os mesmos empregados no método 2, porém, para os cálculos utilizou-se a teoria proposta por Clough e Penzien (1993), a qual define que a frequência cíclica exata de uma viga prismática engastada e em balanço é dada pela equação 9, apresentada anteriormente.

Da mesma forma que no modelo anterior, empregou-se o período de vibração (0,07717 s) obtido por meio da análise do diagrama deformação x tempo, para então, por meio da equação 9 proposta por Clough e Penzien (1993), encontrar o módulo de elasticidade do material, considerando os seguintes parâmetros:

Área= 1,209cm²

Comprimento= 55cm

Espessura= 0,476cm

Largura= 2,54cm

Massa da barra por metro= 0,9491kg/m

O cálculo realizado pode ser assim demonstrado:

$$T = \frac{1}{f} \quad \therefore \quad f = \frac{1}{0,07717} \rightarrow f = 12,9584Hz$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \rightarrow 12,9584 = \frac{\omega}{2\pi} \quad \therefore \quad \omega = 81,42 \text{ rad/s}$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{2,54 \cdot 0,476^3}{12} = 0,02282828725 \text{ cm}^4$$

$$\omega = 1,875^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{m a L^4}} \quad \therefore \quad E = 204054,0647 \text{ MPa}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios e dos cálculos teóricos serão apresentados, analisados e comparados tanto para os modelos estáticos quanto dinâmicos.

4.1 Métodos estáticos

4.1.1 Método 1 – Teste de tração direta

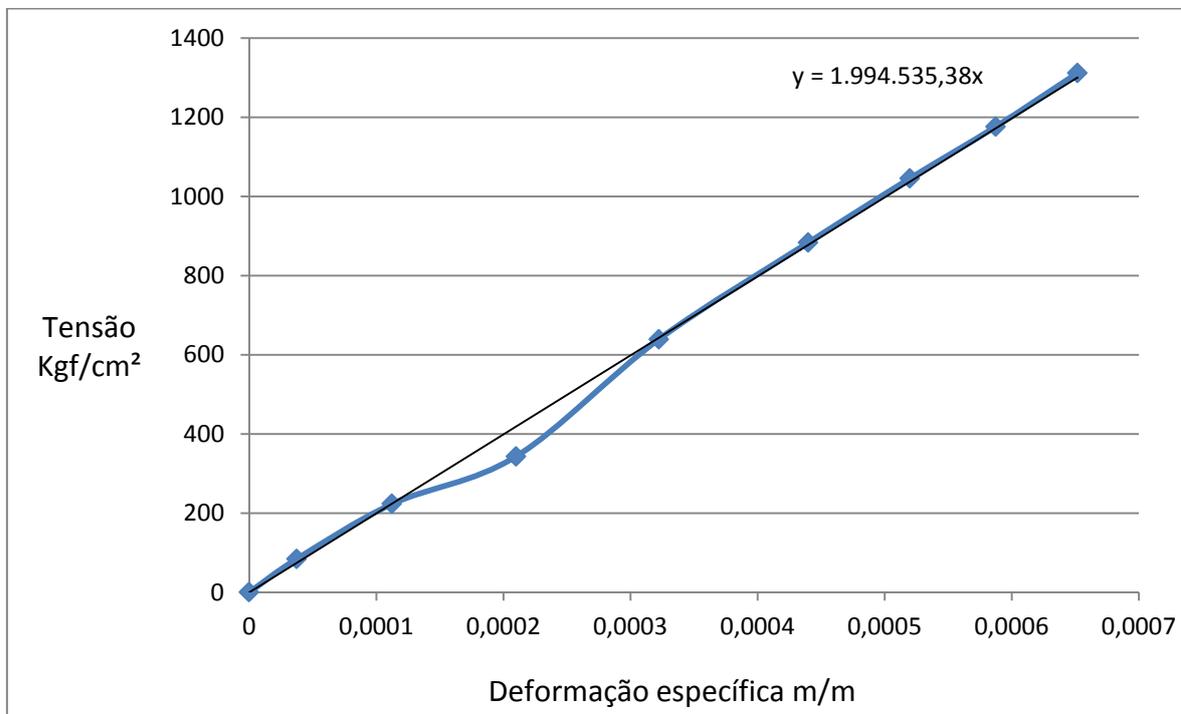
A tabela 1 apresenta os diversos níveis de força de tração aplicada e suas deformações específicas correspondentes medidas no ensaio, assim como, os valores de tensão de tração correspondente, obtidas a partir das cargas. Tais resultados possibilitaram traçar o diagrama tensão x deformação, apresentado na figura 25, e conseqüentemente obter o módulo de elasticidade por meio de uma aproximação resultante de uma linha tendência gerada através do *software Excel*.

Tabela 1 - Dados da força aplicada, deformação específica e tensão obtidos no ensaio de tração

Força (kgf)	Deformação específica – ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Tensão (kgf/cm^2)
0	0	0
102	37,5	84,36724566
270	112,5	223,325062
415	210	343,2588916
773	322,5	639,3713813
1.068	440	883,3746898
1.264	520	1045,492142
1.422	587,5	1176,17866
1.586	652	1311,827957

Fonte: Elaborada pelo autor a partir do ensaio inicial de teste.

Figura 25 - Gráfico mostrando a deformação em função da tensão medida com *strain gage* do ensaio de tração



Fonte: elaborada pelo autor a partir do ensaio inicial de teste.

Assim, aplicando-se uma linha de tendência sobre os valores obtidos experimentalmente (figura 25) foi possível encontrar o módulo de elasticidade $E = 1.994.575,38 \text{ kgf/cm}^2$ ou $203.320,63 \text{ MPa}$.

4.1.2 Método 2 – Teste flexão de viga engastada e em balanço com flecha medida com defletômetro mecânico

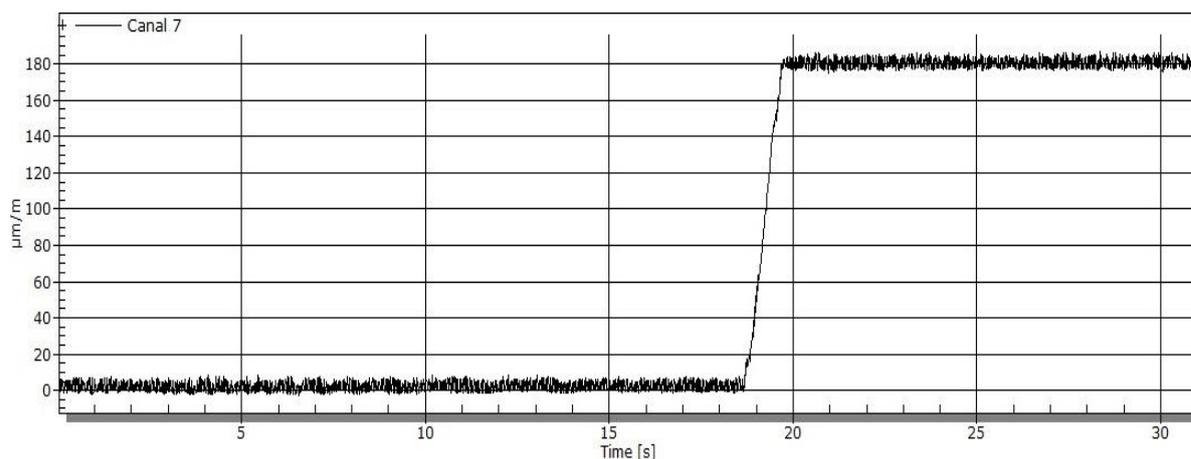
Por meio do ensaio de flexão em barra chata de aço engastada e em balanço, mediu-se a flecha por meio de um defletômetro mecânico, foi encontrado um módulo de elasticidade de $207.100,40 \text{ MPa}$.

4.1.3 Método 3 – Teste flexão de viga engastada e em balanço com deformação medida por meio de um *strain gage*

Conforme se observa no gráfico gerado pelo software Catman da figura 26, o resultado do ensaio com o uso do *strain gage*, após a aplicação da carga, registra

uma deformação específica de $180\mu\text{m}/\text{m}$ praticamente constante, possibilitando a obtenção de um valor para o módulo de elasticidade de $214.765,80\text{ MPa}$.

Figura 26 - Gráfico obtido usando software Catman durante o ensaio de vibração

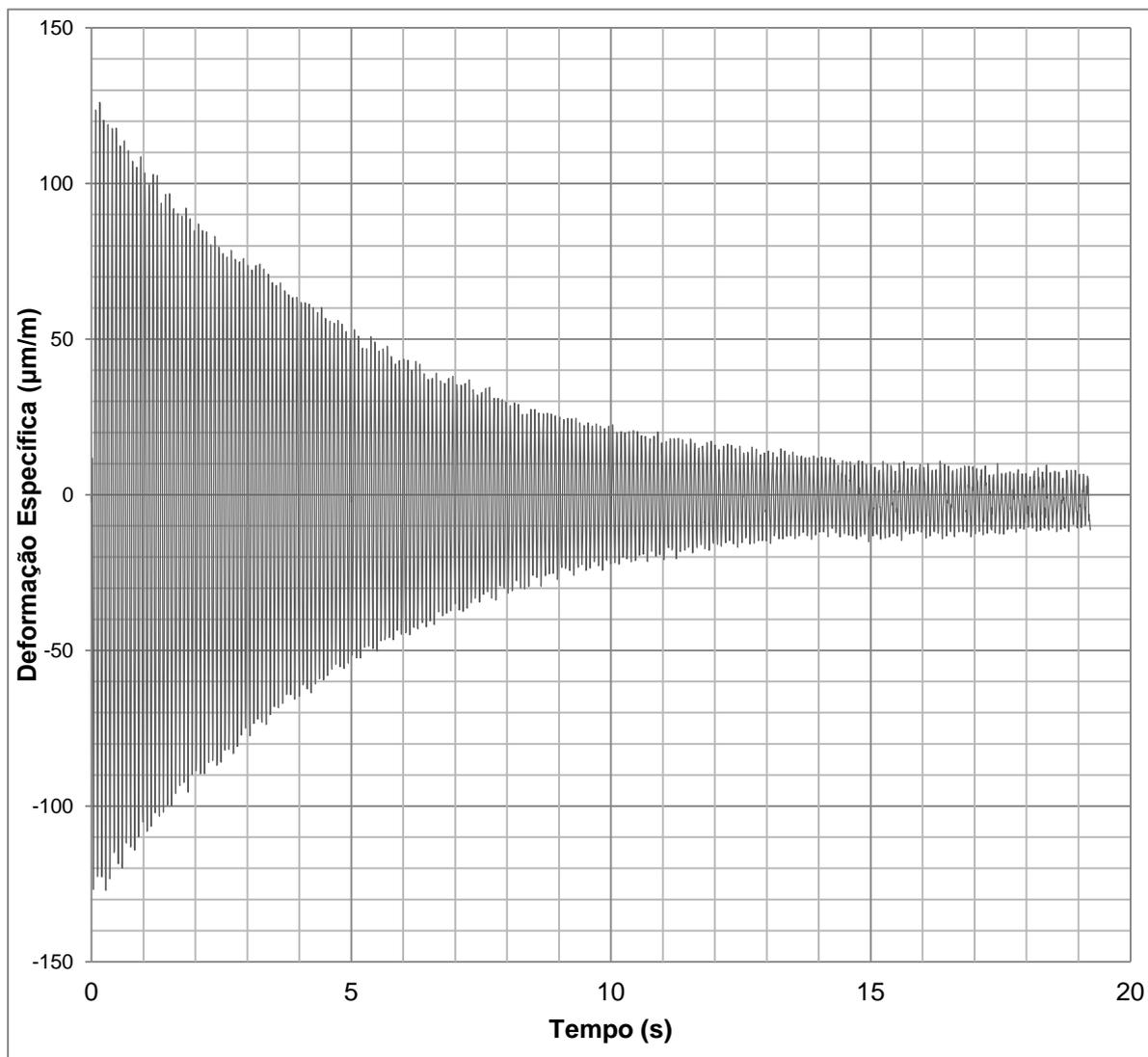


Fonte: obtido pelo software Catman.

4.2 Métodos dinâmicos

Utilizando a medição de deformação, por meio da extensometria elétrica via *strain gage*, para obter as vibrações da barra de aço em análise, encontrou-se o resultado de deformação ao longo do tempo, conforme apresentado no gráfico da figura 27. Observa-se que logo no início a amplitude é maior, diminuindo ao longo do tempo. O *software Catman* utilizado na análise dos resultados, também fornece dados numéricos os quais foram tratados com o auxílio do *software Excel* para obter-se o período (T) e conseqüentemente a frequência (f) de vibração da barra de aço. Os períodos de vibração medidos (distância entre picos do diagrama de deformação no tempo) foram de 0,07717 segundos, enquanto a frequência de vibração resultou em $12,9584\text{ Hz}$ ou $81,42\text{ rad/s}$.

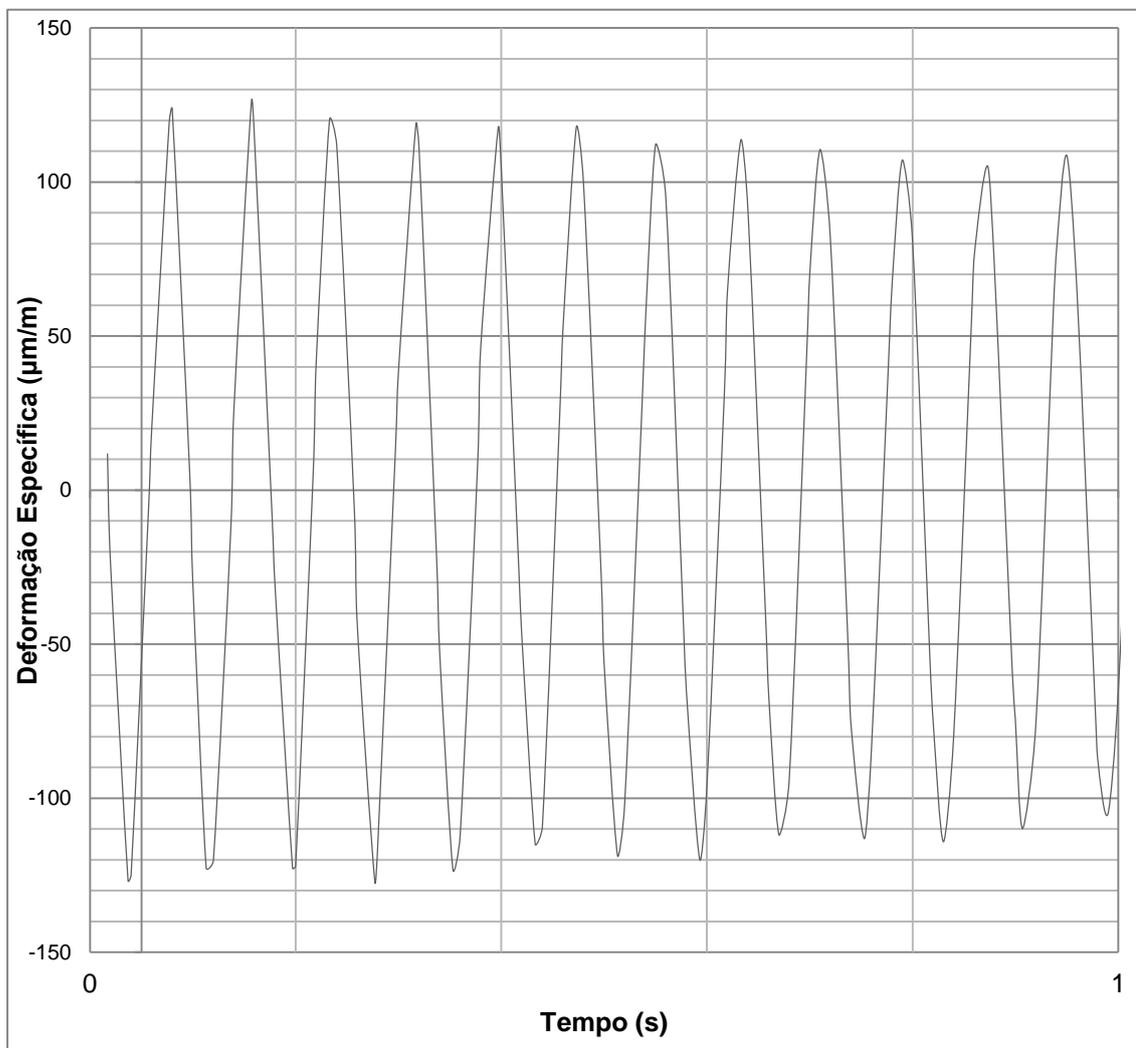
Figura 27 - Gráfico obtido usando software Catman durante o ensaio de vibração para determinação da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor, obtido através do software *Catman*.

É importante registrar a taxa de amostragem de medição do sistema de medição, aquisição e análise de dados empregados registrando períodos de tempo na ordem de 0,001 segundos com elevada precisão e eficiência. A figura 28 apresenta a medição de vibração realizada em um espaço de tempo de um segundo, visando demonstrar o nível de precisão do método empregado.

Figura 28 - Gráfico obtido usando software Catman durante o ensaio de vibração para determinação da frequência para um tempo de 1 segundo



Fonte: Elaborado pelo autor, obtido através do software *Catman*.

Nota-se a exatidão do resultado obtido com o *strain gage* comparado ao cálculo teórico. O resultado é excelente para uma técnica experimental. Observa-se a boa precisão de leitura do extensômetro bem como a facilidade e simplicidade de realização das verificações.

4.2.1 Método 4 – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 1

A partir medição de deformação, por meio da extensometria elétrica via *strain gage*, do tratamento dos dados que possibilitou definir o período de vibração em 0,07717 segundos e a frequência de vibração em 12,9584 Hz ou 81,42 rad/s, empregando a Teoria proposta por Brasil (2014) obteve-se um módulo de elasticidade para o aço de $E=210.169,21$ MPa.

4.2.2 Método 5 – Teste de vibração de viga engastada e em balanço e cálculo via Teoria 2

Da mesma forma que no método apresentado anteriormente, a partir medição de deformação, por meio da extensometria elétrica via *strain gage*, que possibilitou definir o período de vibração em 0,07717 segundos e a frequência de vibração em 12,9584 Hz ou 81,42 rad/s, empregando a Teoria proposta por Clough e Penzien (1993) obteve-se um resultado para o módulo de elasticidade do aço de $E=204.054,06$ MPa.

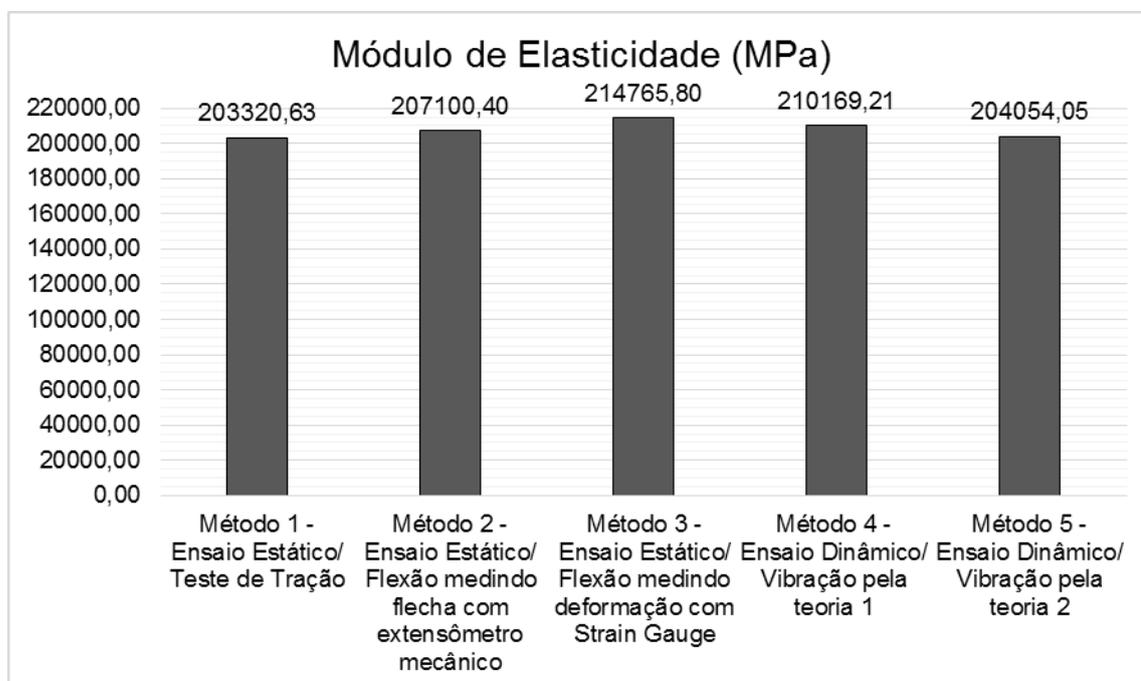
4.3 Comparações

Na tabela 2 e no gráfico da figura 29 pode-se observar a pequena diferença entre resultados obtida, quando se compara os diversos métodos de medição empregados com o método que utiliza o ensaio de tração simples, o qual é tradicionalmente considerado de precisão satisfatória, visto sua simplicidade e o reduzido número de variáveis envolvidas no mesmo. Observando-se ainda, a tabela 2, constata-se que tal variação não é superior a 5,63%, o que é pouco significativa se levar em consideração os parâmetros de ponderação de resistência empregados para o aço, pelas normas brasileiras, os quais são comumente na ordem de 1,10 e 1,15.

Tabela 2 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

Método para determinação do Módulo de Elasticidade	Módulo de Elasticidade (MPa)	Variação (%)
Método 1 - Ensaio Estático/ Teste de Tração	203320,63	0,00%
Método 2 - Ensaio Estático/ Flexão medindo flecha com extensômetro mecânico	207100,40	1,86%
Método 3 - Ensaio Estático/ Flexão medindo deformação com Strain Gage	214765,80	5,63%
Método 4 - Ensaio Dinâmico/ Vibração pela teoria 1	210169,21	3,37%
Método 5 - Ensaio Dinâmico/ Vibração pela teoria 2	204054,05	0,36%

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 29 - Gráfico de comparação dos resultados obtidos

Fonte: Produzido pelo autor.

Cabe salientar que, o pesquisador pode dispor da extensometria elétrica, como mais uma ferramenta de auxílio em suas pesquisas e estudos para:

- Avaliar a segurança de estruturas em construção.
- Confirmar os parâmetros usados em projeto.
- Avaliar as características dinâmicas.
- Detecção de danos estruturais.
- Diagnóstico em situação de emergência.

Contudo, verifica-se que a técnica pode ser usada com ferramenta para análise de vigas, pilares, estruturas metálicas, lajes, modelos de escala reduzida e em componentes sujeitos a variações mecânicas. Para tanto, o pesquisador deve selecionar os *strain gages* indicados para cada situação, utilizar equipamentos e programas de aquisição de dados adequados, bem como seguir as recomendações dos seus fabricantes. Embora ainda não existam padrões para a extensometria elétrica experimental, cada usuário da técnica poderá criar seus próprios parâmetros experimentalmente.

5 CONCLUSÃO

O princípio da extensometria elétrica é conhecido desde o século XIX, mas seu potencial ainda é pouco explorado na construção civil e em outras áreas. Apesar de ser uma técnica experimental apresenta boa precisão quando comparada com outros métodos de medição.

Na atualidade pode-se dispor dos mais variados equipamentos e sensores adequados às necessidades específicas de cada situação, sendo possível executar monitoramento remoto, obtenção dados ao longo do tempo, aquisição de dados de vários *strain gages* simultaneamente.

Pelos resultados apresentados neste trabalho, considerando as análises e testes realizados, é possível concluir que a utilização dos *strain gages*, como sensores de monitoramento de estruturas, assim como, a técnica de extensometria elétrica empregada neste estudo, apresenta resultados confiáveis e de aplicação segura quando comparada com outras técnicas e métodos de medição.

Os fabricantes colocam à disposição dos clientes suporte técnico e demais informações necessárias para utilização dos sensores e equipamentos. Ao longo da pesquisa percebeu-se que a extensometria elétrica experimental é de fácil aplicação, bastando o pesquisador seguir as recomendações contidas nos manuais dos sensores e equipamentos. Mesmo nos dias atuais, a técnica é ainda desconhecida por grande parte dos estudantes e profissionais da engenharia.

Portanto, o pesquisador pode dispor da extensometria elétrica, como mais uma ferramenta de auxílio moderna, ainda com um grande potencial de desenvolvimento para utilização em suas pesquisas, estudos e monitoramento de estrutura.

Ao final deste estudo, fica evidente o potencial desta técnica, para aplicação na área de engenharia de estruturas, assim como, sua gama de possibilidades de aplicações em outras áreas da engenharia civil e mecânica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Pedro Afonso de Oliveira. *Introdução à extensometria elétrica de resistência*: notas de aula. Notas de aula da disciplina - Análise Experimental de Tensões. PEF 795. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais, 1996a. Disponível em: <<http://www.lem.ep.usp.br/pef5794/EXT-1.PDF>>.

ALMEIDA, Pedro Afonso de Oliveira. *Extensometria elétrica III*: Notas de aula. Notas de aula da Disciplina – Análise Experimental de Estruturas. PEF 794. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais, 1996b. Disponível em: <<http://www.lem.ep.usp.br/pef5003/ee-3.pdf>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: 2008.

BARRETO JR., Euler. *Manual Prático de Extensometria*. Manual. UNESP. Ilha Solteira, SP: [s.n.], 1998. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAROQAK/extensometria-manual-pratico>>.

BRASIL, Reyolando M. L. R.; SILVA, Marcelo Araujo da. *Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil*. São Paulo: Blucher, 2013.

CARLOS, Antonio Gil. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

ENCODERS AND SENSORS. *The Strain Gage*. 05 ago. 2010. Disponível em: <<http://www.tayloredge.com/reference/Electronics/Encoders/StrainGage.pdf>>.

EXCEL. *Extensômetros Elétricos*. Excel Sensores Ind. Com. e Exportação Ltda. Disponível em: <<http://www.excelsensor.com.br/>>.

GALLINA, Renato. *Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicações e tendências*. 2003, 75 f. Monografia (pós-graduação Lato Sensu em Mecatrônica) - Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www2.dem.inpe.br/mcr/Orient/pdf/RenatoGallina.pdf>>.

HBM do Brasil. *De sensores a softwares: A completa solução em medição*. Disponível em: <<http://www.hbm.com/pt/>>. Acesso em: set. 2015.

HBM do Brasil. *Catmann AP*. Disponível em: <<http://www.hbm.com/pt/2290/catman-software-para-aquisicao-de-dados/>>. Acesso em: set. 2015.

OLIVEIRA L. *Metodologia de conclusão de curso (TCC)*. Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2013. Disponível em: <<http://academico.direito->

rio.fgv.br/ccmw/images/d/db/METODOLOGIA_TCC_2013.1.pdf>. Acesso em: set. 2015.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. *Estruturas de aço: Dimensionamento Prático*. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. *Estruturas de aço: Dimensionamento Prático*. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009.

PORTNOI, Marcos. *Extensometria: história, usos e aparelhos*. Disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). *Apostila de Extensometria*. Departamento de Engenharia Mecânica. Grupo de Análise e Projeto Mecânico - GRANTE. Florianópolis: UFSC, 2004. Disponível em: <<http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>>.

VEDA - Group of Companies. *Strain gages*. Disponível em: <<http://veda.com.ua/en/catalogue/tenzorezistory>>.

WEBER, Albano Luiz. *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2008. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20e%20xtensometria.pdf>.

WEBER, Albano Luiz. *Metrologia e Instrumentação*. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Caxias do Sul – UCS, 2008. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20e%20xtensometria.pdf>.

ZANELLA, Liane Carly Hermes. *Metodologia de estudo e de pesquisa em administração*. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração / UFSC; [Brasília]: CAPES: UAB, 2009.