

APLICAÇÃO DA PONTE DE WHEATSTONE COM EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS: INSTRUMENTAÇÃO DE UM LINK PARA MEDIÇÕES DAS FORÇAS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

MATEUS LEVI MARCELINO¹

ADILSON MASSA²

FABIANA FLORIAN³

JAILTON LEITE BITTENCOURT⁴

Resumo: A Ponte de Wheatstone é um circuito elétrico utilizado para medir uma resistência desconhecida, normalmente com valor próximo às outras resistências do circuito. Com ela é possível construir uma ponte composta por extensômetros elétricos, que são sensores de deformação capazes de medir uma variação mecânica a partir de sua variação na resistência elétrica com boa precisão e linearidade. O objetivo deste trabalho foi realizar a instrumentação de um link com sensores de deformação (*Strain Gages*) aplicando a ponte de wheatstone para medição das forças de tração e compressão exercidas em um Link (peça de conexão entre dois pontos) que será submetido a uma calibração direta para se obter os resultados em unidade de engenharia com relação a deformação da peça. Foi realizada pesquisa bibliográfica e um estudo de caso em uma empresa do setor de ensaios de instrumentação no município de Gavião Peixoto-SP.

Palavras-chave: extensômetro; linearidade; Ponte de Wheatstone.

¹ Graduando do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara – UNIARA. E-mail: mateus.lmarcelino@gmail.com

² Professor Especialista do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara – UNIARA. E-mail: adilsonmassa12@gmail.com

³ Professora Doutora do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara – UNIARA. E-mail: fflorian@uniara.com.br

⁴ Técnico de Ensaios na empresa Embraer S.A. E-mail: jailton.leite@embraer.com.br

WHEATSTONE BRIDGE APPLICATION WITH ELECTRIC EXTENSOMETERS: INSTRUMENTATION OF A LINK FOR TRACTION AND COMPRESSION FORCES MEASUREMENTS

Abstract: The Wheatstone bridge is an electrical circuit used to measure an unknown resistance, usually with value close to the other resistances of the circuit, using this concept we can construct a bridge composed by electric strain gauges, which are strain sensors capable of measuring a mechanical variation from its variation in electrical resistance with good precision and linearity. Bibliographical research and case study are presented in this article, being the practical part carried out in a company located in the city of Gavião Peixoto-SP. Instrumentation will be performed with strain sensors (*Strain Gages*) applying the Wheatstone bridge to measure the tensile and compression forces exerted on a Link (connecting piece between two points), which is going to be submitted to a direct calibration to obtain the results in engineering unit with ratio the deformation of the part.

Key words: extensometer; linearity; Wheatstone bridge.

1 INTRODUÇÃO

A extensometria é fundamental para medições de fadiga e teste de materiais analisando as forças que atuam sobre o mesmo, tem como objetivo mensurar as microdeformações na superfície do produto através da instrumentação com extensômetros elétricos (Strain-Gages) em pontos onde estão mais sujeitos a sofrer deformação, como por exemplo, tração e compressão.

Os extensômetros têm diferentes tamanhos e formatos, podendo ser uniaxiais, biaxiais ou triaxiais. A definição do tipo a ser utilizado deve ser analisada caso a caso, levando em consideração o objetivo do ensaio, como o tipo do carregamento e geometria da peça. (3D CAE, 2017).

Para se obter a leitura das deformações os extensômetros são dispostos em um circuito elétrico conhecido como ponte de Wheatstone, que faz a leitura da variação da resistência elétrica, provocado pela deformação da grade que compõe o corpo do sensor. A variação da voltagem na saída da ponte é tratada a fim de definir a força atuante na peça, obtida através de uma calibração direta.

É importante ressaltar que a instalação de extensômetros é uma atividade minuciosa que requer tempo de instalação e acesso adequado ao local. A sua instalação deve ser realizada com cautela para que os resultados sejam condizentes e gerem resultados adequados para a aplicação.

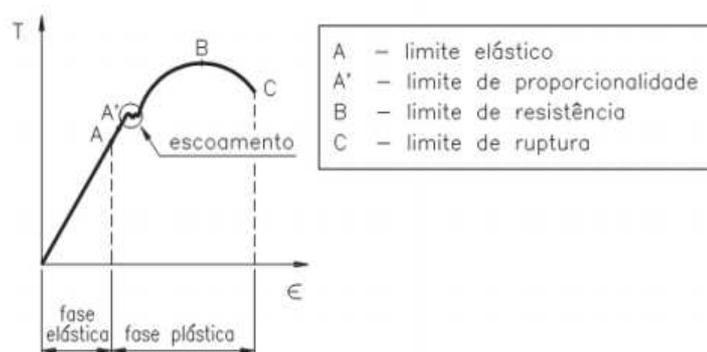
Foi realizada pesquisa bibliográfica e um estudo de caso em uma empresa do setor de ensaios e instrumentação localizada no município de Gavião Peixoto-SP. O trabalho propõe a instrumentação de um Link para medição de forças atuantes no corpo exercendo tração e compressão, utilizando Strain Gages com grades de 350Ω da fabricante *Vishay Micro-Measurements* dispostos em uma ponte de Wheatstone completa e alimentados com 5Vdc por uma fonte regulada. Após a instrumentação foi aplicada uma calibração direta para correlacionar uma unidade de engenharia em força (quilograma-força, Kgf) com a saída da ponte (milivolts, mV).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CURVA DE DEFORMAÇÃO

Para se obter o nível de tensão atuante diante da condição de operação de um equipamento, se faz necessário uma instrumentação com sensores que são colocados na superfície de uma peça os quais são responsáveis por medir a deformação, a partir da resposta dos sensores conseguimos mensurar o valor da força externa que está sendo aplicada sobre a peça, a única regra para que a medida seja representativa é que a deformação do material se mantenha em sua fase elástica. (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004).

Figura 1 Região plástica, elástica e escoamento



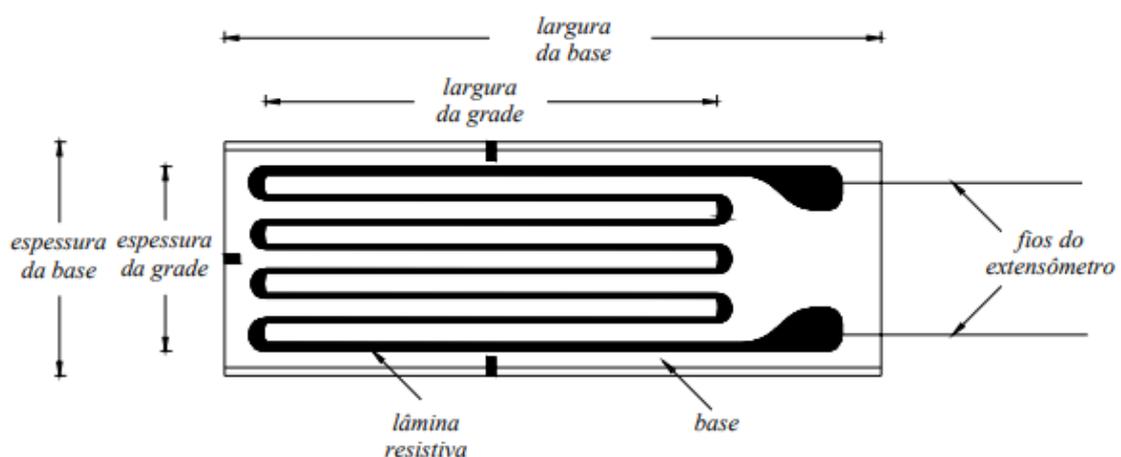
Fonte: ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004

Na Figura 1 é possível observar que a curva mostra o comportamento de um material com relação a deformação (ϵ) quando aumentamos a tensão (T) aplicada. Durante a fase elástica o material consegue voltar a sua forma original quando não temos mais forças de tração atuando sobre ele, porém, se mantivermos o aumento da força entraremos no limite de escoamento que é o ponto onde se produz um alongamento muito rápido do material sem que varie a tensão aplicada, e após, o material entra em sua fase plástica que é a região onde não temos o seu retorno a forma original. Para este estudo, o Link a ser instrumentado vai respeitar uma calibração com limites de carga que garantem o trabalho da peça apenas em sua fase elástica, assim, respeitando também a deformação limite para a grade resistiva do sensor (Strain Gage).

2.2 SENSOR DE DEFORMAÇÃO (STRAIN GAGE)

Os Strain Gages são os sensores mais flexíveis para este tipo de instrumentação, são encontrados em diversas disposições para posicionamento durante a colagem. Ele consiste de uma base isolante e uma resistência elétrica bem fina, podendo ser de fio ou de lâmina, se baseiam na variação da resistência elétrica. (HOFFMANN, Karl, 2012). A Figura 2 apresenta as principais características do Strain Gage identificando suas principais composições como: base do sensor e grade resistiva.

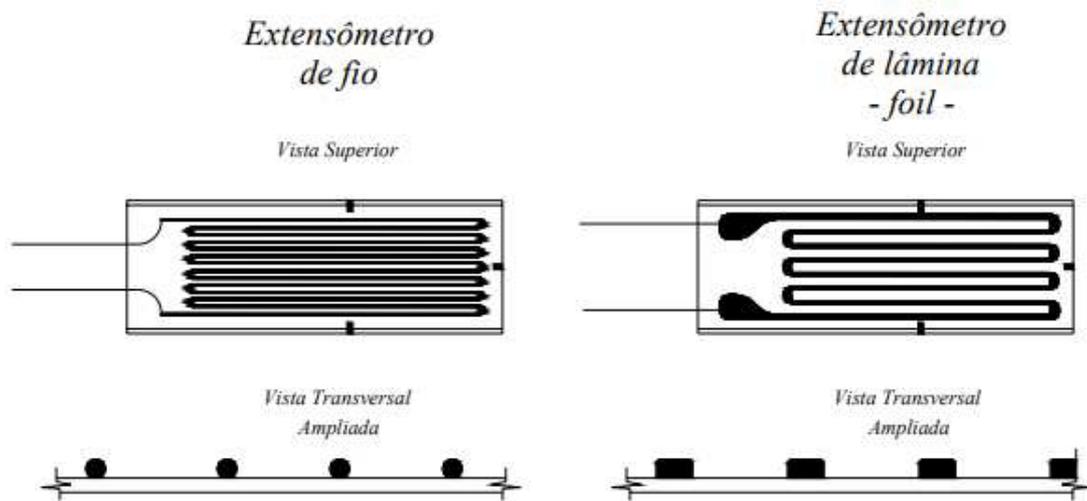
Figura 2 Características do Strain Gage



Fonte: ANDOLFATO e CAMACHO e BRITO, 2004

Aplicando um corte transversal na grade do sensor é possível analisar a diferença do extensômetro de fio em relação ao extensômetro de lâmina, como mostra a Figura 3 abaixo.

Figura 3 Strain Gage de fio e lâmina

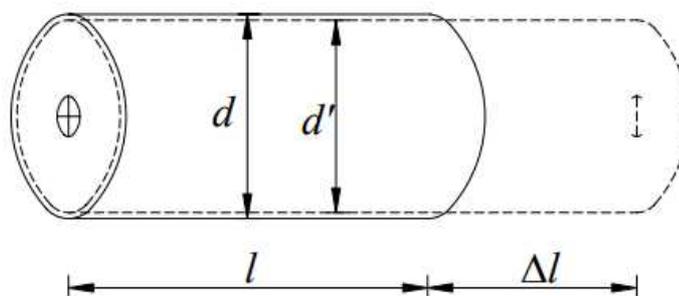


Fonte: ANDOLFATO e CAMACHO e BRITO, 2004

2.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE DEFORMAÇÃO

Em 1856, William Thomson apresentou à Royal Philosophical Society de Londres os resultados de um experimento envolvendo a resistência elétrica do cobre e ferro quando submetidos a estresse. As observações de William foram consistentes com a relação entre resistência elétrica e algumas propriedades físicas de um condutor. (PORTINOI, M, 2001).

Figura 4 Deformação de um fio sob tração



Fonte: ANDOLFATO e CAMACHO e BRITO, 2004

A Figura 4 mostra o comportamento de um fio quando é submetido à força de tração, basicamente, mostra como a resistência do condutor é alterada nos extensômetros. O l é o

comprimento inicial sem sofrer deformação, e esse apresenta uma resistência elétrica, R . A linha pontilhada representa o fio após a deformação causada pela força de tração, resultando em um fio alongado, o comprimento agora é igual a $l + \Delta l$ e resistência igual a $R + \Delta R$.

A resistência elétrica é definida por:

$$R = (\rho \cdot L / A) \quad (1)$$

Onde:

R = resistência elétrica (Ω)

ρ = resistividade do material ($\Omega \cdot \text{mm}^2$)

L = comprimento do fio (m)

A = área da seção transversal do fio (mm^2)

Com o procedimento de colagem sendo realizado corretamente, tem-se o Strain Gage se deformando nas mesmas proporções da peça em teste, assim, sua resistência diminuirá com a peça sendo comprimida e aumentará com a peça sendo tracionada.

A razão da deformação total sofrida pelo comprimento original é definida como strain e por ser muito pequena seu valor é normalmente expresso em micro-strain (strain $\times 10^{-6}$). (OMEGA ENGINEERING, 1999).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Onde:

ε = deformação (adimensional)

L = comprimento do fio (m)

A sensibilidade do Strain Gage pode ser definida pela razão entre a mudança fracional na resistência e a mudança fracional no comprimento (deformação), ou seja, é o quanto de resistência que irá variar para quanto de variação no comprimento da peça onde o sensor está

instalado. A sensibilidade pode ser calculada como segue abaixo, mas também é fornecida pelo fabricante a qual é definida como Gage Factor (GF).

$$GF = (\Delta R/R) / (\Delta L/L) \quad (3)$$

Onde:

R = resistência elétrica (Ω)

L = comprimento do fio (m)

2.3 COEFICIENTE DE POISSON

A relação entre a deformação transversal relativa e a deformação longitudinal relativa é definida como Coeficiente de Poisson (ν). É uma grandeza sem dimensões que relaciona a variação longitudinal e transversal de uma peça quando submetida à uma força de tração ou compressão. (UNICAMP, 2010).

A determinação do Coeficiente de Poisson efetua-se em máquinas de ensaios de tração, sendo necessários dois dispositivos de medida de grande sensibilidade, um para medir a deformação transversal e o outro para medir a deformação longitudinal.

$$\text{Coeficiente de Poisson} = (\Delta e/e_0) / (\Delta l/l_0) \quad (4)$$

Onde:

Δe – variação da dimensão transversal

e_0 – dimensão transversal inicial

Δl – variação da dimensão longitudinal

l_0 – dimensão longitudinal inicial

O coeficiente de Poisson varia com o tipo de material, como se pode verificar na tabela a seguir:

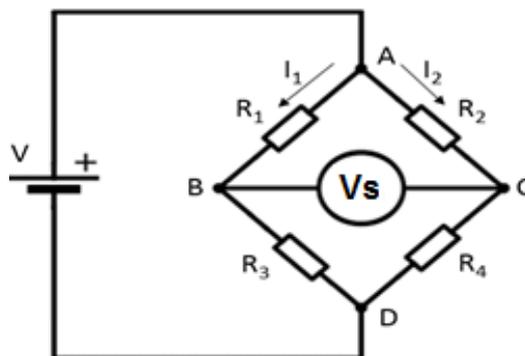
Tabela 1 Pontos coletados na calibração

COEFICIENTE DE POISSON DE ACORDO COM MATERIAL	
Material	Coefficiente de Poisson
Cobre	0,34
Alumínio	0,33
Titânio	0,34
Ferro	0,30
Aço	0,30
Magnésio	0,29

Fonte: UNICAMP, 2010

2.4 PONTE DE WHEATSTONE

A ponte de Wheatstone serve para converter a variação de resistência em uma saída em voltagem que é proporcional à força aplicada. (LIMA, Thiago, 2014). É composta por quatro elementos resistivos, podendo ser montada em três diferentes configurações: um quarto de ponte onde apenas um dos elementos é ativo, meia ponte onde dois elementos são ativos e ponte completa onde todos elementos são ativos (Figura 5). Através do desbalanceamento da ponte que será resultado da variação da resistência dos sensores, tem-se uma diferença de potencial na saída. Na Figura 5, os pontos A e D são conectados à fonte de alimentação, e os pontos B e C são a saída de sinal da ponte. Há uma variação (na casa de milivolts) de acordo com o desbalanceamento da mesma.

Figura 5 Ponte de Wheatstone

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, 2017

Para calcular o valor da saída (V_s) que é um sinal diferencial entre o ponto B e o ponto C, analisa-se cada braço da ponte separadamente. Considerando o primeiro braço com R1 e R3 a voltagem no ponto B será:

$$V_B = V \times R_3 / R_1 + R_3 \quad (5)$$

Para o segundo braço com R2 e R4 a voltagem no ponto C será:

$$V_C = V \times R_4 / R_2 + R_4 \quad (6)$$

Fazendo a diferença da voltagem no ponto B com a voltagem do ponto C ($V_B - V_C$), tem-se a voltagem de saída (V_s) normalmente medida na ordem de milivolts (mV).

2.5 CALIBRAÇÃO

A calibração é um procedimento que pode ser definido como conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um equipamento de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. (ACC PR ENGENHARIA DE MEDIÇÃO, 2012).

Em outras palavras, a calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados no processo de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. (SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA, 2016).

Com o processo de calibração será possível definir os valores em unidade de engenharia para força, correlacionando com o desbalanceamento da Ponte de Wheatstone, e assim, fazer uma análise da curva gerada através da aplicação de carga com o padrão de calibração.

3 DESENVOLVIMENTO

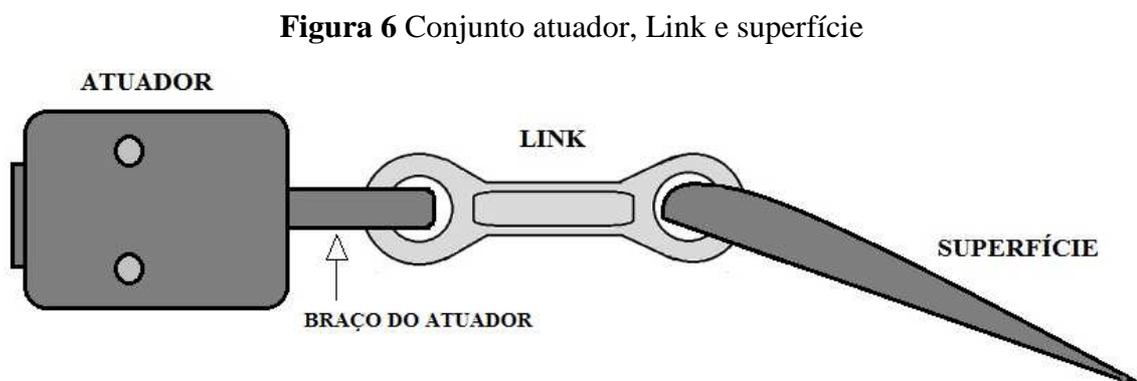
As etapas do desenvolvimento foram divididas em apresentação da peça que foi instrumentada, o Link, mostrando sua função num regime de operação, segunda etapa foi definição da configuração da Ponte de Wheatstone, terceiro, definição do modelo do sensor de deformação, quarta etapa mostra o fechamento da Ponte, em como os sensores de deformação foram dispostos na Ponte. Na quinta e sexta etapa mostra a definição do adesivo e o processo de colagem do sensor, por fim, na última etapa mostra a calibração feita no Link para definir as forças atuantes a partir da medição da deformação da peça.

O desenvolvimento foi todo realizado na empresa Embraer em Gavião Peixoto-SP, no setor de ensaios e instrumentação durante o primeiro semestre do ano de 2018.

3.1 O LINK

O componente a ser instrumentado consiste em uma interface de conexão entre dois pontos, no caso, esse Link fica responsável por interligar um atuador à uma superfície de movimentação, assim, a peça onde os sensores ficaram instalados fica entre o atuador e a superfície.

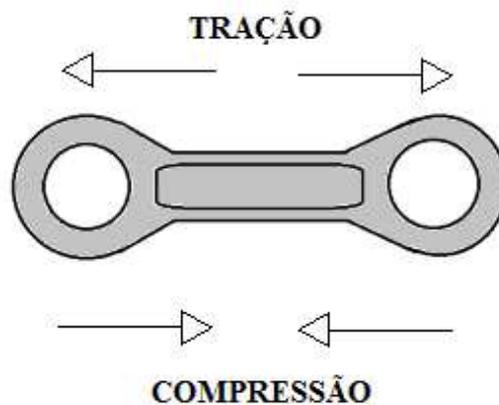
Abaixo segue uma ilustração de como é feita montagem do conjunto quando em regime de operação, representada pela Figura 6.



Fonte: Própria, 2018

Para movimentar a superfície o braço do atuador exerce o movimento de empurrar e de puxar o Link, são esses dois movimentos que caracterizam o regime de trabalho desse conjunto. Com isso, o Link sofre forças de tração e compressão quando a superfície é atuada, e a instrumentação proposta será para medir essas duas tensões na peça. A Figura 7 representa a atuação das forças de tração e compressão sobre o Link.

Figura 7 Forças tração e compressão



Fonte: Própria, 2018

3.2 DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE PONTE

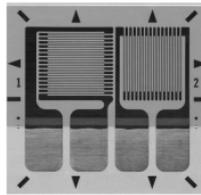
Um dos desafios a se vencer ao configurar a Ponte é com relação a temperatura. Esse fator influencia altamente na medição realizada pelo Strain Gage, além do material resistivo sofrer alteração, o corpo que foi instrumentado também sofre dilatação ou retração com a variação de temperatura. Com isso, é realizado a leitura de um falso sinal, tendo que essa variação se dá apenas pelo aquecimento ou resfriamento da peça e não pela força aplicada no corpo. Para eliminar esse efeito da temperatura, são utilizados os Strain Gages na configuração de ponte de Wheatstone completa, com o fechamento da ponte de forma correta, podemos compensar esse efeito automaticamente. Na configuração de ponte completa, os sensores devem estar dispostos de modo a aumentar a sensibilidade da ponte.

3.3 DEFINIÇÃO DO MODELO DO SENSOR

Conhecendo a geometria do corpo de prova a ser instrumentado, estudamos qual seria o melhor modelo de Strain Gage a ser utilizado que teria a maior sensibilidade para

proporcionar uma melhor saída de nível de voltagem que foi o CEA-06-125UT-350 da fabricante Vishay, o mesmo possui duas grades resistivas em cada Strain Gage, uma sendo para a medição da tensão atuante na peça e a outra para medir o Coeficiente de Poisson, que se refere ao valor absoluto da relação entre as deformações transversais e longitudinais em um eixo de tração axial.

Figura 8 Strain Gage CEA-06-125UT-350

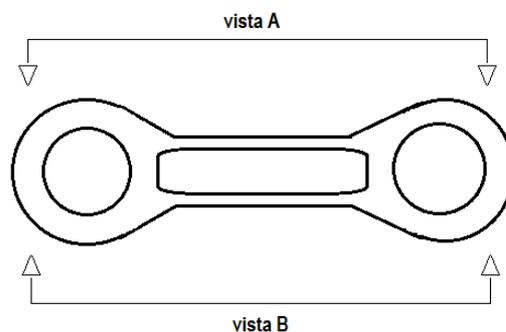


Fonte: Vishay Micro-Measurements

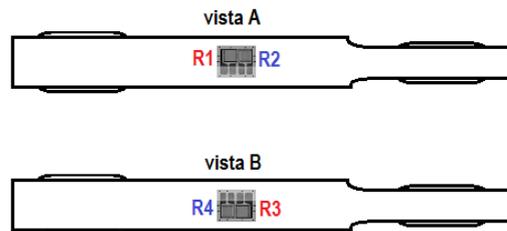
3.3 FECHAMENTO DA PONTE DE WHEATSTONE

O fechamento em ponte completa utiliza os quatro elementos resistivos como ativos, ou seja, as quatro resistências da ponte de Wheatstone serão grades de Strain Gages variando seus valores resistivos de acordo com a deformação do Link. A Figura 9 mostra os cortes das vistas “A” e “B” e a Figura 10 mostra o posicionamento dos sensores na peça de acordo com as vistas “A” e “B”.

Figura 9 Cortes da peça

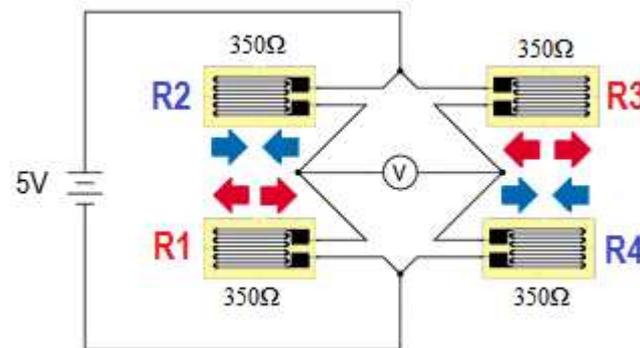


Fonte: Própria, 2018

Figura 10 Posicionamento dos sensores

Fonte: Própria, 2018

Ao representar as grades dos sensores na ponte completa, tem-se a seguinte configuração conforme a Figura 11.

Figura 11 Representação dos sensores na ponte de Wheatstone

Fonte: Própria, 2018

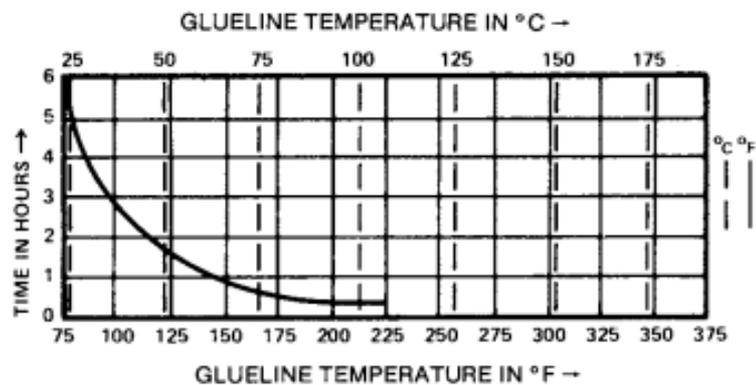
Os sensores R1 e R3 são os que tiveram suas grades posicionadas no sentido da força aplicada, ou seja, são os Strain Gages cuja deformação será de acordo com o alongamento e encurtamento da peça. Os sensores R2 e R4 foram posicionados perpendicularmente ao sentido da força, então, esses sensores serão responsáveis por medir o coeficiente de Poisson que é a deformação transversal e proporcional a deformação longitudinal, no caso do aço que é o material em uso neste trabalho, corresponde a uma deformação de aproximadamente 30% em relação a deformação longitudinal.

3.4 DEFINIÇÃO DO ADESIVO

O adesivo utilizado foi o AE-10, uma mistura entre agente principal e catalizador que forma uma resina epóxi resistente e que aumenta a vida útil da instrumentação, essa cola é

específica para instrumentação com Strain Gages, o que significa que a mesma consegue transferir de forma aceitável as deformações sofridas pela peça para o sensor, sem isso, não seriam confiáveis as medidas lidas após a colagem, pois, a variação de resistência não representaria exatamente a deformação sofrida pelo Link. A cura foi realizada a uma temperatura de 50°C por 2 horas, como recomenda o fabricante (*Vishay Micro-Measurements*).

Figura 12 Curva de cura AE-10



Fonte: Vishay Micro-Measurements

3.5 PROCESSO DE COLAGEM

O processo de colagem de um Strain Gage é muito delicado, tem-se um processo de preparação da superfície para remover resíduos aderidos a peça e também remover imperfeições da área de posicionamento do sensor. Todo o processo foi executado de acordo com as etapas a seguir:

- Desengraxe da superfície;
- Abrasão física e Química da superfície;
- Marcação para posicionamento do Strain Gage;
- Neutralização da superfície.

Após a última etapa de preparação da superfície (neutralização), foram posicionados os dois Strain Gages na área demarcada anteriormente com uma fita celofane de baixa aderência. Após, a fita é levantada parcialmente para a aplicação da cola sobre toda área do sensor para ser pressionado contra a superfície e proporcionar a colagem. Para manter uma força constante

sobre o sensor durante o processo de cura, foi utilizado um grampo juntamente com uma pequena chapa de alumínio de 3mm de espessura sobre uma almofada de silicone.

Passadas 2 horas o dispositivo de aplicação de força foi removido e a colagem foi analisada cuidadosamente. Constatou-se que não obtivemos nenhuma irregularidade no processo, como por exemplo, bolhas provocadas pela cola o que invalidaria a colagem. A próxima etapa foi o fechamento da Ponte de Wheatstone.

O fechamento da Ponte foi realizado com o fio de cobre esmaltado, que é próprio para instrumentações com Strain Gages da fabricante *Vishay Micro-Measurements*.

Figura 13 Fio de cobre esmaltado



Fonte: Vishay Micro-Measurements

As Figuras 14, 15 e 16 mostram o Link com a instrumentação finalizada.

Figura 14 Lado “A” com o Strain Gage colado



Fonte: Própria, 2018

Figura 15 Lado “B” com o Strain Gage colado



Fonte: Própria, 2018

Figura 16 Terminal de interligação dos fios para fechamento da ponte



Fonte: Própria, 2018

3.6 CALIBRAÇÃO

Para se obter a correlação da saída em voltagem (mV) da Ponte de Wheatstone com uma unidade de engenharia em força, no caso o Kgf, foram aplicados valores conhecidos a partir de um padrão de entrada. Esse tipo de calibração é denominado calibração direta, onde a grandeza padrão é aplicada diretamente ao sistema de medição.

A faixa utilizada para gerar os pontos da curva de calibração foi de 1020 Kgf negativos até 3855 Kgf positivos. Os valores positivos representam a força sendo aplicada com tração e os valores negativos para compressão.

Para cada escala do instrumento padrão é realizado um registro individual da leitura, o que é muito importante para verificação do processo de validação. Pode-se analisar os resultados gerados para afirmar se o instrumento satisfaz os requisitos de linearidade e se apresenta erros dentro dos limites aceitáveis.

Antes do registro dos pontos para cada carga aplicada, são feitos ciclos de acomodação da peça que está sendo calibrada para eliminação ou diminuição de fenômenos como a histerese, que provoca um erro nos dados obtidos durante o processo de medição. No caso, utilizou-se três (3) ciclos submetendo o Link com cargas máximas da faixa de calibração para acomodação da instrumentação.

4 RESULTADOS

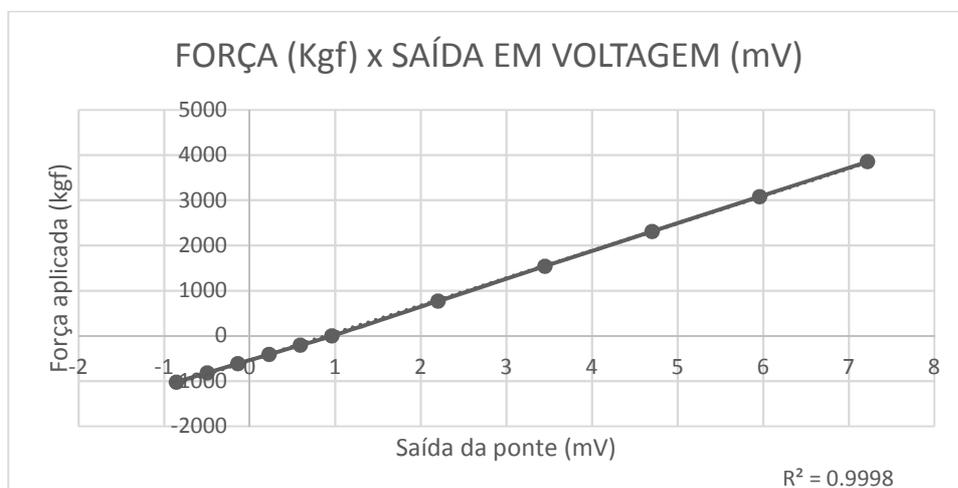
Ao alimentar a Ponte de wheatstone com 5 Volts diferenciais (-2,5V e +2,5V) e medir sua saída com o multímetro, verificou-se seu funcionamento aplicando forças manuais de tração e compressão no Link, a instrumentação responde variando seu sinal em voltagem na saída de acordo com a carga aplicada. Com a peça em repouso e medindo a saída da ponte o valor do offset é de 0,96mV, o que mostra que a mesma apresenta um desequilíbrio mesmo com a ausência da aplicação de forças no Link, ou seja, os valores de resistência dos Strain Gages já estão alterados devido ao processo de colagem, onde aplicou-se uma pressão sobre os Strain Gages no processo de cura do adesivo (AE-10).

Após a montagem do Link instrumentado no padrão de calibração iniciou-se a aplicação de carga na peça, sendo os valores positivos de voltagem (mV) na saída da ponte correspondentes a tração e os valores negativos correspondentes a compressão. Antes de dar início a coleta dos pontos alguns ciclos de acomodação foram aplicados na peça e após, o registro dos pontos efetivos da calibração.

Percebeu-se uma boa linearidade da instrumentação de acordo com que as cargas iam sendo aplicadas, o que é uma característica muito positiva e que vai garantir uma leitura precisa da medida quando a peça estiver sendo submetida às forças em seu local de atuação.

A Figura 17 mostra o resultado da calibração, a curva correlacionando a força aplicada (Kgf) no eixo y, com a saída em milivolts (mV) da ponte de Wheatstone no eixo x.

Figura 17 Curva de calibração



A linearidade da correlação é justificada pelo R-quadrado (R^2) que é o coeficiente de determinação, responsável por indicar o quanto o modelo (conjunto Link mais sensores colados na superfície do mesmo) consegue explicar os valores observados, esse varia entre zero (0) e um (1), quanto mais próximo de um (1) mais representativo é o modelo. Observa-se que a instrumentação realizada sendo submetida ao processo de calibração apresenta um R^2 de 0,9998, o que é muito próximo de um (1).

A curva foi gerada a partir dos seguintes pontos coletados durante a calibração:

Tabela 2 Pontos coletados na calibração

PONTOS DE CALIBRAÇÃO		
Ponto	Força aplicada (kgf)	Saída da ponte (mV)
1	-1020.016	-0.855
2	-816.014	-0.495
3	-612.01	-0.136
4	-408.007	0.229
5	-204.003	0.592
6	0	0.96
7	771.013	2.201
8	1542.025	3.451
9	2313.038	4.704
10	3084.05	5.961
11	3855.063	7.221

Fonte: Própria, 2018

A instrumentação com Strain Gages mostrou-se uma opção vantajosa para leituras de medidas de força e deformação, apresentou linearidade em resposta as aplicações de carga e apesar de levar um tempo razoável para se fazer a instrumentação com todo o processo de colagem, o sensor é pouco intrusivo, leve e de baixo custo.

A leitura do sinal de saída feita com um multímetro, pode ser implementada sendo feita através de um amplificador de instrumentação para condicionamento do sinal trabalhando como conversor analógico-digital e um possível trabalho com software para monitorar as forças em tempo real com o valor em unidade de engenharia, um exemplo é o software LabView que funciona com o sistema operacional Windows.

5 CONCLUSÃO

Após a avaliação e discussão dos resultados conclui-se que a proposta inicial foi cumprida, a instrumentação se comportou muito bem durante os testes e a calibração, apresentou linearidade em sua curva o que proporciona precisão na leitura do sinal quando a peça for submetida às forças de tração e compressão em seu local de atuação.

Estudando os extensômetros elétricos (Strain Gages) e suas técnicas de colagem pôde-se definir a melhor configuração para converter as deformações da peça para um sinal analógico através da Ponte de Wheatstone, que oferece em sua saída uma voltagem variável em milivolts (mV) de acordo com a variação de resistência dos sensores, e com a calibração definiu-se uma correlação para uma análise em unidade de engenharia (Kgf).

O resultado da calibração foi muito satisfatório, através do coeficiente de determinação (R^2) pode-se verificar a grande vantagem de usar extensômetros elétricos em uma instrumentação para medição de cargas atuantes sobre uma determinada peça.

Para maior desenvolvimento didático pode-se utilizar um amplificador de instrumentação para fazer a leitura do sinal da ponte convertendo para digital e transmitindo para um computador com um software onde podemos carregar a curva de calibração e visualizar a medida de uma forma dinâmica em unidade de engenharia.

REFERÊNCIAS

3D CAE. **Extensometria**. Disponível em: <<http://3dcaeengenharia.com.br/extensometria/>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

ACC PR ENGENHARIA DE MEDIÇÃO. **O que é calibração e sua importância no processo e na qualidade**. Disponível em: <<http://www.accpr.com.br/o-que-e-calibracao-e-sua-importancia-no-processo-e-na-qualidade/>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

ANDOLFATO, R.; CAMACHO, J.; BRITO, G. **Extensometria Básica**. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

HOFFMANN, Karl. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Disponível em: <http://www.kk-group.ru/help/Strain_Gauge_Measurements_Book_2012_01.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2018.

LIMA, Thiago. **Ponte de Wheatstone**. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/ponte-de-wheatstone>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Medições de deformação com Strain Gages**. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt>>. Acesso em: 08 abr. 2018.

OMEGA ENGINEERING, INC. **The Strain Gage**. Disponível em: <<http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

PORTINOI, M. **Extensometria: história, usos e aparelhos**. Disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA. **Calibração**. Disponível em: <<http://bom.org.br:8080/jspui/bitstream/2050011876/248/1/08%20Calibra%C3%A7%C3%A3o%20.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

UNICAMP. **Coefficiente de Poisson**. Disponível em: <www.fem.unicamp.br/~assump/Projetos/2010/g3.ppt>. Acesso em: 02 jul. 2018.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Datasheet Strain Gage**. Disponível em: <<http://www.vishaypg.com/docs/11230/125ut.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Datasheet Strain Gage Adhesive**. Disponível em: <<http://www.vishaypg.com/docs/11011/bondae10.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Wire, Cable and Accessories**. Disponível em: <<http://www.vishaypg.com/docs/11024/wire-accessories.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2018.