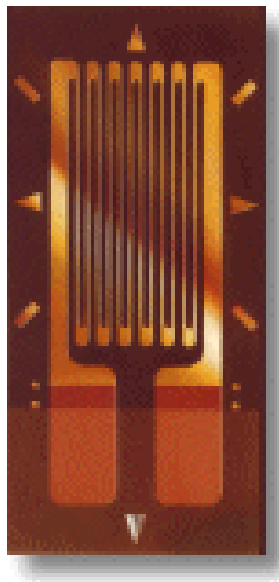




Extensometria Básica



**Autores: Rodrigo Piernas Andolfato
Jefferson Sidney Camacho
Gilberto Antônio de Brito**

1 INTRODUÇÃO

Os medidores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, e são usados usualmente entre os engenheiros de instrumentação. O extensômetro é a unidade fundamental destes dispositivos.

Diferentes métodos de inspeção não destrutivos para medidas de tensões têm sido explorados e desenvolvidos, mas nenhum outro dispositivo tem uma utilização mais ampla do que os extensômetros com relação à sua aplicabilidade. Isto devido à precisão das medidas, facilidade de manipulação e da capacidade do mesmo de monitorar as deformações até as cargas últimas em ensaios destrutivos.

Extensômetros são usados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida é realizada colando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Assim, isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação. Os extensômetros fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade elétrica. As características das medidas com extensômetros são resumidas abaixo:

- Alta precisão de medição;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Fácil utilização desde que conhecida a boa técnica;
- Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo desde que utilizado tratamento apropriado;
- Usados como elementos transdutores para medidas de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);
- Possibilita a medida em locais remotos;

- A saída (sinal analógico, ou após transformação em sinal digital) pode ser aplicada à engenharia de controle.

Esta apostila apresenta explicações do conhecimento fundamental sobre extensômetros, bem como as técnicas de medição e colagem.

2 OS EXTENSÔMETROS

2.1 Princípio de funcionamento:

2.1.1 A relação tensão-deformação (lei de Hooke)

Se um dado material é tracionado, a força aplicada no material é proporcional à deformação causada na região elástica, mantendo uma relação constante entre a magnitude da força externa e a quantidade de deformação. Isto implica no fato de que a força para contrabalançar a ação externa é gerada internamente no material, e a magnitude de força por unidade de área é chamada de tensão. A tensão é um vetor, tendo uma magnitude e uma direção e expressa em termos de kgf/cm^2 ou qualquer outra relação de força por unidade de área. Como símbolo para tensão, σ é usado para indicar tensões verticais, e τ tensões cisalhantes.

Comumente os materiais têm a propriedade de se alongar quando tracionados e de encolher quando comprimidos. Suponha que um material é tracionado, e a quantidade de alongamento seja dada por Δl enquanto que o comprimento original seja l . A relação de alongamento $\Delta l/l$ é chamada deformação não apresentando dimensão.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Equação 1

A Figura 1 mostra a relação entre tensão e deformação de um corpo de prova de aço doce submetido a um carregamento de tração. A tensão é proporcional à deformação entre a origem e o ponto a , onde uma inclinação aproximadamente linear é obtida. Esta é a chamada

região elástica onde se aplicam as leis de Hooke. A relação tensão-deformação na região elástica é dada pela seguinte equação:

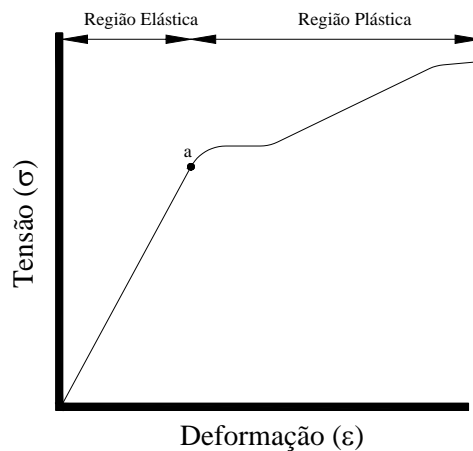


Figura 1 - Curva tensão-deformação

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E$$

Equação 2

Onde E é uma constante de proporcionalidade, a qual é referida como módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young.

2.1.2 Princípio dos extensômetros

O extensômetro é baseado no fato de que os metais mudam sua resistência elétrica quando sofrem uma deformação.

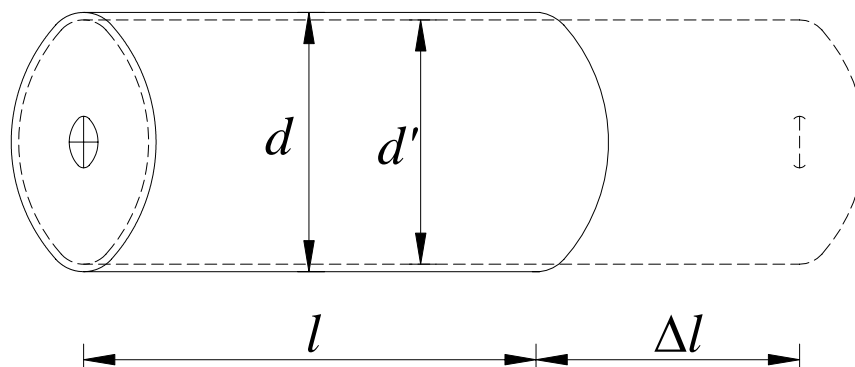


Figura 2 - Deformação de um fio sob tração.

Na Figura 2 a linha contínua mostra parte de um fio metálico, como usado nos extensômetros, onde l é o comprimento original antes da deformação, e este apresenta uma resistência elétrica, R . A linha pontilhada apresenta o fio metálico alongado, seu comprimento agora igual a $l + \Delta l$ e resistência igual a $R + \Delta R$. A resistência elétrica R é dada por:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

- A : área da seção transversal do fio;
- ρ : resistividade do material do fio.

Para obter uma mudança relativa na resistência, os logaritmos para todos os membros da equação devem ser diferenciados. Primeiramente tira-se o logaritmo, e então, faz-se a derivada.

$$\ln R = \ln \left(\rho \cdot \frac{l}{A} \right) \therefore \ln R = \ln \rho + \ln l - \ln A \quad \text{Equação 4}$$

Resultando na expressão:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad \text{Equação 5}$$

Onde a área da seção transversal de um círculo como mostrado na Figura 2 será dada por:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \text{Equação 6}$$

Para extensômetros de lâmina (*foil*), que apresentam seção retangular, a expressão será:

$$A = b \times t \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

- b : largura da seção retangular;
- t : espessura da lâmina.

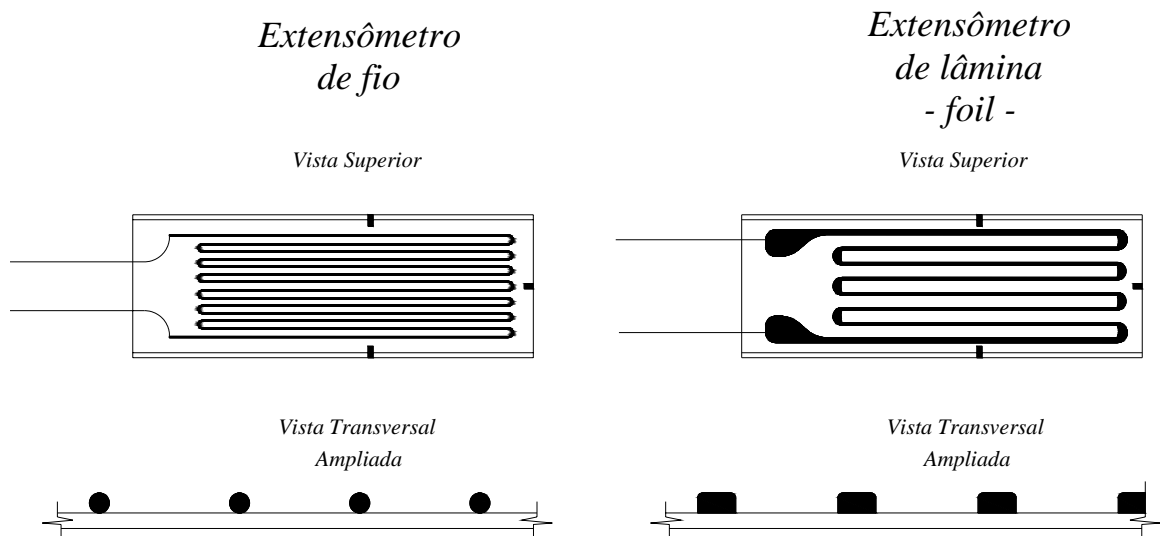


Figura 3 - Extensômetros elétricos de resistência.

Suponha que o comprimento do fio, l , na Figura 2 é alongado por uma tensão de tração, e o diâmetro original, d , seja comprimido à d' , igual ao efeito dado pelo coeficiente de Poisson, e então:

$$\ln A = \ln\left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2\right) \therefore \ln A = \ln \frac{\pi}{4} + \ln d^2 \therefore \ln A = \ln C + 2 \cdot \ln d \quad \text{Equação 8}$$

Tirando a derivada da Equação 8, tem-se:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = 2 \cdot \frac{d' - d}{d} = -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{Equação 9}$$

O mesmo pode ser feito para a seção retangular, chegando a:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta t}{t} = -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{Equação 10}$$

Onde, ν é o coeficiente de Poisson. Agora, substituindo a **Equação 9** ou a **Equação 10** na **Equação 5**, tem-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} = (2 \cdot \nu + 1) \cdot \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{Equação 11}$$

Onde, $\Delta l/l$ não é nada mais que a deformação, ε , e finalmente pode-se escrever a **Equação 11** da seguinte forma:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \right) = (2 \cdot \nu + 1) + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} / \varepsilon \right) \quad \text{Equação 12}$$

A mudança na resistividade elétrica, ρ , ocorre proporcionalmente com a mudança volumétrica do material, de modo que:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = m \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad \text{Equação 13}$$

E que:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta l}{l} + \left(-2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \right) = (1 - 2 \cdot \nu) \frac{\Delta l}{l} = (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \varepsilon \quad \text{Equação 14}$$

Substituindo a **Equação 14** na **Equação 13** e em seguida na **Equação 12**, tem-se:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \right) = (2 \cdot \nu + 1) + [m(1 - 2 \cdot \nu)] = (1 + m) + 2\nu(1 - m) \quad \text{Equação 15}$$

Na **Equação 13**, m é uma constante proporcional, que é determinada experimentalmente. A maioria dos materiais resistivos comumente usados em extensômetros são ligas de cobre e níquel, onde m é aproximadamente igual à unidade, o que leva a parte direita da **Equação 15** ser aproximadamente igual a dois.

$$\frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\varepsilon} \cong 2$$

Equação 16

O valor definido pela **Equação 16** é chamado de sensibilidade à deformação do material metálico, e geralmente expressa pelo símbolo K . Uma vez que o valor de K é determinado dependendo do material resistivo usado para o extensômetro, a **Equação 16** pode ser mudada para:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$$

Equação 17

A qual indica que a mudança relativa na resistência é proporcional à magnitude da deformação medida. Então, é desejável que o material resistivo tenha um valor da constante K sem correlação com a magnitude da deformação. O valor de K para semicondutores simples de cristais usados como elementos sensores de deformação, exibe uma resistividade variável com a magnitude da tensão imposta a ele, conforme a **Equação 18**:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi l \cdot \sigma$$

Equação 18

π é chamado coeficiente piezo-resistivo, o qual apresenta valores diferentes dependendo da direção dos eixos dos cristais.

O elemento sensor de deformação de um extensômetro é disposto formando uma grade de material resistivo em uma pequena área fornecendo uma dada resistência, usualmente 120Ω . A sensibilidade à deformação K corresponde ao fator do extensômetro, K_s , o qual correlaciona a deformação no membro ensaiado, com a mudança na resistência relativa no medidor.

As explicações acima cobrem todo o mecanismo de mudança de resistência com relação à deformação. No item seguinte será apresentado detalhes dos métodos disponíveis para conversão de deformação em uma mudança de voltagem elétrica equivalente.

2.1.3 Princípio do circuito de medição

Circuitos elétricos especiais são empregados para medidas de deformação com extensômetros montados em corpos de prova, em outras palavras, para medir as variações de resistência dentro de um circuito elétrico. O circuito é geralmente chamado de ponte de *Wheatstone*. Este é o circuito mais frequentemente usado e o que apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência.

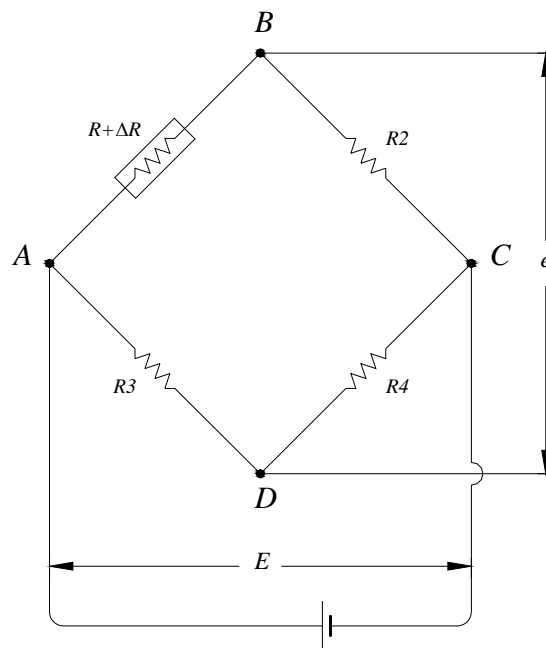


Figura 4 - Circuito em ponte de Wheatstone.

Da física elementar sabe-se que os resistores em série são divisores de tensão (vtagem) e que a tensão entre os resistores em paralelo não varia, sendo a corrente que varia neste caso. Ainda da física elementar, para dois resistores em série com uma tensão de alimentação aplicada a eles conforme mostra a Figura 5 a tensão entre o ponto *A* e *D* é chamada de e_{AD} , e apresenta valor igual a:

$$e_{AD} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \cdot E \quad \text{Equação 19}$$

Analogamente para o outro circuito da Figura 5 a tensão entre o ponto *A* e *B* é chamada de e_{AB} , e apresenta valor igual a:

$$e_{AB} = \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R2} \right] \cdot E \quad \text{Equação 20}$$

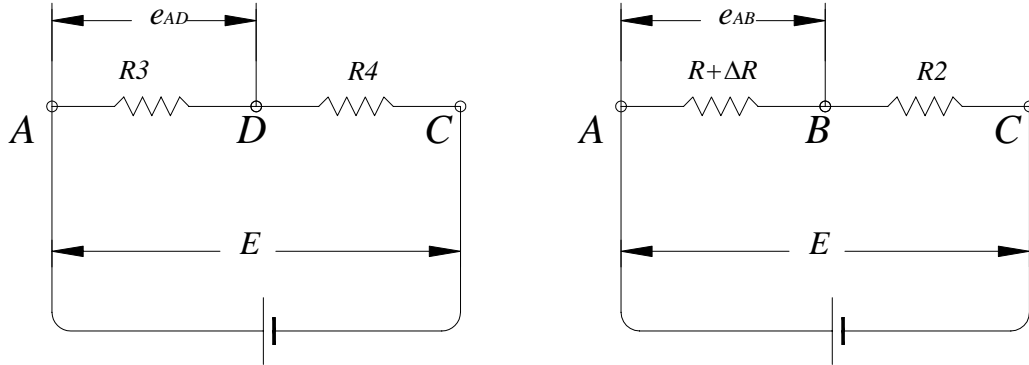


Figura 5 - Circuito de resistores em série.

Colocando os dois circuitos da Figura 5 em paralelo, obtém-se exatamente a ponte de *Wheatstone* da Figura 4, onde a diferença de potencial entre os pontos *D* e *B* será a diferença entre e_{AD} e e_{AB} , que nada mais é que o valor de e que se pretende medir. Supondo agora que na Figura 4, R é a resistência do extensômetro e $R2$, $R3$ e $R4$ são resistores fixos e uma voltagem elétrica, E , é aplicada no circuito da ponte, e supondo ainda que o extensômetro sofra uma deformação e a resistência mude para $R + \Delta R$, então existirá uma voltagem elétrica, e , gerada nos terminais de saída da ponte, conforme:

$$e = e_{AD} - e_{AB} = \left[\frac{R3}{R3 + R4} - \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R2} \right] \cdot E \quad \text{Equação 21}$$

Se $R = R2 = R3 = R4$, a Equação 21 pode ser reescrita como:

$$e = \left[\frac{+\Delta R}{2 \cdot (2R + \Delta R)} \right] \cdot E \quad \text{Equação 22}$$

Uma vez que $2R \gg \Delta R \therefore 2R + \Delta R \cong 2R$, e assim tem-se:

$$e \cong + \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad \text{Equação 23}$$

A partir disso, percebe-se que a voltagem de saída da ponte, e , é proporcional à variação relativa na resistência do extensômetro. Substituindo a Equação 23 na Equação 17, tem-se:

$$e \cong \pm \frac{E}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \quad \text{Equação 24}$$

Assim, fica claro que e é proporcional à deformação, ε . Portanto para se determinar o valor da deformação, é necessário apenas medir a voltagem de saída da ponte.

O funcionamento da ponte de Wheatstone é de mais fácil compreensão quando é feita uma analogia desta com a chamada ponte hidráulica. Um esquema gráfico das duas pontes é apresentado na Figura 7.

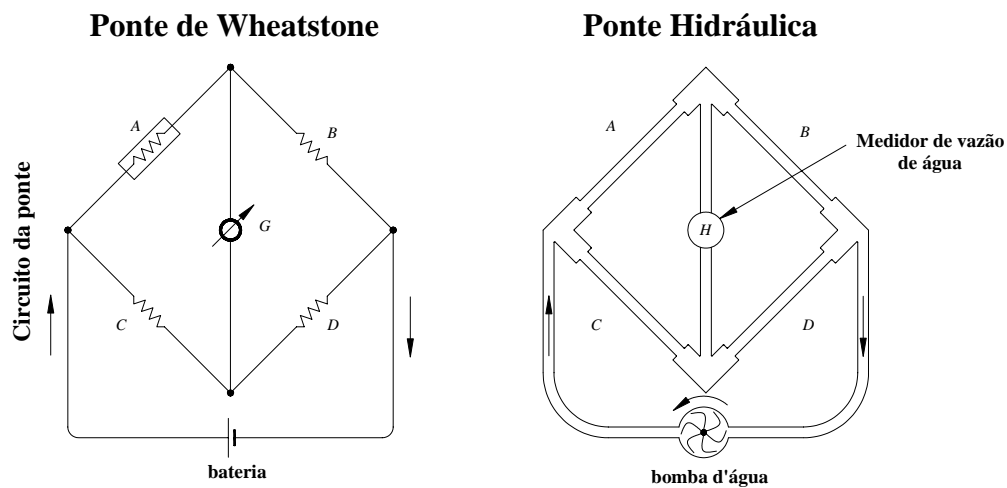


Figura 6 - Esquema das pontes de Wheatstone e Hidráulica.

Na ponte de Wheatstone, geralmente, a condição para que o galvanômetro apresente deflexão zero, condição de estado de equilíbrio, é que $AxD = BxC$. Se A , B , C e D apresentarem resistências iguais, não existirá corrente passando através do galvanômetro, G , mas qualquer pequena mudança na resistência de A fará com que o galvanômetro sofra uma deflexão.

Na ponte hidráulica, se as resistências dos tubos, *A*, *B*, *C* e *D* forem iguais, o medidor de vazão de água não mostrará nenhum movimento, mas qualquer aumento ou diminuição no diâmetro, ou seja, na resistência de *A* fará com que o medidor de vazão de água, *H*, se mova.

2.2 Como são feitos os Extensômetros:

Um tipo comum de extensômetro é mostrado na Figura 7. Uma lâmina metálica resistiva de espessura de alguns micra é fixada em um material eletricamente isolado chamado base. Porções desnecessárias do material da lâmina são eliminadas pelo processo de fotografação, de acordo com o padrão desejado do extensômetro. Então, este trabalho é seguido pela soldagem dos fios de saída. Usualmente, extensômetros são feitos para ter uma resistência de 120Ω , mas existem extensômetros disponíveis com resistências de 350Ω , 500Ω , 1000Ω .

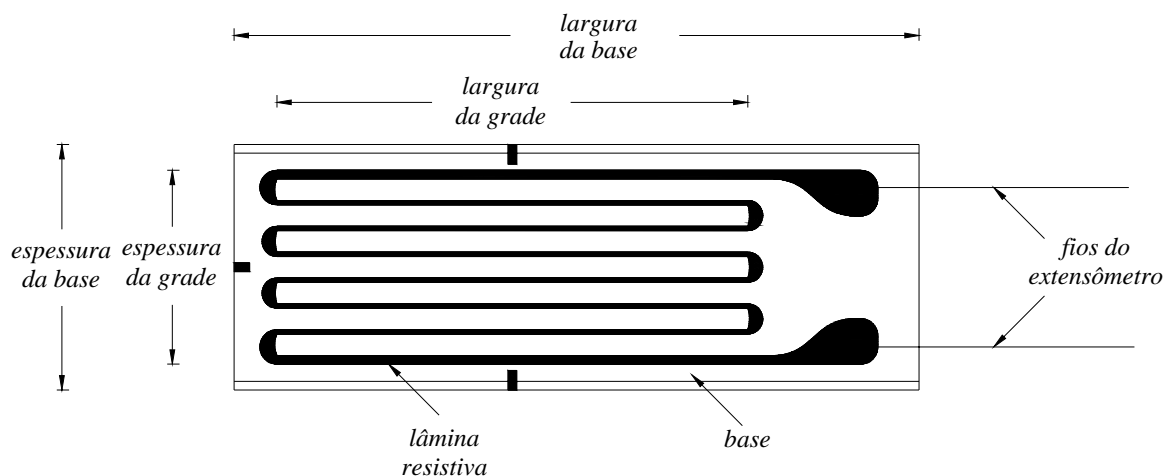


Figura 7 - Esquema de confecção dos extensômetros.

Como mencionado anteriormente, o extensômetro exibe uma mudança de temperatura devido à deformação nele causada, assim como a resistência também é alterada pela mudança de temperatura. Diferentes métodos de medição são disponíveis para eliminar tais efeitos, mas muitos dos extensômetros disponíveis hoje em dia apresentam uma auto-compensação, feitos para sofrerem menos os efeitos da temperatura.

Esses extensômetros são chamados de extensômetros SELCON®, que é uma junção das iniciais das palavras em inglês: “*self compensation*”, que significa autocompensação. Sua aparência e construção são absolutamente as mesmas dos extensômetros comuns.

2.3 Os tipos de Extensômetros:

Existem muitos tipos de extensômetros disponíveis dependendo dos propósitos de aplicação, tamanhos e materiais, e eles são geralmente classificados como:

- Classificação de acordo com o material resistivo:
 - Fios resistivos;
 - Lâmina;
 - Semicondutor;
 - Semicondutor por difusão.
- Classificação de acordo com o material de base:
 - Base de papel;
 - Base de baquelita;
 - Base de poliéster;
 - Base de poliamida;
 - Outros (finalidades especiais).
- Classificação de acordo com sua configuração:
 - Uniaxiais;
 - Biaxiais;
 - Múltiplos eixos (roseta);
 - Padronização especial.

Existem muitas condições a serem consideradas para a comparação das características dos extensômetros, porém, usualmente os extensômetros de lâmina são superiores aos de fios resistivos.

2.3.1 Extensômetros de Lâmina para Uso Geral

Extensômetros de lâmina são produzidos colando as lâminas de alguns micra de espessura, usualmente ligas de cobre e níquel, em bases plásticas e então nelas são gravadas as configurações desejadas. Dentre os diferentes extensômetros disponíveis estes são os mais comuns. Os materiais de base mais usuais são a poliamida e a resina epóxi-fenólico (*phester*).

Base de resina epóxi-fenólico (*Phester*)

Uma resina especial obtida pela modificação do fenol em epóxi é usada em sua base, assim este extensômetro é fino, flexível e fácil de colar e apresenta pouca variação do sinal de saída ao longo do tempo. Pode ser chamado de extensômetro universal por estas vantagens. Combinados com adesivos de utilização em temperatura ambiente exibem excelente características de funcionalidade e tem aplicação em campo muito satisfatória. Também são utilizados na fabricação de transdutores. A faixa de temperatura de operação vai de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Base de poliamida

Como usam resinas de poliamida de excelente resistência ao calor em sua base, este extensômetro tem utilização em temperaturas de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, utilizando as colas adequadas. São apropriados para medidas em ensaios de longa duração. Existem ainda extensômetros construídos com o elemento resistivo entre duas camadas de resina de poliamida, formando um sanduíche com o elemento resistivo. Esse tipo de extensômetro é o de construção mais robusta, porém fácil de manusear.

2.3.2 Extensômetros de Fios Resistivos

Composto por um fio fino resistivo, com diâmetro entre 13 e 25 micra, colados em base de papel ou plástico em forma de grade. Estes também são classificados de acordo com o material de base, que podem ser: papel, poliéster e resina epóxi-fenólico (*phester*).

Base de resina epóxi-fenólico (*Phester*)

Os extensômetros de fios com base de resina epóxi-fenólico usam o mesmo material de base que os extensômetros de lâmina deste tipo. Podem ser usados tanto adesivos de colagem em temperatura ambiente como adesivos de alta temperatura de colagem. O extensômetro é superior em características como manutenção do sinal de saída ao longo do tempo, resistência ao calor, umidade e colagem, mostrando-se adequados para todo tipo de aplicação. Extensômetros de grandes comprimentos são usados principalmente para aplicações em concreto. A faixa de temperatura de operação é de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Base de Papel

Papéis especialmente selecionados são usados como base, e colas de secagem rápida devem ser usadas com este tipo de extensômetro para tornar o trabalho mais fácil. Assim, este extensômetro é usado para aplicações comuns de medidas de tensão. Entretanto, esses não são adequados para uso em ensaios prolongados ou para medições em campo devido a sua alta capacidade de absorção de umidade. A oxidação ocorrerá nos fios resistivos dos extensômetros quando armazenados por um longo período de tempo. Estes tipos de extensômetros devem ser usados dentro de seis meses de sua fabricação, dependendo do fabricante. A faixa de temperatura de operação vai de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Base de Poliéster

Usando resina de poliéster em sua base, este extensômetro pode ser colado em temperatura ambiente usando adesivos de poliéster. A faixa de temperatura de operação vai de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+170\text{ }^{\circ}\text{C}$ o que faz este tipo de extensômetro popular em aplicações de medições em campo.

2.4 Escolha dos Extensômetros:

Uma grande variedade de extensômetros de diferentes especificações é disponível para escolha dependendo do propósito e das condições de medição. Uma escolha imprópria

resultará em uma não efetiva aquisição de medidas. Para a correta escolha dos extensômetros é necessário atentar para algumas características de operação, tais como:

- Faixa de temperatura à que o extensômetro estará submetido;
- Limite máximo de alongamento do próprio extensômetro;
- Corrente (amperagem) máxima suportada pelo extensômetro;
- Resistência à umidade;
- Durabilidade necessária;

Cada fabricante de extensômetro trará suas especificações mais precisas sobre cada tipo fabricado, assim a tabela abaixo é somente uma indicação sobre os tipos mais usuais de extensômetros usados e suas características.

Tabela 1 - Especificações sobre tipos de extensômetros.

Tipo (base)	Temperatura de operação (°C)	Alongamento máximo (%)	Corrente máxima (mA)	Mudança da resistência do extensômetro com a idade	Principais aplicações
Lâmina (Phester)	-50 ~ +180	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão, transdutores, medidas de tensões residuais.
Lâmina (poliamida)	-50 ~ +200	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão, transdutores, medidas de tensões residuais.
Lâmina (poliamida para grandes deformações)	-10 ~ +120	8 ~ 10	30 ou menos	Pequena	Medidas de deformações plásticas
Fios * (papel)	-50 ~ +80	1,2	25 ou menos	Ligeira variação	Medidas usuais de tensões
Fios (poliéster)	-50 ~ +170	1	25 ou menos	Pequena	Medidas usuais de tensão em estruturas no campo

* Baixa resistência a umidade, pouca durabilidade e curto período de armazenamento.

É importante ressaltar que cabe ao engenheiro de instrumentação a correta escolha do extensômetro para o fim desejado, e como ressaltado anteriormente, sem a adequada escolha, as leituras poderão ser prejudicadas, fazendo com que os dados obtidos não condigam com o fenômeno estudado.

Para medidas de deformações estáticas a escolha deve estar associada ao material a ser ensaiado, pois esse irá reger o processo. No caso de medidas de deformações dinâmicas o

extensômetro deve apresentar materiais resistentes à fadiga, devido ao número repetitivo das variações das grandezas. Os extensômetros mais comumente utilizados apresentam alongamento máximo de 2%, porém extensômetros de finalidade especial podem apresentar limites maiores que este.

2.5 Especificações usuais dos Extensômetros:

Cada fabricante de extensômetros apresenta sua maneira de codificar as características mais importantes dos mesmos de modo a facilitar suas identificações. Basicamente estes códigos consistem em seqüências de letras e números que indicam as características básicas dos extensômetros. A Figura 8 e Figura 9 apresentam os padrões de especificação dos extensômetros da *MicroMeasurements* e da *KYOWA*, respectivamente.

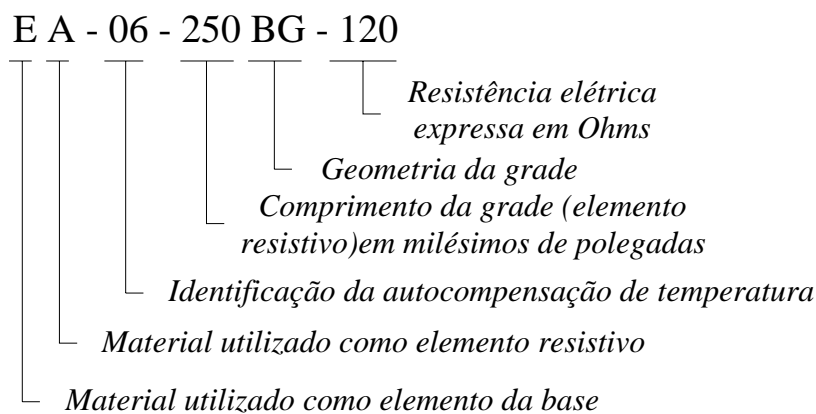


Figura 8 - Esquema utilizado pelos extensômetros da *MicroMeasurements*.

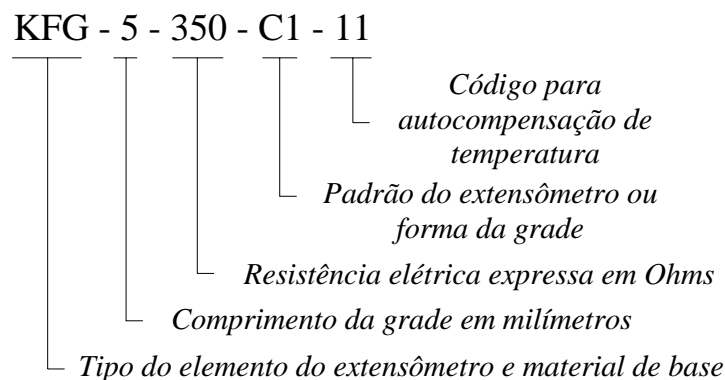


Figura 9 - Esquema utilizado pelos extensômetros da *KYOWA*.

Os valores de autocompensação de temperatura dos extensômetros da *KYOWA* são os próprios valores dos coeficientes de expansão térmica dos materiais para os quais estes são indicados. Por exemplo, no caso do aço comum, o coeficiente de expansão térmica é de $10,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cong 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e assim o valor do código de autocompensação de temperatura é *11*.

3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

O circuito de entrada de todo instrumento de medida de deformação, sem exceções, incluem um circuito de ponte, e os braços da ponte são fornecidos por extensômetros e resistores fixos.

A função de um circuito de ponte é de converter uma pequena mudança na resistência em uma voltagem elétrica. O circuito da ponte de *Wheatstone* é formado por quatro resistores, *R1*, *R2*, *R3* e *R4*, como mostrado na Figura 10.

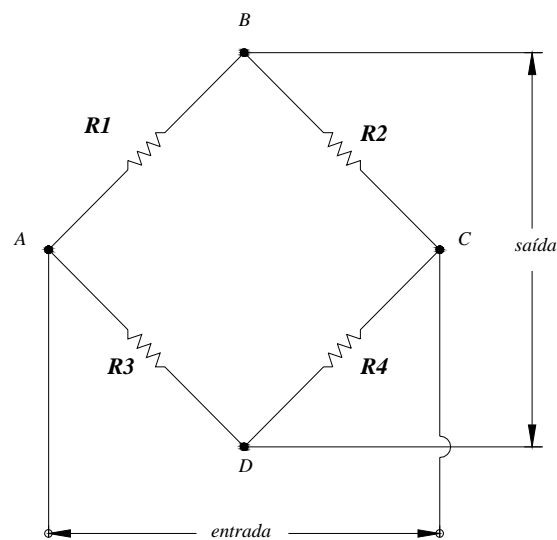


Figura 10 - Circuito da ponte de *Wheatstone*.

Primeiramente, como já foi mostrada anteriormente, a tensão de saída nos terminais *BD* da Figura 10 será igual à:

$$e = \left[\frac{R3}{R3 + R4} - \frac{R1}{R1 + R2} \right] \cdot E \quad \text{Equação 25}$$

Que pode ser reescrita da forma apresentada pela **Equação 26**:

$$e = \left[\frac{R3 \cdot (R1 + R2) - R1 \cdot (R3 + R4)}{(R3 + R4) \cdot (R1 + R2)} \right] \cdot E \therefore$$

$$e = \left[\frac{(R3 \cdot R1) + (R3 \cdot R2) - (R3 \cdot R1) - (R1 \cdot R4)}{(R3 + R4) \cdot (R1 + R2)} \right] \cdot E \therefore$$

$$e = \left[\frac{(R3 \cdot R2) - (R1 \cdot R4)}{(R1 \cdot R3) + (R2 \cdot R3) + (R1 \cdot R4) + (R2 \cdot R4)} \right] \cdot E \quad \text{Equação 26}$$

Supondo agora que exista uma variação em cada braço da ponte devida uma deformação, e que a ponte esteja, antes desta deformação, balanceada com resistências R , assim, o que acontece em cada braço da ponte pode ser escrito da seguinte forma:

$$R1 = R + \Delta R1$$

$$R2 = R + \Delta R2$$

$$R3 = R + \Delta R3$$

$$R4 = R + \Delta R4 \quad \text{Equação 27}$$

Passando a **Equação 27** na **Equação 26**, tem-se:

$$e = \left[\frac{[(R + \Delta R3) \cdot (R + \Delta R2)] - [(R + \Delta R1) \cdot (R + \Delta R4)]}{[(R + \Delta R1) \cdot (R + \Delta R3)] + [(R + \Delta R2) \cdot (R + \Delta R3)] + [(R + \Delta R1) \cdot (R + \Delta R4)] + [(R + \Delta R2) \cdot (R + \Delta R4)]} \right] \cdot E$$

$$\left[\frac{R^2 + (R \cdot \Delta R2) + (R \cdot \Delta R3) + (\Delta R2 \cdot \Delta R3) - R^2 - (R \cdot \Delta R1) - (R \cdot \Delta R4) - (\Delta R1 \cdot \Delta R4)}{R^2 + (R \cdot \Delta R1) + (R \cdot \Delta R3) + (\Delta R1 \cdot \Delta R3) + R^2 + (R \cdot \Delta R2) + (R \cdot \Delta R3) + (\Delta R2 \cdot \Delta R3) + R^2 + (R \cdot \Delta R1) + (R \cdot \Delta R4) + (\Delta R1 \cdot \Delta R4) + R^2 + (R \cdot \Delta R2) + (R \cdot \Delta R4) + (\Delta R2 \cdot \Delta R4)} \right] \cdot E \quad \text{Equação 28}$$

$$e = \left[\frac{R \cdot (-\Delta R1 + \Delta R2 + \Delta R3 - \Delta R4) + (\Delta R2 \cdot \Delta R3) - (\Delta R1 \cdot \Delta R4)}{4R^2 + 2R \cdot (\Delta R1 + \Delta R2 + \Delta R3 + \Delta R4) + (\Delta R1 \cdot \Delta R3) + (\Delta R2 \cdot \Delta R3) + (\Delta R1 \cdot \Delta R4) + (\Delta R2 \cdot \Delta R4)} \right] \cdot E$$

Dividindo o braço direito da **Equação 28** em cima e em baixo por R^2 , tem-se:

$$e = \left[\frac{\frac{-\Delta R1}{R} + \frac{\Delta R2}{R} + \frac{\Delta R3}{R} - \frac{\Delta R4}{R} + \left(\frac{\Delta R2 \cdot \Delta R3}{R^2} \right) - \left(\frac{\Delta R1 \cdot \Delta R4}{R^2} \right)}{4 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta R1}{R} + \frac{\Delta R2}{R} + \frac{\Delta R3}{R} + \frac{\Delta R4}{R} \right) + \left(\frac{\Delta R1 \cdot \Delta R3}{R^2} \right) + \left(\frac{\Delta R2 \cdot \Delta R3}{R^2} \right) + \left(\frac{\Delta R1 \cdot \Delta R4}{R^2} \right) + \left(\frac{\Delta R2 \cdot \Delta R4}{R^2} \right)} \right] \cdot E \quad \text{Equação 29}$$

Sabendo que R^2 é um valor muito grande e que $\Delta R_a \cdot \Delta R_b$ é um número muito pequeno, $\Delta R_a \cdot \Delta R_b$ dividido por R^2 são considerados valores de segunda ordem, e podem ser desprezados na equação desde que apresentem valores pequenos, e deste modo a **Equação 29** passa a se tornar:

$$e = \left[\frac{-\frac{\Delta R1}{R} + \frac{\Delta R2}{R} + \frac{\Delta R3}{R} - \frac{\Delta R4}{R}}{4 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta R1}{R} + \frac{\Delta R2}{R} + \frac{\Delta R3}{R} + \frac{\Delta R4}{R} \right)} \right] \cdot E \quad \text{Equação 30}$$

Com a relação dada na **Equação 17**, tem-se:

$$e = \left[\frac{-K \cdot \varepsilon1 + K \cdot \varepsilon2 + K \cdot \varepsilon3 - K \cdot \varepsilon4}{4 + 2 \cdot (K \cdot \varepsilon1 + K \cdot \varepsilon2 + K \cdot \varepsilon3 + K \cdot \varepsilon4)} \right] \cdot E$$

$$e = \left[\frac{K \cdot (-\varepsilon1 + \varepsilon2 + \varepsilon3 - \varepsilon4)}{4 + 4K \cdot \left(\frac{\varepsilon1 + \varepsilon2 + \varepsilon3 + \varepsilon4}{2} \right)} \right] \cdot E = \frac{K \cdot E}{4} \cdot \left[\frac{(-\varepsilon1 + \varepsilon2 + \varepsilon3 - \varepsilon4)}{1 + K \cdot \left(\frac{\varepsilon1 + \varepsilon2 + \varepsilon3 + \varepsilon4}{2} \right)} \right] \quad \text{Equação 31}$$

Sabendo que ε é um valor muito pequeno, pode-se impor que:

$$1 + K \cdot \left(\frac{\varepsilon1 + \varepsilon2 + \varepsilon3 + \varepsilon4}{2} \right) \cong 1$$

E desta forma a **Equação 31** pode ser escrita como:

$$e = \frac{K \cdot E}{4} \cdot (-\varepsilon1 + \varepsilon2 + \varepsilon3 - \varepsilon4) \quad \text{Equação 32}$$

Rearranjando a **Equação 32** para deixar as incógnitas de um lado e os dados de outro, tem-se a seguinte:

$$-\varepsilon1 + \varepsilon2 + \varepsilon3 - \varepsilon4 = \frac{e \cdot 4}{K \cdot E} \quad \text{Equação 33}$$

E assim a **Equação 33** pode ser usada na resolução das aquisições de medidas de deformação através de medições de tensão em pontes de *Wheatstone*, que apresentam os quatro braços da ponte com o mesmo valor de resistência inicial, ou seja, balanceada.

É importante deixar claro que os valores de ε calculados pela **Equação 33**, englobam as variações devido às deformações do corpo de prova em função da carga (*mecânica*) e em função de sua dilatação (*temperatura*). Sendo que ε pode ser representado pela fórmula abaixo:

$$\varepsilon l = \varepsilon F l + \varepsilon N l + \varepsilon T l \quad \text{Equação 34}$$

Onde $\varepsilon F l$ é a deformação devido aos esforços de flexão, $\varepsilon N l$ é a deformação devido aos esforços normais (*compressão e tração*), e $\varepsilon T l$ é a deformação devido à dilatação ou retração (*temperatura*).

Alguns poderiam sugerir que as deformações devido à temperatura seriam muito pequenas e deveriam ser ignoradas. Pois bem, tanto o coeficiente de dilatação térmica do aço como do concreto ficam em torno de $\alpha = 10^{-6} / ^\circ C$, o que significa que para cada grau Celsius variado no ambiente de ensaio, a deformação devido à temperatura será de $10 \mu\varepsilon$. Para alguns procedimentos em ambientes climatizados tal variação pode ser desprezível, porém em outros casos onde a deformação devida à flexão ou tração não seja tão grandes, esta variação pode falsear os resultados.

Em um circuito de ponte de *Wheatstone* sempre haverá quatro braços em sua configuração, porém, no processo de medição existem três diferentes tipos de disposição de extensômetros no circuito da ponte, e a nomenclatura para estes tipos de disposição muitas vezes pode levar o usuário menos experiente a ter a falsa idéia de conjunto do circuito, pois suas nomenclaturas usuais são: *um quarto de ponte, meia ponte e ponte completa*.

A técnica de medida em um quarto de ponte consiste na utilização de um extensômetro posicionado em um dos braços, o qual estará colado no material a ser ensaiado, e de resistores de precisão nos outros três braços.

Também é chamada de medida em um quarto de ponte, a técnica de medida onde são instalados dois extensômetros em dois braços distintos da ponte, porém, um deles é instalado em um corpo de prova semelhante ao que será ensaiado de mesmo material, mas que não sofrerá deformação nenhuma devido a carregamento, esse extensômetro é chamado de compensador enquanto o outro é chamado de extensômetro ativo. Este tipo de ligação é interessante, pois anula as variações no extensômetro com relação à variação de temperatura sofrida pelo corpo de prova.

A técnica de medida em que utiliza dois extensômetros em dois braços diferentes da ponte é chamada de medida em meia ponte. E por último existe a técnica de medida que utiliza os quatro extensômetros ligados em cada um dos braços da ponte, chamada de leitura em ponte completa.

Em qualquer uma das técnicas apresentadas é importante que o posicionamento dos extensômetros em cada braço da ponte seja feito de forma correta com relação àquilo que se quer medir.

3.1 Exemplos de conexões de pontes:

Neste item serão apresentados alguns exemplos dos tipos de conexões usuais para cada tipo de medição de deformação, com alguns exemplos numéricos fictícios para mais fácil interpretação. Em cada caso, ainda será apresentada, quando for pertinente, ligações feitas de forma incorreta e suas implicações.

3.1.1 Medida de deformações uniaxiais em um quarto de ponte

Este tipo de ligação é usual quando se quer medir as deformações, em uma dada direção, de um corpo de prova. Porém este tipo de ligação só é satisfatório em ambiente onde a mudança de temperatura é pequena.

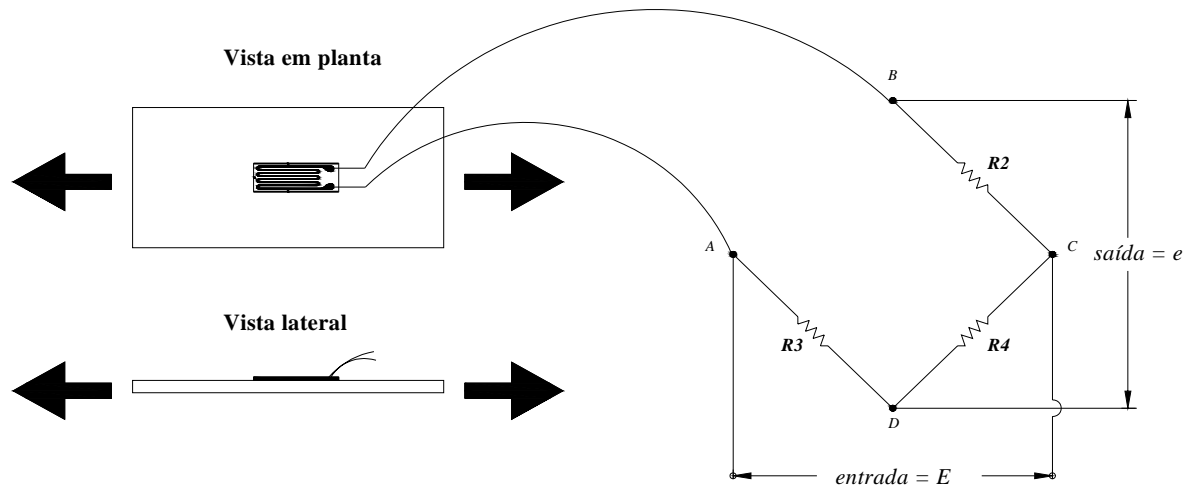


Figura 11 - Ensaio a tração com ligação em um quarto de ponte.

A Figura 11 apresenta o ensaio de uma chapa de aço submetida à tração com um extensômetro colado a ela. Fica definido que as resistências de todos os resistores de precisão inclusive a do extensômetro são muito próximas a 120Ω , porém não iguais¹, como usualmente acontece, e que a tensão de entrada é igual a $5V$.

Os valores para os resistores, com o extensômetro igual a $R1$, são os seguintes:

$$R_{ext} = R1 = 120,2\Omega; R2 = 120,4\Omega; R3 = 120,1\Omega; R4 = 120,2\Omega$$

Adotando um valor de $K = 2,10$, o qual é um valor comumente encontrado, segue o exemplo abaixo:

Antes da introdução de qualquer carregamento a ponte apresenta tensão de saída igual à apresentada abaixo²:

$$e_i = e_{AD} - e_{AB} = \left[\frac{R3}{R3 + R4} - \frac{R_{ext}}{R_{ext} + R2} \right] \cdot E = \left[\frac{120,1}{120,1 + 120,2} - \frac{120,2}{120,2 + 120,4} \right] \cdot 5 = 0,00103V$$

¹ Mesmo não sendo iguais, a **Equação 32** continua válida se os valores de cada braço da ponte forem muito próximos um dos outros.

² Este procedimento não é usual, o que geralmente se faz é medir a saída da ponte e anotar seu valor inicial, ou então em multímetros mais modernos, tomar as leituras relativas (*off-set*) depois do carregamento.

Introduzido o carregamento, o usuário mede novamente a tensão de saída e encontra um valor de $e_f = -0,00004V$, e faz o *off-set* das tensões que é igual ao $e_f - e_i$ que é igual a uma tensão de saída quando a ponte está balanceada, e .

$$e = e_f - e_i = -0,00004 - 0,00103 = -0,00107V$$

Com o valor de e determinado e sabendo que $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$, uma vez que são resistores fixos, o usuário, utilizando a **Equação 33** pode determinar ε_1 :

$$-\varepsilon_1 = \frac{-0,00107 \cdot 4}{2,10 \cdot 5} = -407,61 \cdot 10^{-6}$$

Deve-se deixar claro então que, se não houve variações de temperatura, e o ensaio se tratava de um carregamento a tração sem qualquer excentricidade, o usuário determinou, segundo a **Equação 34**:

$$-\varepsilon_1 = \varepsilon_F + \varepsilon_N + \varepsilon_T = 0 - 407,61 \cdot 10^{-6} + 0 \therefore \varepsilon_1 = 407,61 \cdot 10^{-6}$$

Existe neste tipo de ligação um procedimento usual para retirar as variações de temperatura que ocorrem no fio que vai da ponte ao extensômetro, conforme Figura 12.

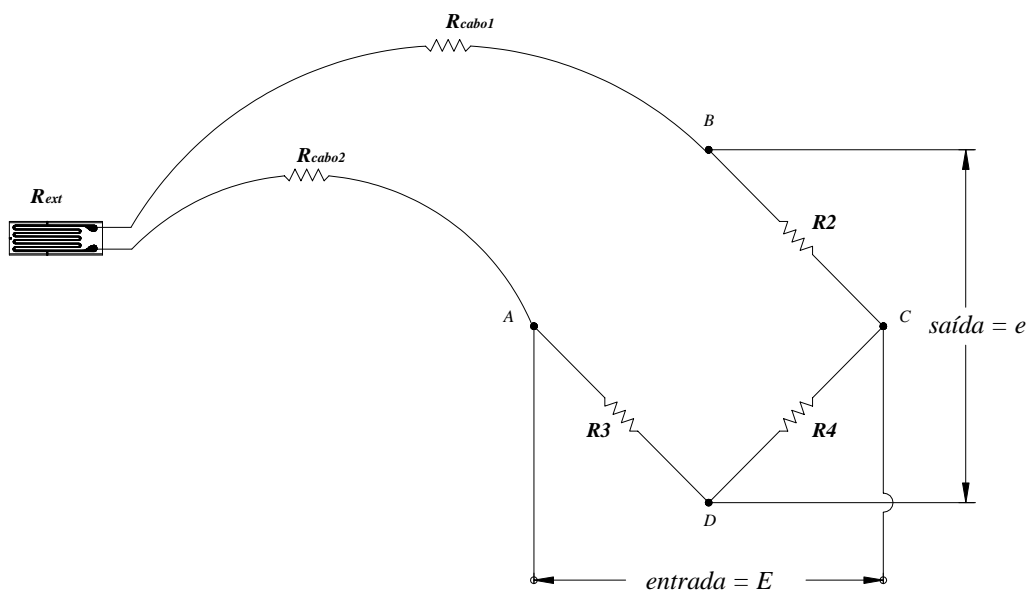


Figura 12 - Esquema da ponte com as resistências dos cabos.

Este procedimento consiste na transformação das resistências de cada um dos fios que sai do extensômetro e vai para a ponte, em resistências dispostas em braços adjacentes da ponte. Isto é feito soldando mais um fio em um dos terminais do extensômetro, o qual torna o terminal do extensômetro o ponto de leitura da tensão de saída, conforme apresenta o esquema da Figura 13, que agora apresenta um ponto E .

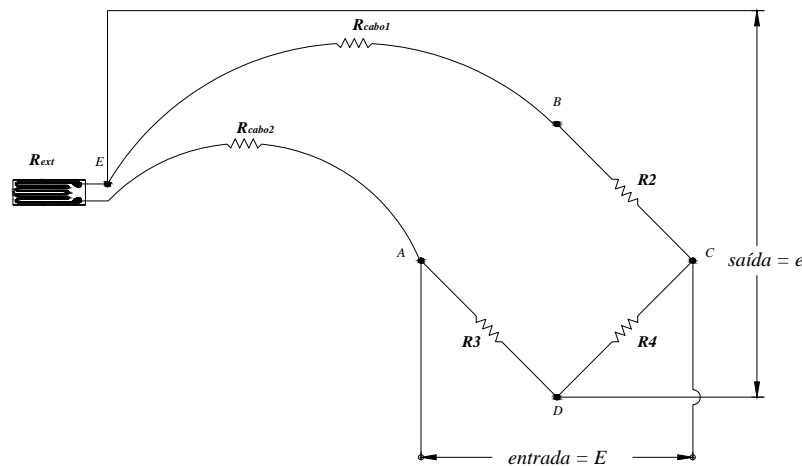


Figura 13 - Esquema da ponte com o terceiro fio soldado ao extensômetro.

Porém a Figura 13 pode ser redesenhada conforme mostra a Figura 14, e que volta a apresentar a forma de uma ponte de *Wheatstone*. A variação de temperatura que causar um ΔR nos fios, será anulada, uma vez que estes ΔR 's estarão em série como no circuito apresentado anteriormente na Figura 5, e suas variações podem ser adotadas como $\varepsilon T1$ e $\varepsilon T2$. Do ensaio anterior, a partir da Equação 33:

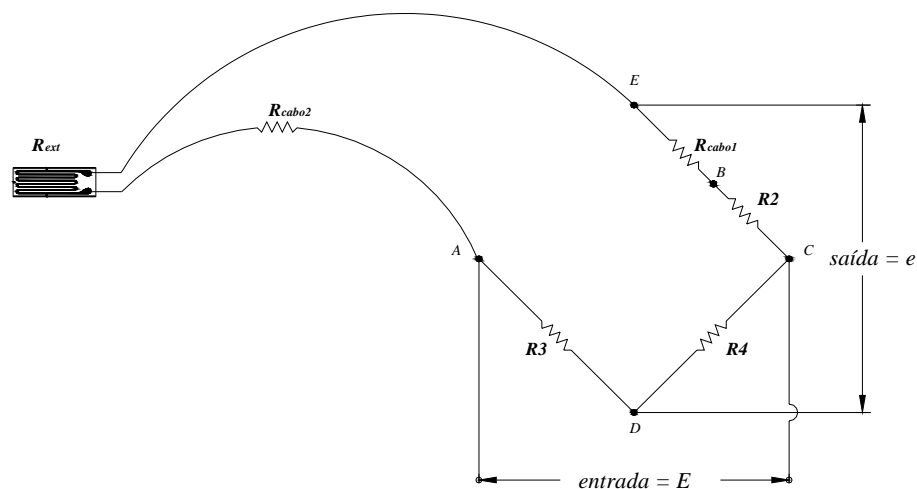


Figura 14 - Esquema da ponte com o terceiro fio soldado e redesenhada para formar a ponte.

$$-\varepsilon T1 - \varepsilon N1 + \varepsilon T2 = -407,61 \cdot 10^{-2}$$

Para que $R_{cabo1} = R_{cabo2}$ e $\Delta R_{cabo1} = \Delta R_{cabo2}$ sejam iguais ou o mais próximo possível é necessário que sejam utilizados o mesmo tipo de fio com o mesmo comprimento. Esta implicação fará com que $\varepsilon T1 = \varepsilon T2$, e assim:

$$\varepsilon N1 = 407,61 \cdot 10^{-2}$$

Leitura em um quarto de ponte com extensômetro compensador

Este procedimento é realizado para compensar as variações de temperatura que ocorrem no corpo de prova usando um outro extensômetro colado em outro corpo de prova que não sofrerá influência mecânica.

Alguns autores preferem chamar este tipo de técnica de: *medida em meia ponte*, porém neste texto, preferiu-se denominá-la com o título acima em negrito, uma vez que só um extensômetro está sendo efetivamente utilizado, sendo o segundo extensômetro um resistor de precisão que varia com a temperatura de modo a anular as variações desta grandeza no corpo de prova.

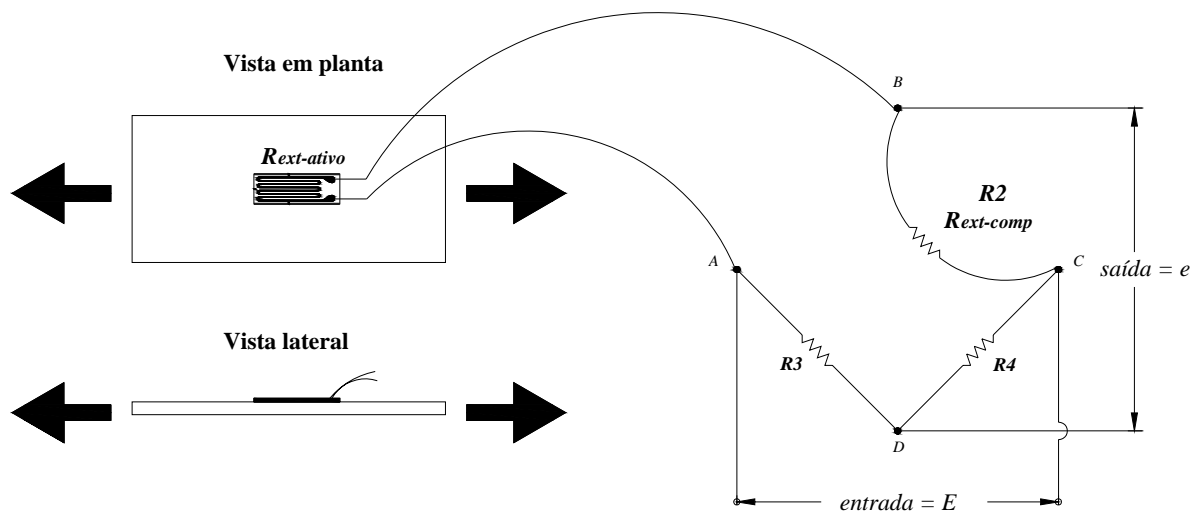


Figura 15 - Esquema da ponte com extensômetro compensador.

A Figura 15 apresenta o esquema em um quarto de ponte com um extensômetro compensador na posição de $R2$. Supondo que os corpos de provas, o que será ensaiado e o compensador, tenham uma variação dimensional devido à temperatura da ordem de $20\mu\epsilon$. E que os resultados obtidos sejam os mesmos obtidos anteriormente, assim tem-se:

$$-\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \frac{e \cdot 4}{K \cdot E} \therefore -\epsilon_1 + \epsilon_2 = -407,61\mu\epsilon \therefore -\epsilon_{N1} - \epsilon_{T1} + \epsilon_{T2} = -407,61\mu\epsilon \therefore$$

$$-\epsilon_{N1} - 20 + 20 = -407,61\mu\epsilon \therefore \epsilon_{N1} = 407,61\mu\epsilon$$

Isto acontecerá se o compensador estiver ligado em um dos braços adjacentes da ponte com relação ao extensômetro. Fica claro que se o compensador for colocado no braço oposto da ponte com relação ao extensômetro ($R1$ e $R4$), a leitura terá influência dobrada da temperatura.

3.1.2 Medida de deformações uniaxiais em meia ponte

As técnicas de medição em meia ponte podem ser utilizadas para se obter esforços de flexão ou normais, dependendo da posição dos dois extensômetro nos braços da ponte e de como estes estão posicionados no corpo de prova. Esta posição ainda implicará na autocompensação de temperatura ou não, dependendo da ligação efetuada.

Leitura em meia ponte com extensômetros colados em faces opostas

A Figura 16 apresenta uma configuração típica de ligação para medição de flexão em meia ponte. Supondo todos os dados semelhantes aos usados nos exemplos anteriores, a resolução do problema será dada por:

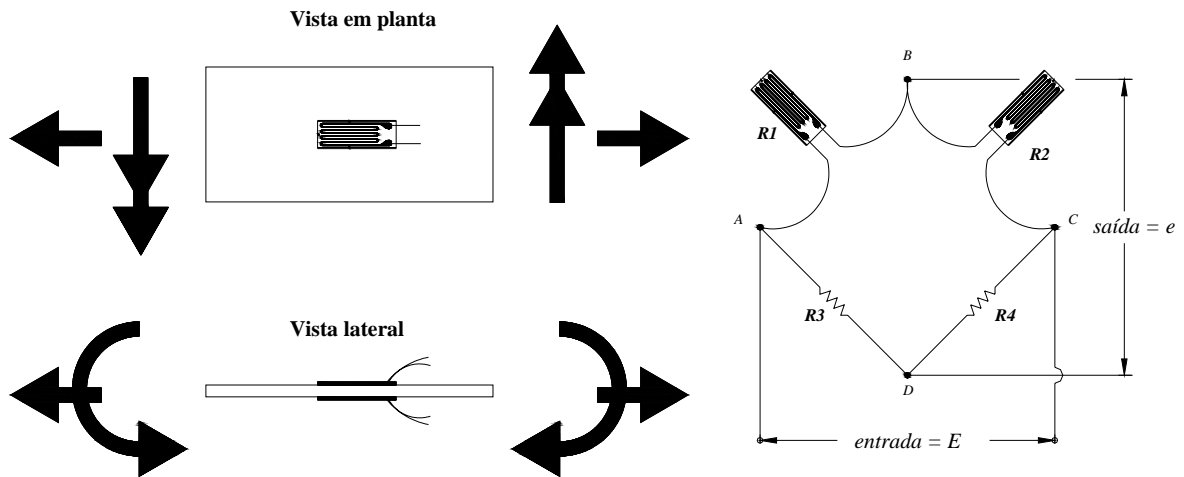


Figura 16 - Meia ponte - flexão - faces opostas - braços adjacentes.

$$-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{e \cdot 4}{K \cdot E} = -815,22 \mu\varepsilon$$

$$-\varepsilon F1 - \varepsilon N1 - \varepsilon T1 + \varepsilon F2 + \varepsilon N2 + \varepsilon T2 = -815,22 \mu\varepsilon$$

Da noção de resistência dos materiais sabe-se que a deformação devido à flexão em faces opostas da barra apresentará mesma deformação, porém com sinais invertidos, e que independentemente de estarem em faces oposta as deformações devido ao esforço normal de tração apresentarão mesmo valor e mesmo sinal. O mesmo princípio adotado para a deformação por tração vale para as deformações devido à temperatura e assim:

$$-\varepsilon F1 - \varepsilon N1 - \varepsilon T1 - \varepsilon F2 + \varepsilon N2 + \varepsilon T2 = -815,22 \mu\varepsilon \therefore -\varepsilon F1 - \varepsilon F2 = -815,22 \mu\varepsilon$$

Como $\varepsilon F1$ e $\varepsilon F2$ apresentam mesmo valor absoluto, a deformação em cada ponto será a metade do valor lido:

$$-2\varepsilon F1 = -815,22 \mu\varepsilon \therefore \varepsilon F1 = \varepsilon F2 = \frac{815,22 \mu\varepsilon}{2} \cong 407,61 \mu\varepsilon$$

Percebe-se que este procedimento é muito eficaz nos ensaios de flexão, uma vez que carregamentos de tração ou compressão que possam surgir oriundos do procedimento de ensaio serão anulados, assim como haverá uma autocompensação de temperatura.

Supondo agora que o usuário resolva montar a ponte com os extensômetros disposto da forma apresentada pela Figura 17, e introduzisse carregamento de flexão e tração. Sua leitura de saída seria:

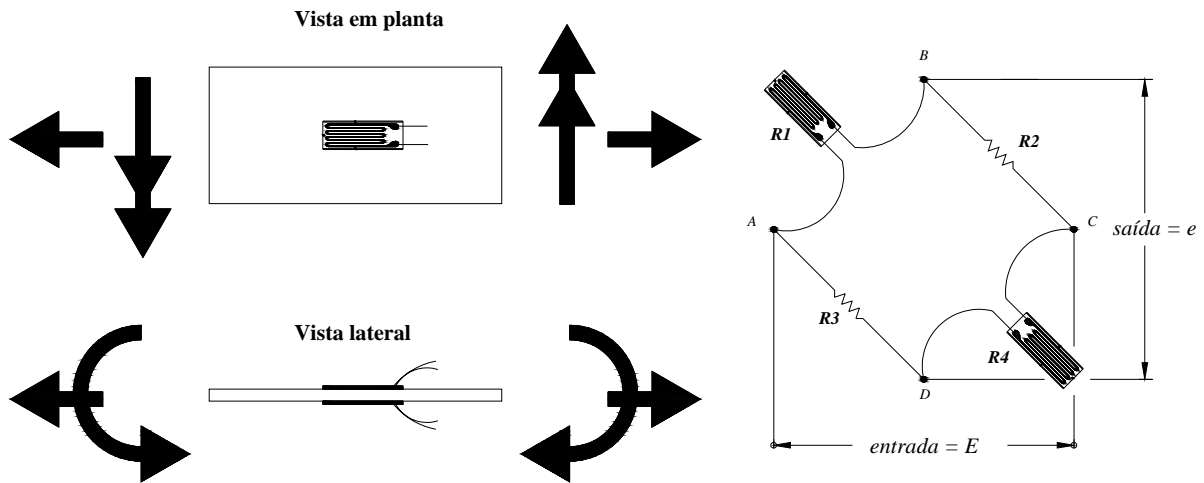


Figura 17 - Meia ponte - flexão - faces opostas - braços opostos.

$$-\varepsilon_1 - \varepsilon_4 = \frac{e \cdot 4}{K \cdot E} = -815,22 \mu\varepsilon$$

$$-\varepsilon_{F1} - \varepsilon_{N1} - \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{F4} - \varepsilon_{N4} - \varepsilon_{T4} = -815,22 \mu\varepsilon$$

Novamente da resistência dos materiais: $\varepsilon_{F1} = -\varepsilon_{F4}$ e $\varepsilon_{N1} = \varepsilon_{N4}$ e $\varepsilon_{T1} = \varepsilon_{T4}$, portanto:

$$-\varepsilon_{N1} - \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{N4} - \varepsilon_{T4} = -815,22 \mu\varepsilon$$

Se puderem ser desprezadas as variações devido à temperatura, o usuário somente estará medindo a deformação por tração com valor dobrado:

$$-\varepsilon_{N1} - \varepsilon_{N4} = -815,22 \mu\varepsilon \therefore \varepsilon_{N1} = \varepsilon_{N4} = \frac{815,22 \mu\varepsilon}{2} \cong 407,61 \mu\varepsilon$$

O fato é que, se o usuário tivesse ensaiando a barra à flexão, e no ensaio não houvesse esforços de tração, não haveria saída alguma de tensão.

Leitura em meia ponte com extensômetros colados lado a lado

A Figura 18 apresenta agora um ensaio com os extensômetros colados lado a lado submetida aos esforços de tração e flexão.

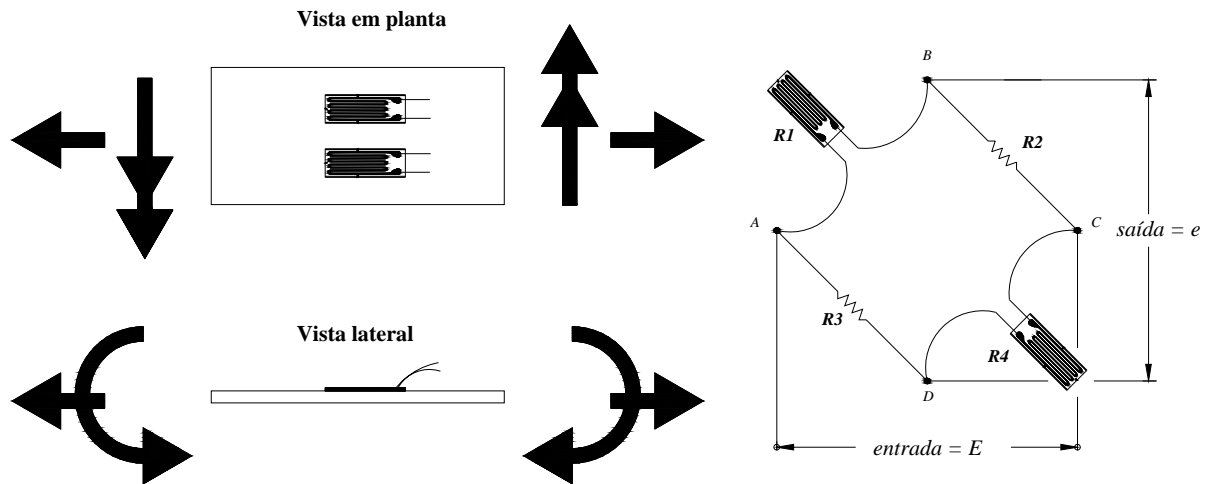


Figura 18 - Meia ponte - flexão - lado a lado -braços opostos.

Da resistência dos materiais: $\varepsilon_{N1} = \varepsilon_{N4}$ e $\varepsilon_{T1} = \varepsilon_{T4}$, porém agora, como os extensômetros estão na mesma face da barra tem-se que $\varepsilon_{F1} = \varepsilon_{F4}$.

$$-\varepsilon_{F1} - \varepsilon_{N1} - \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{F4} - \varepsilon_{N4} - \varepsilon_{T4} = -1013,57 \mu\varepsilon$$

O usuário estaria medindo o total de deformação causada pelos esforços sem poder mensurar as proporções entre elas, além de estar medindo as variações devido à temperatura no corpo de prova.

Para o caso apresentado pela Figura 19 os extensômetros encontram-se lado a lado e suas posições na ponte são em braços adjacentes. Da resistência dos materiais valem as premissas anteriores: $\varepsilon_{F1} = \varepsilon_{F2}$, $\varepsilon_{N1} = \varepsilon_{N2}$ e $\varepsilon_{T1} = -\varepsilon_{T2}$.

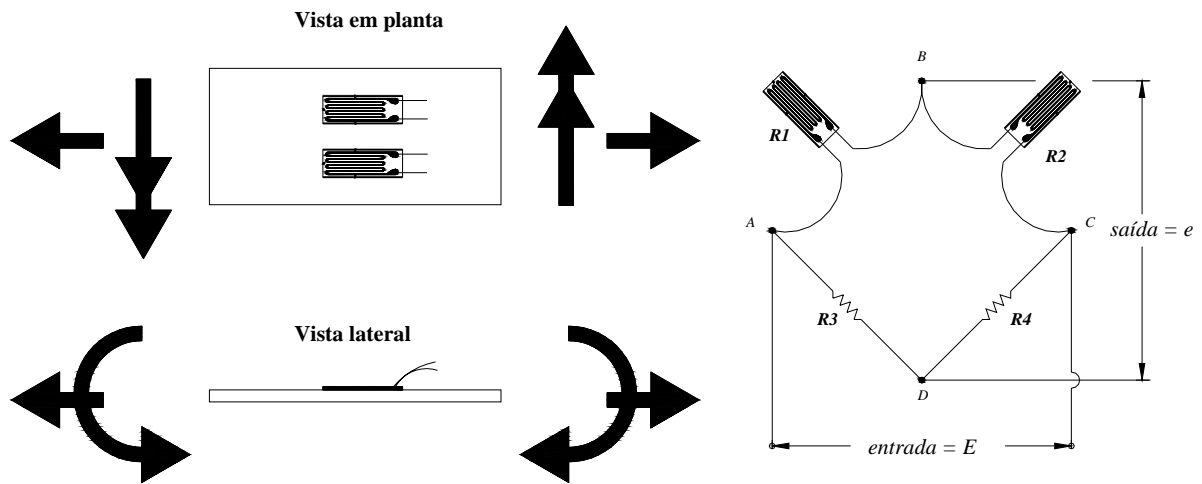


Figura 19 - Meia ponte - flexão - lado a lado -braços adjacentes.

$$-\varepsilon F1 - \varepsilon N1 - \varepsilon T1 + \varepsilon F2 + \varepsilon N2 + \varepsilon T2 = 0$$

Não será obtida leitura nenhuma independentemente do que de fato estiver acontecendo.

4 COLAS E PROCEDIMENTOS DE COLAGEM

4.1 Tipos de Cola:

Usualmente as fabricantes de extensômetros produzem diversos tipos de colas para diversas finalidades, e nelas fazem estudos para que o usuário tire as maiores vantagens para cada tipo de aplicação. Algumas são ativadas termicamente enquanto outras podem ser usadas em temperatura ambiente.

Os tipos de cola variam com suas características, tais como:

- Pressão de colagem;
- Condição para endurecimento;
- Faixa de temperatura de operação;
- Condições de estocagem.

Com relação à pressão de colagem, cada tipo de cola apresenta um determinado valor ou, como usualmente acontece, um intervalo de pressão a ser aplicada. Esta pressão vai desde a pressão aproximada exercida pelos dedos do operador ($0,5 \sim 1 \text{ kgf/cm}^2$) até valores que chegam a 3 kgf/cm^2 .

As condições para endurecimento da cola dependem das propriedades das mesmas, algumas apresentam tempo de colagem elevado a baixas temperaturas e uma redução deste tempo para temperaturas mais elevadas de colagem, outras colas só podem ser usadas em temperatura ambiente, e assim por diante.

Para cada tipo de cola existirá uma faixa de temperatura de operação para qual a mesma apresentará comportamento ideal de utilização ao qual o fabricante a recomenda.

Com relação à estocagem, por se tratarem de polímeros, estas colas sofrem influência da temperatura de armazenamento e até da incidência direta da luz do sol (raios ultravioletas). Por esse fato, muitas colas apresentam em seus rótulos indicações como: “não expor diretamente à luz” e “preservar em local escuro ao abrigo da luz”.

4.2 Precauções na Colagem dos Extensômetros:

4.2.1 Preparação da Cola

Como as colas baseadas em resina epóxi, resina poliéster, etc, são formadas por dois componentes, elas devem ser preparadas misturando os dois componentes imediatamente antes de serem usados.

Uma vez misturados os componentes, estas colas não podem mais ser usadas depois de passado um período fixo de tempo. Assim, é economicamente recomendável, que se preparem as colas para cada procedimento e em quantidade que possa ser usada dentro do período fixado. Isto pode ser feito levando-se em consideração o número de extensômetros que podem ser colocados dentro do período máximo de reação da cola.

No caso de colas baseadas em epóxi, um desvio na mistura padrão pode aumentar muito o tempo de endurecimento ou em alguns casos tornar a cola totalmente não reagente. Então, é importante misturar os reagentes numa relação correta através da pesagem dos mesmos. Mesmo se a condição de mistura estiver apropriada, a falta de homogeneização suficiente fará com que a mistura não seja o uniforme.

Outro ponto que requer especial atenção é o fato de que a vida útil das colas se diferencia de acordo com a quantidade misturada. O período de tempo útil dado para cada tipo de adesivo refere-se a quantidade padrão de mistura de 5 g.

4.2.2 Colagem dos extensômetros

Para colar um extensômetro num corpo de prova, a cola é aplicada na parte de trás da base do extensômetro e na área de colagem do próprio corpo de prova, e então o extensômetro é colocado na posição requerida e permitido o endurecimento da cola com uma pressão aplicada sobre o conjunto.

Algumas colas apresentam um endurecimento tão rápido que em quase todos os casos uma mera pressão na superfície do extensômetro com a ponta dos dedos é suficiente para completar o trabalho colagem. Outras colas, no entanto, necessitam a aplicação de uma pressão contínua por um período fixo de tempo para completar o trabalho colagem.

É de praxe utilizar pinças de mola para fornecer a pressão necessária na colagem dos extensômetros. Existem vários tamanhos de pinça com diferentes pressões de mola, porém, a adequada pressão de colagem é ajustada segundo a área do homogeneizador de tensões, que usualmente é uma chapa de aço que tem uma chapa de borracha de silicone colada a ela.

Se a área de colagem do extensômetro não for uma superfície plana, e sim uma superfície circunferencial, côncava ou convexa, o homogeneizador de tensões deve apresentar geometria semelhante.

4.2.3 Cura

Já que as condições de cura têm amplos efeitos na colagem e no desempenho do extensômetro, é de suma importância sempre manter a temperatura e a pressão indicada por cada fabricante pelo tempo determinado de forma mais criteriosa possível.

A cura é usualmente feita colocando-se o corpo de prova inteiro em uma estufa elétrica. Se o objeto a ser curado é grande ou é uma parte imóvel de uma estrutura, e este deve ser aquecido localmente. A área de colagem pode ser aquecida por queimadores de gás, lâmpadas infravermelhas, ou por pequenos aquecedores instalados nas proximidades. Em tais aquecimentos localizados, deve-se dispensar bastante atenção para não permitir bruscas variações de temperatura.

4.2.4 Envelhecimento

Quando um extensômetro é colado e a cura está completa, este está pronto para operação. Neste estado, entretanto, a colagem não é perfeitamente estável. Se um alto grau de precisão e estabilidade for requerido, como no caso de transdutores, a cura deve ser seguida de um envelhecimento por um período prefixado de tempo.

Tal envelhecimento melhorará marcadamente as características das colas, especialmente daquelas de colagem a temperatura ambiente. O envelhecimento deve ser feito sem a aplicação de pressão e sob temperaturas abaixo da temperatura máxima de operação de colagem.

4.2.5 Verificação da resistência de isolamento

De maneira a realizar medidas estáveis, deve existir uma resistência de isolamento maior do que $100M\Omega$ entre os extensômetros e o corpo de prova, bem como entre os próprios extensômetros no caso das rosetas.

Para checar a resistência de isolamento, conecta-se uma ponta do ohmímetro em um dos terminais do extensômetro e a outra ponta no corpo de prova. Também para o caso dos

extensômetros em roseta é necessário fazer esta verificação, onde neste caso uma das pontas do ohmímetro vai conectada em um dos terminais de um dos extensômetros e a outra ponta em um dos terminais de outro extensômetro, sendo necessário que se apresente uma resistência maior que $100M\Omega$ entre eles.

Esta operação deve ser realizada sem a presença de umidade, uma vez que a resistência de isolamento é bastante prejudicada por este fator. É de suma importância ainda, que não sejam utilizados ohmímetros com tensão de alimentação maior do que 20 volts .

4.2.6 Verificação da resistência do extensômetro

Geralmente a checagem da resistência do extensômetro é feita somente para se verificar se a mesma está próxima do valor indicado na embalagem. Este procedimento pode ser realizado em duas etapas do processo de colagem do extensômetro como um todo, primeiramente antes da colagem para verificar se o extensômetro já não veio corrompido da fábrica, e em outra etapa, após todo o procedimento de colagem, cura e envelhecimento para verificar se não houve danos durante o processo de colagem e ligação.

4.2.7 Verificação da qualidade de colagem

É consideravelmente difícil checar se um extensômetro foi colado corretamente ou não. Alguns métodos práticos e qualitativos podem ser sugeridos e recomendados para avaliar se a colagem foi bem sucedida e se o extensômetro colado está se comportando como era de esperar.

Um dos métodos práticos consiste em cortar parte da base do extensômetro que está colado com um bisturi e ao retirá-la verificar se a mesma está se descascando da superfície do corpo de prova facilmente. Se isto ocorrer, a colagem não está satisfatória. Este teste deve ser feito com o material da base o mais distante possível do material metálico do extensômetro. Este tipo de teste não é o mais usual.

O outro método prático consiste na verificação da leitura de saída do extensômetro quando este é submetido há uma pressão homogênea. Usualmente utiliza-se uma placa de

borracha, e posicionando-a em cima da área onde o extensômetro foi colado, faz-se uma pressão com a ponta do dedo. Se a leitura ao variar não retornar a leitura inicial indica que há bolhas de ar entre o extensômetro e o corpo de prova.

4.3 Procedimentos típicos de colagem:

São apresentados abaixo os procedimentos típicos de colagem de extensômetros em corpos de prova, sendo que alguns passos podem ser suprimidos dependendo do tipo de cola que se esteja usando.

Passo 1 - De maneira a se obter bons resultados na colagem de extensômetros é essencial dar um acabamento à superfície onde os mesmos serão colados.

Para o tratamento da superfície do lugar de colagem do extensômetro deve se remover a ferrugem, tintas e rebarbas do corpo de prova utilizando uma micro-retífica ou lixa.

A área a ser limpa deve ser preferencialmente bem maior do que a área de colagem. É desejável que a superfície não seja polida, mas sim um pouco áspera.

Passo 1a - Este passo refere-se apenas para materiais porosos, como o caso do concreto, onde é necessário fazer uma regularização da superfície para que o extensômetro ao ser colado apresente uma superfície homogeneamente aderida ao corpo de prova.

A Figura 20 apresenta um bloco de concreto tendo sua superfície interna regularizada. Porém, tal procedimento não deve deixar uma quantidade em excesso deste material na área de colagem, pois isto faria com que o extensômetro medisse a deformação do material de regularização e não do corpo de prova a ser ensaiado.

Uma vez com material de regularização endurecido deve-se retirar todo o excesso de material com uma micro-retífica ou lixa, de modo que a camada desse material seja a menor possível, somente tampando os vazios do material superficialmente. Vários materiais podem ser utilizados para regularização de corpos de prova. Na Figura 21 pode ser visto o material de regularização após a retirada dos excessos.

Passo 2 - Com a área de colagem limpa e regularizada deve-se proceder com a leve escarificação do lugar onde o extensômetro será colado. Esta escarificação é feita com uma

lixa número 320 passando-a em duas direções ortogonais entre si e que formam um ângulo de 45° com a direção preferencial do extensômetro.

Estas ranhuras que se formam nas duas direções servem para melhorar as características de adesão da cola com o corpo de prova.



Figura 20 - Superfície tratada para materiais muito porosos.



Figura 21 - Procedimento de limpeza e desengraxe do local de colagem

Passo 3 - Realizar as marcações riscando com uma ponta metálica os eixos de posicionamento do extensômetro no lugar de colagem do corpo de prova. Jamais se deve utilizar o lápis ou lapiseira para fazer esse procedimento uma vez que a grafite é um material lubrificante e, portanto, prejudica a colagem.

É usual a utilização de gabaritos durante o processo de marcação para que haja uma padronização do ponto de colagem do extensômetro e a manutenção do alinhamento quando testando vários corpos de prova de mesma espécie. A Figura 22 apresenta um gabarito feito de chapa zincada utilizada para marcação de blocos de concreto. Bastante atenção aos seguintes pontos quando fazendo a marcação:

- a) *Risque a posição e o ângulo de colagem do extensômetro corretamente, com a linha de gabarito mantendo-se fora da área de colagem. Normalmente os extensômetros apresentam marcações em suas bases indicando seus centros, estas marcações são posicionadas na direção das linhas riscadas;*
- b) *Não faça riscos muito profundos, pois estes podem afetar os corpos de prova. Lembre-se que os riscos servem somente para guiar o usuário.*

Passo 4 - Escovar as rebarbas e restos de materiais estranhos da superfície. Remover óleos, graxas e gorduras com um absorvente limpo de algodão ou gaze usando um solvente adequado. Este passo deve ser feito repetidamente até que o algodão ou a gaze não saia mais

manchados de sujeira, a Figura 21 apresenta uma das passadas para o desengraxe. Tenha certeza sempre de usar a parte limpa do material absorvente, nunca usando o mesmo algodão ou gaze por mais de uma vez. A área a ser desengordurada deve ser maior que a área de colagem do extensômetro.

Instruções de precauções do Passo 4:

- a) *Se o material a ser medido for plástico, não use acetona ou qualquer outro solvente orgânico, uma vez que estes estragam a superfície plástica. Use Freon TF ou solventes à base de tetra cloreto de carbono;*
- b) *Quando a umidade relativa do ar está alta o vapor pode condensar-se na superfície depois de passado o algodão ou gaze com solvente. Neste caso retire a umidade com uma gaze seca. É interessante que a sala de colagem dos extensômetros seja climatizada com ar-condicionado, uma vez que estes aparelhos além de manter uma temperatura aproximadamente constante ainda retiram umidade do ar;*
- c) *Jamais toque a superfície tratada diretamente com os dedos ou a mão. É ideal colar os extensômetros na área desengordurada sem permitir que esta fique exposta ao ar por um longo período de tempo. A Figura 23 apresenta o bloco desengordurado e pronto para a colagem.*



Figura 22 - Gabarito para marcação dos extensômetros.



Figura 23 - Local de colagem do extensômetro limpo e desengraxado.

Passo 5 - Proceder com o posicionamento dos extensômetros. Usualmente são utilizadas fitas adesivas que são presas na extremidade da base do extensômetro que não contém os terminais. Assim consegue-se posicionar os extensômetros sendo que os mesmos

podem ser levantados de forma basculante facilitando o passo seguinte. É importante lembrar sempre que deste passo adiante a utilização de pinças adequadas será imprescindível.



Figura 24 - Posicionamento do extensômetro.



Figura 25 - Extensômetros posicionados.

Passo 6 - Esparramar a cola no local de colagem do corpo de prova e na face inferior do extensômetro. A área coberta pela cola deve ser um tanto maior do que área de base do extensômetro. Com as pinças, descer o extensômetros na sua posição final verificando as marcações. A Figura 26 e a Figura 27 apresentam o procedimento da colagem.



Figura 26 - Colagem do extensômetro transversal.



Figura 27 - Colagem do extensômetro longitudinal.

Passo 7 - Colocar um filme de plástico antiaderente sobre a área colada, antes da colocação do homogeneizador de tensões de colagem. Este filme plástico é utilizado devido sua propriedade de antiaderência junto à cola. Para colas que necessitam temperaturas elevadas de polimerização, devem-se utilizar plásticos convenientes para tal, como os filmes de *teflon*.

Os homogeneizadores de tensão são placas de aço ou alumínio com placas de borracha de silicone coladas a elas. Estes são posicionados com o lado da borracha sobre a área de colagem, ficando o lado da chapa metálica virada para cima.

Usualmente prende-se o homogeneizador com fita adesiva antes de prendê-los com as pinças de mola, evitando que o mesmo se movimente e estraguem a colagem. A Figura 28 mostra o filme de polietileno sobre a área colada antes do posicionamento do homogeneizador de tensões de colagem. A Figura 29 apresenta o homogeneizador posicionado e preso com a fita adesiva.



Figura 28 - Colocação do filme de polietileno.

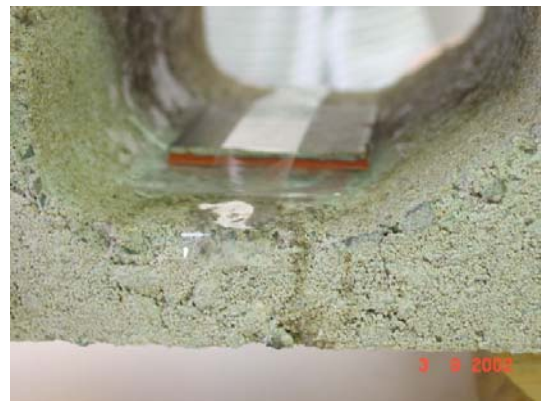


Figura 29 - Homogeneizador posicionado.

Passo 8 - Posicionar as pinças de mola para que seja fornecida a correta pressão definida pelo fabricante da cola. É interessante notar que as pinças de molas apresentam uma força constante, e desta forma para se obter a pressão ideal de colagem é necessário que o homogeneizador de tensões apresente uma área adequada para tal.

Para algumas colas a pressão de colagem é aquela exercida pela ponta dos dedos, e nestes casos, as colas são de secagem rápida a temperatura ambiente. A Figura 30 apresenta as duas pinças de mola utilizadas para fornecer a pressão de prensagem.

Passo 9 - Manter os blocos na temperatura, e pelo tempo, indicados pelo fabricante da cola. Em alguns casos a colagem deve ser curada em temperaturas elevadas, o que necessita de uma estufa com temperatura controlada.

Quando utilizando colas de pega a quente, muitas vezes é necessário, depois de retiradas as pinças de mola, ou seja, a pressão de colagem, recolocar os corpos de prova de volta na estufa a uma temperatura especificada pelo fabricante da cola para que haja um relaxamento das tensões de colagem. A Figura 31 apresenta este procedimento.

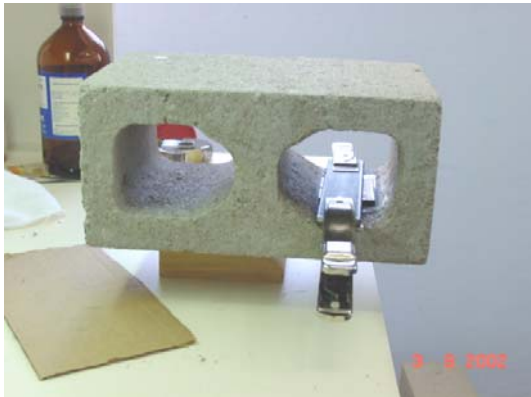


Figura 30 - Pinças de mola posicionadas.



Figura 31 - Relaxamento das tensões de colagem.

Passo 10 - Verificar a resistência de isolamento e a resistência do extensômetro, confirmando se o processo não alterou suas características.

4.4 Colagem de extensômetros em concreto e argamassa:

Quando colando extensômetros em superfícies de concreto ou argamassas, deve-se dispensar bastante atenção para os seguintes pontos:

- 1) Remova completamente as partículas de sujeira com uma escova de aço;
- 2) Se álcalis liberados estão aparentemente depositados na superfície de medição, estes devem ser neutralizados segundo o procedimento descrito abaixo:
 - a) Primeiramente deve-se limpar a superfície com uma esponja encharcada em uma mistura de cloreto de zinco ($ZnCl_2$), ácido fosfórico (H_3PO_4) e água, para que os álcalis sejam neutralizados, em uma proporção de 2%, 3% e 95% respectivamente;
 - b) Em seguida deve-se limpar o local somente com água, e então colar os extensômetros;
- 3) A argamassa e o concreto tendem a ter umidade saindo de si próprios e condensando em sua superfície. Assim, na superfície deve ser aplicada uma camada de adesivo para eliminar os efeitos indesejáveis dessa umidade;
- 4) Polímeros especiais podem ser utilizados para regularizar as faces dos corpos de prova de concreto ou de argamassa, e ao mesmo tempo oferecer-lhes a impermeabilidade sugerida no item anterior;

- 5) Quando os corpos de prova estão bem secos ou quando a colagem de extensômetros e o ensaio ocorrem no mesmo dia, pode ser utilizada a massa corrida para regularização das faces;
- 6) Quando a superfície não é muito rugosa pode-se utilizar a própria cola para fazer a regularização seguindo os procedimentos seguintes:
 - a) Aplique a cola ao concreto sobre uma área consideravelmente maior a aquela da base do extensômetro de modo que os poros sejam preenchidos, e cubra esta camada com plástico celofane para não permitir que se formem bolhas de ar;
 - b) Remova o plástico celofane depois de um período de tempo duas vezes mais longo do que o tempo preconizado para o endurecimento da cola;
 - c) Se a superfície se encontrar enrugada, de um acabamento com uma lixa #300 e limpe o local com um solvente tipo tetra cloreto de carbono ou *freon TF*;
 - d) Por fim cole o extensômetro sobre esta camada regularizada
- 7) Em todos os casos de regularização da superfície deve-se manter em mente que uma camada excessivamente grossa fornecerá medidas imprecisas.

5 FIAÇÃO E LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

A ligação dos fios pode ser feita diretamente nos terminais dos extensômetros, ou por intermédio de terminais de ligação colados nos corpos de prova. Estes terminais são usualmente vendidos pelas empresas que comercializam e produzem os extensômetros. A Figura 32 apresenta um extensômetro ligado aos terminais de ligação onde também são ligados os fios.

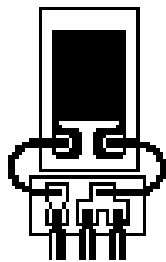


Figura 32 - Terminais colados.



Figura 33 - Estação de solda.

A soldagem dos fios no extensômetro é feita com solda de estanho sem o uso de pastas comuns ou ácidos para facilitar a soldagem. Usualmente são utilizados fios de solda de estanho $\phi 0,7$ ou $\phi 0,8mm$, e que possua em sua composição química uma quantidade maior de estanho em relação a chumbo.

Podem ser utilizados os ferros de solda para ligação dos fios nos extensômetros, porém, o ideal é a utilização de estações soldadoras com temperatura controlada. Estas estações podem ser encontradas em casa de equipamentos pra eletrônica ou mesmo nas grandes empresas que comercializam os extensômetros. A Figura 33 apresenta uma estação de solda com controlador de temperatura.

A maioria das empresas que fabricam os extensômetros atualmente produz versões que vêm de fábrica com os fios já soldados nos extensômetros.

6 PROTEÇÃO E IMPERMEABILIZAÇÃO

O desempenho dos extensômetros é facilmente degradado pela ação da umidade, ataques químicos ou por choques mecânicos. Como resultado, os extensômetros necessitam de graus de proteção que variam de acordo com a severidade do ambiente em que ele operará.

Enquanto é prática comum, para aplicações em laboratório, o uso de extensômetros sem qualquer proteção, é recomendável que cuidados sejam tomados para que não haja baixa de isolamento devido a umidade presente no ar.

Existem no mercado vários tipos de impermeabilizantes especiais, como: cera de abelha filtrada, borrachas de silicone, resinas de poliéster ou epóxi, dentre outros. As borrachas de silicone são mais comumente utilizadas, no entanto, cuidados devem ser tomados uma vez que as borrachas de silicone comuns são corrosivas e podem danificar os extensômetros. Assim, quando se optar pelo uso do silicone verificar se na especificação da mesma existe a certificação de não corrosividade.

7 EQUIPAMENTOS DE LEITURA

Todos os equipamentos de leitura de deformações disponíveis baseiam-se no circuito em ponte de *Wheatstone*. De forma que é possível montar tais circuitos com resistores de precisão para fechar a ponte nos casos de ligações em $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ pontes, bastando um multímetro de precisão para realizar as leituras de variação de tensão para os incrementos de carga.

Usualmente, em multímetros digitais mais modernos é possível reajustar a leitura em zero antes da introdução de cargas. Assim, estes fornecem o valor da variação de tensão para cada incremento de carga. O mesmo multímetro que fará a leitura de saída pode ser usado para verificar a tensão de entrada na ponte.

Tendo o circuito montado, sabe-se da **Equação 33** que a deformação total de saída será:

$$-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \frac{e \cdot 4}{K \cdot E} \therefore$$

$$-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = e \cdot \left(\frac{4}{K \cdot E} \right)$$

O valor entre parênteses da última equação é constante e, portanto é um fator multiplicativo da variação de tensão e que transforma esta em deformação.

Existem vários equipamentos modernos para leitura, aquisição e tratamento de dados quando se tratando de extensômetros elétricos, desde equipamentos mais simples de detecção de nulo até sistemas de aquisição de dados de múltiplos canais por varredura.

A Figura 34 apresenta o modelo PCD-300 da KYOWA, o qual é conectado a um PC somente via USB convertendo-o em um sistema de aquisição e tratamento de dados. Para operação deste equipamento é necessário um software que é gratuito para quem adquire o equipamento KYOWA.



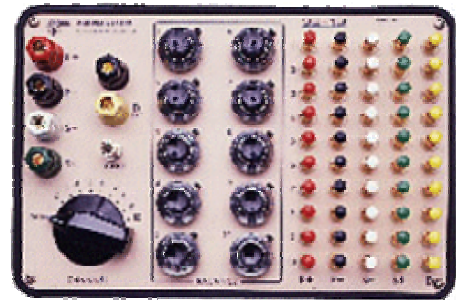
**Figura 34 - PCD-300 Interface de sensoriamento
(KYOWA)**



**Figura 35 - UCAM-60A Indicador de deformação digital
(KYOWA)**



**Figura 36 - Modelo P3 Gravador e Indicador de
Deformação (Measurements Group)**



**Figura 37 - Modelo SB-10 Com seletor para dez canais
(Measurements Group)**

8 INFORMAÇÕES SOBRE FABRICANTES

A maioria dos fabricantes de extensômetros e materiais para extensometria fornecem gratuitamente folhetos e catálogos com modelos, tamanhos e principais características de seus produtos. Abaixo são apresentadas as três principais fornecedoras de extensômetros no Brasil.

KYOWA

http://www.kyowa-ei.co.jp/english/index_e.htm

Representante no Brasil: PANAMBRA

+55 (11) 3346-6329

MEASUREMENTS GROUP

<http://www.vishay.com/company/brands/micromasurements/>

Representante no Brasil: AROTEC

+55 (11) 4613-8600

EXCEL SENSORES

<http://www.excelsensor.com.br/>

+55 (11) 4781-1490

9 BIBLIOGRAFIA

BARRETO JR. E. **Conhecendo o extensômetro elétrico de resistência - Manual técnico.**

DOEBELIN, E. O. **Measurement systems - Application and design.** McGraw Hill, New York, 1990.

KYOWA. **Measuring instruments for stress solutions.** Tokyo, Cat. N°. 901D-U62.

KYOWA. **Strain gages: A complete lineup of high performance strain gages and accessories.** Tokyo, Cat. N°. 101E-U1.

MARTINELLI, D. A. O. **Contribuição ao emprego de extensômetros elétricos de resistência no estudo de estruturas.** EESC, Tese de doutoramento, São Carlos, 1961.

MEASUREMENTS GROUP. **Catalog 500 - Precision Strain Gages.** Raleigh, 1996.

MEASUREMENTS GROUP. **Experimental stress analysis - Notebook.** Raleigh, 1987.

MEASUREMENTS GROUP. **Student manual for strain gage technology.** Raleigh, 1993.

TAKEYA, T. **Análise experimental de estruturas.** EESC, São Carlos, 2001. Notas de aula.