

Introdução a Análise Experimental de Estruturas

Prof. Dr. Pedro Afonso de Oliveira Almeida
Professor da EPUSP

José Fernando Sousa Rodrigues
Doutorando da Escola Politécnica da USP da área Análise Experimental de Estruturas

Texto do Curso
“Introdução a Análise Experimental de Estruturas”
realizado no Núcleo de Tecnologia do NUTEC, ao longo do encerramento das
obras de recuperação estrutural do Estádio Castelão, Fortaleza Ceará

Sumário

1. Apresentação

2. Conceitos Básicos Sobre Extensômetria Elétrica de Resistência

3. Processo de colagem

4. Ponte de Wheatstone

4.1 Circuito $\frac{1}{4}$ de ponte com 2 fios

4.2 Circuito $\frac{1}{4}$ de ponte com três fios

4.3 Resistor de Calibração

4.4 Possíveis Arranjos das Pontes de Wheatstone

4.5 Medidas de Força (Célula de Carga)

5. Exemplos de aplicação

6. Aquisição de dados

Referência Bibliográfica

1 Apresentação

Curso sobre extensometria elétrica de resistência e aquisição automatizada de dados, voltado aos ensaios de monitoração de estruturas de grande porte. No decorrer do curso, dar-se-á ênfase aos aspectos práticos sobre a aquisição de dados, mais especificamente ao equipamento ADS-2000, constituído por uma placa condicionadora AC-2122 e duas placas conversoras AI-2161 e AI-2164, controlados pelo programa AQDADOS, todos fabricados pela LYNX Tecnologia Eletrônica Ltda.

A extensometria elétrica vem sendo empregada em diversos setores da Engenharia, na determinação de deformações específicas que efetivamente ocorrem em estruturas. Para seu entendimento e correta aplicação, é essencial que sejam lembrados conceitos fundamentais desenvolvidos em cursos de Resistência de Materiais e Teoria da Elasticidade. O conhecimento dos estados de tensão a que está submetido um elemento estrutural é de fundamental importância, considerando que na maioria dos casos esses valores são os limitantes de projeto que devem ser obedecidos por engenheiros.

2 Conceitos básicos sobre extensometria elétrica de resistência

Os extensômetros elétricos (Strain Gage) são sensores baseados na propriedade elétrica de um fio que quando submetidos a um alongamento ou um encurtamento apresentam uma variação da resistência elétrica proporcional ao alongamento, equação 1.

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

onde,

R é a resistência elétrica do fio indeformado, em Ω ; L é o comprimento do fio indeformado,

Sabe-se que a resistência de um fio de metal é dado por:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

onde ρ é o coeficiente de resistividade do material, em $\Omega \text{ m}$;

A é a área, em m^2 ;

L é o comprimento, em m;

R é a resistência elétrica do condutor, em Ω .

em m; ΔL é a variação do comprimento do fio, em m; ΔR é a variação da resistência elétrica, em Ω .

Verifica-se experimentalmente que a relação entre a resistência elétrica e o alongamento é linear para a faixa de interesse de pequenas deformações. Dessa forma, a expressão 1 é modificada para:

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

onde, k é a constante característica do extensômetro (gage factor); ε é a deformação específica, em m/m.

Baseados nessa propriedade os extensômetros elétricos são constituídos por filamentos metálicos, orientados em uma direção preferencial, montados sobre um suporte de papel ou de resina plástica e coberto por uma capa de feltro ou de mesmo material do suporte. O suporte serve como base de fixação do filamento e como isolante entre o filamento e a superfície da peça sobre a qual o extensômetro deverá ser colado, figura 1.

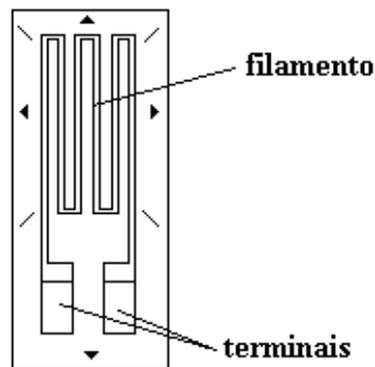


Figura 1 – Extensômetro elétrico de resistência

3 Instalação dos extensômetros elétricos de resistência

Para a determinação das tensões nas superfícies das peças considera-se que o sensor tem rigidez bem menor que peça, o que permite que não ocorra esforço cisalhante entre o sensor e a superfície da peça, garantido que as deformações medidas pelo sensor (filamento metálico) sejam as mesmas da superfície da peça. A garantia dessa hipótese está no processo de preparação da superfície e colagem. O propósito da preparação da superfície é obter uma superfície plana e quimicamente limpa, com aspereza apropriada para as exigências de instalação do extensômetro. A alcalinidade de superfície deve ter um pH em torno de 7. Na preparação da superfície para colagem do extensômetro são removidas as impurezas tais como ferrugem, pó, camadas galvanizadas, óxidos, etc.

LSE

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

Para a redução dos erros de medida deve-se dar especial atenção aos procedimentos de colagem. Antes de colar o extensômetro deve-se marcar a superfície com um par de linhas de referência na região onde a medida de tensão vai ser feita. As linhas são marcadas perpendicularmente entre si, com uma linha orientada na direção da medida de tensão. O extensômetro será instalado então de forma que as marcas do sensor (de índice triangulares) que definem as direção longitudinal e a direção transversal da grade sensível do extensômetro estejam alinhadas com as linhas de referência na superfície da peça.

Normalmente o processo de colagem tem as seguintes etapas:

- preparação da superfície da peça, com a limpeza da superfície;
- fixação do sensor com adesivo adequado, de preferência especificado pelo fabricante do extensômetro, como os adesivos a base de cyanoacrylate (super bonder);
- para fixar o extensômetro na peça deve-se inicialmente manter pressionado o extensômetro contra a peça durante 2 minutos, tempo necessário para o início da pega da cola;
- proteção do sensor contra umidade. Para isso, pode-se utilizar borracha de silicone, verniz polyurethane , etc.
- Após 10 minutos da colagem com adesivos do tipo cyanoacrylate o extensômetro poderá ser utilizado para ensaios estáticos.

Após a colagem e a proteção do extensômetro a instrumentação deve conter as parte demonstradas na figura 2.

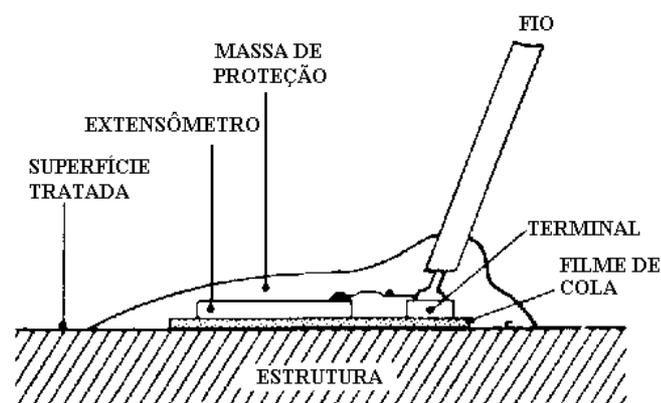


Figura 2 – Detalhe esquemático da colagem do extensômetro

4 Ponte de Wheatstone**4.1 Circuito básico**

Desde a invenção do extensômetro elétrico de resistência (strain gage) no final do século dezenove, a ponte de Wheatstone tornou-se o melhor circuito para a instrumentação. Esta popularidade é devida principalmente: ao desempenho deste tipo de circuito para detectar pequenas mudanças de resistência produzidas pelo extensômetro (strain gage) em função da mudança de forma; por permitir ajuste da tensão (ponto nulo) e pela possibilidade de compensar a variação de temperatura do extensômetro no circuito, com a utilização de um terceiro fio. Em diferentes níveis, cada um desses fatores é essencial para a exatidão da medida da deformação específica.

Para a determinação do estado de tensões na superfície de um corpo de prova podem ser utilizados extensômetros uniaxiais, biaxiais e triaxiais. Neste caso, cada sensor, correspondente a uma única direção de medição, é conectado a um braço do circuito (ponte de Wheatstone).

O circuito da ponte de Wheatstone consiste em quatro resistências elétricas (R_1, R_2, R_3 e R_4), conectadas nos bornes 1, 2, 3 e 4, formando arranjos em série e em paralelo. Esse circuito é excitado por uma voltagem (E). O sinal de saída (E_0) é medido nos bornes opostos ao da excitação, figura abaixo.

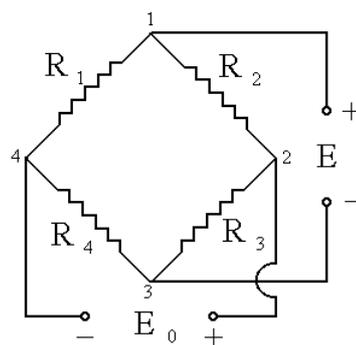


Figura 3 – Desenho esquemático do circuito da ponte de Wheatstone

Verifica-se neste circuito elétrico que para a condição de simetria de resistência, o sinal de saída E_0 (diferença de potencial) é igual a zero.

L S E

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

De acordo com a primeira lei de Ohm, dada por $E = RI$, torna-se possível a determinação das correntes em cada braço da ponte.

Calculando-se a corrente elétrica nos braços das resistências R_2 e R_3 , e das resistências R_1 e R_4 , para a mesma diferença de potencial, obtém-se:

$$I_{23} = \frac{E}{R_2 + R_3} \text{ e } I_{14} = \frac{E}{R_1 + R_4} \quad (4)$$

Considerando que o sinal de saída E_0 é dado por

$$E_0 = R_1 I_{14} - R_2 I_{23} \quad (5)$$

obtem-se a expressão geral da diferença de potencial entre os bornes 2 e 4, dada por:

$$E_0 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) E \quad (6)$$

Nas condições de $E_0 = 0$, correspondente a ponte equilibrada, tem-se:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_4} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (7)$$

de onde se verifica a proporcionalidade existente entre as resistências elétricas de cada braço da ponte.

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (8)$$

4.2 Circuito ¼ de ponte com 2 fios

O circuito ¼ de ponte com dois fios consiste na substituição da resistência R_1 por um extensômetro elétrico de resistência R_g (strain gage) conectado ao circuito por meio de dois fios com resistência R_L , conforme figura 4.

Na investigação experimental os extensômetros são colados em peças estruturais que ficam afastadas dos condicionadores de extensometria e conseqüentemente dos respectivos circuitos. Dependendo da distância entre o sensor (extensômetro) e o condicionador, o sinal de saída pode sofrer perturbações devido a resistência elétrica dos fios e a variação de temperatura.

Se a resistência dos dois fios $2R_L$ for desprezível a ponte permanece equilibrada, mas se a resistência dos fios for considerável (devido ao comprimento) a ponte perde o equilíbrio e a sinal de saída E_0 deixa de ser zero. Isso ocorre em decorrência dos dois fios estarem em série com o extensômetro elétrico, de onde a resistência do braço da ponte fica sendo $R_g + 2R_L$.

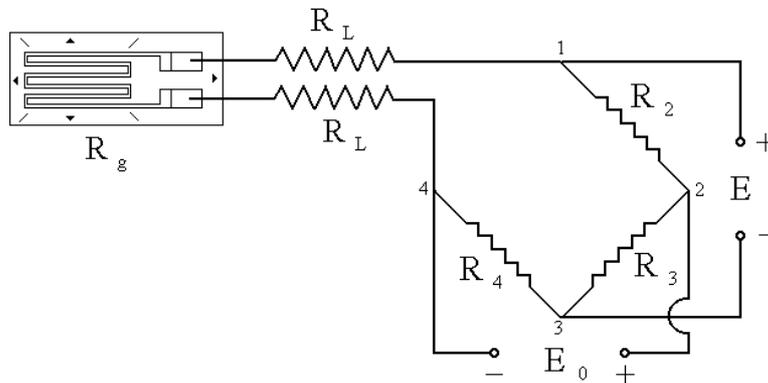


Figura 4 – Circuito $\frac{1}{4}$ de ponte com dois fios

O efeito do comprimento do fio torna-se significativo quando se utiliza extensômetros de 120Ω e fios de 0.40 mm de diâmetro (AWG26). Como exemplo considere que a resistência $2R_L$ dos fios seja igual a 1.7Ω . Para um extensômetro com constante característica k (gage factor) igual a 2, essa resistência do fio provoca um desequilíbrio na ponte que corresponde uma deformação específica de aproximadamente $7000\mu\epsilon$ (microstrain). Além disso, os fios representam uma resistência constante no braço da ponte e efetivamente esse efeito reduz a sensibilidade da ponte, atenuando o sinal de saída ao longo do ensaio. Para valores modestos de resistência dos fios, a porcentagem de perda no sinal é aproximadamente igual à relação entre a resistência do fio e resistência do extensômetro (strain gage). No exemplo acima essa perda ficou em torno de 1.5%.

O desequilíbrio inicial provocado pela resistência elétrica dos fios pode ser compensado eletronicamente por meio de um circuito eletrônico com balanço automático ou manual da ponte, ou pode ser compensado matematicamente subtraindo-se dos dados coletados durante o ensaio a deformação provocada pela resistência dos fios. Contudo, o maior problema não é a resistência elétrica dos fios, mas sim a variação da temperatura ao longo dos fios durante o processo de medição. Esse efeito causa mudança na resistência dos fios e provoca erros no processo de medição. Por exemplo, fios de cobre mudam sua resistência em aproximadamente

2.2% para variações de 5.5°C de temperatura. Para extensômetros de 120 Ω e $k = 2$ essa mudança provoca um erro equivalente de aproximadamente 156 με (microstrain) para cada 5.5°C de mudança de temperatura. O erro provocado pela mudança de temperatura ao longo dos fios pode ser solucionado pela simples adição de um terceiro fio no circuito da ponte. Esse esquema de circuito chama-se circuito com ¼ de ponte com três fios.

4.3 Circuito ¼ de ponte com três fios

Esse circuito utiliza um extensômetro em configuração de ¼ de ponte com três fios, figura 5. O primeiro fio fica em série com o extensômetro (strain gage), o terceiro fio fica montado no outro braço da ponte, em série com o resistor R_4 , e o segundo fio deixa de fazer parte da ponte (figura 5). Se os fios são do mesmo tipo e apresentam o mesmo comprimento, a variação de resistência elétrica provocada pela mudança de temperatura que ocorre ao longo do primeiro fio ocorre com o sinal trocado no terceiro fio. Isso ocorre porque os fios estão em braços opostos da ponte, ou seja, o terceiro fio compensa o primeiro. A variação de resistência provocada pela mudança de temperatura só afeta o segundo fio, ou seja, fica reduzida em 50% esse problema quando comparado com a configuração com dois fios. Além disso, essa configuração de ponte reduz o desequilíbrio da ponte provocada pela resistência dos fios já que os fios estão em braços opostos da ponte.

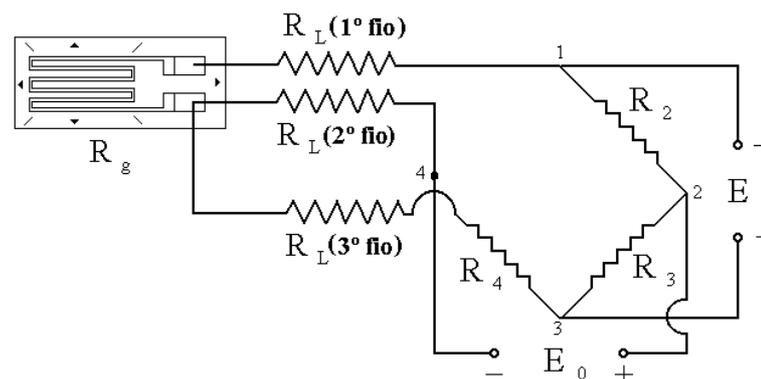


Figura 5 – Circuito com ¼ de ponte com três fios

4.4 Resistor de Calibração

O extensômetro deve ser calibrado antes de ser usado. Periódica calibração é necessária para se verificar a exatidão e a linearidade da instrumentação utilizada. A calibração também é utilizada para ajustar a amplificação, de forma que o comando de registro de saída corresponda ao comando predeterminado de entrada. Um exemplo de tal situação ocorre quando o extensômetro está instalado longe dos condicionadores de sinais. O sinal é consideravelmente atenuado pela resistência do fio. Neste caso a calibração é usada para ajustar a sensibilidade do instrumento de tal forma que o registro do sinal do extensômetro seja adequado. Além disso, a calibração é usada para ajustar a saída dos indicadores ou gravadores de sinais para um fator de escala conveniente.

Calibração Direta

Há basicamente dois métodos de calibração – calibração direta e indireta. Com a calibração direta, um valor mecânico conhecido é aplicado ao sensor do sistema de medição e o sinal de saída é usado para verificar ou ajustar o valor lido. Por exemplo, no caso de uma célula de carga é aplicado um valor conhecido de carga e correlaciona-se o sinal de saída com o valor da carga aplicada. Dessa forma, levanta-se uma reta de calibração que relaciona o sinal de saída do sensor com o valor da carga aplicada. Esse método de calibração não é aplicável para extensômetros elétricos de resistência. Para a maioria dos casos, utiliza-se a calibração indireta.

Calibração Indireta

A abordagem mais prática e largamente utilizada na calibração dos extensômetros elétricos de resistência é o método de calibração indireta. Esse método consiste em simular uma deformação nos terminais do extensômetro por meio de uma resistência elétrica conhecida. Nessa simulação o aumento da resistência corresponde a um alongamento no extensômetro e a diminuição corresponde a um encurtamento. A simulação de deformação no extensômetro por meio de aumento da resistência não é muito prática porque envolve uma mudança muito pequena de resistência. Essa resistência, que deve ser colocada em série com o extensômetro para simular tal aumento, além de ser muito pequena deve ser com um resistor de precisão, o que inviabiliza tal procedimento. Mesmo que se utilize uma resistência com

LSE

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

essas características, ainda assim existirão dúvidas quanto à impedância no contato dessa resistência com os terminais da ponte. Outra forma é a simulação de uma diminuição da resistência elétrica no braço da ponte onde se encontra o extensômetro, ou seja, simular um encurtamento no extensômetro. Esse método, conhecido como resistor de calibração (Shunt cal), não necessita de uma resistência de precisão.

O procedimento de calibração consiste no posicionamento de um resistor de calibração (R_{cal}) em paralelo com o extensômetro (R_g), figura 6. A resistência equivalente (R_{eq}) desse arranjo é uma resistência menor que a resistência do extensômetro, ou seja, simula-se dessa forma um encurtamento no extensômetro (equação 11).

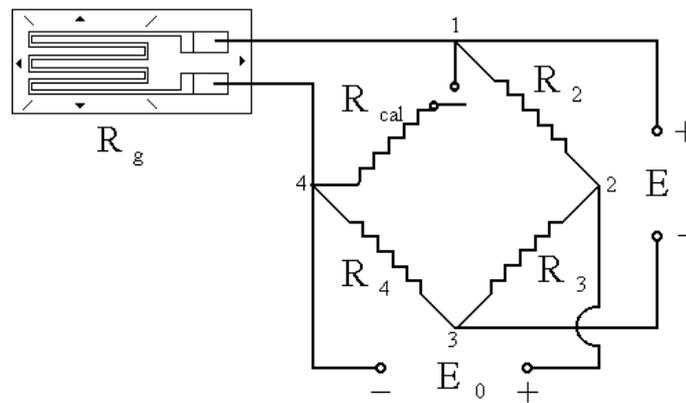


Figura 6 – Resistor de calibração (shunt cal)

$$R_{eq} = \frac{R_{cal} \times R_g}{R_{cal} + R_g} \quad (11)$$

A variação de resistência no braço da ponte é igual

$$\Delta R = R_{eq} - R_g = \frac{R_{cal} \times R_g}{R_{cal} + R_g} - R_g = R_g \left(\frac{R_{cal}}{R_{cal} + R_g} - 1 \right) \quad (12)$$

$$\frac{\Delta R}{R_g} = \frac{R_{cal}}{R_{cal} + R_g} - 1 = \frac{-R_g}{R_{cal} + R_g} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta R}{R_g} = k\varepsilon \quad (14)$$

LSE

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

$$k\varepsilon = \frac{-R_g}{R_{cal} + R_g} \quad (15)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \times \frac{-R_g}{R_{cal} + R_g} \quad (16)$$

Para o caso de verificação do desempenho da instrumentação, o valor de R_{cal} pode ser determinado em função de uma deformação específica a ser simulada:

$$k\varepsilon = \frac{-R_g}{R_{cal} + R_g} \quad (17)$$

$$R_g \times k \times \varepsilon + R_{cal} \times k \times \varepsilon = -R_g \quad (18)$$

$$R_g \times k \times \varepsilon = -R_{cal} \times k \times \varepsilon - R_g \quad (19)$$

$$R_{cal} = -\frac{R_g}{k \times \varepsilon} - R_g = -R_g \left(1 + \frac{1}{k \times \varepsilon} \right) \quad (20)$$

Exemplo:

Para $\varepsilon = -0.001 \text{ m/m}$, com $k = 2$ e $R_g = 120 \Omega$, tem-se:

$$R_{cal} = -120 \left(1 + \frac{1}{2 \times (-0.001)} \right) = 59880 \Omega \quad (21)$$

Alguns condicionadores de sinais já apresentam um circuito interno de calibração. Por exemplo, no condicionador ADS-2000 de fabricação da LYNX já traz internamente esse circuito. Esse circuito simula automaticamente as deformações no extensômetro, por meio de resistências internas R_{cal} , e fornece os valores de leitura de saída da ponte (E_0) ao software de controle (AQDADS, desenvolvido pela LYNX). O software ajusta uma reta de calibração, por meio de mínimos quadrados, que relaciona a deformação no extensômetro com a voltagem de leitura (figura 7).

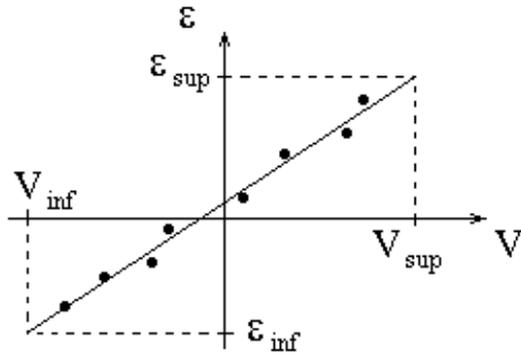


Figura 7 – Reta de calibração.

Verifica-se na figura que não necessariamente a reta passa pelo zero. Isto ocorre quando já existe embutido no extensômetro uma deformação ou quando existe, além da resistência do extensômetro, uma resistência adicional ao circuito da ponte (resistência do fio, resistência de eventuais soldas, etc.).

Para se determinar a reta de calibração é necessário fornecer ao software a constante característica do extensômetro. No caso do conjunto ADS-2000/AQDADOS o valor que é fornecido ao programa é o valor de engenharia. Esse valor corresponde a deformação específica simulada quando o sistema introduz em paralelo ao extensômetro o resistor de calibração R_{cal} . O valor do resistor de calibração do ADS-2000 é $R_{cal} = 68098\Omega$.

Considerando um extensômetro de 120Ω , com constante característica $k = 2$ (gage factor), o valor de engenharia fornecido ao programa AQDADOS é:

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \times \frac{-R_g}{R_{cal} + R_g} = \frac{1}{2} \times \frac{-120}{68098 + 120} = -0.00087953 \text{ m/m} \quad (22)$$

Para se evitar perda de precisão numérica o valor fornecido ao programa AQDADOS é multiplicado por $\times 10^6$, e o valor de engenharia fica sendo:

$$\varepsilon = -879.530 \mu\text{m/m} \quad (23)$$

Nesse número já se considera todas as informações necessárias (resistência do extensômetro, constante característica e resistor de calibração) para que o programa AQDADOS converta o valor de saída da ponte e_0 (em volts) em valor de engenharia – deformação específica $\varepsilon(\mu\text{m/m})$.

5 Exemplos de aplicação

Arranjos básicos da ponte de Wheatstone

A seguir estão apresentados outras configurações da Wheatstone:

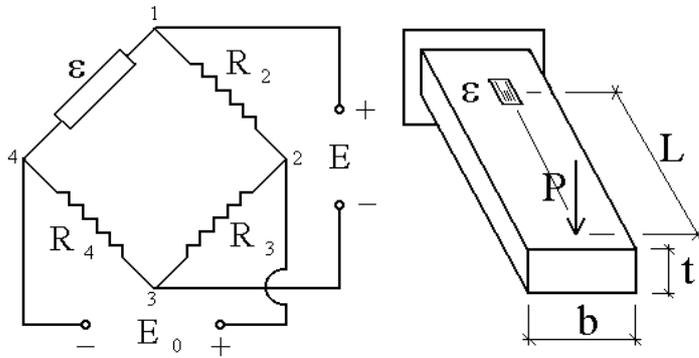


Figura 8 – Um extensômetro ativo (flexão)

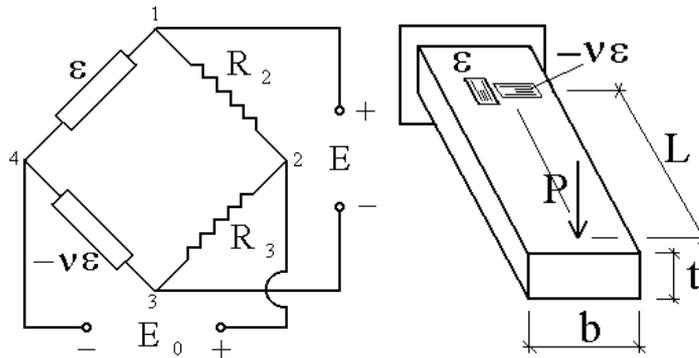


Figura 9 – Dois extensômetros ativos (flexão)

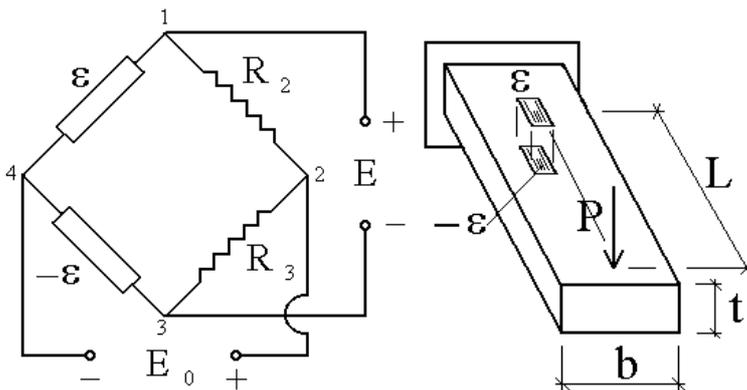


Figura 10 – Dois extensômetros ativos (flexão)

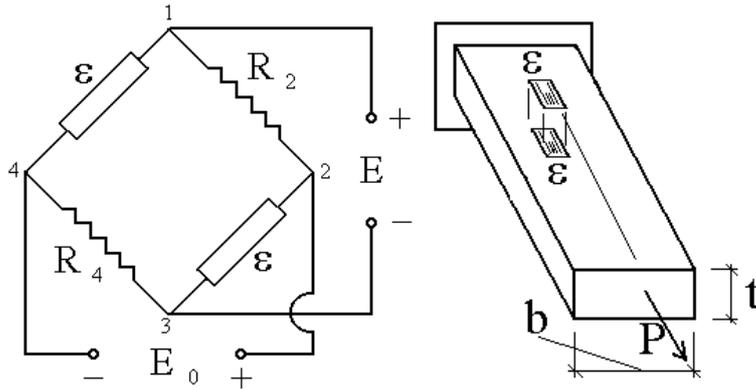


Figura 11 – Dois extensômetros ativos (esforço normal)

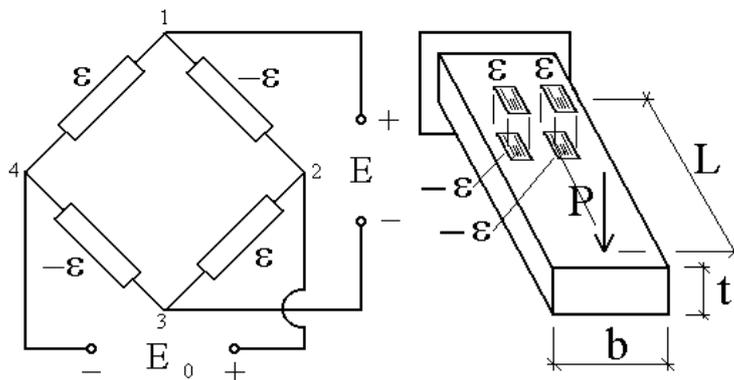


Figura 12 – Quatro extensômetros ativos (flexão)

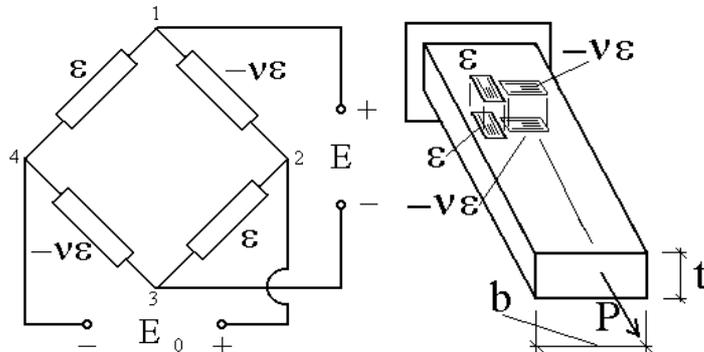


Figura 13 – Quatro extensômetros ativos (esforço normal)

Medidas de Força (Célula de Carga)

A medida de força é uma grandeza física de grande interesse, principalmente nos laboratórios, onde são aplicadas no estudo do comportamento de modelos de estruturas e de componentes estruturais. Essa grandeza pode ser medida por meio de anéis dinamométricos, ou por células de carga a base de extensômetros elétricos.

LSE

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

Os principais parâmetros que caracterizam uma célula de carga são: capacidade nominal da célula (tf ou kN) e a sensibilidade ou constante característica da célula (mV/V). Com essas duas informações é possível configurar qualquer sistema de aquisição de dados para utilização de uma célula de carga. O arranjo básico da ponte de Wheatstone, para aplicação com célula de carga, é apresentado na figura 14. Nesse arranjo são considerados quatro extensômetros ativos. Dois extensômetros medem deformações longitudinais e outros dois extensômetros medem deformações transversais. O arranjo com quatro extensômetros ativos permite um sinal de saída mais forte, quando comparado com arranjos com menos extensômetros, e melhora a sensibilidade da célula. Na figura 14 observa-se também a disposição dos extensômetros na célula e o esquema de ligação da ponte ao condicionador de dados ADS-2000.

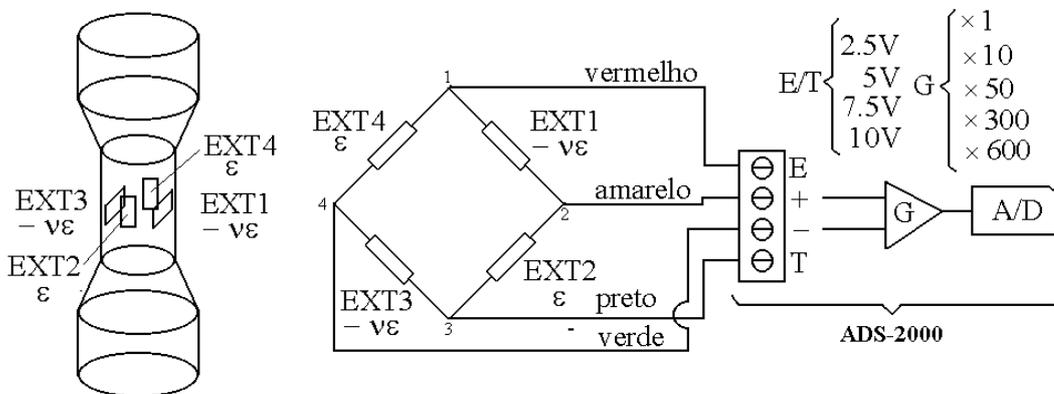


Figura 14 – Célula de carga

A configuração do sistema de aquisição de dados é baseada nos valores de capacidade nominal da célula e sensibilidade da célula (valores fornecidos pelo fabricante da célula de carga). No caso do sistema de aquisição de dados ADS-2000, é necessário fornecer ao software de controle do sistema (AQDADOS) uma reta que relaciona o sinal de saída da ponte (diferença de potencial entre os terminais + -, em volts) e a carga aplicada na célula. Dessa forma, o sistema de aquisição pode converter o valor de saída (em volts) em valor de engenharia (em unidade de força, tf ou kN).

Considere por exemplo uma célula de carga do tipo TD10 de fabricação da Kratos. Essa célula de carga tem capacidade de 100 kN e constante característica (sensibilidade) de 1,95mV/V. Na configuração do ADS-2000 foram parametrizadas a excitação da ponte (E/T) e a amplificação do sinal nos terminais (+ -), ganho (G). Esses valores foram respectivamente de 10 V e de $\times 300$. Para essa célula, com a parametrização acima, tem-se:

LSE

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

$$100\text{kN} \rightarrow 1,95\text{mV/V} \quad (24)$$

$$100\text{kN} \rightarrow 10 \times 1,95 = 19,5\text{mV}, \text{ com } E = 10\text{V} \quad (25)$$

$$100\text{kN} \rightarrow 19,5 \times 300 = 5,85\text{V}, \text{ com } G = \times 300 \quad (26)$$

Assim, quando a carga na célula chegar a 100kN o valor de saída, já condicionado, vai ser de 5,85V.

No AQDADOS essas informações são introduzidas na janela de configuração dos canais de entrada. Essa janela tem o seguinte aspecto:

Configuração dos canais de entrada						
Canal	Nome	Unidade	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Tipo	Faixa (V)
01	Cel. TD10	kN	170,94	-170,94	Linear	$\pm 10\text{V}$

Devem ser fornecidos ao programa AQDADOS os limites superior e inferior relativos as faixas de voltagens de leitura. Essas faixas podem ser $\pm 10\text{V}$, $\pm 5\text{V}$, $\pm 2,5\text{V}$ e $\pm 1,25$. No exemplo da célula TD10 o valor máximo de voltagem é de 5,85V com 100kN de carga, optou-se por uma faixa de leitura de $\pm 10\text{V}$. Com essa faixa de leitura os limites superior e inferior ficam sendo 170,94kN e $-170,94\text{kN}$ respectivamente (ver reta de calibração, figura 15).

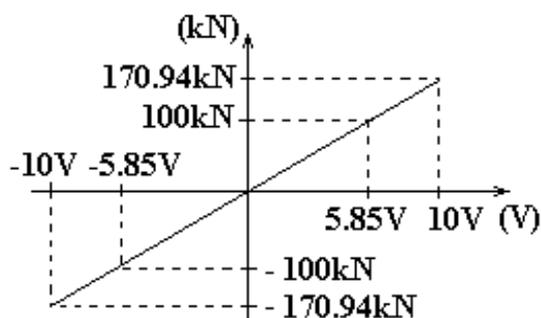


Figura 15 – Reta de calibração.

Se os valores de força que serão medidos na célula de carga forem menores do que por exemplo 40kN, é possível fechar a faixa de leitura, aumentando-se assim a resolução da aquisição. Quando for aplicado na célula 40kN, o valor de saída do sinal vai ser de 2,34V. Ajustando-se a faixa de leitura para $\pm 2,5\text{V}$ os limites superior e inferior ficam sendo 42,73kN e $-42,73\text{kN}$ respectivamente.

Configuração dos canais de entrada						
Canal	Nome	Unidade	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Tipo	Faixa (V)
01	Cel. TD10	kN	42,73	-42,73	Linear	$\pm 2,5V$

As vezes é necessário levantar as características de uma célula de carga para uma simples aferição da sensibilidade ou para caracterização de uma célula recém fabricada. Para essa finalidade é possível proceder de forma inversa ao item anterior, ou seja, tendo-se a reta de calibração achar a constante característica da célula.

Considere uma célula de carga de capacidade de 3000kN. Essa célula de carga foi aferida no LEM - Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da EPUSP com o auxílio de um sistema de aquisição de dados ADS-2000 e uma máquina universal de ensaio de capacidade de 2000kN. O sistema ADS-2000 foi configurado para uma excitação de 10V e uma amplificação de $\times 300$. Com essa configuração foram aplicados na célula valores conhecidos de carga. A cada valor de carga aplicada registrava-se o valor da tensão de saída. Esses resultados estão resumidos na tabela 1 e no gráfico da figura 16.

Tabela 1 – Ensaio de calibração.

Carga (kN)	Tensão (V)
0	-0,0848
-200	-0,4671
-400	-0,8465
-600	-1,2336
-800	-1,6152
-1000	-2,0049
-1200	-2,3824
-1400	-2,7689
-1600	-3,1520

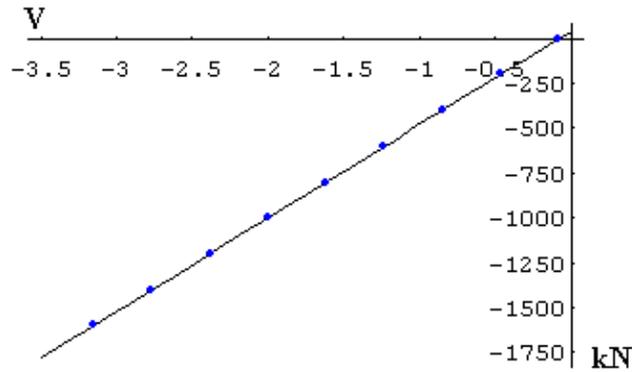


Figura 16 – Reta de calibração.

A inclinação da reta do gráfico da figura 16 é:

$$521.34 \text{ kN/V} \quad (27)$$

$$521.34 \text{ kN} \rightarrow 1 \text{ V} \quad (28)$$

$$3000 \text{ kN} \rightarrow x \quad (29)$$

$$x = 5.7544 \text{ V} \quad (30)$$

$$\text{sensibilidade} = \frac{x}{E \times G} = \frac{5.7544}{10 \times 300} = 1.92 \text{ mV/V} \quad (31)$$

Existem outros modelos de células de cargas diferentes dos apresentados acima. Por exemplo, pode-se utilizar um anel dinamométrico devidamente instrumentado como célula de carga (figura 17). Nesse caso o arranjo da ponte fica um pouco diferente, mas todos os conceitos acima são aplicáveis.

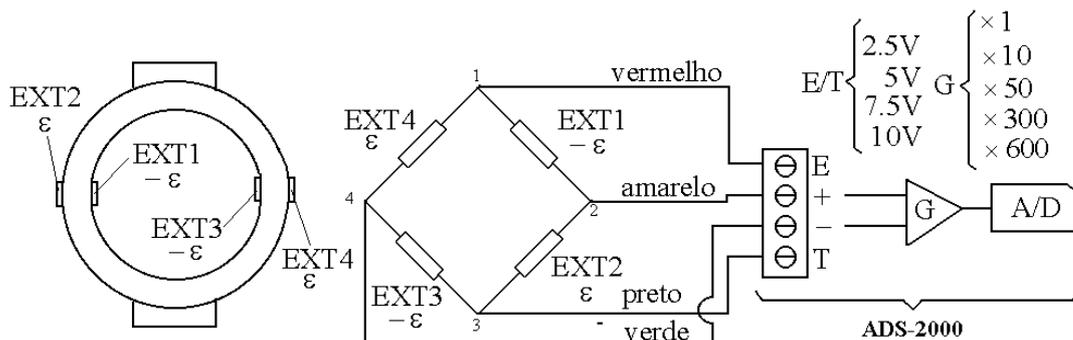


Figura 17 – Célula de carga

6 Aquisição de dados

Os métodos de investigação experimental de estruturas podem ser divididos nas seguintes fases:

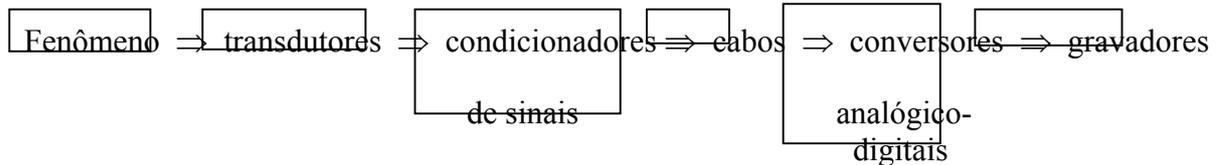


Figura 18 - Configuração básica de um sistema de aquisição de dados

Fenômeno

É o processo que se deseja estudar. A análise do fenômeno é baseada no estudo de grandezas físicas que são medidas por meio de transdutores.

Antes de realizar a aquisição de dados, deve-se escolher cuidadosamente as grandezas a serem medidas. Estas grandezas são denominadas variáveis de interesse do sistema e podem ser obtidas diretamente dos resultados do ensaio ou, utilizando-se um modelo teórico para tratamento desses dados. No segundo caso, deve-se comparar as hipóteses admitidas em modelos teóricos utilizados com as condições de ensaio para que a variável medida represente realmente o fenômeno estudado.

Transdutores

Nos transdutores as grandezas físicas são transformadas em sinais de outra natureza, tais como elétricos, acústicos, ópticos ou mesmo mecânicos. Em ensaios de monitoração de estruturas, são utilizados transdutores que transformam as grandezas mecânicas em sinais elétricos, que podem ser tensão ou corrente. Quanto ao funcionamento, os transdutores elétricos podem ser resistivos, indutivos ou capacitivos

Condicionamento de Sinais

Os condicionadores de sinais são equipamentos eletrônicos que modificam o sinal de entrada de alguma forma. Alguns exemplos de condicionamento de sinais são:

LSE

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

• Transformação Impedância-Tensão Elétrica, as variações de impedâncias (resistências, capacitâncias e indutâncias) nos transdutores precisam ser convertidas em tensões elétricas. Nesse sentido, são utilizados basicamente os circuitos da ponte de Wheatstone e os circuitos potenciométricos, figura 19;

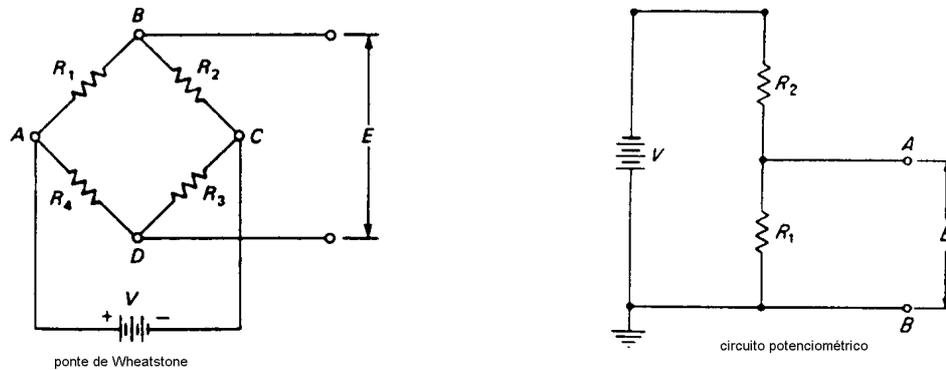


Figura 19 - Circuitos básicos usados para condicionamento de sinais, DALLY; RILEY (1991)

- Amplificação ou Atenuação sinais elétricos enviados pelos transdutores podem ser de baixa ou alta tensão, faz-se necessário o uso respectivo de amplificadores ou atenuadores;
- Filtros analógicos são utilizados basicamente para eliminação de ruídos causados por campos magnéticos vizinhos ou seleção da banda das frequências de interesse;
- Isolação Galvânica serve para eliminar ruídos por meio da linha de aterramento do sistema de aquisição de dados.

Cabos

Os cabos interligam os transdutores, condicionadores, conversores e gravadores. Desta forma, o número de fios presentes num cabo de ligação transdutor-condicionador depende do tipo de transdutor utilizado. Os servo-acelerômetros empregados nos ensaios de monitoração do estádio do Castelão, por exemplo, utilizam cabos de 4 fios e uma malha externa.

A utilização de cabos compridos pode acarretar erros devido a queda de tensão que ocorre nos fios do cabo. Neste caso, estes erros devem ser corrigidos.

Conversão de Sinais Analógicos em Digitais

O conversor A/D converte um sinal analógico em digital. O sinal digitalizado é desejável porque pode ser manipulado pelo computador. O conversor constitui-se em uma placa de circuito impresso que pode ser colocada na unidade de computação. A principal característica

de um conversor é o número de bits para os quais o mesmo é projetado, que define a sua resolução básica. O funcionamento de um conversor A/D de aproximações sucessivas é ilustrado nas figuras 20 e 21.

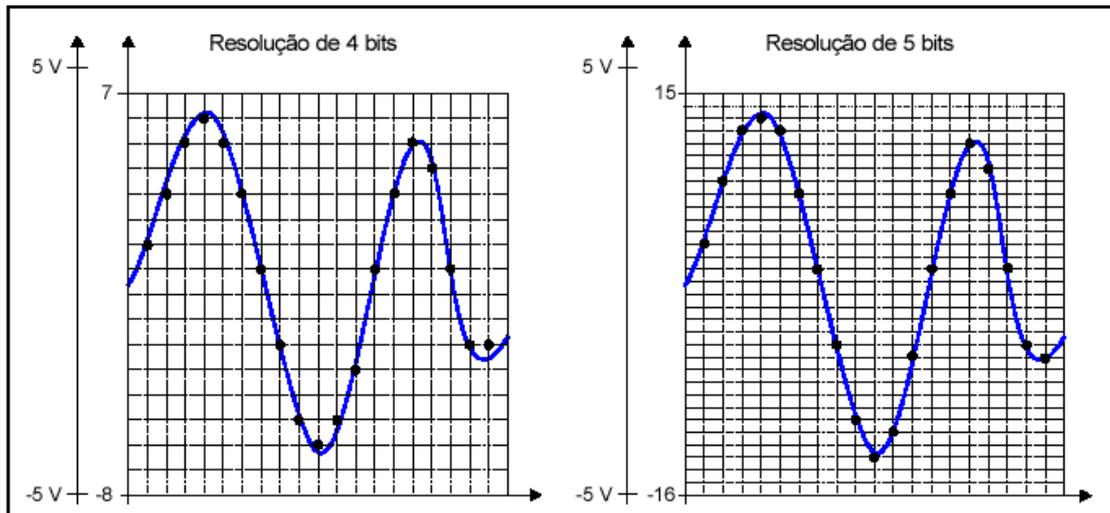


Figura 20 - Conversor A/D de 4 e 5 bits, LYNX (2001)

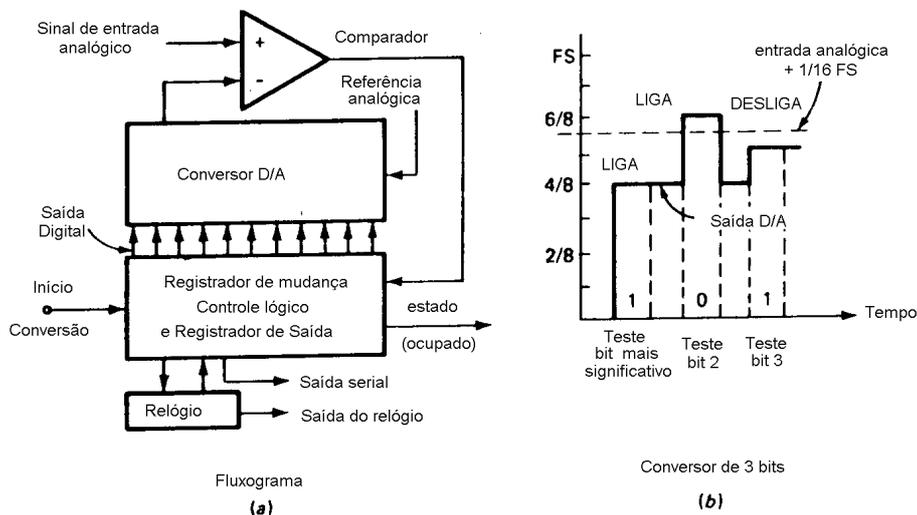


Figura 21 - Conversor A/D de aproximações sucessivas, DOEBELIN (1990)

LSE

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

Registro de Sinais Analógicos

Algumas maneiras de registrar dados analógicos são as seguintes: gravadores XT e XY eletromecânicos do tipo servo, gravadores matriciais térmicos e eletrostáticos, gravadores de fitas magnéticas, etc.

Gravação de Sinais Digitais

Para a gravação de sinais digitalizados, utiliza-se principalmente microcomputadores. Nesse caso os dados são armazenados normalmente no disco rígido do micro. Outras formas de registrar esses sinais são por meio de osciloscópios ou impressoras.

Frequências de Amostragem

A discretização de um sinal é feita por meio da sua amostragem em intervalos regulares. A frequência de amostragem é o inverso deste intervalo. Esta frequência não pode ser muito baixa (comparada com a frequência de variação do sinal) devido ao efeito de sub-amostragem, fenômeno referido na literatura como “aliasing”, figura 22.

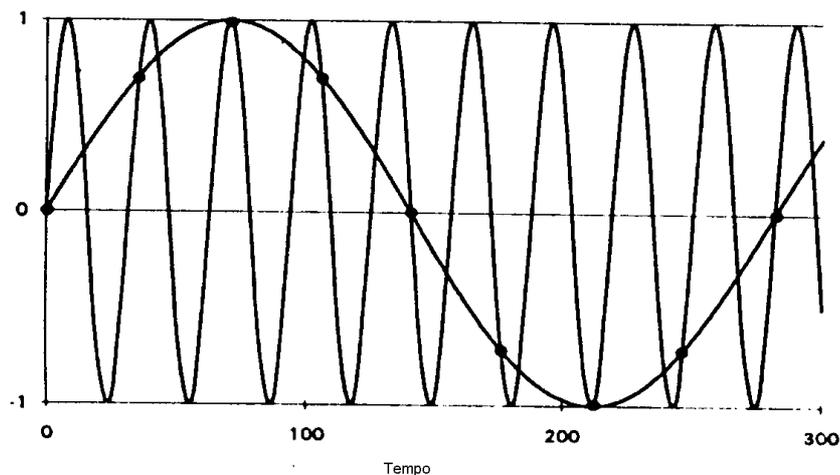


Figura 22 - Representação gráfica da sub-amostragem, ROMBERG (1996)

7 Aspectos Práticos do Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica Ltda é constituído por placas controladoras (AC-2122, AC-2120) e placas condicionadoras (AI-2080, AI-2160, AI-2161 e AI-2164) controladas pelo programa AQDADOS, instalado em um microcomputador. A conexão entre o ADS-2000 (placas controladoras e conversoras) e o microcomputador é feita por meio de cabos, via rede (endereço IP) ou via porta paralela do micro (LPT). Figura 23.

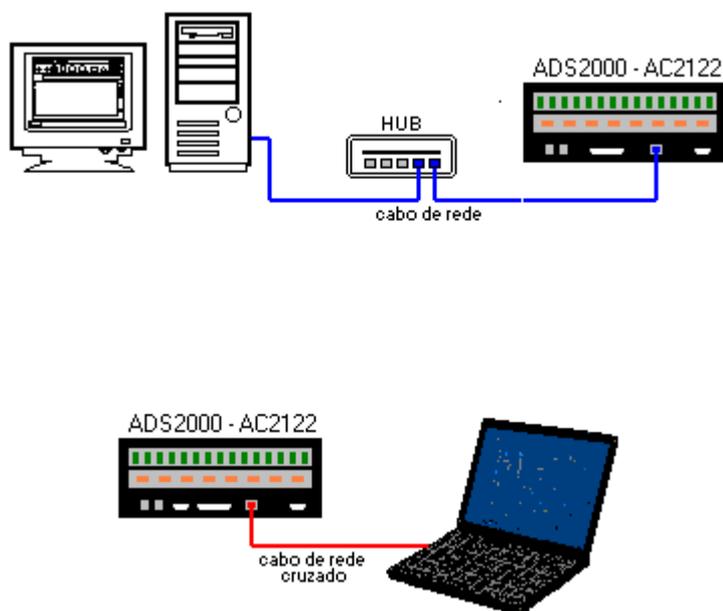


Figura 23 - Visão geral do sistema de aquisição de sinais, via rede

Configuração de Hardware

Para utilizar o sistema de aquisição, deve-se inicialmente configurá-lo. Após identificar as placas controladora (AC-2122) e condicionadoras (AI-2161 e AI-2164), deve-se configurar o programa, o micro e as placas. As instruções para configuração de hardware podem ser obtidos no Manual do AQDADOS e Menus de Ajuda inseridos no programa.

Microcomputador

No caso Computador com Endereço IP fixo,

No *Prompt* do DOS:

```
route add 192.168.1.1 10.0.0.56
```

Programa AQDADOS

No Menu Ensaio/Configuração do Driver de Aquisição,

Confirmar a placa AC, o endereço IP, os módulos de expansão (placas AI) e respectivos endereços.

Endereço placa AC-2122: dip switch S1

Endereço placa AI-2161: jumper JEND

Endereço placa AI-2164: jumper JEND

Configuração das entradas

Deve-se inicialmente conhecer as limitações do sensor assim como seu princípio de funcionamento. Isso definirá o tipo de condicionamento necessário, bem como o processo de calibração que deve ser empregado.

No Menu Ensaio/Entradas Analógicas

Selecionar o módulo (placa AI)

A tecla *Informações* fornece possíveis configurações para condicionamento dos sinais que devem ser modificadas nas placas AI.

Por exemplo, para o caso de extensômetros, tem-se 4 possíveis configurações na AI-2161:

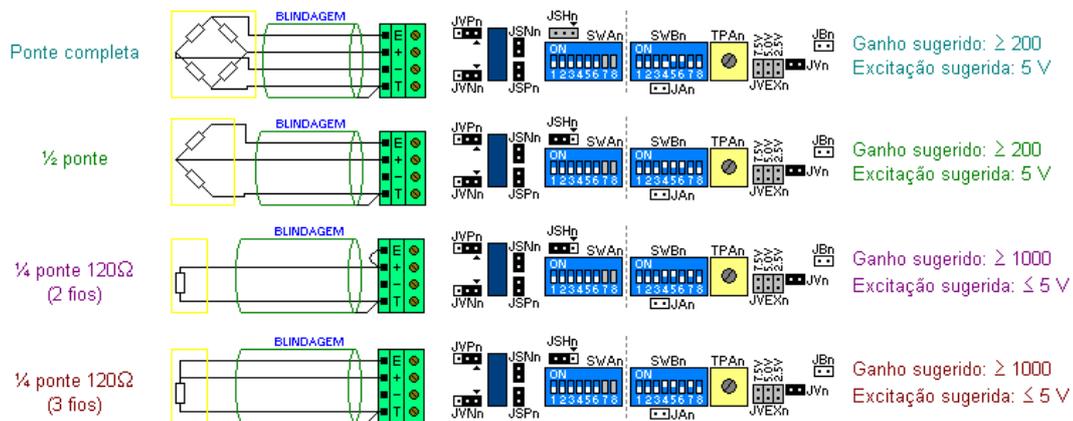


Figura 24 - Configuração da AI-2162 para extensômetros elétricos de resistência

Calibração dos extensômetros elétricos

No Menu Ensaio/Entradas Analógicas

Selecionar o módulo (placa AI)

A tecla *Avançado* possibilita a calibração dos extensômetros por meio de um resistor Shunt cal.

L S E

Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda

Referências Bibliográficas

Notas de aula do curso PEF 5794 – Análise Experimental de Tensões, EPUSP.