

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ANÁLISE DE TENSÕES EM TUBULAÇÃO SUBMETIDA A TRANSIENTES
DE PRESSÃO INTERNA E TEMPERATURA

Tânus Rodrigues Mansur

Orientador: Roberto Francisco Di Lorenzo

Tese apresentada ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
NUCLEBRÁS
BELO HORIZONTE - BRASIL
1981

Este trabalho foi realizado nas instalações do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - NUCLEBRÁS , e constitui uma tarefa do programa de atividades do Departamento de Tecnologia de Materiais.

A Fatinha, Daniel
e meus pais.

AGRADECIMENTOS

Desejo apresentar meus agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Particularmente apresento minha gratidão a:

- Roberto Francisco Di Lorenzo, pelo trabalho de orientação e ao apoio recebido durante todo o curso;
- Alexandre Otávio Rodrigues Sette Câmara, pela valiosa cooperação nas discussões;
- Eder Franco Suszczinski, pelo firme apoio;
- João Roberto Gutti Moraes, pela indispensável contribuição técnica;
- Wagner R. Costa Campos, pelo acompanhamento prático;
- Sebastião Vargas e Paulo Ney Barros, pelos trabalhos de laboratório de testes mecânicos;

Agradeço também a Luiz Carlos D. Ladeira, pela atenção durante os ensaios.

Agradecimentos especiais a Olimpio, pela datilografia e Adma, pelos desenhos.

O Autor

S U M Á R I O

	Pág.
1. INTRODUÇÃO E RESUMO	1
1.1 ABSTRACT	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Tensão-Deformação	4
2.2 Métodos de Medidas de Deformação	5
2.3 Extensometria - O Extensômetro Elétrico ..	6
2.3.1 Generalidades	7
2.3.2 Construção dos Extensômetros Elétricos ...	7
2.3.3 Transmissão de Esforços	13
2.3.4 Geometria dos Extensômetros Utilizados em Análise de Tensões	13
2.4 Características dos Extensômetros Elétri COS	17
2.4.1 O Fator de Conversão K	17
2.4.2 Histerese, Linearidade e Desvio de Zero ..	25
2.4.3 Fluência e Relaxação	27
2.4.4 Limite de Resolução e Limite de Deformação Máxima	29
2.4.5 Tolerância a Carregamento Dinâmico	30
2.5 Princípios Básicos de Medidas	31
2.6 Corrente de Excitação	35
2.7 Critérios e Recomendações para a Escolha de Extensômetros	37
2.7.1 Introdução	37
2.7.2 Seleção de Parâmetros	39
2.8 Adesivos e Outros Materiais	44
2.8.1 Adesivos	45
2.8.2 Cabos de Conexão	46
2.8.3 Soldas	46
2.8.4 Coberturas	47
2.9 Procedimentos de Instalação	48
2.9.1 Preparo da Superfície	48
2.9.2 Preparo de Adesivos e Procedimentos de Co lagem de Extensômetros	49

	Pág.
2.9.3	Soldagem de Extensômetros 50
2.9.4	Cabos 51
2.9.5	Proteção dos Extensômetros 52
2.10	Instrumentação para Extensometria 55
2.11	Correção de Resultados 57
2.11.1	Correção de Resultados Associados à Variação de Temperatura 58
2.11.2	Erros de Alinhamento 70
2.11.3	Correção dos Resultados Relativamente à Sensi- bilidade Transversal 75
2.11.4	Correção dos Resultados Devido a Linearidade de Ponte Wheatstone 80
2.11.5	Correção dos Resultados Devido a Resistência dos Fios 81
2.12	Deformações e Tensões 83
2.12.1	Deformações 84
2.12.2	Tensões 96
2.12.3	Relação Entre Tensões e Deformações 111
2.12.4	Detalhamento das Medidas com Extensômetros Elé- tricos 116
3.	MATERIAIS E MÉTODOS 122
3.1	Extensômetros Utilizados 122
3.2	Adesivos 123
3.3	Sensores de Temperatura 124
3.4	Terminais para Conexão 125
3.5	Solda 125
3.6	Fiação 125
3.7	Localização dos Extensômetros 125
3.8	Instrumentação 127
3.8.1	Excitação das Pontes de Wheatstone 127
3.8.2	Instrumentos Registradores 130
3.9	Procedimentos de Instalação dos Sensores 130
3.9.1	Preparo das Superfícies 130
3.9.2	Preparo do Adesivo 133
3.9.3	Colagem dos Extensômetros, Sensores de Tempe- ratura, Terminais 135
3.9.4	Seqüência dos Ensaios 138

	Pág.
4. RESULTADOS	143
5. DISCUSSÃO	159
6. CONCLUSÃO	170
7. NOVOS TRABALHOS	171
APÊNDICE "A"	172
BIBLIOGRAFIA	194

1. INTRODUÇÃO E RESUMO

As tubulações de um circuito hidráulico, durante a manipulação das diversas válvulas existentes, ficam sujeitas a variações bruscas de pressão, provocando uma maior solicitação mecânica destas tubulações, podendo mesmo em certos casas provocar falhas mecânicas.

O problema se agrava quando simultaneamente a estas variações de pressão aparecem também flutuações importantes de temperatura.

Neste trabalho procurou-se determinar experimentalmente o comportamento estrutural da tubulação de um circuito térmico, pressurizado (Figura 0) quando submetido a variações bruscas e simultâneas de pressão e temperatura, provocadas pelo acionamento manual de uma válvula de esfera, durante sua operação de rotina.

A fim de obter os valores das tensões às quais é submetida a tubulação nas condições acima, foi utilizada a técnica extensométrica, tendo sido escolhido para estudos, pontos considerados críticos em termos de maior solicitação estrutural.

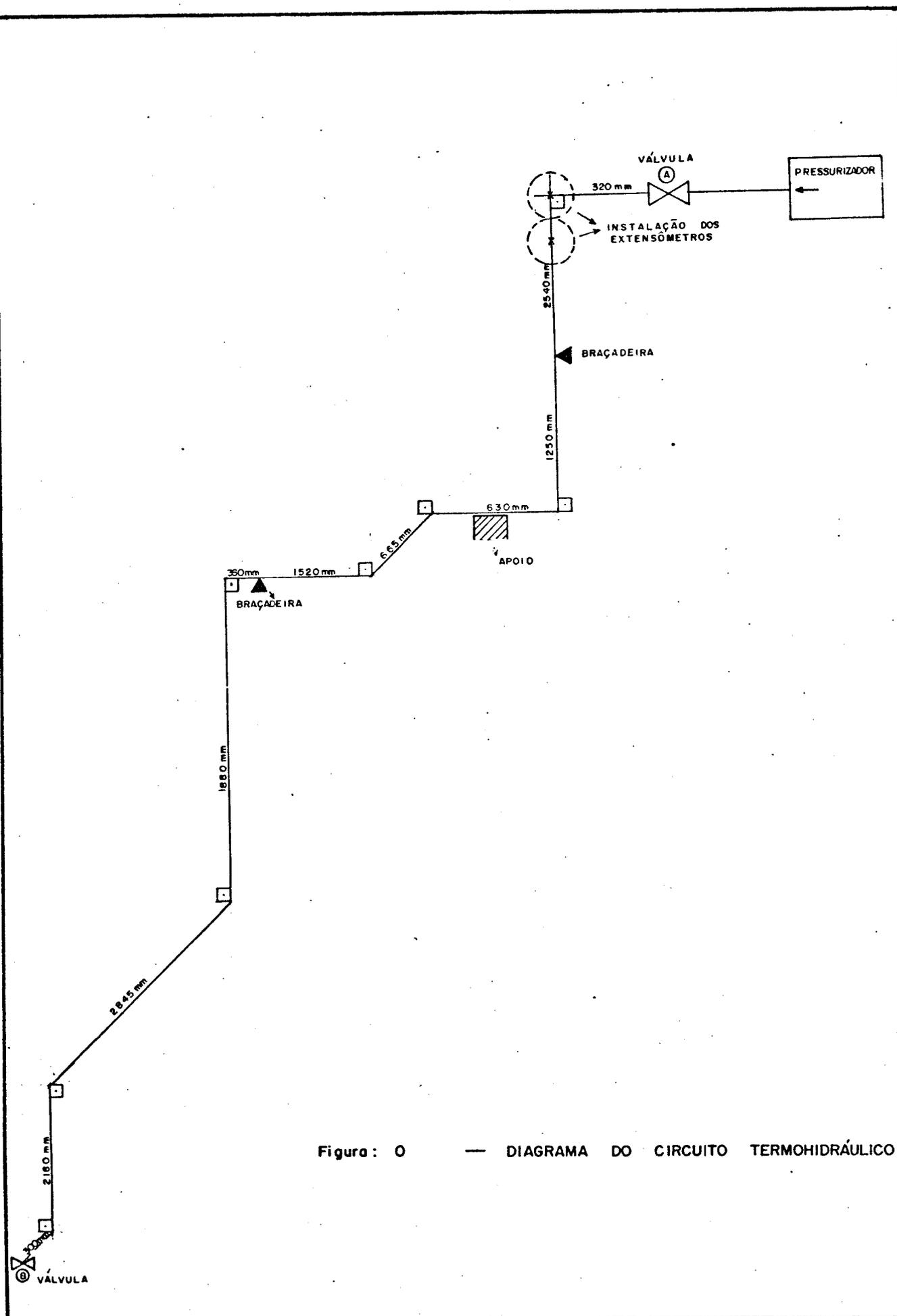


Figura: 0 — DIAGRAMA DO CIRCUITO TERMOHIDRÁULICO

1.1 Abstract

In this work, experimental determination of the structural behaviour of a thermal-hidraulic loop, when submited to simultaneous fast change of pressure and tempe_rature, were performed. For this, electrical strain-gages were positioned at some critical points in order to measure the deformations conditions of the structure.

The study of the kinetics of the deformation revealed the presence of important transient stresses, mainly from thermal origin.

After this transient behaviour, the structure is submited to a thermal stress, which is show to be strongly dependent on the degree of restraint of the structure.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tensão-Deformação

A palavra tensão significa força por unidade de área. Com mais precisão, a tensão σ em um ponto de uma superfície ΔA se define como sendo a razão entre o incremento de força ΔF e a área ΔA em torno do ponto de aplicação da força.

Por deformação entende-se a variação das coordenadas de um ponto no corpo devido a existência de tensão neste ponto.

A deformação é um fenômeno fundamental na engenharia. Ela existe em todos os materiais e em todo o tempo devido a cargas externas, ao peso próprio, a temperaturas e a defeitos de fabricação do material ou da estrutura. Os valores das deformações num corpo abrangem uma larga faixa de variações, que podem ir desde deformações da ordem de poucas micro deformações até aquelas percebidas a olho nu.

Geralmente toda deformação está relacionada a tensões que solicitam o corpo fraca ou fortemente, estática ou dinamicamente. Tais tensões podem levar uma estrutura a falhas, algumas vezes com sérios prejuízos.

Existem vários métodos para se dimensionar um corpo a fim de que ele resista a solicitações mecânicas. Citamos como exemplo o emprego da teoria da elasticidade. Entretanto, existem formas geométricas para as quais o cálculo teórico é

quase impossível de ser realizado.

Cientistas e engenheiros tem trabalhado durante anos buscando métodos experimentais que possibilitem o dimensionamento destas complexas estruturas, bem como a determinação dos esforços sofridos em regime de trabalho. Este tipo de verificação se torna cada vez mais necessário à medida que peças trabalhem em condições pouco conhecidas ou, que façam parte de um conjunto estrutural de grande importância e de difícil cálculo teórico.

A determinação do estado de tensão de uma peça é feita quase sempre a partir da medida da deformação ocorrida no corpo, objeto de análise. O problema posto ao experimentador consiste pois na avaliação do estado de tensão a partir do estado de deformação ocorrido na peça.

2.2 Métodos de Medidas de Deformação

Vários são os métodos para medida das deformações que ocorrem num corpo. Atualmente, as mais usadas no campo de análise experimental de tensões, são:

- vernizes frágeis;
- método de Moiré;
- fotoelasticidade;
- holografia;
- extensometria.

Como neste trabalho é utilizada a técnica extenso

sométrica, nos itens seguintes ela será apresentada. Os outros métodos encontram-se bem detalhados na seguinte bibliografia: /1/, /2/, /3/ e /4/.

2.3 Extensometria - O Extensômetro Elétrico

Dos métodos de análise experimental de tensões, o extensiométrico, utilizando-se extensômetros elétricos (strain gage), é dos mais precisos, eficientes e de menores custos para determinação de esforços em estruturas reais.

O extensômetro elétrico, utilizado adequadamente, possibilita obter resultados de deformações e conseqüentemente a análise das tensões de estruturas em diversas condições como se segue:

- carregamentos estáticos;
- carregamentos dinâmicos;
- deformações - desde micro a macro;
- temperaturas - desde criogênicas a centenas de graus centígrados;
- materiais dos mais diversos tipos.

Com extensômetro elétrico pode-se obter também as tensões residuais, a freqüência natural de peças, ou mesmo a confecção de células de cargas.

Informações mais detalhadas sobre o assunto podem ser encontradas em diversas bibliografias: /1/, /2/ e /3/.

2.3.1 Generalidades /1/, /5/, /6/

O extensômetro elétrico é baseado no princípio de variação da resistência elétrica de um fio ao variar o seu comprimento, alongando ou contraindo, sob a ação de uma força. Este fio é colado sob um suporte muito fino arranjado de acordo com a Figura 1. Como pode ser visto nesta figura, o comprimento maior do fio orienta-se segundo uma direção fixa. Dois fios de secção transversal maior servem para a soldagem do extensômetro a cabos de ligação com instrumentos de medida de resistência elétrica. O extensômetro é colado sobre a superfície a ser estudada de modo a acompanhar a deformação da mesma. Os valores lidos fornecem a deformação segundo a direção do maior comprimento do fio que compõe o extensômetro.

Um extensômetro elétrico, desde que adequadamente instalado, pode servir durante muito tempo, mas não pode ser retirado da estrutura para posterior uso.

Existem vários tipos de extensômetros elétricos, variando tanto em forma como na composição da liga do fio e do material suporte do fio. (Figura 2).

2.3.2 Construção dos Extensômetros Eletricos /1/, /5/, /6/

Com relação ao tipo de construção adotada comercialmente existem três tipos de extensômetros: (Figura 3)

- Os extensômetros de fio: comercialmente são os

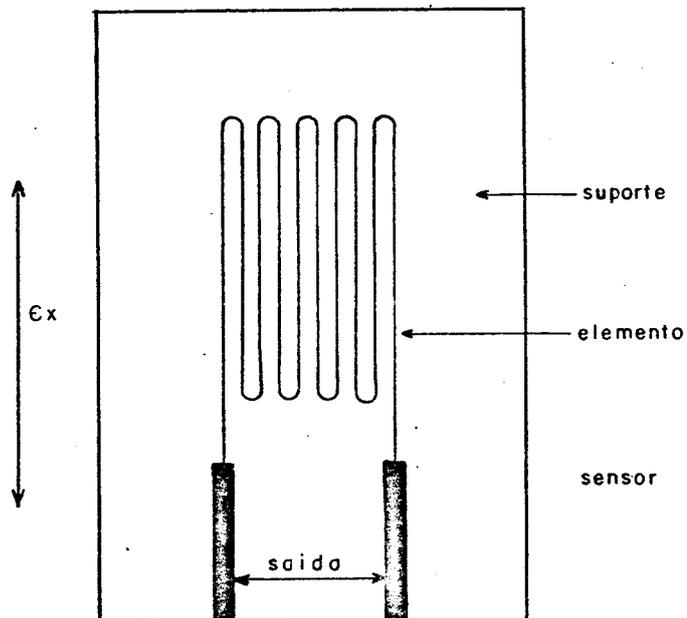


Figura : I — CONSTRUÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO

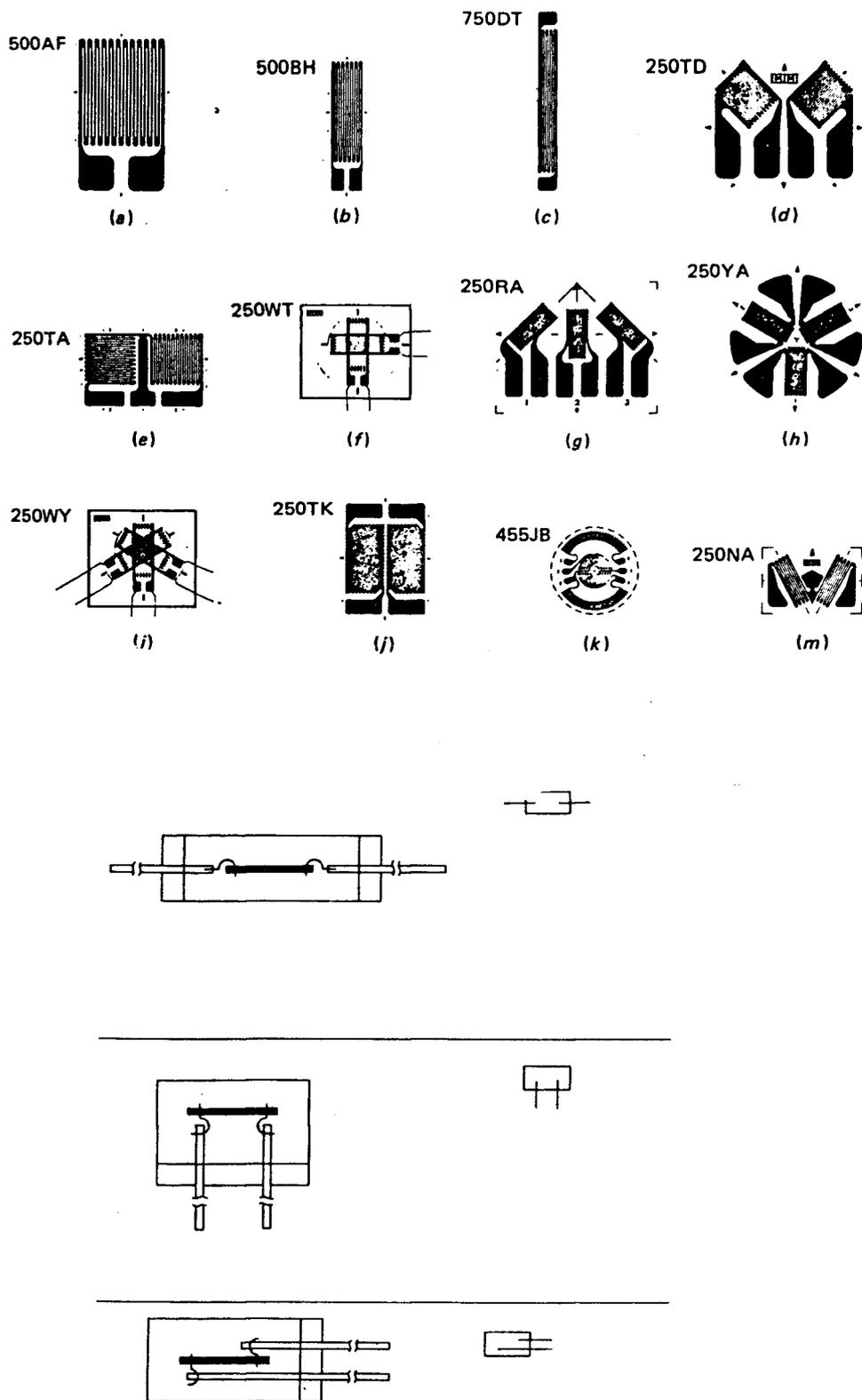
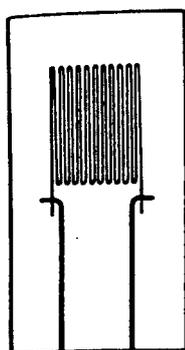


Figura: 2 - Algumas das variedades de extensômetros elétricos /1, 3/. Os extensômetros elétricos com código são fabricados pela M.M..



a) EXTENSÔMETRO DE FIO

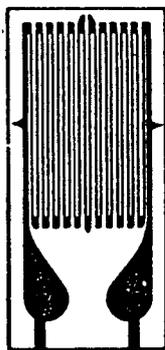
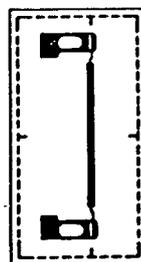
b) EXTENSÔMETRO DE
DE LÂMINAc) EXTENSÔMETRO DE
SEMICONDUTOR

Figura - 3 — TRÊS TIPOS DE EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

mais baratos, mas sua sensibilidade perpendicularmente ao eixo do elemento sensor é elevada, obrigando a correções nas leituras das deformações.

A sensibilidade perpendicularmente ao eixo do elemento sensor é elevada porque o fio do extensômetro não está unicamente disposto segundo a direção da deformação a ser medida. (Figura 4).

- Extensômetros de lâmina: fabricados segundo a técnica de circuito impresso, custo igualmente baixo, e apresenta a vantagem de ter sensibilidade transversal praticamente desprezível, motivado pela área muito maior nas extremidades do elemento sensor (Figura 5).

- Extensômetros de semi-condutor: é composto de um elemento de cristal semi-condutor (Si, por exemplo), dopado com impurezas tipo P ou N, no formato de uma fita muito fina colada sob um suporte plástico também muito fino.

A característica fundamental do extensômetro de semi-condutor é a altíssima variação da resistência com a deformação. Seu uso é muito limitado pela elevada sensibilidade que apresenta em função da temperatura, e de não apresentar uma linearidade tão boa quanto aos outros tipos citados acima.

Alguns extensômetros são inteiramente encapsulados pelo mesmo material do suporte. Este encapsulamento apresenta a vantagem de já ser uma proteção do extensômetro contra umidade e leves escoriações mecânicas.

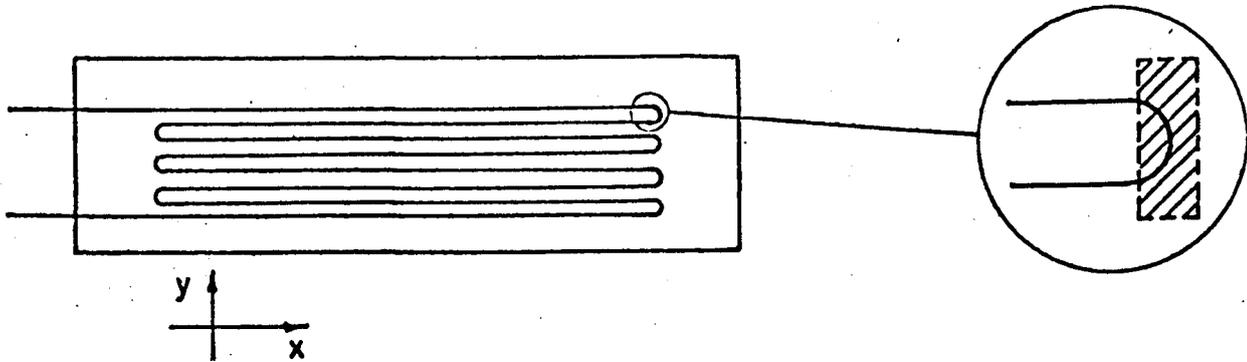


Figura : 4 — EXTENSÔMETRO DE FIO

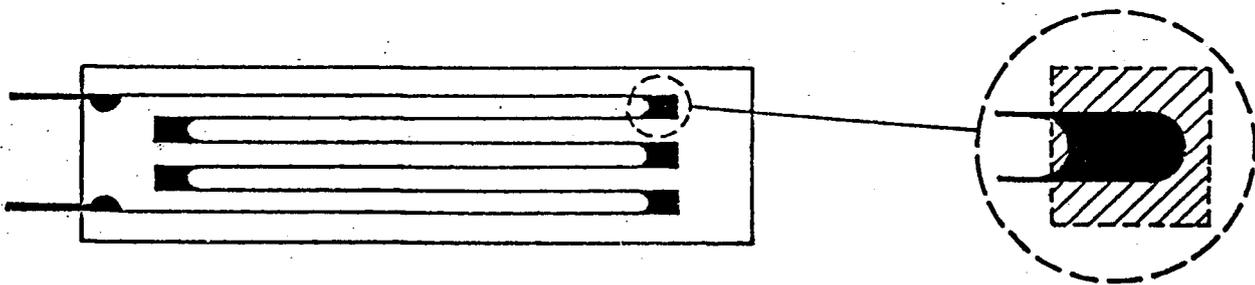


Figura : 5 — EXTENSÔMETRO DE LÂMINA

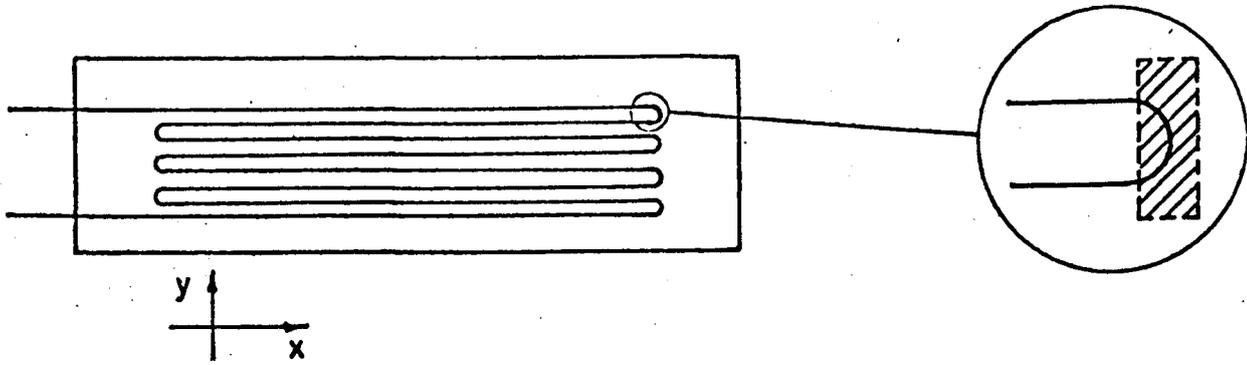


Figura : 4 — EXTENSÔMETRO DE FIO

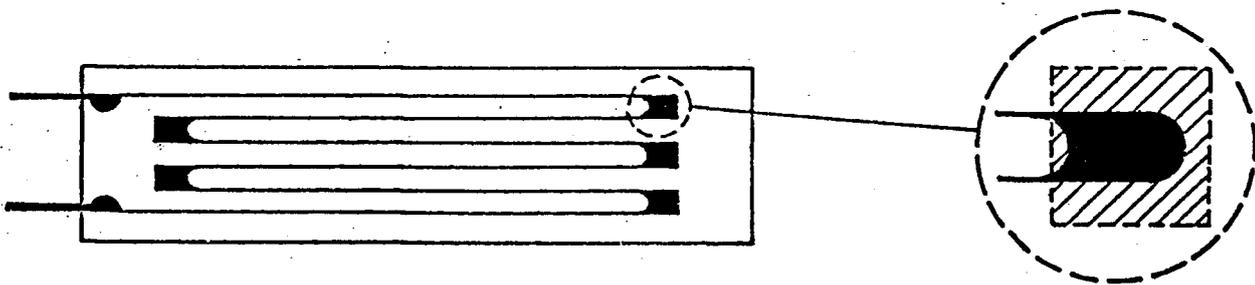


Figura : 5 — EXTENSÔMETRO DE LÂMINA

2.3.3 Transmissão de Esforços /1/

A deformação do elemento sensor do extensômetro é idêntica a da estrutura sobre a qual ele é colado. Mostra-se /1/ que a transmissão se dá principalmente através das extremidades do elemento sensor. (Figura 6).

2.3.4 Tipos dos Extensômetros Utilizados em Análise de Tensões /1/

Os extensômetros mais comuns que o mercado apresenta são os seguintes:

- Extensômetro Simples: usado para determinação de deformação em determinada direção. (Figura 7).

- Roseta de Dois Elementos: usadas para determinação de deformações em duas direções normais. (Figura 8).

- Rosetas de Três Elementos: quando não se conhece as direções principais, três medidas são necessárias para determinação do estado de deformação superficial no ponto. Nestes casos utiliza-se roseta de três elementos. (Figura 9).

As firmas fabricantes apresentam, relativamente ao tamanho do elemento sensor, ao tipo de liga e, em se tratando de rosetas, em relação à disposição do elemento sensor no suporte, uma ampla faixa de variedades, especiais para cada caso.

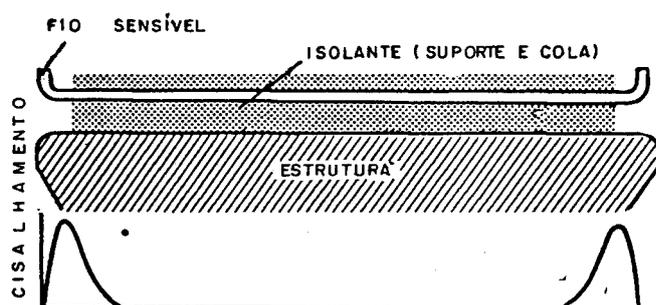
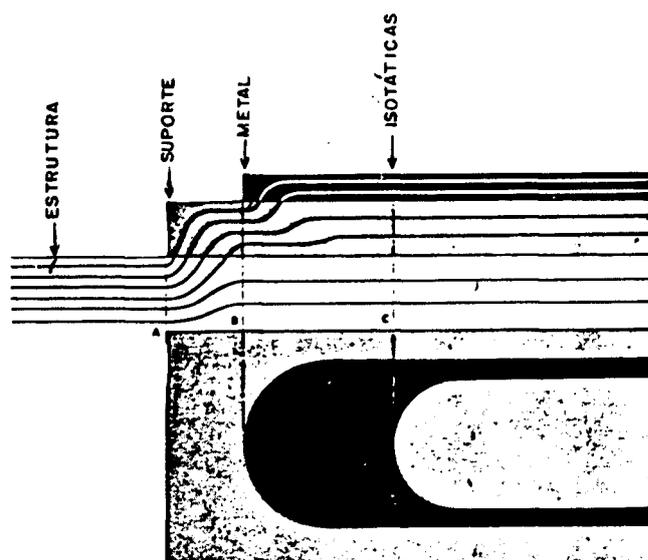


Figura : 6 — TRANSMISSÃO DE ESFORÇOS ENTRE A ESTRUTURA E O EXTENSÔMETRO ELÉTRICO. /1/

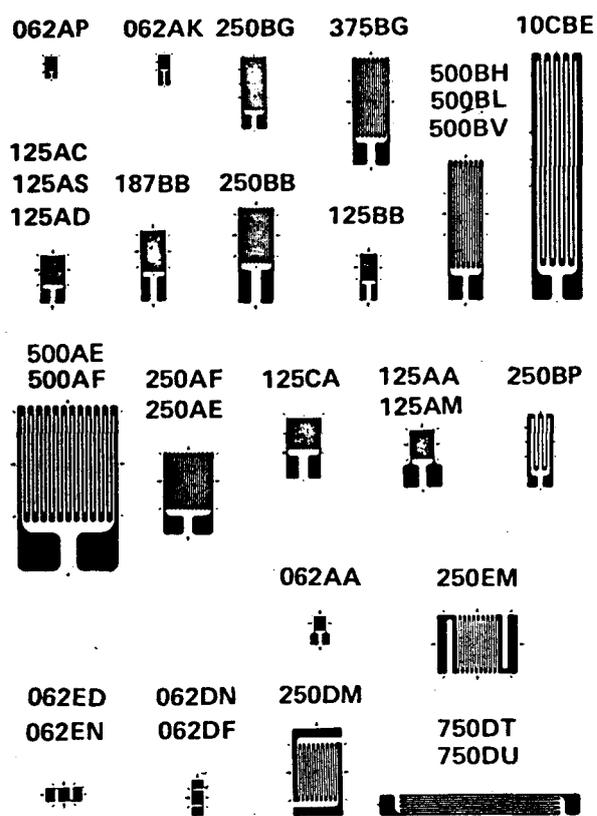


Figura: 7 — Extensômetros simples /1/.
Os extensômetros apresentados na
figura acima são fabricados pela
M.M..

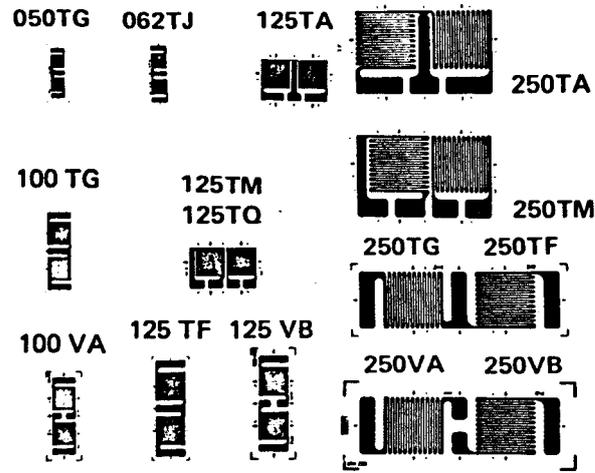


Figura: 8 — ROSETAS DE DOIS ELEMENTOS

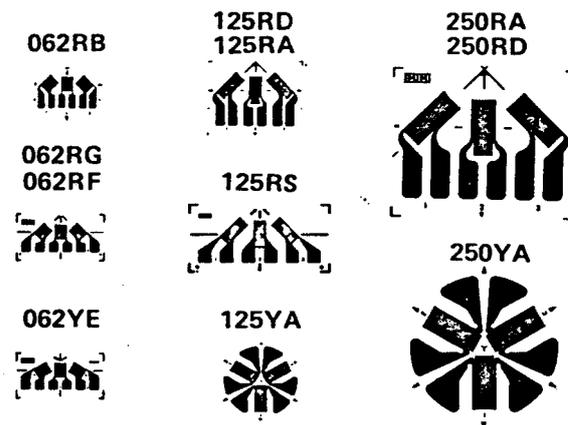


Figura: 9 — ROSETAS DE TRÊS ELEMENTOS /1/

Os extensômetros apresentados nas figuras acima são fabricados pela firma M.M..

2.4 Características dos Extensômetros Elétricos

2.4.1 O Fator de Conversão K /1/, /2/, /3/, /5/, /6/

A resistência de um extensômetro, R , é determinada por:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

ρ é a resistividade do metal do fio;

L é o comprimento do fio;

A é a secção transversal do fio.

Se o condutor é tracionado ou comprimido, sua resistência variará devido a mudança dimensional (comprimento e área da secção transversal) e devido à propriedade fundamental dos materiais, chamada "piezo-resistência", que indica a dependência da resistividade ρ com a deformação mecânica.

$$R = f(\rho, L, A)$$

Como a função R , de variáveis independentes, tem derivadas parciais $\frac{\partial R}{\partial \rho}$, $\frac{\partial R}{\partial L}$ e $\frac{\partial R}{\partial A}$ no ponto (ρ, L, A) , tem-se:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial L} dL + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

Mas,

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

$$\frac{\partial R}{\partial A} dA = \rho L \left(-\frac{1}{A^2}\right) dA$$

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

$$dR = \frac{\rho}{A} dL - \frac{\rho L}{A^2} dA + \frac{L}{A} d\rho$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{\rho}{A} \left(\frac{A}{\rho L}\right) dL - \frac{\rho L}{A^2} \left(\frac{A}{\rho L}\right) dA + \frac{L}{A} \left(\frac{A}{\rho L}\right) d\rho$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

Sabe-se que por definição, a deformação de um comprimento L no sentido de aplicação da força é:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{dL}{L}$$

Sabe-se também, que a deformação nos sentidos perpendiculares à força é:

$$\varepsilon_t = -\mu\varepsilon, \text{ onde } \mu \text{ é o coeficiente de Poisson.}$$

Devido a contração lateral tem-se que:

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L}, \text{ como é mostrado abaixo:}$$

$$A = yz$$

$$dA = ydz + zdy$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{ydz}{yz} + \frac{zdy}{yz}$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} = \epsilon_z + \epsilon_y$$

$$\epsilon_z = \epsilon_y = -\mu \frac{dL}{L}$$

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L}$$

Substituindo em $\frac{dR}{R}$ o valor obtido para $\frac{dA}{A}$, vem:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} + 2\mu \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{Eq. 2})$$

Se em primeira aproximação, a resistividade for admitida constante ter-se-á, supondo o coeficiente de Poisson igual a 0,3 para a maioria dos metais

$$\frac{dR}{R} = 1,6 \frac{dL}{L}$$

Mas, o que se observa é:

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde K é uma constante que depende do material considerado.

Como exemplo do valor de K, cita-se /3/:

$K = 2$ para o constantan (45Ni; 55Cu).

$K = 3,2$ para o isoelstic (36Ni; 8Cr; 0,5Mo; 55,5Fe).

Afim de explicar estas variações e de explicitar o valor de K recorre-se à lei de Bridgman:

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde c é a constante de Bridgman e $\frac{dV}{V}$ é a variação relativa do volume do fio.

Se L é o comprimento do fio e A é a sua secção transversal, tem-se que:

$$V = L.A$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + \frac{dA}{A}$$

logo, a equação 4 passa a ser:

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \left(\frac{dL}{L} + \frac{dA}{A} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 2, vem:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} + 2\mu \frac{dL}{L} + c \frac{dL}{L} + c \frac{dA}{A}$$

como $\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L}$, tem-se:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} + 2\mu \frac{dL}{L} + c \frac{dL}{L} - 2c\mu \frac{dL}{L}$$

$$\frac{dR}{R} = \left[(1 + 2\mu) + c (1 - 2\mu) \right] \frac{dL}{L} \quad (\text{Eq. 6})$$

Comparando a Equação 3 com a Equação 6, conclui-se que:

$$K = (1 + 2\mu) + c (1 - 2\mu).$$

K é denominado coeficiente de sensibilidade, sensibilidade ou fator de conversão do extensômetro.

Então, como é mostrado na Equação 3, se o coeficiente de sensibilidade do extensômetro é conhecido, medindo-se a variação de resistência (dR/R), conhece-se a elongação relativa ($dL/L = \epsilon$). ESTE É O PRINCÍPIO DO EXTENSÔMETRO ELÉTRICO.

Os valores de K giram em torno de dois para extensômetros de resistência e de -150 a 200 para extensômetros de semi-condutores.

O coeficiente de sensibilidade K, como definido anteriormente, considera unicamente a variação de dL com dR para um fio retilíneo. Porém, no caso de um extensômetro pode se ver na Figura 4, o fio não está unicamente na direção x , mas apresenta-se também na direção y .

Pela teoria clássica da elasticidade sabe-se que $\epsilon_y = -\mu \epsilon_x$. O valor real do coeficiente de sensibilidade do extensômetro, considerando a deformação nas duas direções da estrutura, e a deformação de cisalhamento, será:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \epsilon_x + K_y \epsilon_y + K_{xy} \gamma_{xy}$$

onde:

ϵ_x é a deformação normal na direção axial do extensômetro;

ϵ_y é a deformação normal na direção transversal do extensômetro;

γ_{xy} é a deformação de cisalhamento;

K_x é a sensibilidade do extensômetro para a deformação axial;

K_y é a sensibilidade do extensômetro para a deformação transversal;

K_{xy} é a sensibilidade do extensômetro para a deformação de cisalhamento.

Em geral, a sensibilidade para a deformação de cisalhamento é pequena /3/ e pode ser desprezada. Portanto, tem-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \epsilon_x + K_y \epsilon_y = K_x \epsilon_x + K_y (-\mu \epsilon_x) = (K_x - \mu K_y) \epsilon_x$$

$$\frac{\Delta R}{R \epsilon_x} = K_x - \mu K_y$$

mas K , por definição, é $K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_x}$

Portanto:

$$K = K_x - \mu K_y = K_x \left(1 - \mu \frac{K_y}{K_x}\right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Para a maioria das aplicações e para a maioria dos extensômetros de resistência K_y pode ser desprezado /3/. Entretanto, quando a precisão do ensaio necessitar ou quando o extensômetro tiver um K_y significativo, o valor da sensibilidade pode ser corrigido, como será mostrado posteriormente.

Devido a pequenas diferenças na composição da liga de fabricação do elemento sensor, o fator de conversão real diverge do valor teórico em aproximadamente $\pm 2\%$. Essas diferenças não podem ser compensadas por métodos de fabricação e a obtenção de fatores de conversão uniformes só é possível pela seleção dos extensômetros na fase final de produção. O fator de conversão real dos extensômetros é determinado estatisticamente - uma certa percentagem do produto acabado é instalada sobre uma barra que é flexionada, livre de deformação transversal e de coeficiente de Poisson bem conhecido. O valor médio encontrado é marcado na embalagem para uso.

As ligas usadas para confeccionar os elementos sensores dos extensômetros apresentam variação no coeficiente de sensibilidade com a temperatura. Em alguns casos, o erro devido a este efeito é pequeno e pode ser ignorado. Em outros, dependendo da liga envolvida, da temperatura de teste, e da precisão envolvida na medida das deformações, correção para o coeficiente de sensibilidade se faz necessário. A Figura 10 mostra a variação do fator de sensibilidade com a temperatura para as ligas Constantan, Isoelastic, ferro-cromo - alumínio usadas para a fabricação de elementos sensores de alguns extensômetros (ligas A, D e C, respectivamente).

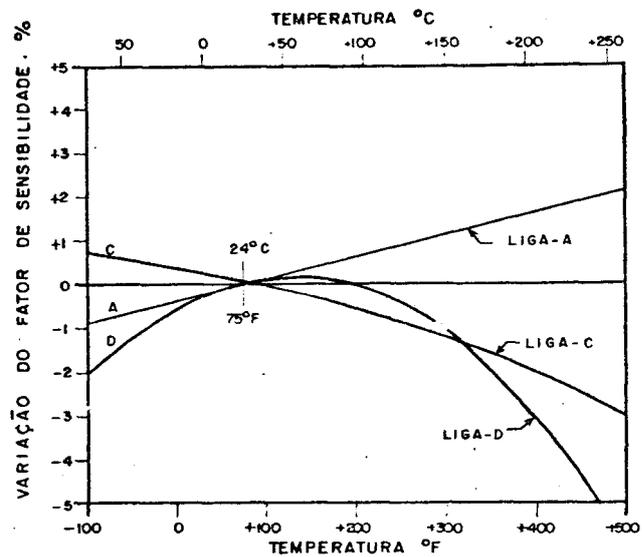


Figura : 10 - VARIÇÃO DO FATOR DE SENSIBILIDADE COM A TEMPERATURA
/12/

2.4.2 Histerese, Linearidade e Desvio de Zero /1/, /3/, /6/, /7/

Se a medida de deformação adquirida de um extensômetro é representada graficamente em função da deformação da estrutura carregada ciclicamente, obtém-se a curva mostrada na Figura 11. Um pequeno desvio de linearidade é observado, e a curva de alívio de carga "cai" abaixo da curva de carga, formando um laço de histerese. Observa-se ainda que, quando a deformação da estrutura é reduzida a zero, a medida de deformação indica um pequeno valor negativo, denominado desvio de zero.

Para muitos extensômetros o desvio de linearidade gira em torno de 0,1% da máxima deformação (extensômetros com suporte de polyimide), para outros, é de 0,05% (com suporte de epoxy). Para o primeiro ciclo de carga não é possível prever-se os efeitos de histerese e desvio de zero. Sempre que possível deve-se carregar ciclicamente o sistema por 4 ou 5 vezes com deformação 25% maior que a deformação máxima prevista /1/. Entretanto, este procedimento só é viável quando pode-se garantir que a estrutura permanecerá ainda em regime elástico.

Em análise experimental de tensões, onde o extensômetro é usado na monitoração da deformação logo a partir do primeiro ciclo de aplicação de carga, deve-se especificar um extensômetro que apresente ótima linearidade e um desvio de zero praticamente desprezível.

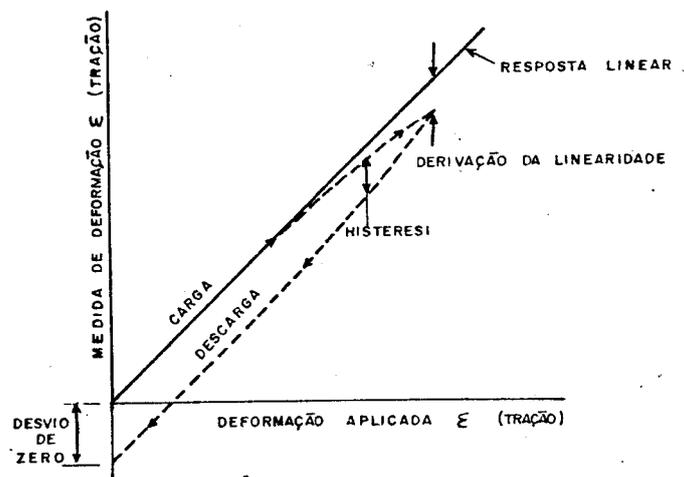


Figura :II — UM TÍPICO CICLO DE DEFORMAÇÃO MOSTRANDO A NÃO LINEARIDADE, HISTERESI E DESVIO DE ZERO /13/

2.4.3 Fluência e Relaxação /1/

A palavra fluência, dentro de seu sentido mais amplo, é empregada para designar os fenômenos de deformações variáveis em função do tempo. Em mecânica dos sólidos, fluência é o aumento contínuo da deformação sob esforço constante, enquanto que relaxação é a diminuição da tensão quando a deformação é mantida constante.

Em qualquer dos dois casos acima o fenômeno é representado pela Figura 12, que se apresenta exagerada para melhor compreensão. Todos os materiais plásticos sofrem escoamento e a escolha dos suportes e colas dos extensômetros devem permitir, senão eliminar, pelo menos reduzir consideravelmente este fenômeno.

Examinando a Figura 12, nota-se que a aplicação de uma carga fixa provoca uma indicação do extensômetro que diminui em seguida para se estabilizar poucos minutos depois.

Quando a carga é retirada é observado o fenômeno inverso, isto é, a indicação passa do zero, chegando a ele assintoticamente. Este fenômeno é imperceptível dentro das condições habituais do emprego dos extensômetros, porém, não deve ser negligenciado quando o suporte do extensômetro e/ou a cola são aquecidos à temperatura próximas a seus limites de utilização.

Fluência e relaxação não são somente próprias aos extensômetros e colas. Os materiais das estruturas podem igualmente serem sensíveis aos efeitos de fluência e relaxação.

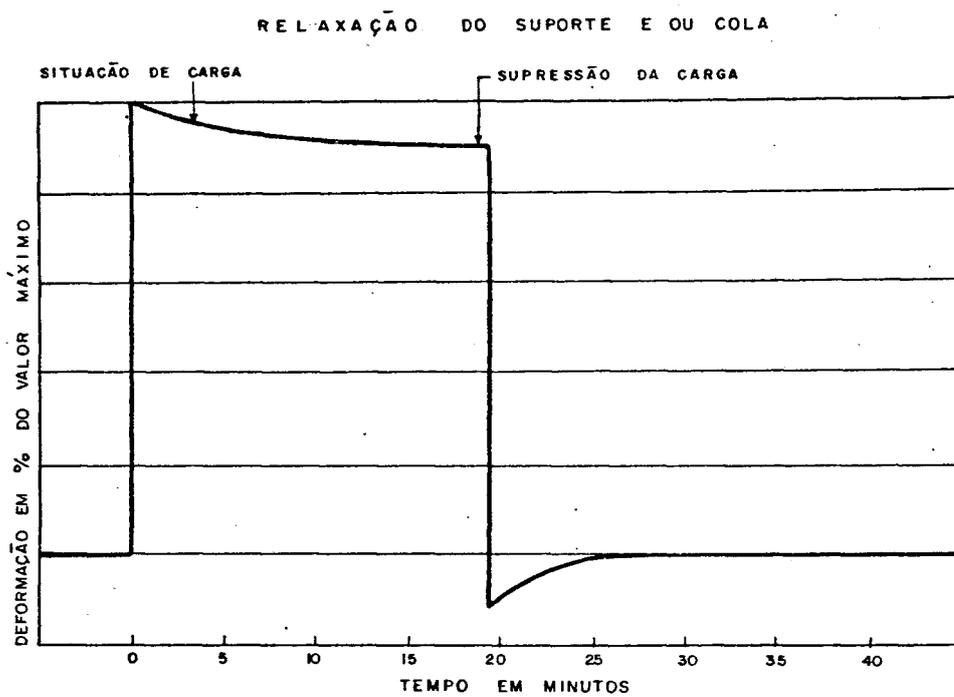


Figura : 12 — UMA RELAXAÇÃO DA COLA OU DO SUPORTE PODE SER A CAUSA DE UMA DERIVAÇÃO DAS INDICAÇÕES, SOB CARGA CONSTANTE. /1/

2.4.4 Limite de Resolução e Limite de Deformação Máxima
/1/, /6/

Não se conhece ainda um limite de resolução para extensômetros elétricos; deformações da ordem de 10^{-10} podem ser obtidas com reprodutibilidade satisfatória.

A resolução na medição de deformação utilizando-se extensômetros elétricos está ligada fundamentalmente a instrumentação usada.

Todos os extensômetros tem limites de alongamento que não devem ser ultrapassados. Se isto ocorrer, o elemento sensor pode se romper, a base fissurar ou mesmo o extensômetro se descolar. Os extensômetros de grande desempenho tem o suporte reforçado com fibra de vidro e sua deformação é limitada a 1 ou 2% (10.000 ou 20.000 ud). Os extensômetros de uso corrente, com suporte de polyimide atingem 5% ou mesmo 10%. Os extensômetros, sem suporte, colados com ajuda de cimento cerâmico são limitados a 0,5%.

Existem extensômetros especialmente construídos para grandes alongamentos que vão até 20 ou 25%, com excelente linearidade. O metal utilizado é o constantan recozido e o suporte é em polyimide.

A máxima deformação admissível para um extensômetro pode ser especificada em função de vários critérios fundamentais, por exemplo:

- 1 - Fratura do elemento sensor;
- 2 - Diferença entre a deformação indicada e a deformação real igual ou maior a $\pm 10\%$;
- 3 - Desvio de linearidade maior que 1%.

O limite de deformação é um parâmetro determinado experimentalmente, e depende de uma série de fatores, tais como:

- geometria do elemento sensor (comprimento do elemento sensor);
- propriedades mecânicas do elemento sensor e do suporte;
- propriedades elásticas do adesivo usado;
- temperatura;
- umidade;
- efeitos da deformação no fator de conversão K.

2.4.5 Tolerância a Carregamento Dinâmico /1/

Para medição de deformações em regime dinâmico, é particularmente importante que o extensômetro possa suportar diversos ciclos de carga, e uma atenção especial deve ser dada à conexão do extensômetro à instrumentação de medida, isto porque os cabos de ligação também estão sujeitos ao carregamento dinâmico. Existem extensômetros com melhores características à aplicação dinâmica e, durante o teste deve ser observado o desvio de zero (sintoma de fadiga), para o segmento do ensaio.

2.5 Princípios Básicos de Medida /2/, /3/, /5/, /8/

Como foi visto, um extensômetro colado sobre uma superfície que se deforma sofre também deformações o que provoca a variação de sua resistência elétrica, variação esta que se comporta linearmente com a deformação dentro de uma determinada faixa.

O método mais usual para se medir essas variações é a incorporação de um ou mais extensômetros à uma ponte de wheatstone. (Figura 13).

Sabe-se que, quando $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$, o galvanômetro indicará leitura zero. Toda vez que por um motivo qualquer houver variação em uma das resistências da fonte, o galvanômetro indicará a passagem de uma corrente, proveniente do aparecimento de uma diferença de potencial entre os pontos A e C.

Para determinar qual foi o valor de variação da resistência da fonte, pode-se usar um dos dois processos:

1 - Método da Leitura Nula

Consiste em se adicionar à fonte resistências de tal modo que a diferença de potencial entre os pontos A e C seja novamente zero. Neste caso o valor das resistências acrescentadas é igual à variação da resistência da fonte.

2 - Método das Deflexões

Consiste em se utilizar o valor medido da diferença de potencial entre A e C para se calcular a variação da

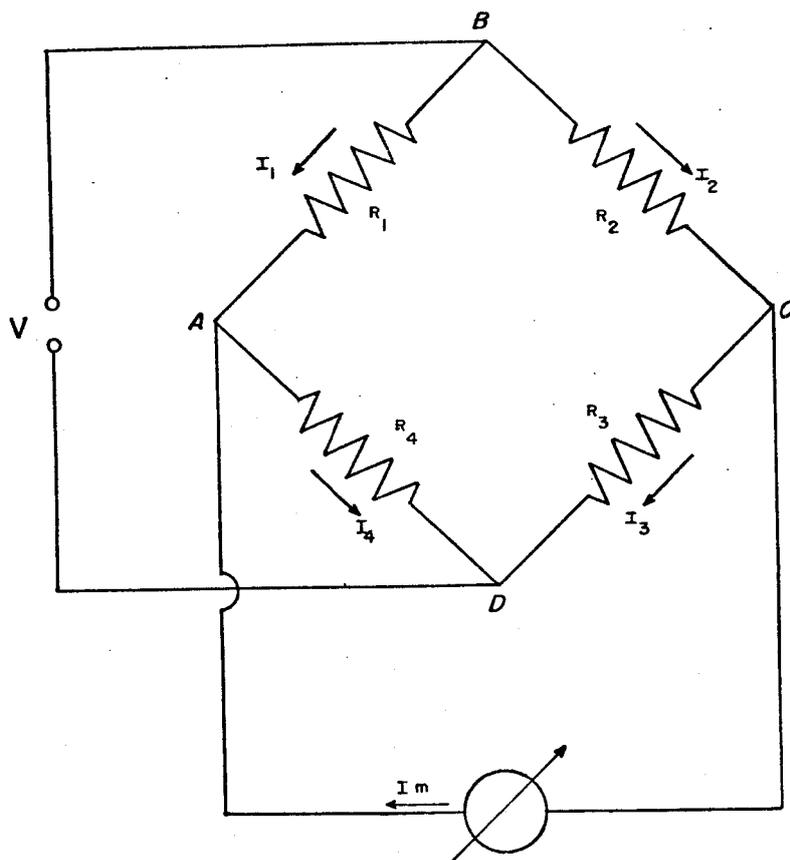


Figura : 13. — PONTE DE WHEATSTONE

resistência.

Pode-se mostrar /2/ que a variação de uma das resistências, como por exemplo, R_2 é dada por:

$$V_{CA} = - \frac{R_3 dR_2}{(R_2 + R_3)^2} V. \quad (\text{Eq. 8})$$

No caso real a ponte de Wheatstone pode ser constituída de quatro extensômetros e, o efeito total em V_{CA} é a soma dos efeitos individuais:

$$V_{CA} = \left[\frac{R_4 dR_1}{(R_1 + R_4)^2} - \frac{R_3 dR_2}{(R_2 + R_3)^2} + \frac{R_2 dR_3}{(R_2 + R_3)^2} - \frac{R_1 dR_4}{(R_1 + R_4)^2} \right] V \quad (\text{Eq. 9})$$

Lembrando que a sensibilidade de um extensômetro é

$K = \frac{dR/R}{\epsilon}$ e dela explicitando dR , tem-se:

$dR = K \epsilon R$, de uma maneira geral.

$$\left. \begin{aligned} dR_1 &= K_1 \epsilon_1 R_1 \\ dR_2 &= K_2 \epsilon_2 R_2 \\ dR_3 &= K_3 \epsilon_3 R_3 \\ dR_4 &= K_4 \epsilon_4 R_4 \end{aligned} \right\} \quad (\text{Eq. 10})$$

Substituindo o grupo de equações acima na equação 9, resulta:

$$V_{CA} = \left[\frac{R_1 R_4 K_1 \epsilon_1}{(R_1 + R_4)^2} - \frac{R_2 R_3 K_2 \epsilon_2}{(R_2 + R_3)^2} + \frac{R_2 R_3 K_3 \epsilon_3}{(R_2 + R_3)^2} - \frac{R_1 R_4 K_4 \epsilon_4}{(R_1 + R_4)^2} \right] V \quad (\text{Eq. 11})$$

Para a maioria dos casos em extensometria, as resistências envolvidas na ponte de Wheatstone são iguais e, a sensibilidade é a mesma para todos os extensômetros.

$$\left. \begin{aligned} R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \\ K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K \end{aligned} \right\} \quad (\text{Eq. 12})$$

Substituindo as equações 12 na equação 11, resulta:

$$V_{CA} = \left[\frac{R^2}{(2R)^2} \varepsilon_1 - \frac{R^2}{(2R)^2} \varepsilon_2 + \frac{R^2}{(2R)^2} \varepsilon_3 - \frac{R^2}{(2R)^2} \varepsilon_4 \right] VK$$

$$V_{CA} = \frac{VK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{Eq. 13})$$

Se nem todos os ramos da ponte são ativos (aqueles que sofrem deformação mecânica), faz-se na equação V_{CA} , a deformação correspondente igual a zero.

Quando existe um V_{CA} inicial, depois da ponte balanceada, no lugar de V_{CA} escreve-se ΔV_{CA}

$$\Delta V_{CA} = \frac{VK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{Eq. 14})$$

Observa-se pela equação acima que as diferenças de potencial resultantes de deformações de mesmo sinal algébrico, somam-se quando em extensômetros opostos e subtraem-se quando em adjacentes e, as diferenças de potencial resultantes de deformações de sinais contrários, somam-se quando em extensômetros adjacentes e subtraem-se quando em opostos.

Ao circuito montado com quatro extensômetros idênticos dá-se o nome de "Montagem em Ponte Completa". Quando se tem dois resistores fixos montados em ramos adjacentes e nas outras duas posições extensômetros, fica caracterizado o que se chama "Montagem em Meia Ponte".

Se apenas um extensômetro é montado em circuito de ponte, tem-se "Montagem em Um Quarto de Ponte".

2.6 Corrente de Excitação dos Extensômetros /3/, /9/

É bem conhecido que a variação de temperatura pode influenciar significativamente nos sinais de saída dos extensômetros. A temperatura do elemento sensor é certamente influenciada pela variação da temperatura ambiente e pela potência dissipada na grade quando ele é conectado à ponte de Wheatstone.

Sabe-se que:

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2 R, \text{ onde:}$$

P é a potência dissipada;

I é a corrente no elemento sensor;

R é a resistência do elemento sensor;

V é a voltagem através do elemento sensor.

Os fatores que influenciam na dissipação de calor, são:

- 1 - Tamanho do elemento sensor, l_0 e c_0 (largura inicial e comprimento inicial, respectivamente);
- 2 - Configuração do elemento sensor, espaçamento e tamanho dos elementos de condução;
- 3 - Suporte, tipo de polímero e espessura;
- 4 - Adesivo, tipo de polímero e espessura;
- 5 - Espécie de material, difusividade térmica;
- 6 - Dimensões da peça onde está colado o extensômetro;
- 7 - Tipo e espessura da proteção contra a umidade;

Os parâmetros normalmente usados para caracterizar a dissipação de calor de uma instalação extensométrica é a densidade de potência P_D , definida como $P_D = \frac{P}{A}$, onde P é potência que deve ser dissipada pelo sensor e A é a área da grade (elemento sensor).

As densidades de potência que podem ser toleradas pelos elementos sensores estão relacionada fortemente com os materiais onde estão instalados os extensômetros.

Quando uma ponte de Wheatstone com quatro ramos iguais é empregada, tem-se:

$$P = \frac{V^2}{4R} \quad (\text{potência dissipada numa grade, em watts})$$

Como $P_D = \frac{P}{A}$, vem:

$$P_D \cdot A = \frac{V^2}{4R}$$

$$V^2 = 4P_D \cdot A \cdot R$$

$$V = 2 \sqrt{P_D \cdot A \cdot R} \quad (\text{Eq. 15})$$

Aqui,

V é a voltagem de excitação da Ponte, em volts;

A é a área da grade (elemento sensor), em mm^2 ou in^2 ;

R é a resistência do extensômetro, em Ohms;

P_D é a densidade de potência da grade, em watts/mm^2 ou watts/in^2 .

2.7 Critérios e Recomendações Para a Escolha de Extensômetros /1/, /6/, /10/

2.7.1 Introdução

O passo inicial na preparação de uma instalação extensométrica é a seleção do extensômetro apropriado para a tarefa. Uma escolha racional e cuidadosa das características e parâmetros do extensômetro é um procedimento que apresenta fundamental importância na otimização das medidas durante o en

saio e na economia total da instalação.

As características de operação de um extensômetro são afetadas pelos seguintes fatores, que podem ser selecionados de diversos modos no processo de escolha do mesmo:

- Liga metálica com que é confeccionado o elemento sensor;
- Material com que é confeccionado o suporte;
- Comprimento do elemento sensor;
- Arranjo do(s) elemento(s) sensor(es) sobre o suporte;
- Coeficiente de compensação de temperatura do extensômetro (S.T.C. "Self-Temperatura-Compensation Coefficient");
- Resistência elétrica do elemento sensor.

A escolha dos extensômetros é feita em função das condições de teste, quais sejam:

- Precisão desejada;
- Estabilidade na medida;
- Máxima deformação que se deseja medir;
- Duração do teste;
- Tolerância a carregamentos cíclicos que o extensômetro deve suportar;
- Facilidade e simplicidade de instalação.

Geralmente a escolha de um extensômetro envolve um compromisso entre as características dos dispositivos encontrados no comércio e as condições de teste.

2.7.2 Seleção dos Parâmetros

2.7.2.1 Escolha da Liga Metálica

A liga metálica com que é confeccionado o elemento sensor do extensômetro é o principal componente que determina suas características de operação. Entretanto, na maioria dos casos, a liga não é um parâmetro especificável independentemente, devendo sua escolha enquadrar-se no conjunto de combinações liga/suporte que o fabricante oferece.

2.7.2.2 Escolha de Uma Compensação

A expressão "Extensômetro Autocompensado" caracteriza um extensômetro destinado a ser utilizado sobre um material com coeficiente de dilatação determinado.

O coeficiente de temperatura da liga da qual é constituído o extensômetro, é escolhido para dar um efeito térmico nulo.

Desde que conhecido o coeficiente de dilatação do material sobre o qual o extensômetro é colado, procura-se, dentre as opções oferecidas pelo fabricante, aquele que satisfaz a esta condição:

Detalhe desta autocompensação é discutido no

item 2.11.

2.7.2.3 Escolha do Material de Fabricação do Suporte

Como a liga metálica do elemento sensor, o material do suporte não é parâmetro especificável independentemente. Geralmente, as firmas fabricantes oferecem três tipos de materiais para suporte do elemento sensor, quais sejam:

- Polyimide;
- Epoxy;
- Resina epoxy-phenolic com fibra de vidro.

As ligas do elemento sensor, combinadas com os suportes, oferecem as séries fornecidas pelos fabricantes, para a escolha adequada.

2.7.2.4 Escolha do Comprimento do Elemento Sensor

O comprimento do elemento sensor é freqüentemente o primeiro parâmetro do extensômetro que deve ser definido e é de grande influência em regiões de concentração de tensões. Geralmente, medidas de deformação são tomadas nas regiões mais tensionadas de uma estrutura, e conseqüentemente sujeitas a grandes gradientes de deformação. Se um extensômetro de grandes dimensões é submetido a um campo de deformações semelhantes ao mostrado na Figura 14 é indicado o valor de deformação média entre os limites de localização do elemento sen

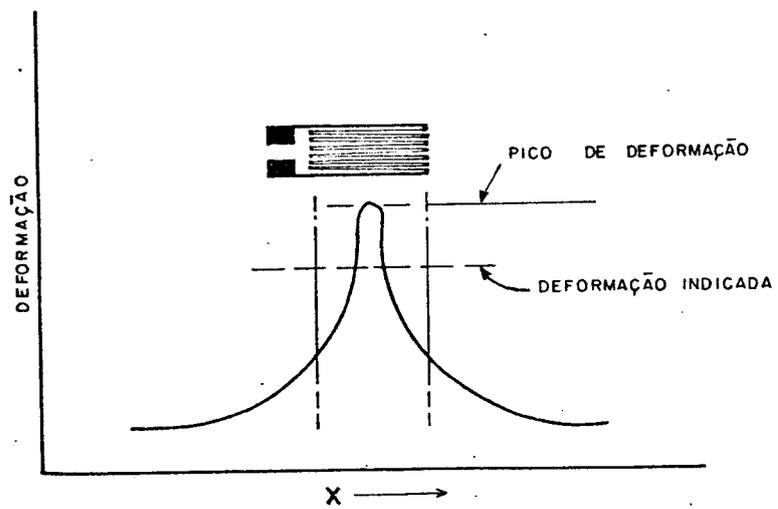


Figura: 14 — EXTENSÔMETRO SUJEITO A UM ELEVADO GRADIENTE DE DEFORMAÇÃO. /1/

sor e o valor de deformação máximo é ignorado.

Como uma regra prática, o comprimento do elemento sensor não deve ser maior que 0,1 vezes o raio de um furo, em talhe ou uma dimensão correspondente de qualquer outro concentrador geométrico de tensões, no qual a deformação será medida. Entretanto, verifica-se para extensômetros /10/ pequenos, uma degeneração de suas características relativamente às unidades maiores, tornando-se difícil o estabelecimento de um compromisso entre o desempenho desejado para o dispositivo e o gradiente de deformações que se tem para a superfície.

Extensômetros grandes sempre que possível devem ser preferidos, pois são de fácil manuseio e permitem, como já foi visto anteriormente, maiores voltagens de excitação. São também aplicáveis em materiais não homogêneos, como o concreto, onde valores de deformação realmente significativos são obtidos mediante a tomada de uma amostra relativamente grande da superfície.

2.7.2.5. Escolha de Um Arranjo Geométrico de Elementos Sensores Sobre o Suporte

Em análise experimental de tensões, um extensômetro de apenas um elemento sensor é normalmente usado em pontos de estado uniaxial de tensões e onde as direções dos eixos principais são conhecidos com razoável precisão.

Para um estado de tensão biaxial, é necessário o uso de extensômetros de 2 ou 3 elementos sensores independentes, arranjados geometricamente de forma conveniente sobre um mesmo suporte, roseta.

Quando a superfície de teste apresenta elevados gradientes de deformação, as rosetas de 2 ou 3 elementos superpostos geralmente dão um resultado mais significativo que as rosetas de construção plana. Entretanto, esta última é mais flexível, adaptando-se melhor a superfícies com raios de curvatura menor, e permitem maiores correntes de excitação, pois dissipam melhor o calor.

2.7.2.6 Escolha da Resistência Elétrica do Elemento Sensor

As medidas de deformação com extensômetros são feitas geralmente através da conexão de um, dois ou quatro elementos em Ponte de Wheatstone.

A corrente de excitação provoca em cada elemento uma perda de potência elétrica ($P = VI$) que deve ser dissipada em forma de calor. Isto indica que o elemento sensor e o suporte do mesmo, necessariamente trabalham a uma temperatura mais elevada que a temperatura ambiente e, caso esta temperatura atinja níveis elevados, o desempenho do extensômetro fica alterado, da seguinte forma:

1 - Se a temperatura do elemento sensor for muito maior que a do corpo-de-prova, o fator S.T.C. perde o seu significado pois todos os dados (relativos ao S.T.C.) fornecidos pe

lo fabricante são obtidos com baixos níveis de excitação.

2 - Os efeitos provodados pela fluência do suporte são consideravelmente ampliados, uma vez que dependem sobretudo da temperatura do conjunto suporte-adesivo.

3 - Pode ocorrer instabilidade no circuito da ponte, já que cada extensômetro conectado ao circuito pode dissipar calor de forma diferente.

Como a voltagem de alimentação da ponte é mantida constante, a potência dissipada vai variar só com a variação de I . Se a resistência aumenta, a corrente diminui, e consequentemente diminui a potência dissipada. Isto indica que quanto maior é a resistência elétrica de um extensômetro, menores são os efeitos 1, 2 e 3, citados acima.

A escolha de um valor de resistência para o extensômetro envolve então um compromisso entre a estabilidade desejada nas medições e a sensibilidade esperada do conjunto extensômetro-instrumentação. Portanto, sempre que possível, extensômetros de resistência elétrica maior devem ser preferidos já que permitem uma tensão de excitação mais elevada e portanto uma medida mais acurada.

2.8 Adesivos e Outros Materiais

Para se fazer um bom trabalho em extensometria não basta simplesmente escolher um extensômetro adequado. Tem-se

também que escolher adesivos, cabos de conexão, solda, terminais para soldagem e coberturas protetoras também adequados.

2.8.1 Adesivos /1/, /3/, /6/, /11/

O adesivo serve a uma vital função nas medidas de deformação utilizando extensômetros elétricos. Ele deve transmitir ao elemento sensor do extensômetro a deformação sofrida pela estrutura, sem distorção. A escolha do adesivo adequado está ligada ao tipo de base de que é feito o extensômetro e a natureza do teste. Atualmente três tipos básicos de adesivos são utilizados para instalação de extensômetros com suporte plástico:

- Adesivos à base de cianoacrilato, usadas em instalações rápidas;
- Adesivos à base de epoxy, usados em temperaturas mais elevadas ou medições mais acuradas;
- Adesivos à base de material cerâmico, usados em temperaturas altas.

Existem também colas nitro-celulósicas, que são utilizadas nos extensômetros com suporte de papel e aquelas à base de poliéster usados em extensômetros com suporte de poliéster.

Geralmente, os fabricantes dos extensômetros fornecem catálogos que relacionam os extensômetros com os adesivos, bem como todas as propriedades das colas, necessárias à aplicação.

cação.

2.8.2 Cabos de Conexão /1/, /6/

Um extensômetro estando colado à estrutura deverá ser ligado aos instrumentos de medição através de cabos. A escolha dos cabos de conexão é feita levando-se em consideração as seguintes condições de testes:

- temperatura;
- tipo de ensaio: estático ou dinâmico;
- arranjo dos extensômetros na ponte de Wheatstone;
- instrumentação usada;
- comprimento da fiação;
- condições de ruídos eletromagnéticos no local de ensaio.

Os parâmetros especificados em função das condições de testes, são:

- material isolante do cabo;
- tipo de fio (rígido ou flexível);
- número de condutores independente no cabo;
- bitola;
- blindagem.

2.8.3 Solda Para Conexão dos Cabos aos Extensômetros /1/, /3/, /6/

Em extensometria, a escolha das soldas está essen

cialmente ligada à temperatura de ensaio, portanto, o principal parâmetro que deve ser especificado para a solda é a sua temperatura de fusão. Entretanto, outras características devem ser observadas quando o extensômetro trabalha em condições especiais de temperatura, carregamento dinâmico, ambientação químico-agressiva, etc. Estas características, são: resistência à fadiga; variação do comportamento mecânico com a temperatura; resistência à corrosão; variação da condutibilidade elétrica com a temperatura.

A soldagem do extensômetro aos cabos de ligação dos instrumentos pode ser feita de três modos diferentes, dependendo da natureza do teste. São elas:

- Soldando os finos fios do extensômetro diretamente nos fios de ligação;
- Utilizando de terminais impressos;
- Soldando os fios de ligação diretamente ao extensômetro.

2.8.4 Coberturas Protetoras /1/, /3/, /6/, /8/

O desempenho dos extensômetros é sensivelmente afetado pelo ambiente, o que normalmente exige uma proteção química-mecânica das instalações extensométricas. Química porque as instalações devem ser protegidas contra umidade, ambientes corrosivos e, mecânicas porque deve-se proteger contra pressões externas e contra choques mecânicos.

Geralmente os fabricantes de extensômetros produzem também uma gama variada de "coberturas" protetoras, as quais combinadas entre si adequam-se satisfatoriamente à quase toda situação.

2.9 Procedimentos de Instalação /1/, /6/, /8/

2.9.1 Preparo da Superfície

Pode-se instalar extensômetros elétricos sobre qua se todos os tipos de superfícies, desde que sejam correta mente preparadas.

A preparação de uma superfície consta essencialmen te de cinco etapas básicas, abaixo relacionadas:

- Desengraxamento;
- Abrasão;
- Traçado das linhas de referência para orientação dos extensômetros;
- Condicionamento químico;
- Neutralização.

Entretanto, existem casos em que a superfície neces sita de outros tipos de tratamento para se poder aplicar os extensômetros, como por exemplo é o caso do concreto.

Cuidados adicionais devem ser tomados depois da su perfície já preparada para evitar a recontaminação. São eles:

- Não tocar a superfície com os dedos;
- Esfregar esponjas, guazes ou cotonetes sobre a su perfície somente uma vez e apenas num sentido;
- Não permitir que elementos contaminantes atinjam a superfície depois de preparada;
- Evitar longos intervalos de tempos entre as operações de preparo e a etapa de neutralização e a instalação do extensômetro.

A maioria das firmas fabricantes de extensômetros fornecem a seqüência de preparo da superfície na qual ele se rá instalado, e, indicam os produtos que devem ser usados.

2.9.2 Preparo de Adesivos e Procedimentos de Colagem de Extensômetros

A preparação dos adesivos e os procedimentos de colagem variam conforme os adesivos usados.

Dois tipos de adesivos são os mais usados em extensometria, são eles: adesivos à base de cianoacrilato e epóxi. (O primeiro destes dois tipos não exige qualquer preparação para sua aplicação, bastando levá-lo à temperatura ambiente caso esteja estocado em geladeira.

Estes adesivos polimerizam-se em torno de 2 minutos, existindo porém catalizadores que diminuem este tempo e não

afetam o desempenho final do extensômetro, desde que convenientemente aplicados.

Os adesivos a base de epóxi geralmente são fornecidos em dois componentes (resina e catalizador) ou, na forma de uma mistura pré-catalizada diluída em um solvente. Uma mistura uniforme dos dois componentes deve ser obtida, o que é facilitado por um brando aquecimento da resina ou do catalizador a uma temperatura especificada pelo fabricante.

Depois de preparados a superfície e o adesivo, a colagem do extensômetro deve ser imediata para evitar a contaminação da superfície.

Procedimentos de instalação são fornecidos pelos fabricantes e, para um conhecimento detalhado de tal, consultar a referência /6/.

2.9.3 Soldagem de Extensômetros

A soldagem dos extensômetros nos fios de ligação dos instrumentos é feita utilizando-se os ferros de solda de potência constante ou variável ou ainda uma máquina de solda a ponto. O mais usado é o ferro de solda de potência constante.

A soldagem pode ser feita de três modos diferentes:

- Soldando os fios do extensômetro aos fios de ligação;

- Utilizando-se terminais impressos;
- Soldando os fios de ligação diretamente nos extensômetros.

O primeiro destes três tipos é particularmente útil nas instalações para alta temperatura. Visto que nestas circunstâncias necessita-se solda com alto ponto de fusão, o equipamento usado é geralmente a máquina de solda a ponto.

No segundo modo, os fios de ligação e os do extensômetro são soldados nos terminais impressos. Este método impede que o extensômetro seja danificado no caso de alguma força atuar nos fios.

Para utilização correta dos terminais deve-se selecionar um terminal de configuração geométrica adequada, colar o terminal na superfície juntamente e do mesmo modo que o extensômetro e, finalmente, desde que possível, orientar o terminal impresso ao longo do eixo de menor deformação.

Muitos extensômetros são fabricados já com os pontos de solda, podendo portanto, controlar mais facilmente o tamanho da junção solda + fio, eliminando os efeitos de tempo par e aumentando a vida de fadiga do extensômetro.

2.9.4 Cabos

Na soldagem dos extensômetros aos fios de ligação, é importante posicioná-los corretamente. Esta precaução é importante para evitar que qualquer perturbação sofrida

pelo fio chegue aos extensômetros.

Uma destas precauções está ilustrada na Figura 15.

2.9.5 Proteção dos Extensômetros

Para se obter um bom desempenho do extensômetro é necessário uma série de cuidados que vão desde o modo de manuseá-lo até as proteções especiais utilizadas de acordo com o ambiente onde será feita a instalação.

Como já foi dito anteriormente, o desempenho do extensômetro pode ser gravemente afetado pelas condições ambientais, tais como:

- Umidade;
- Temperaturas;
- Pressão hidrostática;
- Radiação nuclear;
- Água;
- Gás corrosivo;
- Abrasão;
- etc.

Para evitar que tais fatores afetem o comportamento do extensômetro, é necessário definir proteções adequadas a cada tipo de situação. São vários os produtos utilizados, a maioria destes permitindo total impermeabilização do extensômetro, entretanto, todos possuem limite de temperatura

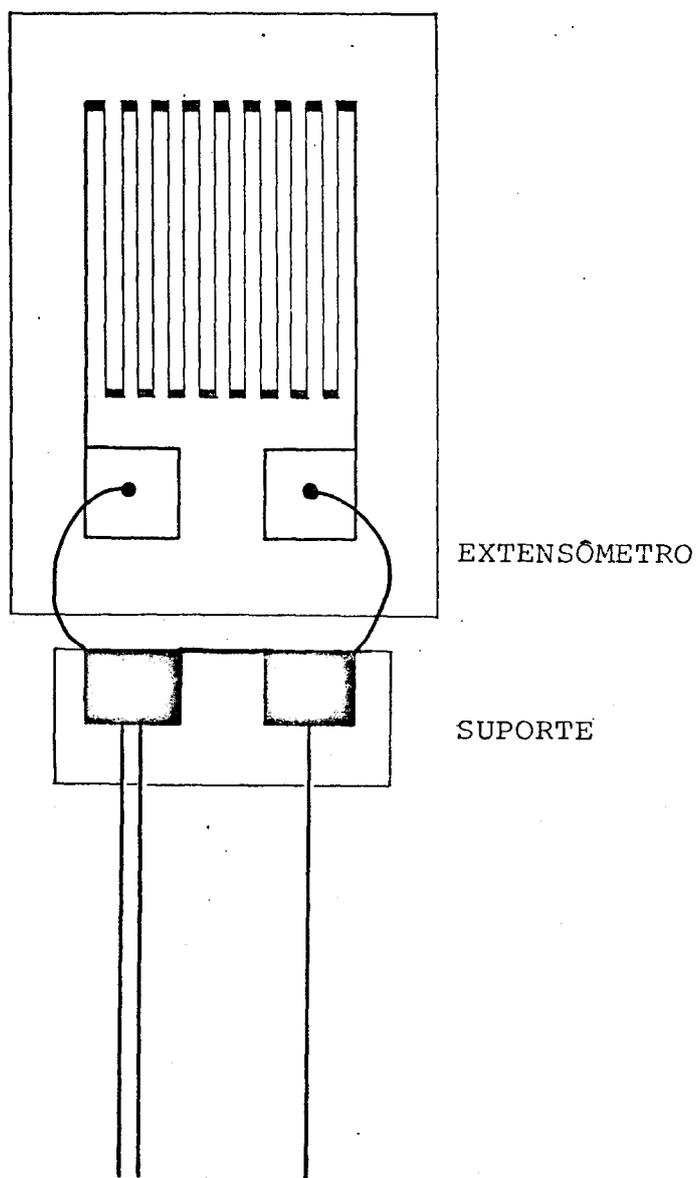


Figura: 15 — UMA FORMA DE PRECAUÇÃO NA INSTALAÇÃO DO EXTENSÔMETRO ELÉTRICO.
(a ligação entre o extensômetro e o suporte é feita através de fios curvos, dando mais flexibilidade à instalação).

de emprego.

Os tipos de proteção usados em extensometria podem ser resumidos da seguinte forma:

- Contra umidade;
- Temperaturas extremas;
- Proteção mecânica.

A proteção contra umidade é feita através de produtos químicos, fornecidos pelo próprio fabricante dos extensômetros. Cita-se abaixo uma série destes produtos:

- Polyuretano em solução de xileno;
- Resina acrílica em solução de tolueno;
- Ceras impermeáveis à umidade;
- Resinas de epoxy que polimerizam à temperatura ambiente;
- Elastômero de silicone em solução de xileno.

Quando o extensômetro se encontra imerso em água, óleo, etc., deve-se cuidar para que estes líquidos não alcançam através dos fios condutores.

Proteções mecânicas são utilizadas quando o extensômetro estiver exposto a condições difíceis, que podem envolver submersão juntamente com abrasão, corrosão, etc.

Como, que as proteções mecânicas devem evitar a aplicação de cargas diretamente sobre o extensômetro, ela é composta de uma cobertura metálica, além das outras coberturas impermeáveis comumente usadas.

Em se tratando de instalações sujeitas a temperatu

ras extremas as proteções são dos mesmos tipos que as anteriores. A diferença é que os produtos empregados tem que resistir à temperatura em questão, assim como o extensômetro, o adesivo, a solda e os fios de ligação.

2.10 Instrumentação para Extensometria

Não é de interesse tratar aqui os circuitos eletrônicos dos equipamentos utilizados em extensometria. O que se verá é como os extensômetros interagem com o sistema de aquisição de dados. Mostra-se na Figura 16 um diagrama de blocos apresentando esta interação.

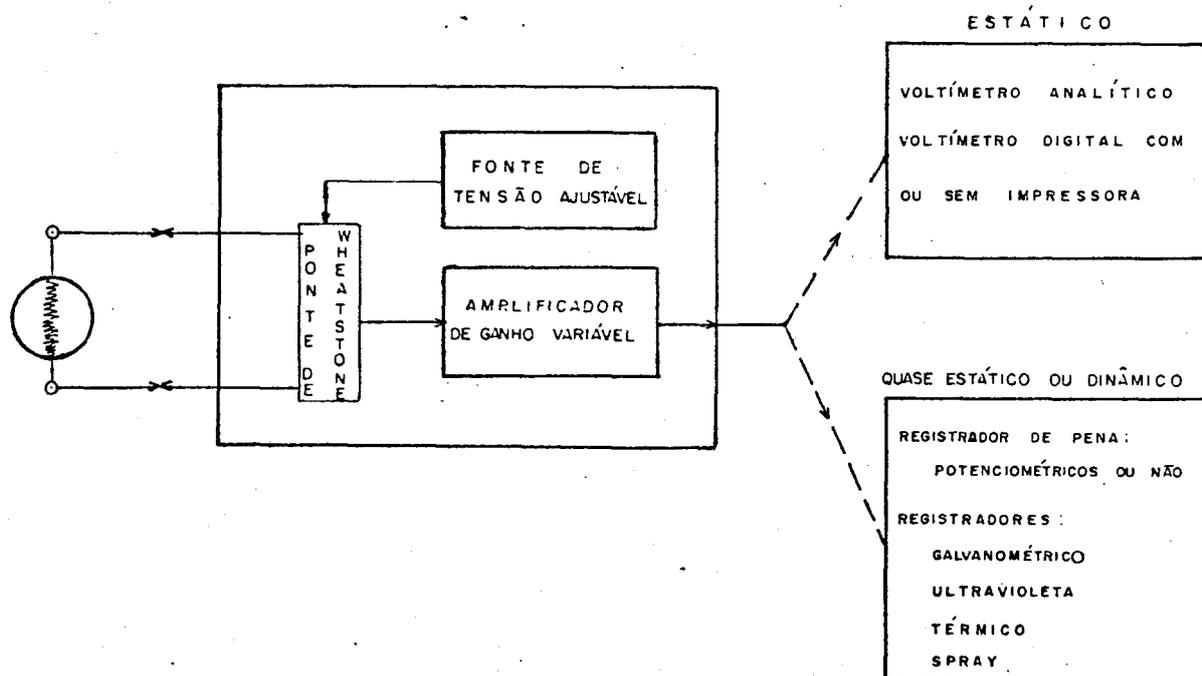


Figura: 16 — DIAGRAMA DE BLOCOS

Descrição:

O extensômetro é ligado à ponte de Wheatstone que se encontra no condicionador de sinal. O circuito da ponte é alimentado pela fonte de tensão contínua, fazendo fluir pelo extensômetro uma corrente que sofrerá variações proporcionais às deformações da estrutura onde o extensômetro está instalado. Inicialmente, estando a estrutura isenta de carregamento, tem-se na saída da ponte um valor de tensão que corresponde ao desequilíbrio inicial entre as resistências que compõem o circuito da ponte de Wheatstone.

Este sinal é indesejável porque, geralmente, coloca os instrumentos registradores utilizados fora de sua escala de trabalho quando a estrutura é submetida a esforços.

Como foi visto anteriormente, existem dois processos mais usuais para equilíbrio deste sinal, o método da leitura nula e o método das deflexões.

Uma vez equilibrada a ponte e a estrutura carregada, o sinal obtido é enviado ao amplificador de ganho ajustável, a fim de se obter um nível de tensão adequado à excitação dos registradores.

Existem dois tipos de registradores:

- Registradores numéricos. Utilizados em ensaios estáticos e em alguns casos em ensaios quase estáticos. São constituídos de uma unidade conversora "analógico-digital" e um circuito interfaceador entre o conversor e uma tele-impressora. Em trabalhos onde se utilizam poucos pontos de estudos,

pode ser usado equipamentos mais simples, desprovidos da tele-impressora e cujos valores de deformação podem ser obtidos usualmente, através de escala linear e ponteiro, ou indicadores digitais.

- Registradores analógicos. Utilizados em ensaios dinâmicos onde exige-se uma rapidez de registro impossível de ser obtido nos equipamentos acima mencionados.

Existem vários tipos de registradores analógicos e sua utilização depende do tipo de ensaio.

Cita-se abaixo as aplicações dos diversos tipos de registradores.

- Osciloscópios - Usados em ensaios de impacto e fenômenos transientes;

- Registradores de Pena - Utilizados em ensaios dinâmicos de baixa frequência;

- Registradores Galvanométricos - Usados em ensaios dinâmicos de alta frequência e de duração mais longa que os osciloscópios poderiam registrar.

2.11 Correção de Resultados /1/, /2/, /3/, /6/, /8/, /12/

Normalmente na prática extensométrica é necessário correções quando não se trabalha à temperatura constante, ou não se tem o extensômetro corretamente alinhado ou ainda ,

quando a grade do elemento sensor sofre influência de defor
mação transversal.

Além destas três correções necessárias, devem ser observadas também, a linearidade da ponte de Wheatstone e a resistência elétrica da fiação empregada.

2.11.1 Correção dos Resultados Associados à Variação da Temperatura

2.11.1.1 Efeitos da Temperatura Sobre o Extensômetro

Em alguns testes, a instalação extensométrica é su
jeita a variações de temperatura, durante o período do teste. Considerações cuidadosas devem ser tomadas para se determinar a influência destas variações nas medidas das de
formações reais que a peça está sujeita.

Quando a temperatura ambiente muda, quatro fenôme
nos ocorrem ao mesmo tempo e devem ser considerados:

- a) Variação da sensibilidade do extensômetro;
- b) Expansão ou contração linear do elemento sensor;
- c) Expansão ou contração linear do material sob tes

te;

d) Variação da resistividade do extensômetro.

A Figura 17 mostra a variação da sensibilidade K para as ligas Advance ou Constantan. (45% Ni, 55% Cu) e Karma (74Ni, 20Cr, 3Al, 3Fe).

A influência dos outros efeitos será mostrada abaixo.

Seja,

α o coeficiente de dilatação linear do extensômetro

β o coeficiente de dilatação linear do material de teste

θ o coeficiente de resistividade

T a temperatura

Supondo inicialmente que a variação da resistividade é nula, isto é, $\theta = 0$, a variação na resistência do extensômetro é causada pela diferença entre o coeficiente de dilatação da estrutura e do extensômetro.

Sabe-se que:

$$\Delta L_{ext} = \alpha L \Delta T \text{ (expansão livre do extensômetro);}$$

$$\Delta L_m = \beta L \Delta T \text{ (expansão livre do material sob teste)}$$

A deformação resultante do extensômetro será dada por:

$$\frac{\Delta L}{L} = \beta \Delta T - \alpha \Delta T = (\beta - \alpha) \Delta T \quad (\text{Eq. 16})$$

Portanto,

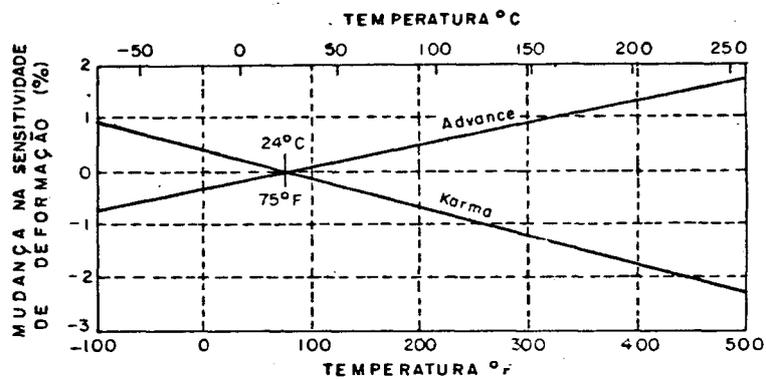


Figura : 17 — VARIÇÃO DA SENSIBILIDADE PARA AS LIGAS
ADVANCE E KARMA . /3/

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\theta=0} = K \frac{\Delta L}{L} = K (\beta - \alpha) \Delta T \quad (\text{Eq. 17})$$

Supondo agora que $\beta = \alpha$, estuda-se a seguir a variação da resistividade do extensômetro.

$$R = f(\rho, L, A)$$

onde: $\rho = \rho(T)$, $L = L(T)$ e $A = A(T)$.

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

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{Eq. 18})$$

onde:

$$\frac{dL}{L} = \alpha \Delta T$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \theta \Delta T$$

$$\frac{dA}{A} = 2\alpha \Delta T$$

Portanto, a equação 18 pode ser escrita como:

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\alpha=\beta} = \alpha \Delta T - 2\alpha \Delta T + \theta \Delta T$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\alpha=\beta} = (\theta - \alpha) \Delta T = \gamma \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 19})$$

onde $\gamma = \theta - \alpha$ é denominado "coeficiente térmico de resistividade" do fio em expansão.

Associando os dois efeitos analisados:

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\Delta T} = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\theta=0} + \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\alpha=\beta}$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\Delta T} = K(\beta - \alpha)\Delta T + \gamma\Delta T \quad (\text{Eq. 20})$$

Então, como pode ser visto pela equação acima, qualquer variação de temperatura na superfície em que está colado o extensômetro, produzirá uma variação da resistência do elemento sensor. Esta mudança faz aparecer no instrumento de medida uma leitura que corresponde a uma deformação aparente.

A deformação aparente causada pela mudança de temperatura é a maior fonte de erros em medidas de deformações estáticas utilizando-se extensômetros e, em ensaios dinâmicos onde a variação da temperatura se processa muito rápido. Esta deformação aparente deve ser evitada ou corrigida. É o que a seguir se apresenta.

Como $K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$ vem que:

$$\epsilon = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \frac{1}{K}$$

Substituindo na equação acima o valor de $\frac{\Delta R}{R}$ obtido pela variação de temperatura, obtém-se:

$$\epsilon_{APP,L} = |K(\beta - \alpha)\Delta T + \gamma\Delta T| \frac{1}{K}$$

$$\epsilon_{APP,L} = \left| (\beta - \alpha) + \frac{\gamma}{K} \right| \Delta T \quad (\text{Eq. 21})$$

Se existe uma expansão diferencial entre o extensômetro e o material sob o qual o extensômetro está colado devido à mudança de temperatura ($\alpha \neq \beta$), o elemento sensor estará sujeito a uma deformação mecânica $\epsilon_m = (\beta - \alpha)\Delta T$, a qual não ocorrerá na estrutura em questão. O elemento sensor reage a esta deformação indicando uma mudança na resistência da mesma maneira que ele indica uma mudança para deformação devido a carga aplicada. Se a liga do elemento sensor e o material de base tem idênticos coeficientes de dilatação linear, esta componente de deformação aparente induzida termicamente desaparece. O extensômetro poderá também indicar uma "deformação aparente" desde que o "coeficiente térmico de resistividade" seja diferente de zero.

2.11.1.2 Compensação para a Deformação Aparente

Teoricamente, a deformação aparente induzida por variações de temperatura pode ser completamente eliminada mediante a conexão de um extensômetro compensador (ativo ou passivo) no mesmo ramo da ponte de Wheatstone em que se encontra ligado o extensômetro ativo principal. A Figura 18 mostra como é este procedimento. Para este tipo de comportamento, é necessário o uso de extensômetros iguais (do mesmo lote) e o conhecimento da relação entre as deformações caso se utilize na medição dois extensômetros ativos.

Outro procedimento para corrigir os efeitos indese

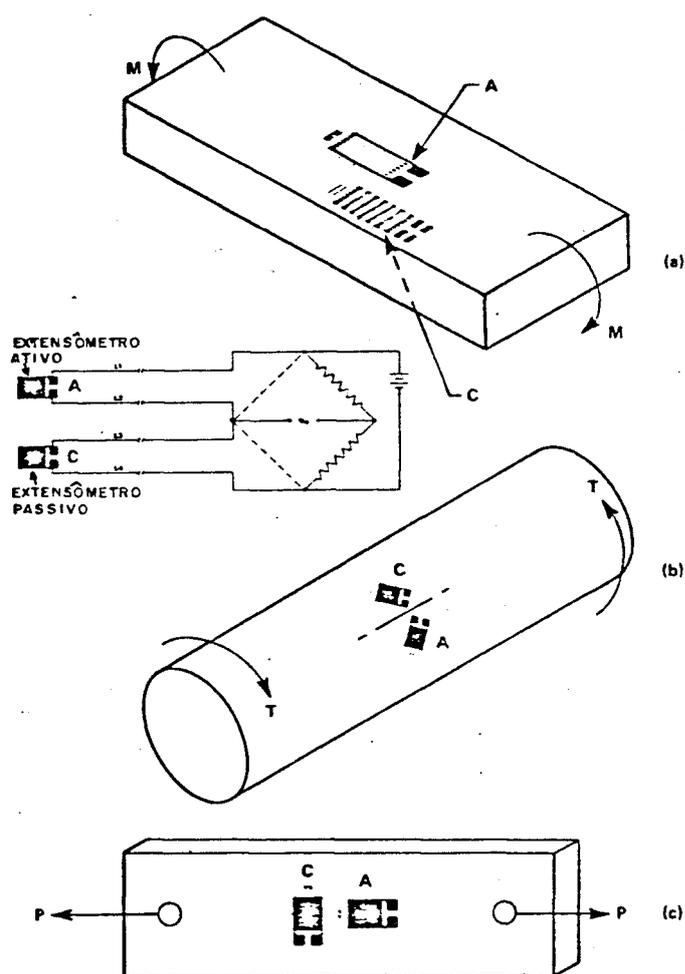


Figura: 18 — COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA USANDO EXTENSÔMETRO ATIVO E PASSIVO /12/

jáveis da temperatura, sobre as medições de deformação, é a utilização de extensômetros compensados em temperatura. As propriedades metalúrgicas de certas ligas de que são feitos os elementos sensores dos extensômetros, em particular constantan e karman modificado, são tais que estas ligas podem ser feitas para minimizar a deformação aparente sobre uma ampla faixa de temperatura, quando fixado para testar materiais com coeficientes de expansão térmica para os quais eles são destinados.

Extensômetros que possuem esta propriedade são chamados de "compensados para temperatura"; S.T.C..

Desde o aparecimento destes extensômetros o uso dos extensômetros passivos no mesmo ramo da ponte de Wheatstone tem sido colocado de lado. É prática usual, quando se faz medidas de deformação em temperatura ambiente ou perto dela, o uso de extensômetros compensados para temperatura em arranjo quarto-de-ponte, completado o circuito com um resistor de alta qualidade, no mesmo ramo da ponte. (Figura 19).

Os fabricantes de extensômetros fazem acompanhar em cada embalagem uma carta contendo a curva de deformação aparente em função da temperatura e, esta curva só é utilizável para extensômetros da referida embalagem.

2.11.1.3 Procedimentos de Correção

Descreve-se abaixo os procedimentos para a correção

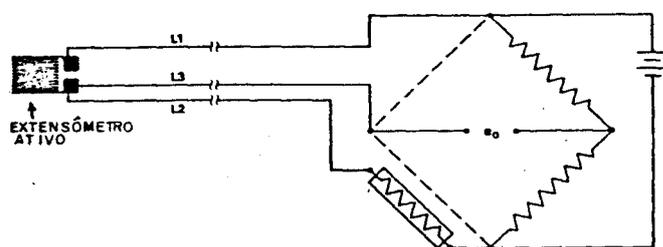


Figura: 19 — PONTE COMPLETADA COM RESISTOR DE PRECISÃO

da deformação devido à influência indesejável da temperatura.

A Figura 20 mostra as curvas de deformação aparente e variação do fator de conversão K, em função da temperatura.

Os passos para a correção são os seguintes:

1) Corrige-se a deformação lida ($\hat{\epsilon}$) para a deformação aparente ϵ_{APP} através da fórmula:

$$\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon} - \epsilon_{APP}$$

onde:

$\hat{\epsilon}$ é a deformação corrigida para a deformação aparente

$\hat{\epsilon}$ é a deformação lida, não corrigida para a deformação aparente ou fator de conversão com a temperatura.

ϵ_{APP} é a deformação aparente na temperatura TI para o material onde está colado o extensômetro.

Para se determinar ϵ_{APP} tem que se fazer as seguintes considerações:

A carta fornecida pelo fabricante para a deformação aparente, nem sempre é para o material que está sendo estudado pelo extensômetro do referido lote. No caso da figura aqui apresentada o material utilizado para o traçado da curva foi o Alumínio e o extensômetro pode estar sendo utilizado no aço.

Como foi deduzido anteriormente,

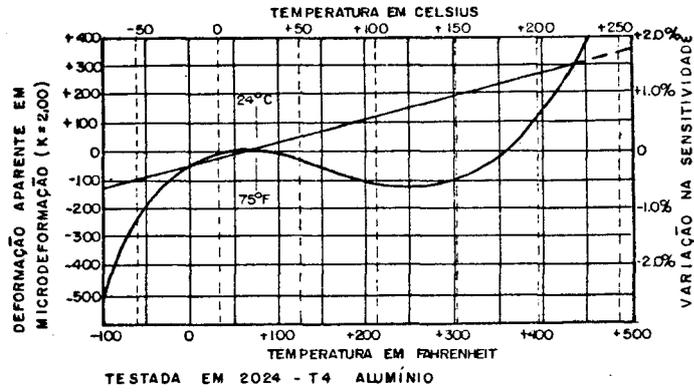


Figura: 20 — DEFORMAÇÃO APARENTE INDUZIDA PELA TEMPERATURA
/12/

$$\epsilon_{APP} = \left| (\beta - \alpha) + \frac{\gamma}{K} \right| \Delta T \text{ de uma maneira geral} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$\epsilon_{APP,L} = \left| (\beta_L - \alpha) + \frac{\gamma}{K} \right| \Delta T \text{ para o caso da Figura} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$\epsilon_{APP} - \epsilon_{APP,L} = (\beta - \beta_L) \Delta T$$

$$\epsilon_{APP} = \epsilon_{APP,L} + (\beta - \beta_L) \Delta T \quad (\text{Eq. 24})$$

onde:

$\epsilon_{APP,L}$ é a deformação aparente obtida a partir da curva fornecida pelo fabricante

β é o coeficiente de dilatação linear (valor médio no intervalo de temperatura ΔT) da estrutura sobre a qual o extensômetro está colado

β_L é o coeficiente de dilatação linear (valor médio no intervalo de temperatura ΔT) do material sobre o qual o extensômetro foi colado para o traçado da curva fornecida pelo fabricante

ΔT é a diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura para a qual o circuito da ponte foi balanceado

2) Calcula-se o fator de conversão real, à temperatura de ensaio, empregando a fórmula:

$$K(TI) = K + \frac{K(\Delta K\%)}{100} \quad (\text{Eq. 25})$$

onde:

$K(TI)$ é o fator de conversão à temperatura de en
saio;

K é o fator de conversão nominal do extensômetro;

$\Delta K(\%)$ é a variação percentual do fator de conver
são para a temperatura de ensaio (tirado
da figura).

- 3) Corrige-se $\hat{\epsilon}$ para as variações do fator de con
versão K , com a temperatura, pela fórmula:

$$\epsilon = \hat{\epsilon} \frac{K^*}{K(TI)} \quad (\text{Eq. 26})$$

K^* é o fator de conversão usado no traçado da
curva de deformação aparente e no cálculo de
 $\hat{\epsilon}$ a partir da tensão de saída da ponte de
Wheatstone;

ϵ é a deformação corrigida para o efeito da tem
peratura, ou seja, corrigida para os erros de
vido à deformação aparente e fator de conver
são.

2.11.2 Erros de Alinhamento

Quando um extensômetro é fixado na superfície de
teste com um pequeno erro angular em relação ao eixo em que
deveria ser fixado, as deformações indicadas exibirão um erro
devido a este mau alinhamento.

Como pode ser visto na Figura 21, qualitativamente,
quando ϕ é 0° ou 90° , um pequeno erro angular produzirá um

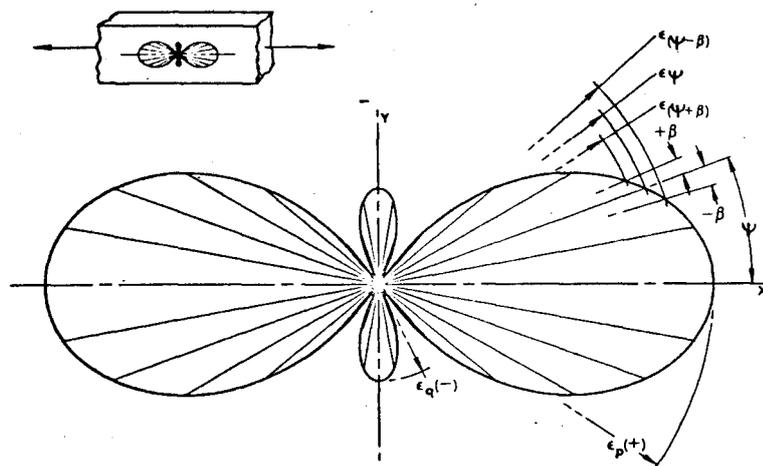


Figura : 21 — DISTRIBUIÇÃO POLAR DE DEFORMAÇÃO CORRESPONDENDO A TENSÃO UNIAXIAL, ILUSTRANDO O ERRO NA INDICAÇÃO DE DEFORMAÇÃO QUANDO O EXTENSÔMETRO É DESALINHADO POR MAIS OU MENOS β DO ÂNGULO ψ .

erro muito pequeno na deformação indicada. Para ângulos entre 0 e 90° a Figura 22 mostra que o erro na deformação indicada, devido a um pequeno desalinhamento angular, pode ser bem significativo.

Através do círculo de Mohr para deformação, Figura 22, pode ser visto que o erro na medida de deformação, devido ao mau alinhamento do extensômetro, é expresso por:

$$n = \varepsilon(\psi \pm \beta) - \varepsilon\psi \quad (\text{Eq. 27})$$

onde:

n é o erro absoluto, em microdeformações

$\varepsilon\psi$ é a deformação ao longo do eixo fixado para medi-
das, também em microdeformações; e

$\varepsilon(\psi \pm \beta)$ é a deformação ao longo do eixo em que foi
realmente fixado o extensômetro.

A expressão de n pode ser escrita em função dos ângulos e das deformações principais:

$$\varepsilon(\psi \pm \beta) = \frac{\varepsilon_{\text{máx}} + \varepsilon_{\text{mín}}}{2} + \left(\frac{\varepsilon_{\text{máx}} - \varepsilon_{\text{mín}}}{2} \right) \cos 2(\psi \pm \beta) \quad (\text{Eq. 28})$$

$$\varepsilon(\psi) = \frac{\varepsilon_{\text{máx}} + \varepsilon_{\text{mín}}}{2} + \frac{\varepsilon_{\text{máx}} - \varepsilon_{\text{mín}}}{2} \cos 2\psi \quad (\text{Eq. 29})$$

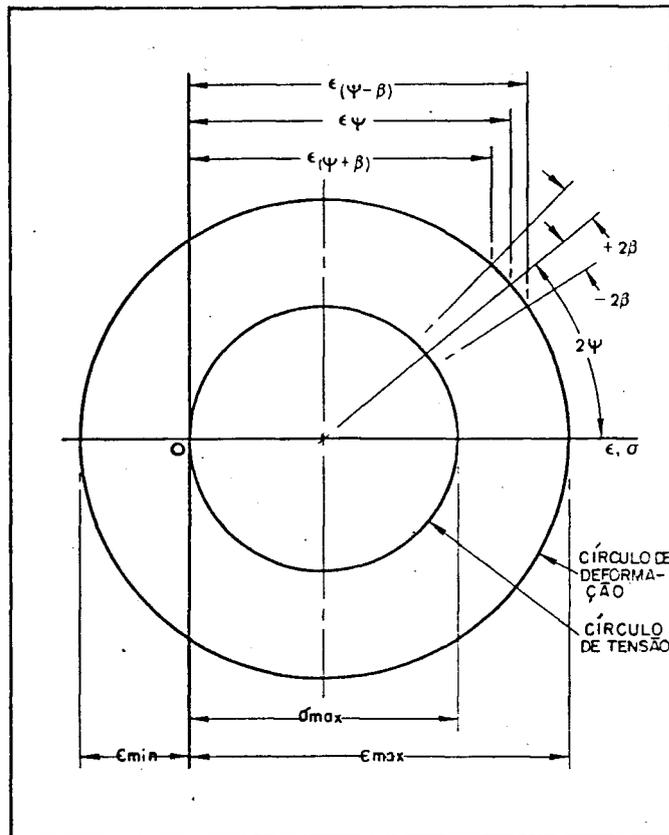


Figura:22 — CÍRCULO DE MOHR PARA DEFORMAÇÃO E TENSÃO

Subtraindo a equação 29 da equação 28, vem:

$$n = \frac{\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}}{2} \left| \cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi \right| \quad (\text{Eq. 30})$$

Se se deseja exprimir o erro em percentagem, vem:

$$n' = \frac{\frac{\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}}{2} \left| \cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi \right|}{\frac{\epsilon_{\text{máx}} + \epsilon_{\text{mín}}}{2} + \frac{\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}}{2} \cos 2\psi} \times 100$$

Dividindo numerador e denominador por $\frac{\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}}{2}$

$$n' = \frac{\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi}{\frac{\epsilon_{\text{máx}} + \epsilon_{\text{mín}}}{\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}} + \cos 2\psi} \times 100 = \frac{\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi}{\frac{\frac{\epsilon_{\text{máx}}}{\epsilon_{\text{mín}}} + 1}{\frac{\epsilon_{\text{máx}}}{\epsilon_{\text{mín}}} - 1} + \cos 2\psi} \times 100$$

Colocado $R = \frac{\epsilon_{\text{máx}}}{\epsilon_{\text{mín}}}$ vem:

$$n' = \frac{\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi}{\frac{R_{\epsilon} + 1}{R_{\epsilon} - 1} + \cos 2\psi} \times 100 \quad (\text{Eq. 31})$$

Como pode ser visto nas Figuras 21 e 22 e nas fórmulas de n e n' , o erro devido ao mau alinhamento depende de três fatores:

- a) a razão algébrica da deformação principal máxima para a deformação principal mínima;
- b) o ângulo ψ entre a deformação principal máxima e

- o eixo onde se vai medir a deformação;
- c) o ângulo β entre a direção que se queria medir e a direção de fixação do extensômetro.

2.11.3 Correção dos Resultados Relativamente à Sensibilidade Transversal dos Extensômetros

Entende-se por sensibilidade transversal a variação elétrica do elemento sensor do extensômetro devido à deformação orientada perpendicularmente ao seu eixo principal.

Nos extensômetros com elemento sensor de fio de resistência a sensibilidade transversal origina-se principalmente nas extremidades. Nos extensômetros com elemento sensor de construção laminar, a sensibilidade transversal deve-se principalmente aos efeitos nas regiões do elemento sensor orientadas axialmente ao extensômetro.

Na maioria das aplicações os efeitos da sensibilidade transversal podem ser desprezados; porém, em medições mais acuradas, correções devem ser feitas.

O fator de conversão K dos extensômetros, fornecido pelos fabricantes, é a razão entre a variação relativa da resistência elétrica do elemento sensor e a deformação no sentido axial do mesmo.

Isto é válido somente quando se verifica para a superfície um estado uniaxial de deformação, e quando o eixo do elemento sensor orienta-se segundo a direção de máxima de

formação principal, sendo ainda o coeficiente de Poisson (μ) para o material igual a 0,285.

O fator de conversão pode ser escrito como:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}; \text{ (K é o fornecido pelo fabricante)}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (\text{Eq. 32})$$

que pode ser escrita em função das sensibilidades axial e transversal K_a e K_t , como:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a\epsilon + K_t\epsilon_t \quad (\text{Eq. 33})$$

onde:

K_a é a sensibilidade axial;

K_t é a sensibilidade transversal;

ϵ é a deformação normal ao longo da direção longitudinal do extensômetro; e

ϵ_t é a deformação normal ao longo da direção transversal do extensômetro.

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a \left(\epsilon + \frac{K_t}{K_a} \epsilon_t \right)$$

Fazendo $F = \frac{K_t}{K_a}$, tem-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a (\epsilon + F\epsilon_t) \quad (\text{Eq. 34})$$

Da equação 32 e da equação 34:

$$K\varepsilon = K_a (\varepsilon + F\varepsilon_t)$$

$$K = K_a \left(1 + F \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon}\right)$$

mas, $\varepsilon_t = -\mu_o\varepsilon$, portanto:

$$K = K_a (1 - \mu_o F) \quad (\text{Eq. 35})$$

A deformação aparente ε_c , obtida em qualquer campo de deformação devido do fator de conversão, fornecido pelo fabricante, é:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta R/R}{K} = \frac{K_a (\varepsilon + F\varepsilon_t)}{K_a (1 - \mu_o F)}$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon + F\varepsilon_t}{1 - \mu_o F}$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon (1 + F\varepsilon_t/\varepsilon)}{1 - \mu_o F}$$

Donde:

$$\varepsilon = \varepsilon_c \cdot \frac{(1 - \mu_o F)}{1 + F\varepsilon_t/\varepsilon} \quad (\text{Eq. 36})$$

A equação 36 é que fornece o verdadeiro valor da deformação no sentido axial do extensômetro.

O percentual de erro envolvido quando se despreza a sensibilidade transversal, é:

$$\xi = \frac{\epsilon_c - \epsilon}{\epsilon} \times 100 \quad (\text{Eq. 37})$$

ou

$$\xi = \frac{F (\epsilon_t/\epsilon + \mu_0)}{1 - \mu_0 F} \times 100 \quad (\text{Eq. 38})$$

É evidente que quando a deformação transversal ϵ_t é igual a $-\mu_0$ (condição de tensão uniaxial com o elemento sensor do extensômetro ao longo do eixo da tensão principal máxima), o erro é zero.

Se o coeficiente de Poisson para o material é algum valor μ , diferente de μ_0 , existe erro.

Dois procedimentos para correção dos dados têm sido desenvolvidos.

O primeiro requer um antecipado conhecimento para a razão ϵ_t/ϵ do estado de deformação.

$$\text{Desde que } \epsilon = \epsilon_c \frac{1 - \mu_0 F}{1 + F \epsilon_t/\epsilon} \quad (\text{Eq. 39})$$

O Fator de Correção (FC) é:

$$FC = \frac{1 - \mu_0 F}{1 + F \epsilon_t/\epsilon} \quad (\text{Eq. 40})$$

O segundo procedimento é atuar no fator de sensibilidade do extensômetro.

$$\text{De } \epsilon = \epsilon_c \cdot \frac{1 - \mu_0 F}{1 + F \epsilon_t/\epsilon} \quad (\text{Eq. 41})$$

onde ϵ é a deformação verdadeira.

Se ϵ é a deformação verdadeira, tem-se que:

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{K^*} \quad e \quad \epsilon_c = \frac{\Delta R/R}{K}$$

Substituindo as equações de ϵ e ϵ_c na equação 41 ,

vem:

$$\frac{\Delta R/R}{K^*} = \frac{\Delta R/R}{K} \frac{1 - \mu\sigma F}{1 + F\epsilon t/\epsilon}$$

$$K^* = K \frac{1 + F\epsilon t/\epsilon}{1 - \mu\sigma F} \quad (\text{Eq. 42})$$

A correção para efeito de sensibilidade transversal quando o campo de deformação não é conhecido, é mais complexo requerendo a determinação experimental das deformações em x e y . Se ϵ'_x e ϵ'_y são as deformações aparentes registradas para as direções x e y , tem-se, com o auxílio da equação:

$$\epsilon_c = \epsilon \cdot \frac{1 + F\epsilon t/\epsilon}{1 - \mu\sigma F} \quad \text{que}$$

$$\epsilon'_x = \epsilon_x \cdot \frac{1 + F\epsilon_y/\epsilon_x}{1 - \mu\sigma F} \quad \text{ou}$$

$$\epsilon'_x = \frac{1}{1 - \mu\sigma F} (\epsilon_x + F\epsilon_y) \quad (\text{Eq. 43})$$

e analogamente:

$$\epsilon'_y = \frac{1}{1 - \mu\sigma F} (\epsilon_y + F\epsilon_x) \quad (\text{Eq. 44})$$

onde ϵ_x e ϵ_y são as deformações verdadeiras.

Résolvendo o sistema formado pelas equações 43 e 44,

vem:

$$\epsilon_x = \frac{1 - \mu OF}{1 - F^2} (\epsilon'_x - F \epsilon'_y) \quad (\text{Eq. 45})$$

$$\epsilon_y = \frac{1 - \mu OF}{1 - F^2} (\epsilon'_y - F \epsilon'_x) \quad (\text{Eq. 46})$$

2.11.4 Correção dos Resultados Devido a Não Linearidade da Ponte de Wheatstone

Os erros devido a não linearidade ocorrem porque , quando medidas de deformação são feitas com uma ponte de Wheatstone não balanceada, há certas condições debaixo das quais o sinal de saída do circuito da ponte é uma função não linear da variação da resistência.

O erro devido a não linearidade, quando presente , é muito pequeno, e pode ser ignorado quando em medidas de deformações em regime elástico, em metais.

A percentagem de erro cresce com a grandeza da de formação medida e pode tornar-se significativa para grandes deformações; por exemplo: o erro é em torno de 0,1% em 1000 μ d, 1% em 10.000 μ d e 10% em 100.000 μ d, ou; como uma regra prático conveniente, o erro, em percentagem, é aproximadamente igual ao valor da deformação.

Maiores detalhes sobre este item poderão ser encontrados nas referências /1/, /3/, /6/.

2.11.5 Correção dos Resultados Devido a Resistência dos Fios /1/

Os erros provocados pelos fios de ligação de um extensômetro são de duas naturezas:

- Os fios de ligação são resistências montadas em série com o circuito dos extensômetros.
- A resistência destes fios varia com a temperatura.

O segundo fenômeno pode ser eliminado pela montagem de três fios, que consiste em dividir os efeitos térmicos sobre dois braços adjacentes da ponte de Wheatstone.

O primeiro efeito não pode ser suprimido e deve ser calculado para ser corrigido.

Em lugar de ver a resistência do extensômetro R_E , a ponte vê uma resistência total R' igual a soma de R_E e R_F , resistência da linha. Entretanto, a variação de resistência devido às deformações é ΔR_E já que R_F é constante.

Por definição, o fator de conversão K do extensômetro é:

$$K = \frac{\Delta R_E / R_E}{\epsilon}$$

O fator de conversão efetivo é:

$$K_e = \frac{\Delta R_E / R'}{\epsilon} = \frac{\Delta R_E / R_E + R_F}{\epsilon} \quad \text{sendo}$$

R_E = resistência do extensômetro, em ohms.

R_F = resistência total da linha em série com o ex
tensômetro de um braço da ponte, em ohms.

$$R' = R_E + R_F$$

ΔR_E = variação da resistência do extensômetro, em ohms.

ϵ = deformação do extensômetro, em μd .

K = fator de conversão nominal do extensômetro.

K_e = fator de conversão efetivo do extensômetro li
gado por uma linha de resistência não nula.

A desensibilização

$$D = \frac{K_e}{K} = \frac{R_E}{R_E + R_L}$$

$$K = \frac{R_E}{R_E + R_L} \quad K$$

A correção do fator K relativamente ao comprimento da fiação é feita substituindo na equação que fornece ϵ , K por K_e .

2.12 Deformações e Tensões

Um extensômetro elétrico fornece a deformação da peça em que está colado, na direção em que está fixado.

Para se conhecer o estado de deformação num ponto qualquer, o importante é determinar as deformações principais bem como sua orientação segundo eixos pré-determinados. De posse destas informações e usando convenientemente as relações entre tensões e deformações, convertem-se em tensões as deformações obtidas, ficando finalmente determinado o estado real de solicitação da estrutura, no ponto considerado.

O que será apresentado neste item, é a teoria de deformação e tensão, necessária à prática extensométrica. Também será apresentado a teoria de tensões térmicas, usada neste trabalho.

2.12.1 Deformações /4/, /8/, /13/, /14/

2.12.1.1 Estado Uniaxial de Deformação

Um corpo está submetido a um estado uniaxial de de formação quando a ele só é permitido deformar-se segundo uma direção.

A Figura abaixo mostra este comportamento.

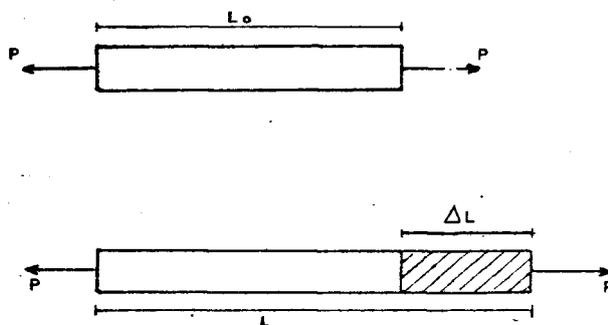


Figura: 23 — ESTADO UNIAXIAL DE DEFORMAÇÃO

Define-se a deformação convencional unitária deste corpo como sendo:

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Eq. 47})$$

2.12.1.2 Estado Plano de Deformações

Considere o plano xy pertencente a um sólido que vai se deformar. Admita também que as deformações lineares e angulares, em todos os pontos do plano, sejam iguais. Esta consideração permite dizer que elas são uniformes. Os eixos x e y são os eixos de referência. Neste sólido e neste plano isole-se uma fibra de comprimento ℓ , como na Figura 24, abaixo.

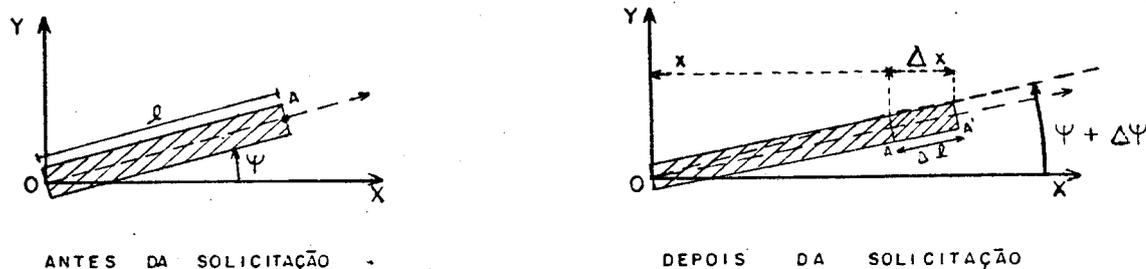


Figura : 24 — INFLUÊNCIA DE UM DESLOCAMENTO Δx , PARALELO A x , NA DEFORMAÇÃO DE UMA FIBRA ℓ . /13/

Para facilitar o estudo, será considerado separadamente os vários tipos de deformação que podem ocorrer na fibra.

a) Influência de uma deformação linear horizontal .

Ex.: na deformação linear de um semento ℓ .

Imagine que A sofra apenas um deslocamento horizontal, Δx . Deverá ser encontrada a influência deste deslocamento sobre o comprimento OA. CONSI

DERE ψ POSITIVO NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO.

Seja Δl o alongamento sofrido pela fibra OA. Se Δx for pequeno comparado com x , pode-se confundir $\text{Cos}\psi$ e $\text{Cos}(\psi + \Delta\psi)$.

$\text{Cos}\psi = \frac{\Delta l}{\Delta x}$ como pode ser visto no detalhe da Figura 25, anterior.

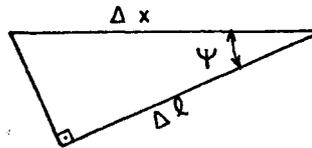


Figura : 25 - DETALHE DA FIGURA 24

$$\Delta l = \Delta x \cdot \text{Cos}\psi$$

$$\text{Cos}\psi = \frac{x}{l}$$

$$l = \frac{x}{\text{Cos}\psi}$$

Na direção de x , tem-se:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x}$$

Na direção de ψ :

$$\epsilon_\psi = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta x \cdot \text{Cos}\psi}{x/\text{Cos}\psi} = \frac{\Delta x}{x} \text{Cos}^2\psi = \epsilon_x \cdot \text{Cos}^2\psi$$

$$\epsilon_\psi = \epsilon_x \text{Cos}^2\psi \quad (\text{Eq. 48})$$

b) Influência de uma deformação linear vertical ϵ_y , na deformação linear de um segmento l .

A Figura 26 será útil ao desenvolvimento.

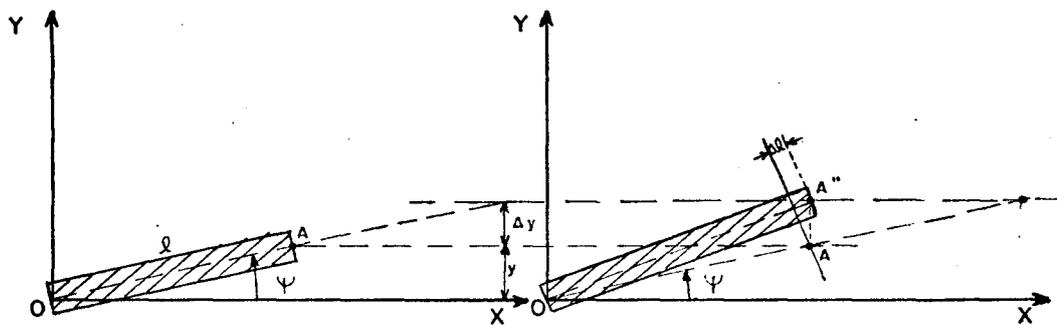


Figura: 26 — INFLUÊNCIA DE UM DESLOCAMENTO Δy , PARALELO A y NA DEFORMAÇÃO DE UMA FIBRA l . /13/

$$\text{Sen}\psi = \frac{y}{l}$$

$$l = \frac{y}{\text{Sen}\psi}$$

$$\text{Sen}\psi = \frac{\Delta l}{\Delta y}$$

$$\Delta l = \Delta y \cdot \text{Sen}\psi$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta y}{y}$$

$$\epsilon_\psi = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta y \cdot \text{Sen}\psi}{y/\text{Sen}\psi} = \frac{\Delta y}{y} \text{Sen}^2\psi = \epsilon_y \cdot \text{Sen}^2\psi$$

$$\epsilon_\psi = \epsilon_y \text{Sen}^2\psi \quad (\text{Eq. 49})$$

- c) Influência de uma deformação angular, γ_{xy} , na de-
formação angular do segmento l .

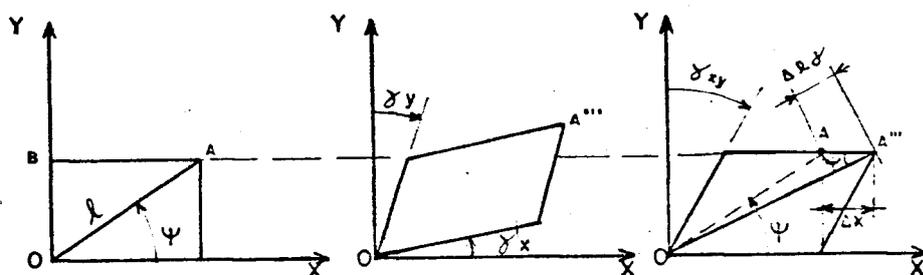


Figura: 27 — INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO ANGULAR NA DEFORMAÇÃO
LINEAR DE l /13/.

Sob a influência de uma deformação de cisalhamento, o retângulo xy transforma-se num paralelogramo, cujos lados fazem ângulos γ_y e γ_x com os eixos x e y . Porém, para estudos dos deslocamentos relativos dentro do próprio elemento, nada se altera se o paralelogramo for girado como um corpo rígido até γ_x ser anulado. Então, pode-se escrever:

$$\gamma_{xy} = \gamma_x + \gamma_y$$

γ_x e γ_y são positivos, pois diminuem o ângulo inferior esquerdo do elemento.

Do desenho:

$$AA'''' = \Delta x = y \operatorname{tg} \gamma_{xy}.$$

Como γ_{xy} é muito pequeno, $\gamma_{xy} \approx \operatorname{tg} \gamma_{xy}$, portanto:

$$AA'''' = \Delta x = y \gamma_{xy}$$

$$\operatorname{Cos} \psi = \frac{\Delta l \gamma}{\Delta x}$$

$$\Delta l \gamma = \Delta x \cdot \operatorname{Cos} \psi = y \gamma_{xy} \cdot \operatorname{Cos} \psi$$

$$\operatorname{Sen} \psi = \frac{y}{l} ; \quad l = \frac{y}{\operatorname{Sen} \psi}$$

$$\epsilon_{\psi} = \frac{\Delta l \gamma}{l} = \frac{y \cdot \gamma_{xy} \operatorname{Cos} \psi}{y / \operatorname{Sen} \psi} = \gamma_{xy} \operatorname{Sen} \psi \operatorname{Cos} \psi$$

$$\epsilon_{\psi} = \frac{\gamma_{xy}}{2} \operatorname{Sen} 2\psi \quad (\text{Eq. 50})$$

d) Soma dos efeitos individuais

Se o corpo é solicitado simultaneamente pelos es forços que provocam as deformações mostradas em a, b e c, pode-se então escrever:

$$\epsilon_{\psi} = \epsilon_x \operatorname{Cos}^2 \psi + \epsilon_y \operatorname{Sen}^2 \psi + \frac{\gamma_{xy}}{2} \operatorname{Sen} 2\psi \quad \text{ou}$$

$$\epsilon_{\psi} = \epsilon_x \operatorname{Cos}^2 \psi + \epsilon_y \operatorname{Sen}^2 \psi + \gamma_{xy} \operatorname{Sen} \psi \operatorname{Cos} \psi$$

Nesta equação, ϵ_x é a deformação linear horizon tal, ϵ_y é a deformação linear vertical e γ_{xy} é a deformação angular.

2.12.1.3 Deformações Principais: Grandeza e Orientação

Qualquer que seja o estado de deformação no plano , existe sempre um par de eixos ortogonais que continuam ortogonais após a deformação. Tais eixos definem as direções das deformações principais que são, por definição, os valores máximo e mínimo da deformação existente no ponto.

Para determinar as direções das deformações principais é conveniente trabalhar com a equação de ϵ_ψ em função do ângulo 2ψ .

$$\epsilon_\psi = \epsilon_x \cos^2 \psi + \epsilon_y \sin^2 \psi + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\psi.$$

$$\begin{aligned} \epsilon_\psi &= \epsilon_x \cos^2 \psi + \epsilon_x \sin^2 \psi - \epsilon_x \sin^2 \psi + \epsilon_y \sin^2 \psi + \\ &+ \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\psi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_\psi &= \epsilon_x (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi) - \sin^2 \psi (\epsilon_x - \epsilon_y) + \\ &+ \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\psi. \end{aligned}$$

$$\epsilon_\psi = \epsilon_x - \sin^2 \psi (\epsilon_x - \epsilon_y) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\psi.$$

$$\begin{aligned} \epsilon_\psi &= \frac{\epsilon_x}{2} + \frac{\epsilon_x}{2} + \frac{\epsilon_y}{2} - \frac{\epsilon_y}{2} - \sin^2 \psi \left(\frac{\epsilon_x}{2} + \frac{\epsilon_x}{2} - \frac{\epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_y}{2} \right) + \\ &\frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\psi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{\psi} = & \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} - \text{Sen}^2 \psi \left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \right) - \\ & - \text{Sen}^2 \psi \left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \right) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \text{Sen} 2\psi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{\psi} = & \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} (1 - \text{Sen}^2 \psi) - \text{Sen}^2 \psi \left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \right) + \\ & \frac{\gamma_{xy}}{2} \text{Sen} 2\psi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{\psi} = & \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \text{Cos}^2 \psi - \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \text{Sen}^2 \psi + \\ & \frac{\gamma_{xy}}{2} \text{Sen} 2\psi. \end{aligned}$$

$$\epsilon_{\psi} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \text{Cos} 2\psi + \frac{\gamma_{xy}}{2} \text{Sen} 2\psi. \quad (\text{Eq. 51})$$

Derivando a equação de ϵ_{ψ} em relação a ψ vem:

$$\frac{d\epsilon_{\psi}}{d\psi} = \frac{-2(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2} \text{Sen} 2\psi + \frac{2\gamma_{xy}}{2} \text{Cos} 2\psi \quad (\text{Eq. 52})$$

e igualando a zero a equação acima, tem-se:

$$\text{Tg} 2\psi_p = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (\text{Eq. 53})$$

Esta equação apresenta duas soluções de interesse ,
que são:

$$2\psi_p = \text{arc Tg} \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (\text{Eq. 54})$$

e

$$2\psi_p = \text{arc Tg} \left(\frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \right) + 180 \quad (\text{Eq. 55})$$

Para se determinar ϵ_ψ (Equação 51), é necessário os valores de $\text{Cos}2\psi$ e $\text{Sen}2\psi$ que podem ser obtidos facilmente através de considerações geométricas. Nas Figuras abaixo (Figura 28) estão representados os dois ângulos soluções da Equação 53.

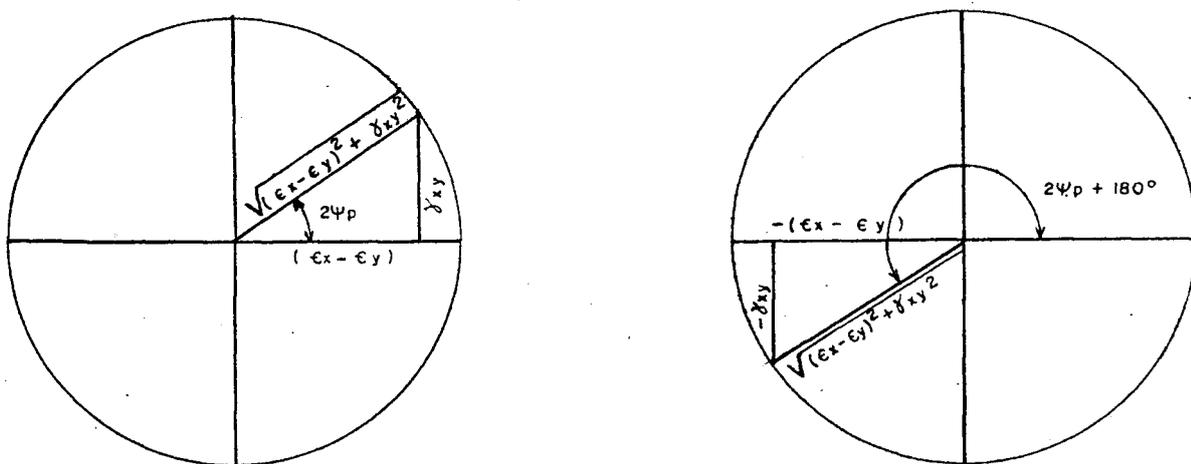


Figura : 28 — REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DOS ÂNGULOS $2\psi_p$ E $2\psi_p + 180^\circ$

$$\text{Sen}2\psi_p = + \frac{\gamma_{xy}}{\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}} \quad (\text{Eq. 56})$$

$$\text{Cos}2\psi_p = + \frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}} \quad (\text{Eq. 57})$$

$$\text{Sen}2\psi_p + 180^\circ = - \frac{\gamma_{xy}}{\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}} \quad (\text{Eq. 58})$$

$$\cos 2\psi_p + 180^\circ = - \frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}} \quad (\text{Eq. 59})$$

Substituindo os valores das Equações 56 e 58, na Equação 51, obtém-se:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}}{2} \quad (\text{Eq. 60})$$

e

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}}{2} \quad (\text{Eq. 61})$$

Estes valores correspondem aos máximos e mínimos da função ϵ_ψ .

Analisando as expressões acima verifica-se facilmente que $\epsilon_1 = \epsilon_{\text{máx}}$ e $\epsilon_2 = \epsilon_{\text{mín}}$, que são as deformações principais.

Note-se pelas soluções obtidas para a Equação 53, que, $\epsilon_{\text{máx}}$ e $\epsilon_{\text{mín}}$ estão defasadas de 90° .

A fim de se obter de uma maneira mais prática a orientação de $\epsilon_{\text{máx}}$ e $\epsilon_{\text{mín}}$, examina-se o comportamento da derivada segunda da equação 51. Esta derivada é dada por:

$$\frac{d^2 \epsilon_\psi}{d\psi^2} = -2 (\epsilon_x - \epsilon_y) \cos 2\psi_p + 2\gamma_{xy} \sin 2\psi_p \quad (\text{Eq. 62})$$

A condição de máximo de uma função é quando sua derivada segunda é menor que zero. Dividindo a Equação 62 por $\text{Cos}2\psi_p$ obtêm-se:

$$\frac{1}{\text{Cos}2\psi_p} \cdot \frac{d^2 \epsilon_\psi}{d\psi^2} = -2 (\epsilon_x - \epsilon_y) - 2\gamma_{xy} \text{Tg}^2 \psi_p \quad (\text{Eq. 63})$$

$$\frac{1}{\text{Cos}2\psi_p} \cdot \frac{d^2 \epsilon_\psi}{d\psi^2} = A \quad (\text{Eq. 64})$$

Sendo:

$$A = -2 (\epsilon_x - \epsilon_y) - 2\gamma_{xy} \text{Tg}2\psi_p \quad (\text{Eq. 65})$$

Como o interesse é determinar a "direção" das deformações principais, deve-se notar que qualquer ângulo $2\psi_p$ determinado pela equação 53 possui um ângulo correspondente no primeiro ou quarto quadrante que define a mesma "direção" determinada por $2\psi_p$.

Assim, considerando os ângulos do primeiro e quarto quadrantes, pode-se dizer que $\text{Cos}2\psi_p$ é sempre positivo. Logo, na equação 64, o sinal da derivada segunda vai depender somente do sinal de A. Então, para a condição de $\epsilon_{\text{máx}}$ ser verificada, deve-se ter $A < 0$.

Multiplicando ambos os membros da equação 53 por $\text{Tg}2\psi_p$ resulta:

$$\text{Tg}^2 2\psi_p = \frac{\gamma_{xy} \text{Tg}2\psi_p}{\epsilon_x - \epsilon_y}$$

Esta equação pode ser escrita como:

$$\text{Tg}^2 2\psi_p \cdot (\epsilon_x - \epsilon_y) = \gamma_{xy} \text{Tg} 2\psi_p.$$

Substituindo na equação 65 $\gamma_{xy} \text{Tg} 2\psi_p$ por seu valor dado pela equação acima, vem:

$$A = -2(\epsilon_x - \epsilon_y) - 2\text{Tg}^2 2\psi_p (\epsilon_x - \epsilon_y)$$

Portanto, se $\epsilon_x > \epsilon_y$ o ângulo determinado pela equação $\text{Tg} 2\psi_p$ corresponderá a $\epsilon_{\text{máx}}$. Se $\epsilon_x < \epsilon_y$, o valor de A será maior que zero e, o valor da derivada segunda de ϵ_y será maior que zero. Esta condição faz com que o valor do ângulo determinado por $\text{Tg} 2\psi_p$ corresponda à orientação de $\epsilon_{\text{mín}}$.

2.12.1.4 Deformação Tangencial, Devido a Deformação Normal Simples e a Deformação Tangencial Simples

Demonstra-se /4/ que a deformação tangencial devido à ação simultânea de ϵ_x e ϵ_y é $\gamma\psi = (\epsilon_x - \epsilon_y) \text{Sen} 2\psi$ e, em função das deformações principais, $\gamma\psi = (\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}) \text{Sen} 2\psi$ e por conseguinte a deformação tangencial máxima, $\gamma_{\text{máx}}$, é dada por: $\gamma_{\text{máx}} = \epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}$, ou, substituindo os valores de $\epsilon_{\text{máx}}$ e $\epsilon_{\text{mín}}$:

$$\gamma_{\text{máx}} = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + (\epsilon_x - \epsilon_y)^2} \quad (\text{Eq. 66})$$

Se, além das deformações ϵ_x , ϵ_y atuar também γ_{xy} , tem-se:

$$\gamma_{\psi} = (\epsilon_x - \epsilon_y) \text{ Sen}2\psi - \gamma_{xy} \text{ Cos}2\psi \quad (\text{Eq. 67})$$

Através desta equação e, como uso de 2ψ determinado pela equação 53, mostra-se que $\gamma_{\psi} = 0$, isto é, os planos principais da deformação permanecem perpendiculares entre si.

2.12.2 Tensões

A palavra tensão significa força por unidade de área. Com mais precisão, a tensão σ em um ponto P de uma superfície limitada ΔA se define pela expressão:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (\text{Eq. 68})$$

onde ΔF é o incremento de força sobre a área ΔA ao redor do ponto dado.

A tensão σ , chamada de tensão resultante, se decompõe, por comodidade, nas tensões normais e tangenciais que são, respectivamente, perpendicular e paralela à superfície ΔA . A componente normal pode ser uma tensão de tração ou compressão.

2.12.2.1 Estado Simples de Tensão

A Figura a seguir mostra um elemento sujeito a uma

tensão de tração simples σ_x .

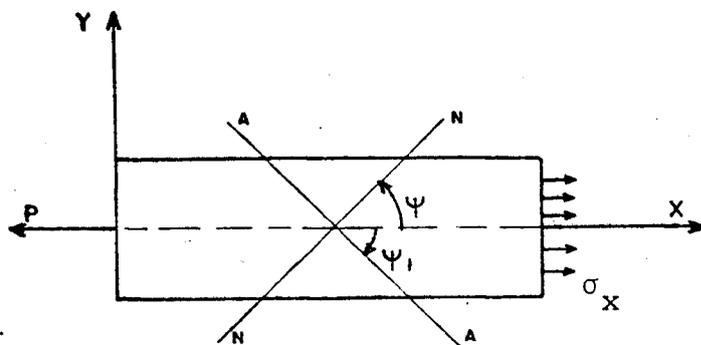


Figura: 29 — REPRESENTAÇÃO DE UM ESTADO SIMPLES DE TENSÃO

A tensão normal σ_x se define como sendo:

$$\sigma_x = \frac{P}{S} \quad , \quad \text{onde:}$$

P é a força aplicada

S é a área de atuação da força.

Sobre um plano inclinado A-A, determinado por um ângulo ψ a tensão normal σ_x dá origem a uma tensão perpendicular σ_ψ e a outra tangencial τ_ψ .

Deve ser observado que o ângulo ψ , que define o plano inclinado A-A, sempre deve medir-se a partir do eixo x em direção à normal N ao plano A-A e se considera positiva a direção anti-horária.

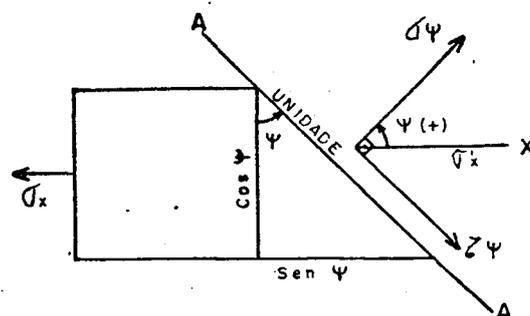


Figura: 30 — TENSÕES ATUANTES SEGUNDO UM PLANO AA

As direções das tensões provocadas podem determinar-se facilmente pela observação.

A fim de obter expressões das tensões σ_ψ e τ_ψ considera-se a parte direita do elemento limitada pelo plano A-A e aplica-se as condições de equilíbrio para as forças que atuam sobre ele.

$\sigma'_x = \frac{P}{A'} = \frac{P}{A/\cos\psi}$ onde P é a força aplicada, A' a área inclinada de ψ e A a área normal a P.

$$\sigma_\psi = \sigma'_x \cdot \cos\psi = \frac{P}{A/\cos\psi} \cos\psi = \frac{P}{A} \cos^2\psi = \sigma_x \cos^2\psi$$

$$\sigma_\psi = \sigma_x \cos^2\psi \quad (\text{Eq. 69})$$

$$\tau_{\psi} = \sigma'_{x} \text{Sen}\psi = \frac{P}{A/\text{Cos}\psi} \text{Sen}\psi = \sigma_x \text{Sen}\psi \text{Cos}\psi = \frac{\sigma_x}{2} \text{Sen}2\psi.$$

$$\tau_{\psi} = \frac{\sigma_x}{2} \text{Sen}2\psi \quad (\text{Eq. 70})$$

2.12.2.2 Tensões Devidas a Esforços Normais Por Unidade de Superfície Que Formam Ângulo Reto

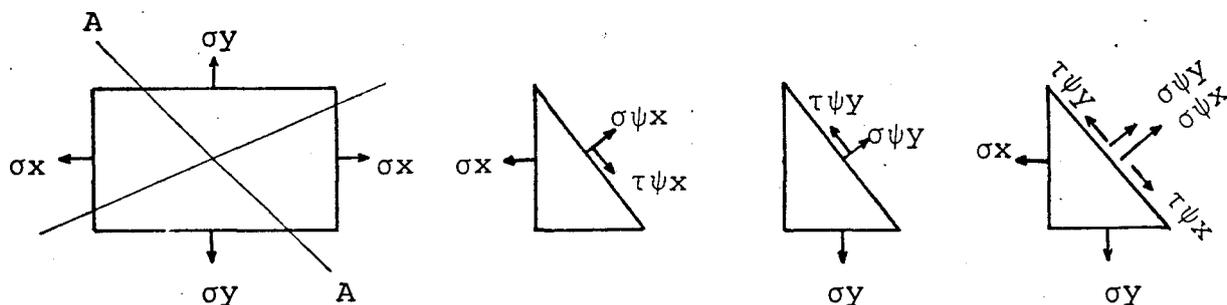


Figura : 31 — METODO DE SUPERPOSIÇÃO PARA DETERMINAR AS TENSÕES ORIGINADAS SOBRE UM PLANO INCLINADO MEDIANTE TENSÕES NORMAIS QUE FORMAM UM ÂNGULO RETO.

A Figura mostra um elemento sujeito a tensões normais σ_x e σ_y . Suponha que as tensões que atuam sobre o plano A-A devidas a σ_x e σ_y , atuem separadamente, dando origem a $\sigma_{\psi x}$, $\tau_{\psi x}$, $\sigma_{\psi y}$ e $\tau_{\psi y}$, respectivamente.

Sabe-se que:

$$\sigma_{\psi x} = \sigma_x \text{Cos}^2\psi \quad (\text{Eq. 71})$$

$$\tau_{\psi x} = \frac{\sigma_x}{2} \text{Sen}2\psi \quad (\text{Eq. 72})$$

$$\sigma_{\psi y} = \sigma_y \text{Sen}^2 \psi \quad (\text{Eq. 73})$$

$$\tau_{\psi y} = \frac{\sigma_y}{2} \text{Sen} 2\psi \quad (\text{Eq. 74})$$

As tensões resultantes σ_{ψ} e τ_{ψ} devidas a σ_x e σ_y que atuam simultaneamente, são, pelo princípio de superposição, iguais a somas algébricas das tensões produzidas quando atuam separadamente.

Como é mostrado na Figura 31 se deduz que as tensões normais $\sigma_{\psi x}$ e $\sigma_{\psi y}$ tem as mesmas direções e que as tensões tangenciais seguem direções opostas quando as tensões σ_x e σ_y tem o mesmo sinal.

$$\sigma_{\psi} = \sigma_x \text{Cos}^2 \psi + \sigma_y \text{Sen}^2 \psi \quad (\text{Eq. 75})$$

ou

$$\sigma_{\psi} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \text{Cos} 2\psi \quad (\text{Eq. 76})$$

Supondo que σ_x seja maior que σ_y , tem-se como valor numérico da tensão de corte:

$$\tau_{\psi} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \text{Sen} 2\psi \quad (\text{Eq. 77})$$

2.12.2.3 Tensões Originadas por Esforço de Corte Simples

Um elemento sobre o qual sã atuam tensões de corte, se diz que está submetido a corte simples.

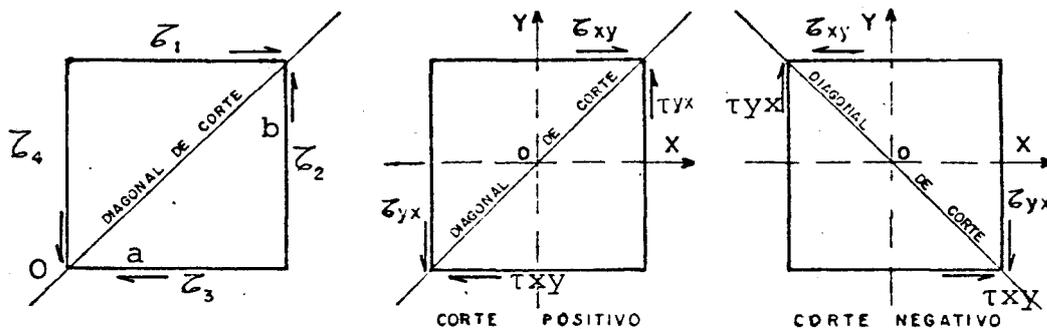


Figura : 32 — SISTEMAS DE TENSÕES TANGENCIAIS, POSITIVOS E NEGATIVOS, E DIAGONAIS DE CORTE CORRESPONDENTES.

Chamando de t a espessura do elemento, tem-se:

$$\tau_1 at = \tau_3 at \quad (\epsilon_{Fx} = 0)$$

$$\tau_1 = \tau_3$$

$$\tau_2 bt = \tau_4 bt \quad (\epsilon_{Fy} = 0)$$

$$\tau_2 = \tau_4$$

$$\tau_1 at \cdot b = \tau_2 bt \cdot a \quad (\epsilon_{Mo} = 0)$$

$$\tau_1 = \tau_2$$

Portanto:

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4$$

As tensões de corte sobre as faces horizontais se designam por τ_{xy} e as que atuam sobre as verticais por τ_{yx} .

Portanto:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (\text{Eq. 78})$$

Esta expressão diz que as tensões de corte em faces perpendiculares são iguais.

Na Figura 33 pode ver-se que um sistema de corte simples produz uma tensão normal σ_ψ e uma tangencial τ_ψ sobre todos os planos inclinados, tais como A-A. As direções das tensões σ_ψ e τ_ψ se deduzem imediatamente da observação.

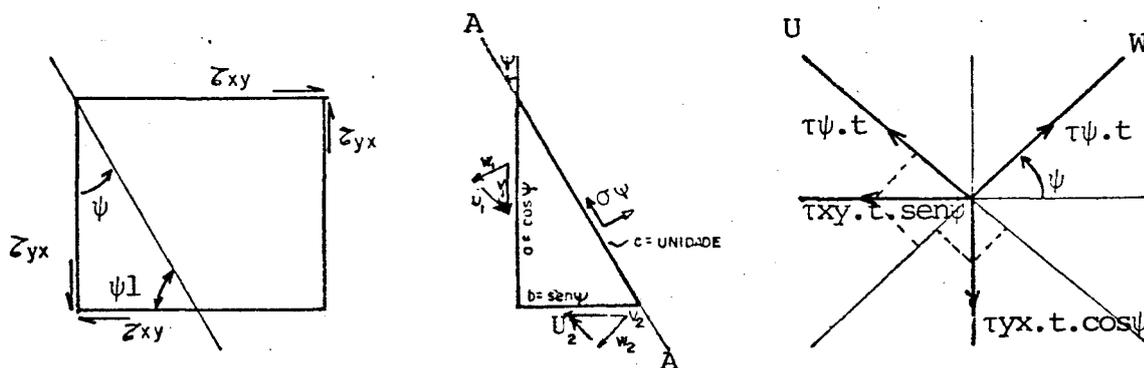


Figura : 33 — DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES, NORMAL e TANGENCIAL, PRODUZIDOS POR CORTE SIMPLES SOBRE UM PLANO INCLINADO.

A tensão normal σ_ψ é de tração, as forças de corte V_1 e V_2 que atuam sobre as faces vertical e horizontal são, respectivamente, proporcionais aos comprimentos a e b . A espessura do elemento é t .

$$\sigma_\psi \cdot t - \tau_{xy} t \text{Sen}\psi \cdot \text{Cos}\psi - \tau_{xy} t \text{Cos}\psi \cdot \text{Sen}\psi = 0 \quad (\Sigma F_w = 0)$$

$$\sigma_\psi = \tau_{xy} \text{Sen}2\psi$$

$$\tau_\psi \cdot t + \tau_{xy} t \text{Sen}\psi \cdot \text{Sen}\psi - \tau_{xy} t \text{Cos}\psi \cdot \text{Cos}\psi = 0 \quad (\Sigma F_u = 0)$$

$$\tau_\psi = \tau_{xy} (\text{Cos}^2\psi - \text{Sen}^2\psi)$$

$$\tau_\psi = \tau_{xy} \text{Cos}2\psi \quad (\text{Eq. 79})$$

2.12.2.4 Tensões Devidas a Um Sistema Geral Plano de Tensões

Um sistema de tensões composto exclusivamente em tensões normais σ_x , σ_y e tensões tangenciais τ_{xy} , τ_{yx} , as quais são funções somente de x e y , se chama sistema plano de tensões ou bidimensional. Um sistema de tensões plano só pode ter existência real em caso de chapas delgadas.

A Figura 34 mostra um elemento sujeito a um sistema plano positivo de tensões completamente geral.

A determinação das tensões que atuam sobre um plano qualquer A-A, pode resolver-se facilmente mediante a observação e a superposição. As Figuras b, c e d mostram as direções e sentidos das tensões produzidas por σ_x , σ_y e τ_{xy} , respectivamente, quando atuam separadamente.

As tensões resultantes podem portanto serem expres

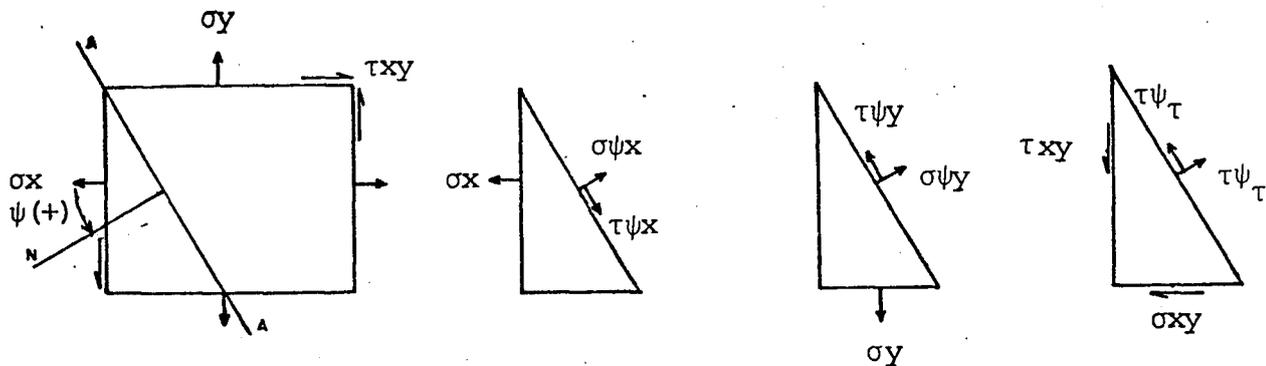


Figura: 34 — DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES ORIGINADAS EM UM PLANO INCLINADO POR UM SISTEMA DE TENSÕES BIDIMENSIONAL GERAL POSITIVO, PELO MÉTODO DE SUPERPOSIÇÃO.

das como:

$$\sigma_{\psi} = \sigma_x \cos^2 \psi + \sigma_y \sin^2 \psi + \sigma_{xy} \sin 2\psi. \quad (\text{Eq. 80})$$

Esta equação escrita em função do ângulo duplo 2ψ ,

é:

$$\sigma_{\psi} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos 2\psi + \tau_{xy} \sin 2\psi \quad (\text{Eq. 81})$$

$$\tau_{\psi} = -\frac{\sigma_x}{2} \sin 2\psi + \frac{\sigma_y}{2} \sin 2\psi + \tau_{xy} \cos 2\psi \quad (\text{Eq. 82})$$

$$\tau_{\psi} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} (\sin 2\psi) + \tau_{xy} \cos 2\psi \quad (\text{Eq. 83})$$

2.12.2.5 Tensões Principais - Orientações e Grandezas

Se um elemento está sujeito somente a tensões normais, isto é, as faces do mesmo não estão sujeitas a tensões de corte, os únicos planos isentos de tais tensões (tensões de corte) são as faces externas do dito elemento ou planos paralelos a ela. Os planos não sujeitos a tensões tangenciais se chamam planos principais, e as tensões normais que atuam sobre eles, tensões principais.

A seguir demonstra-se a afirmativa acima, bem como as orientações e grandezas das tensões principais.

Derivando as expressões:

$$\sigma_{\psi} = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) + 0,5(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\psi + \tau_{xy} \operatorname{Sen} 2\psi$$

$$\tau_{\psi} = 0,5(\sigma_y - \sigma_x) \operatorname{Sen} 2\psi + \tau_{xy} \cos 2\psi$$

vem:

$$\frac{d\sigma_{\psi}}{d\psi} = 0,5(\sigma_x - \sigma_y) (-\operatorname{Sen} 2\psi) \cdot 2 + 2\tau_{xy} \cos 2\psi$$

$$\frac{d\tau_{\psi}}{d\psi} = (\sigma_y - \sigma_x) \operatorname{Sen} 2\psi + 2\tau_{xy} \cos 2\psi \quad (\text{Eq. 84})$$

Comparando a equação 83 com a equação 84, tem-se:

$$\frac{d\sigma_{\psi}}{d\psi} = 2\tau_{\psi} \quad (\text{Eq. 85})$$

Agora, derivando a equação 83 em relação a ψ tem-se:

$$\frac{d\tau}{d\psi} = 2 \left[0,5(\sigma_y - \sigma_x) \cos 2\psi - \tau_{xy} \sin 2\psi \right]$$

que comparada com a equação 81 permite escrever:

$$\frac{d\tau}{d\psi} = 2 \left[0,5(\sigma_x + \sigma_y) - \sigma_\psi \right] \quad (\text{Eq. 86})$$

Observando as equações 85 e 86, conclui-se:

1. Onde σ é máximo ou mínimo, $\tau = 0$.
2. Onde τ é máximo ou mínimo, $\sigma_\psi = 0,5(\sigma_x + \sigma_y)$.

Para se obter as direções das tensões principais, iguala-se a zero a equação 84, tem-se:

$$(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\psi + 2\tau_{xy} \cos 2\psi = 0$$

$$\frac{\sin 2\psi}{\cos 2\psi} = \frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x}$$

$$\text{Tg} 2\psi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (\text{Eq. 87})$$

A expressão de $\text{Tg} 2\psi$ permite calcular a direção das tensões principais, ou seja, a direção de $\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$.

De acordo com a sua definição, o ângulo ψ dado pela equação 87 deve medir-se a partir de σ_x em sentido anti-horário quando ψ é positivo e no sentido inverso quando ψ

é negativo.

Como visto anteriormente:

$$\frac{d\sigma_{\psi}}{d\psi} = (\sigma_y - \sigma_x) \text{Sen}2\psi + 2\tau_{xy} \text{Cos}2\psi$$

Derivando pela segunda vez σ_{ψ} vem:

$$\frac{d^2\sigma_{\psi}}{d\psi^2} = 2(\sigma_y - \sigma_x) \text{Cos}2\psi - 4\tau_{xy} \text{Sen}2\psi \quad (\text{Eq. 88})$$

O máximo de uma função é quando

$$\frac{d^2\sigma_{\psi}}{d\psi^2} < 0 \Rightarrow \psi \text{ corresponderá a } \sigma_{\text{máx}}$$

Dividindo a equação 88 por $\text{cos}2\psi$:

$$\frac{1}{\text{Cos}2\psi} \frac{d^2\sigma_{\psi}}{d\psi^2} = 2(\sigma_y - \sigma_x) - 4\tau_{xy} \text{Tg}2\psi \quad (\text{Eq. 89})$$

Comparando a equação acima com a equação 63, chega-se à conclusão que se

$$\begin{aligned} \sigma_x > \sigma_y &\Rightarrow \psi \text{ é de } \sigma_{\text{máx}} \\ \sigma_x < \sigma_y &\Rightarrow \psi \text{ é de } \sigma_{\text{mín}} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 90})$$

Determina-se, agora, a grandeza das tensões principais.

Sabe-se da trigonometria, que:

$$(1 + \text{Tg}^2 a) \text{Cos}^2 a = 1, \text{ donde:}$$

$$\text{Cos}^2 a = \frac{1}{1 + \text{Tg}^2 a}$$

Fazendo $a = 2\psi$, vem:

$$\cos 2\psi = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{Tg}^2 2\psi}}$$

Substituindo $\operatorname{Tg} 2\psi$ por seu valor dado pela equação 87

$$\cos 2\psi = \pm \frac{0,5 (\sigma_x - \sigma_y)}{\sqrt{[0,5 (\sigma_x - \sigma_y)]^2 + \tau_{xy}^2}} \quad (\text{Eq. 91})$$

Analogamente:

$$\operatorname{Sen} 2\psi = \pm \frac{\operatorname{Tg} 2\psi}{\sqrt{1 + \operatorname{Tg}^2 2\psi}}, \text{ logo}$$

$$\operatorname{Sen} 2\psi = \pm \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{[0,5 (\sigma_x - \sigma_y)]^2 + \tau_{xy}^2}} \quad (\text{Eq. 92})$$

Substituindo na equação 81 $0,5(\sigma_x - \sigma_y)$ e τ_{xy} por seus valores retirados das equações 91 e 92, ora ambos com sinal positivo, ora com sinal negativo, encontra-se respectivamente as tensões principais máxima e mínima.

$$\sigma_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{[0,5(\sigma_x - \sigma_y)]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Eq. 93})$$

$$\sigma_{\text{m}\grave{\text{i}}\text{n}} = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{[0,5(\sigma_x - \sigma_y)]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Eq. 94})$$

2.12.2.6 Tensões Máximas de Cisalhamento. Orientação e Grandezas

Derivando-se a equação 83, encontra-se:

$$\frac{d\tau_{\psi}}{d\psi} = 2 [0,5(\sigma_y - \sigma_x)\cos 2\psi - \tau_{xy}\sin 2\psi] \quad (\text{Eq. 95})$$

e, igualando-se a zero, obtem-se:

$$0,5 (\sigma_y - \sigma_x)\cos 2\psi - \tau_{xy} \sin 2\psi = 0$$

$$\text{Tg} 2\psi' = - \frac{0,5(\sigma_x - \sigma_y)}{\tau_{xy}} \quad (\text{Eq. 96})$$

Comparando a equação 87 com a 96, nota-se que:

$$\text{Tg} 2\psi \cdot \text{Tg} 2\psi' = \left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right) \times \left[\frac{-0,5(\sigma_x - \sigma_y)}{\tau_{xy}}\right] = -1 \quad (\text{Eq. 97})$$

A condição acima permite afirmar que os planos onde ocorrem as tensões de cisalhamento máximo são bissetores dos planos principais, isto é, são inclinados de 45o em relação a eles.

A máxima tensão de cisalhamento, é determinada levando-se na equação 83 os ângulos obtidos da equação 96.

Como na dedução das tensões principais far-se-a uso das relaoes:

$$\text{Sen} 2\psi' = \pm \frac{\text{Tg} 2\psi'}{\sqrt{1 + \text{Tg}^2 2\psi'}} = \pm \frac{0,5(\sigma_x - \sigma_y)}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}}$$

$$\cos 2\psi' = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{Tg}^2 2\psi'}} = \pm \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}}$$

levando os valores de $\operatorname{Sen} 2\psi'$ e $\operatorname{Cos} 2\psi'$ na equação 83

$$\tau_{\psi'} = - \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} - \left[\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \right] \frac{1}{\pm \sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}} +$$

$$+ \frac{\tau_{xy}^2}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}}$$

$$\tau_{\psi'} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 \frac{1}{\pm \sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}} + \frac{\tau_{xy}^2}{\pm \sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}}$$

$$\tau_{\psi'} = \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 \right] \frac{1}{\pm \sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}}$$

$$\tau_{\psi'} = \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 \right] \frac{\pm \sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2}}{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) + \tau_{xy}}$$

Donde:

$$\tau_{\begin{matrix} \text{máx} \\ \text{mín} \end{matrix}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Eq. 98})$$

Como é facilmente demonstrado:

$$\tau_{\begin{matrix} \text{máx} \\ \text{mín} \end{matrix}} = \pm 0,5 (\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}) \quad (\text{Eq. 99})$$

2.12.3 Relação Entre Tensões e Deformações

2.12.3.1 Lei de Hooke para Pequenas Deformações Lineares, no Estado Simples de Tensões

Quando transmitem (ou estão sujeitos a) um esforço, os corpos se deformam; e reagem à deformação com esforços internos, oriundos da variação de distância entre suas moléculas ou átomos.

Dentro do regime elástico, o esforço interno reage e cresce proporcionalmente à deformação correspondente. Em geral, essa relação linear entre deformação e esforço interno (tensão) em um ponto se manifesta, para o corpo todo, também por uma relação linear entre o esforço externo e a deformação total. Essa relação linear é chamada Lei de Hooke.

A Lei de Hooke escreve-se:

$\sigma = E\epsilon$ (Eq. 100), onde E é chamado de "Módulo de Elasticidade" ou "Módulo de Young", do material.

2.12.3.2 Lei de Hooke para Pequenas Deformações Angulares

A proporcionalidade se exprime aqui por $\sigma = G\gamma$.
(Eq. 101)

A constante G é o "Módulo Transversal" e sua unida

de é também força por área.

2.12.3.3 Direção das Tensões e Deformações Principais

Considere um elemento em forma de um paralelepípedo retangular. Suponha que duas faces opostas estejam sujeitas a uma tensão normal simples σ_x , sendo o eixo X paralelo à direção das tensões. A experiência mostra /4/ que os ângulos retos do paralelepípedo elementar não sofrem deformação alguma, isto é, os planos sobre os que não atuam tensões de corte não estão sujeitos a deformações tangenciais. Como os planos sobre os quais não atuam tensões de corte estão sujeitas as tensões principais, e os planos que não sofrem deformações tangenciais estão submetidos a deformações principais e como, experimentalmente, se comprova que ambos pares de planos coincidem, se deduz que as direções das tensões principais, máxima e mínima, coincidem respectivamente com a direção das deformações principais máxima e mínima, e, além disso, que os planos de tensão tangencial máxima coincidem com os planos de deformação tangencial máxima, isto é, a diagonal de corte das tensões é paralela à diagonal das deformações.

2.12.3.4 Relação de Poisson e Expressão Geral das Deformações

A experiência demonstra que uma deformação longitudinal em uma direção dada é seguida por uma deformação seme

lhante de sinal oposto, em uma direção perpendicular.

Uma extensão na direção X, produz uma contração segundo Y e Z. Assim, as deformações ϵ_y e ϵ_z correspondentes a uma deformação ϵ_x são dadas por:

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\mu \frac{\sigma_x}{E} \quad (\text{Eq. 102})$$

A constante μ se chama coeficiente de Poisson.

Tem-se encontrado que se um elemento está sujeito somente à tensões tangenciais, não sofre mudanças nos comprimentos de seus lados. Além disto, o módulo de elasticidade para a tração é o mesmo que para compressão, e finalmente, a deformação segundo uma direção dada, produzida pela ação simultânea de um sistema de tensões, é igual a soma das deformações produzidas por cada uma das tensões, como se atuassem separadamente; isto é, a deformação resultante obedece a lei da superposição.

Portanto, se um elemento está sujeito a um sistema geral tridimensional de tensões σ_x , σ_y e σ_z , assim como a tensões de corte, as componentes das deformações longitudinais na direção do eixo X, não são afetadas pelas tensões tangenciais e são respectivamente iguais a:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_x}{E}, \quad \epsilon_2 = -\mu \frac{\sigma_y}{E}, \quad \epsilon_3 = -\mu \frac{\sigma_z}{E} \quad (\text{Eq. 103})$$

e a deformação resultante ϵ_x é, segundo o princípio de superposição:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_y + \sigma_z) \quad (\text{Eq. 104})$$

Da mesma forma:

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_z) \quad (\text{Eq. 105})$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{Eq. 106})$$

Em caso de um sistema de tensões bidimensional, tem-se $\sigma_z = 0$ e, portanto:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu}{E} \sigma_y \quad (\text{Eq. 107})$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu}{E} \sigma_x \quad (\text{Eq. 108})$$

$$\epsilon_z = - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$$

Em função das tensões e deformações principais, as equações anteriores se transformam em:

$$\epsilon_{\text{máx}} = \frac{1}{E} (\sigma_{\text{máx}} - \mu \sigma_{\text{mín}}) \quad (\text{Eq. 109})$$

$$\epsilon_{\text{mín}} = \frac{1}{E} (\sigma_{\text{mín}} - \mu \sigma_{\text{máx}}) \quad (\text{Eq. 110})$$

$$\epsilon_z = - \frac{\mu}{E} (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}) \quad (\text{Eq. 111})$$

Resolvendo o sistema formado pelas equações 107 e 108, tem-se que:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_x + \mu\epsilon_y) \quad (\text{Eq. 112})$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_y + \mu\epsilon_x) \quad (\text{Eq. 113})$$

Em termos das deformações principais, tem-se:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{\text{máx}} + \mu\epsilon_{\text{mín}}) \quad (\text{Eq. 114})$$

$$\sigma_{\text{mín}} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{\text{mín}} + \mu\epsilon_{\text{máx}}) \quad (\text{Eq. 115})$$

2.13.3.5 Relação Entre os Módulos de Elasticidade de Tração e Corte ou, Relação Entre as Constantes Elásticas do Material

Demonstra-se /4/, /13/, /15/, que:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (\text{Eq. 116})$$

Substituindo em $\tau = G \cdot \gamma$

γ por $\gamma_{\text{máx}}$, obtém-se:

$$\tau_{\text{máx}} = \gamma_{\text{máx}} \cdot G$$

$$\text{mas, } \gamma_{\text{máx}} = \epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}$$

onde: G é o módulo de elasticidade transversal do material;

E é o módulo de elasticidade;

μ é o coeficiente de Poisson;

γ é a deformação angular

Portanto:

$$\tau_{\text{máx}} = (\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}) G$$

$$\tau_{\text{máx}} = (\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}}) \cdot \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (\text{Eq. 117})$$

2.12.4 Detalhamento das Medidas com Extensômetros Elétricos /1/, /4/, /6/, /8/

2.12.4.1 Utilização de Um Sô Extensômetro

O estado de deformação e conseqüentemente de tensão, com a utilização de um sô extensômetro sô é possível em casos muito particulares. O mais expressivo destes casos, é o de tração ou compressão numa barra sujeita a um carregamento axial.

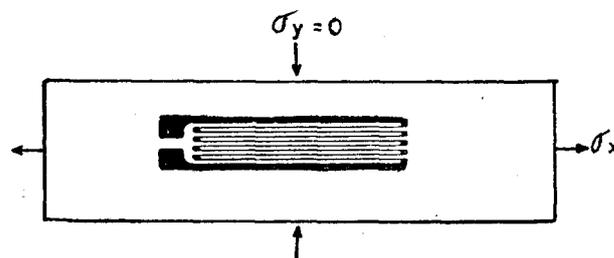


Figura: 35 — EXTENSÔMETRO COLADO SEGUNDO A DIREÇÃO DE X

Se ϵ_x é a medida feita utilizando-se o extensômetro como na figura acima, tem-se:

$$\epsilon_y = -\mu\epsilon_x$$

$$\sigma_x = E\epsilon_x$$

$$\sigma_y = 0$$

2.12.4.2 Utilização de Dois Extensômetros

Utiliza-se dois extensômetros quando as direções das tensões principais num estado plano de tensão, são conhecidas, como por exemplo, num reservatório cilíndrico submetido à pressão interna.

Como foi visto anteriormente, estes extensômetros de vem ser colados perpendicularmente. Se ϵ_x e ϵ_y são os valores obtidos para deformação,

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_x + \mu\epsilon_y) \text{ e}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_y + \mu\epsilon_x)$$

2.12.4.3 Rosetas

De uma maneira mais ampla, o estado de deformação ao qual está sujeito um ponto de uma estrutura nem sempre é conhecido. Para determinação do estado de deformação e consequentemente de tensões que está submetido um ponto qualquer de uma

estrutura utiliza-se a equação 51:

$$\epsilon_{\psi} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\psi + \frac{\gamma_{xy}}{2} \operatorname{Sen} 2\psi.$$

Observando a equação acima, vê-se que para a determinação de ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} , é necessário e suficiente calcular três deformações longitudinais ϵ_{ψ} , segundo três direções arbitrárias ψ_1 , ψ_2 e ψ_3 .

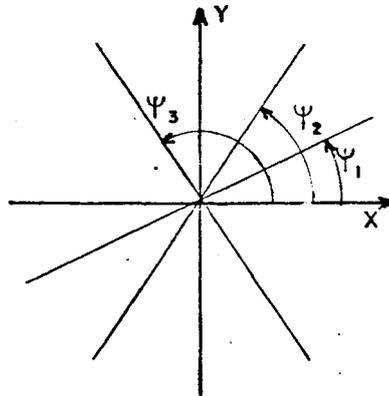


Figura : 36 — POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS EM TRES DIREÇÕES ARBITRÁRIAS

Sejam OX e OY dois eixos arbitrários que passam por um ponto O para o qual se quer determinar ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} . Aplicando a equação de ϵ_{ψ} para ψ_1 , ψ_2 e ψ_3 , tem-se três equações e três incógnitas, as quais resolvidas, fornecerão ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} .

ϵ_x e ϵ_y são dados em microdeformações ($\mu\text{m/m}$) e γ_{xy} em radianos.

Determinados ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} , determina-se, em seguida, utilizando-se as equações 60 e 61 $\epsilon_{\text{máx}}$ e $\epsilon_{\text{mín}}$. De posse de

$\epsilon_{\text{máx}}$ e $\epsilon_{\text{mín}}$ determina-se $\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$ utilizando as equações 114 e 115. A orientação das deformações principais é feita utilizando a equação 53.

Os três extensômetros colados desta maneira sobre uma estrutura recebem o nome de roseta e, das configurações geométricas possíveis, duas são as principais: roseta retangular ou estrela e, roseta equiangular ou roseta delta.

2.12.4.3.1 A Roseta Retangular ou Estrela

Chama-se roseta retangular aquela em que $\psi_1 = 0^\circ$, $\psi_2 = 45^\circ$ e $\psi_3 = 90^\circ$.

Substituindo estes valores em ϵ_ψ , obtêm-se:

$$\epsilon_x = \epsilon_1$$

$$\epsilon_y = \epsilon_3$$

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)$$

Das equações 60 e 61, tem-se:

$$\epsilon_{\text{máx}} = \frac{1}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_3) + \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + [2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)]^2} \quad (\text{Eq.118})$$

$$\epsilon_{\text{mín}} = \frac{1}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_3) - \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + [2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)]^2} \quad (\text{Eq.119})$$

Utilizando a equação 66, obtêm-se:

$$\gamma_{\text{m\acute{a}x}} = \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + [2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)]^2} \quad (\text{Eq. 120})$$

A orienta\c{c}\~ao das deforma\c{c}\~oes principais \eacute obtida de 53 quando se substitui ϵ_x por ϵ_1 e ϵ_y por ϵ_3 .

$$\psi_\rho = \frac{1}{2} \text{Tan}^{-1} \frac{2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \quad (\text{Eq. 121})$$

Das equa\c{c}\~oes 114, 115 e 117, obt\~em-se:

$\sigma_{\text{m\acute{a}x}}$, $\sigma_{\text{m\acute{i}n}}$ e $\tau_{\text{m\acute{a}x}}$ diretamente de ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 /8/.

$$\sigma_{\text{m\acute{a}x}} = \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + [2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)]^2} \right] \quad (\text{Eq. 122})$$

$$\sigma_{\text{m\acute{i}n}} = \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + [2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)]^2} \right] \quad (\text{Eq. 123})$$

$$\tau_{\text{m\acute{a}x}} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + [2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)]^2} \quad (\text{Eq. 124})$$

2.12.4.3.2 Roseta Equiangular ou Roseta Delta

Neste tipo de roseta $\psi_1 = 0^\circ$, $\psi_2 = 60^\circ$ e $\psi_3 = 120^\circ$. Seguindo o mesmo racioc\~inio do item anterior, chega-se aos valores desejados /8/.

$$\epsilon_{\text{m\acute{a}x}} = A + \sqrt{B^2 + C^2} \quad (\text{Eq. 125})$$

$$\epsilon_{\text{m\acute{i}n}} = A - \sqrt{B^2 + C^2} \quad (\text{Eq. 126})$$

$$\gamma_{\text{m\acute{a}x}} = 2(\sqrt{B^2 + C^2}) \quad (\text{Eq. 127})$$

$$\psi_{\rho} = \frac{1}{2} \text{Tan}^{-1} \frac{C}{B} \quad (\text{Eq. 128})$$

Substituindo $\epsilon_{\text{m\acute{a}x}}$, $\epsilon_{\text{m\acute{i}n}}$ nas expressões de $\sigma_{\text{m\acute{a}x}}$, $\sigma_{\text{m\acute{i}n}}$ e $\tau_{\text{m\acute{a}x}}$, resulta:

$$\sigma_{\text{m\acute{a}x}} = E \left[\frac{A}{(1-\mu)} + \frac{1}{1+\mu} \sqrt{B^2 + C^2} \right] \quad (\text{Eq. 129})$$

$$\sigma_{\text{m\acute{i}n}} = E \left[\frac{A}{(1-\mu)} - \frac{1}{1+\mu} \sqrt{B^2 + C^2} \right] \quad (\text{Eq. 130})$$

$$\gamma_{\text{m\acute{a}x}} = \frac{E}{1+\mu} \sqrt{B^2 + C^2} \quad (\text{Eq. 131})$$

onde:

$$A = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3}$$

$$B = \epsilon_1 - \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3}$$

$$C = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\sqrt{3}}$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Extensômetros

A escolha do extensômetro foi feita tendo em vista as seguintes condições postuladas para o teste:

- Temperatura máxima esperada: 160°C;
- Deformação máxima : 10.000 µd (1,0%);
- Característica do ensaio : dinâmico (de baixa frequência e com ausência de carregamentos cíclicos).

Tendo em vista as condições acima, foi escolhido o extensômetro NFLA-6-17, de TML (TOKYO SOKKI KENKYUJO CO., LTD.), com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

- Série do Extensômetro: NF (elemento sensor em lâmina);
- Material do Elemento Sensor: Cu-Ni;
- Material do Suporte: Polyimide;
- Faixa de Temperatura Operacional (°C):
 - . Pequeno Tempo : -196 a 250
 - . Normal : -20 a 230
 - . Compensado para Temperatura: 0 a 60.
- Limite de Deformação (%):
 - . Tração : 3
 - . Compressão: 2
- Limite de Fadiga: 10⁶ ciclos;

- Adesivos Compatíveis e Faixa de Temperatura Operacional:
 - . P-2 (-30 a 180°C)
 - . CN (-30 a 100°C)
 - . NP-50 (-30 a 300°C)
 - . C-1 (-30 a 200°C)
 - . CR-2 (-196 a 80°C)
- Comprimento do Elemento Sensor: 6mm;
- Largura do Elemento Sensor: 2,8mm;
- Área do Suporte: 15 x 5,5 mm²;
- Resistência Nominal: 120 ± 0,3Ω;
- Fator de Conversão: 2,11.

A Figura 68 mostra as curvas de deformação aparente e de variação do fator de conversão K com a temperatura, para os extensômetros utilizados.

3.2 Adesivos

As condições para a seleção do adesivo além do extensômetro escolhido são as seguintes:

- Material ensaiado: aço carbono;
- Impossibilidade de cura a alta temperatura com a aplicação de pressão sobre o extensômetro, devido à falta de material apropriado no CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear).

Baseados nas condições do teste, o adesivo escolhi

do foi o NP-50, marca TML, cujas características estão anotadas abaixo.

- Temperatura de cura: ambiente;
- Tempo de cura : 1 a 2 horas;
- Material compatível: metal;
- Faixa de temperatura operacional: -30 a 300°C ;
- Pós Cura: 20°C superior ao máximo valor esperado para o ensaio, durante 2 horas.

3.3 Sensores de Temperatura

As temperaturas foram obtidas através do uso de sensores de temperatura.

Foram utilizados os sensores TFL-10, da TML. Estes sensores foram colados com o mesmo adesivo utilizado para os extensômetros (NP-50).

As características do TFL-10, são:

- Área do elemento sensor: $(10 \times 5) \text{ mm}^2$;
- Área do suporte : $(18 \times 7) \text{ mm}^2$;
- Faixa de temperatura : -20 a 200°C ;
- Sensibilidade: $0,43\Omega/^{\circ}\text{C}$ (80 a 200°C);
 $0,34\Omega/^{\circ}\text{C}$ (-20 a 80°C).

3.4 Terminais para Conexão

Foram usados os terminais T-F2, marca KIOWA, de epóxi cobreado, nas dimensões 10mm x 6mm x 0,07mm.

3.5 Solda

Solda Best "Trinúcleo", com ponto de fusão superior a 200°C.

3.6 Fiação

Junto aos extensômetros foram usados fios rígidos, bitola 22AWG, isolamento de amianto, devido à alta temperatura.

O restante da fiação foi feita com cabo blindado de três condutores flexíveis e de bitola 28AWG, isolamento plástico, com aproximadamente vinte e três metros de comprimento total e cinco ohms de resistência por condutor.

3.7 Localização dos Extensômetros

A Figura 37 mostra esquematicamente a tubulação testada.

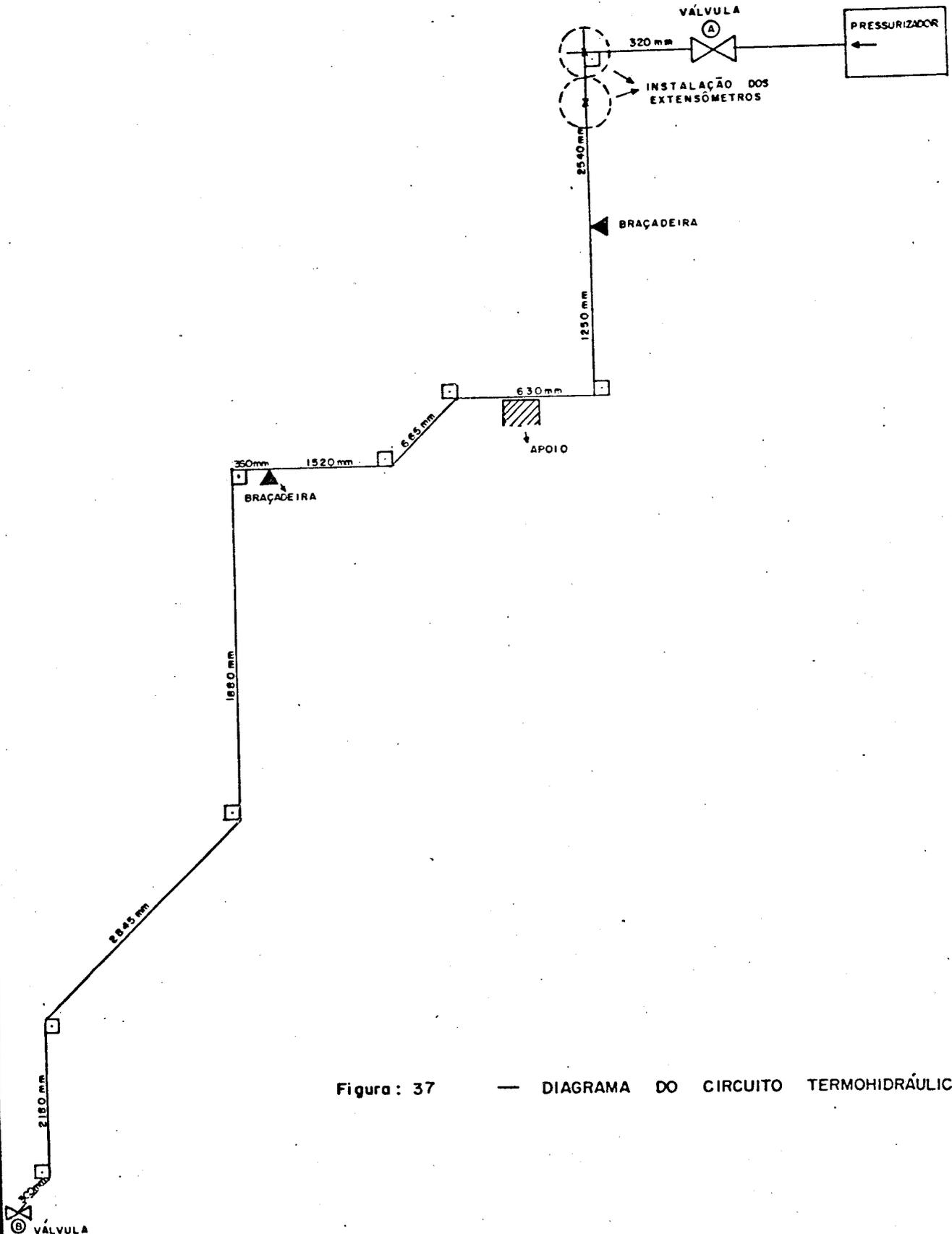


Figura: 37 — DIAGRAMA DO CIRCUITO TERMOHIDRÁULICO

Foram instalados um sensor de temperatura e três extensômetros formando uma roseta retangular, no primeiro joelho. Na tubulação reta logo abaixo do joelho foram instalados mais um sensor de temperatura e um extensômetro.

Os extensômetros localizados no joelho foram utilizados para a determinação do estado de tensão-deformação naquele ponto e, além disto, para um estudo comparativo com os resultados obtidos com o extensômetro colado no tubo.

As Figuras 38 e 39 mostram a distribuição dos extensômetros e respectivos circuitos de ligação.

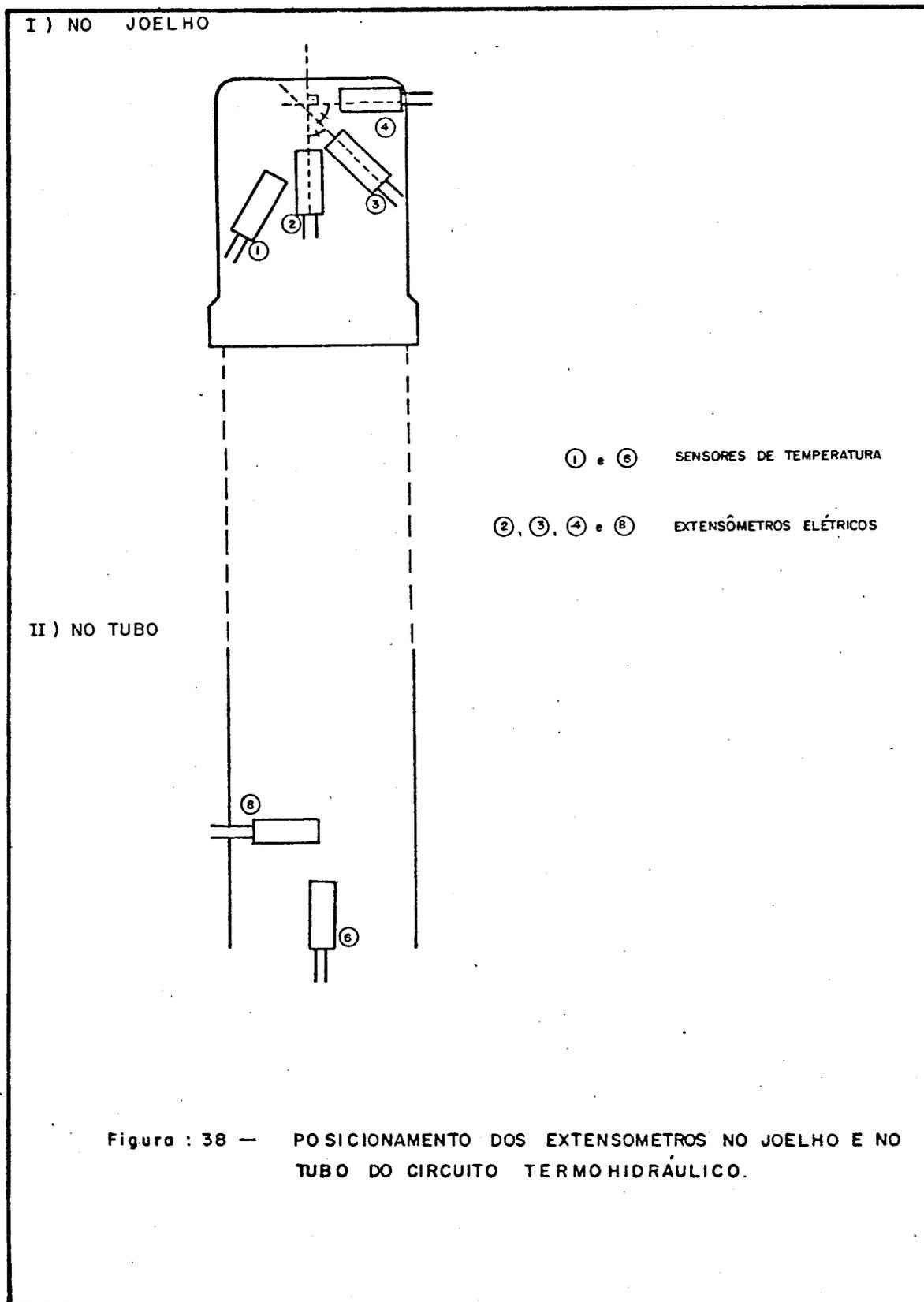
3.8 Instrumentação

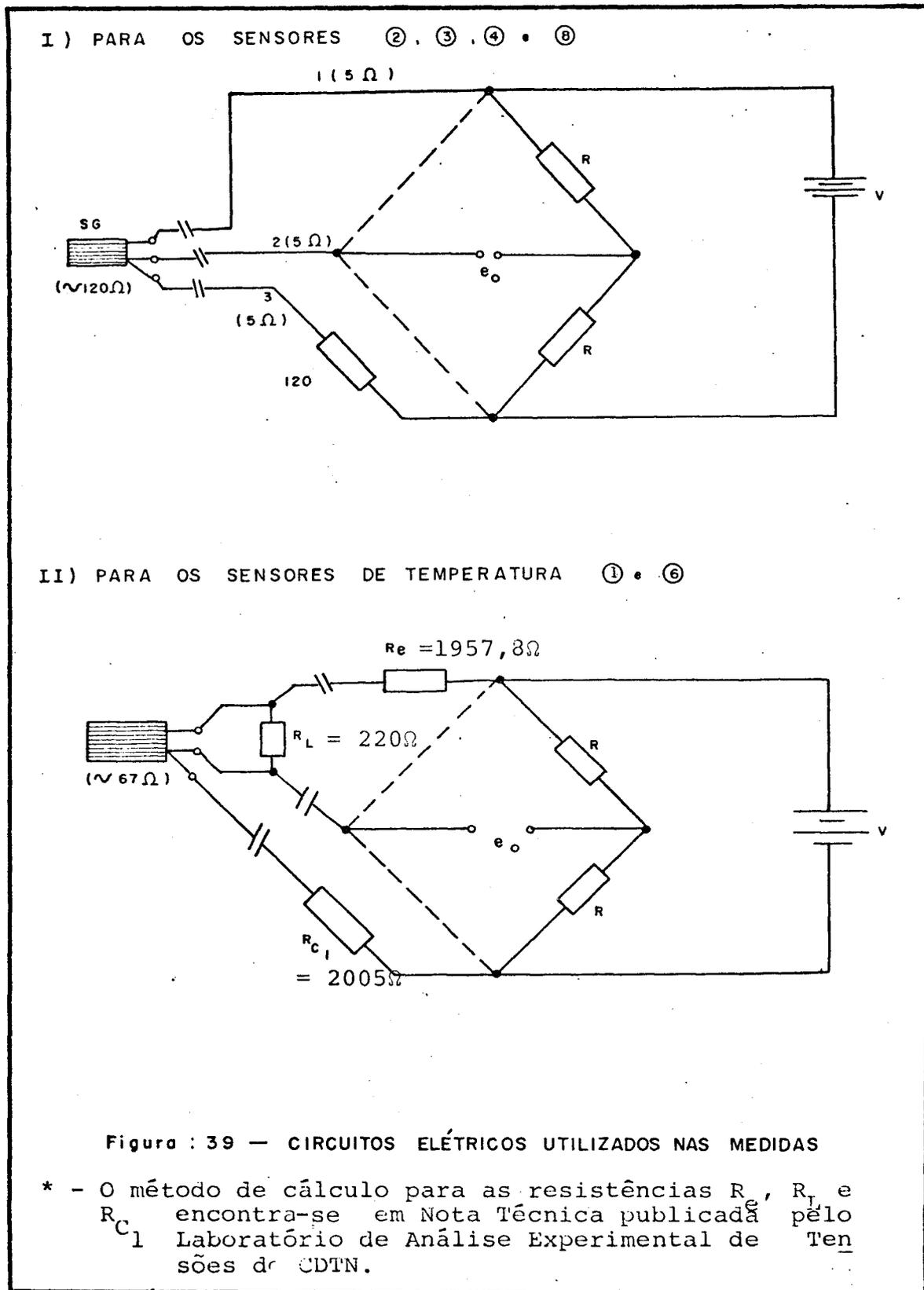
3.8.1 Excitação das Pontes de Wheatstone

Feitas com pontes de alimentação D.C., convencionais de laboratório eletrônico.

O valor de excitação das fontes com sensores de temperatura foi de 1 V. É um valor baixo porque o sensor de temperatura tem elevada sensibilidade e, não causa sobre-aquecimento do elemento sensor.

Para os extensômetros, a tensão de excitação foi de 3 volts.





3.8.2 Instrumentos Registradores

Foram utilizados registradores "HP" com fundo de escala ajustado em 5mV. (Figuras 40 e 41).

3.9 Procedimentos de Instalação dos Sensores

3.9.1 Preparo das Superfícies

3.9.1.1 Desengraxamento

Foi usado thinner aplicado com estopa, para remoção da tinta de proteção da superfície externa da tubulação, seguido pela aplicação de acetona com algodão.

3.9.1.2 Abrasão

Utilizou-se lixas d'água de granulação progressiva desde 80 até 320, em movimentos direcionados segundo diferentes ângulos.

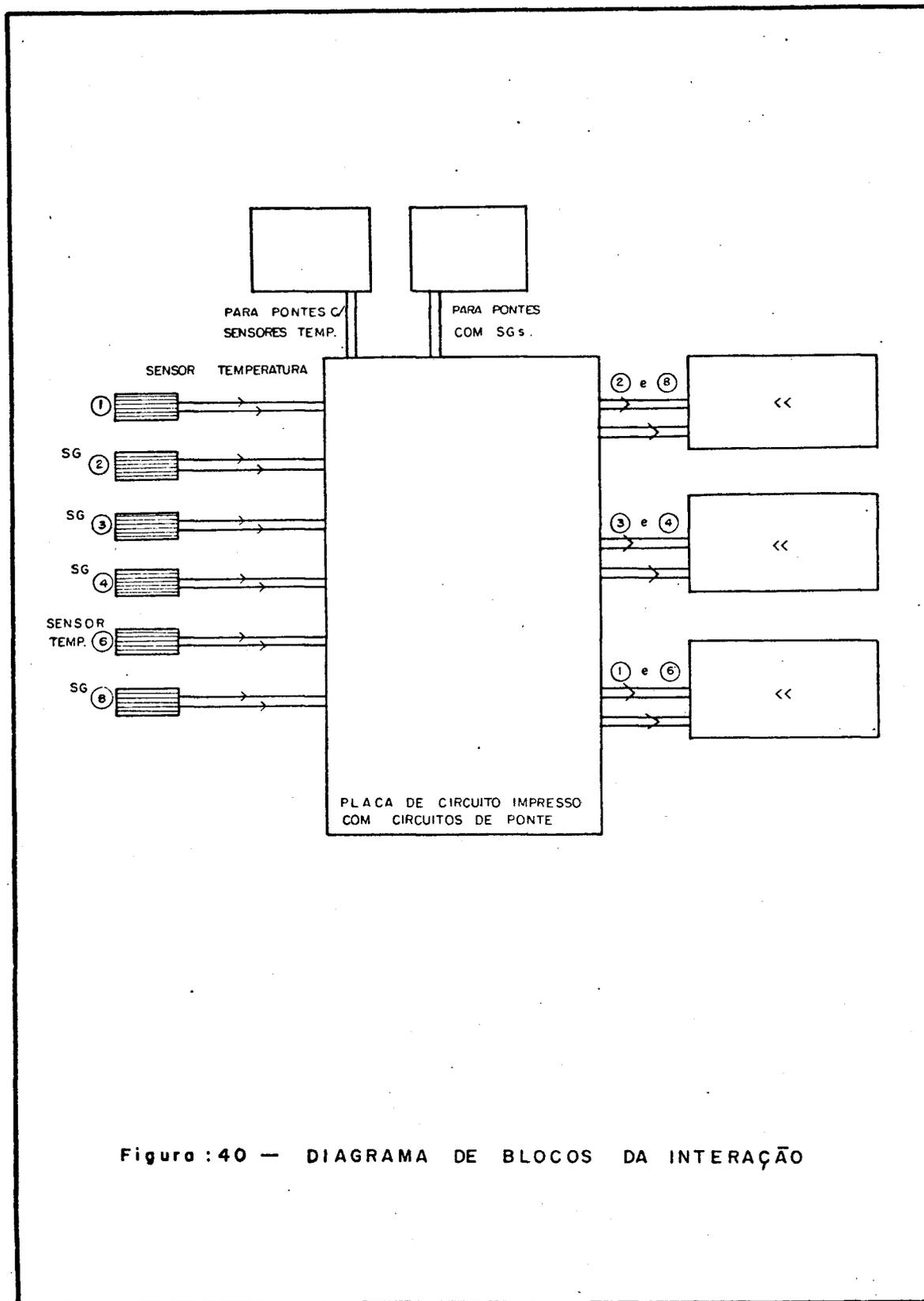


Figura : 40 — DIAGRAMA DE BLOCOS DA INTERAÇÃO

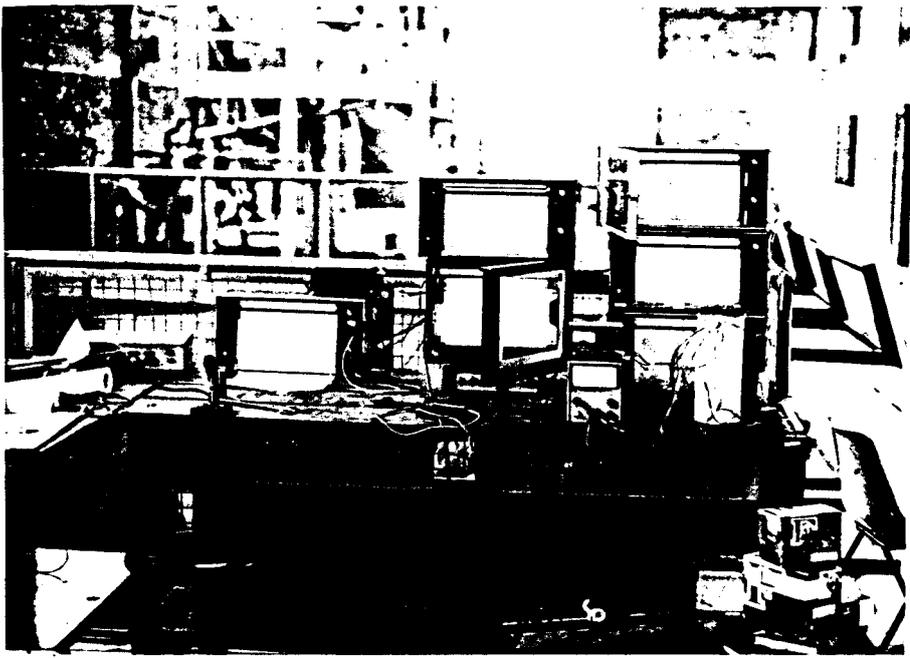


Figura : 41 — INSTRUMENTOS REGISTRADORES UTILIZADOS

3.9.1.3 Limpeza Inicial

Foi feita com acetona aplicada com algodão industrial.

3.9.1.4 Traçado das Linhas de Referência para a Orientação dos Sensores

Foram traçados com instrumento riscador, e lâmina flexível de aço para orientação dos mesmos. As linhas de referência não atingiram a área de instalação dos sensores.

3.9.1.5 Condicionamento Químico da Superfície

Obtido mediante a aplicação de tetracloreto de carbono, através de "cotonetes", em movimentos unidirecionais utilizando cada "cotonete" numa única passada (Figura 42).

3.9.2 Preparo do Adesivo

Preparado segundo as instruções fornecidas pelo fabricante.



Figura: 42 — APARÊNCIA DA INSTALAÇÃO APÓS O
CONDICIONAMENTO QUÍMICO DA SUPERFÍCIE

3.9.3 Colagem dos Extensômetros, Sensores de Temperatura, Terminais

3.9.3.1 Posicionamento dos Sensores e Terminais

Feito com fita adesiva.

3.9.3.2 Colagem

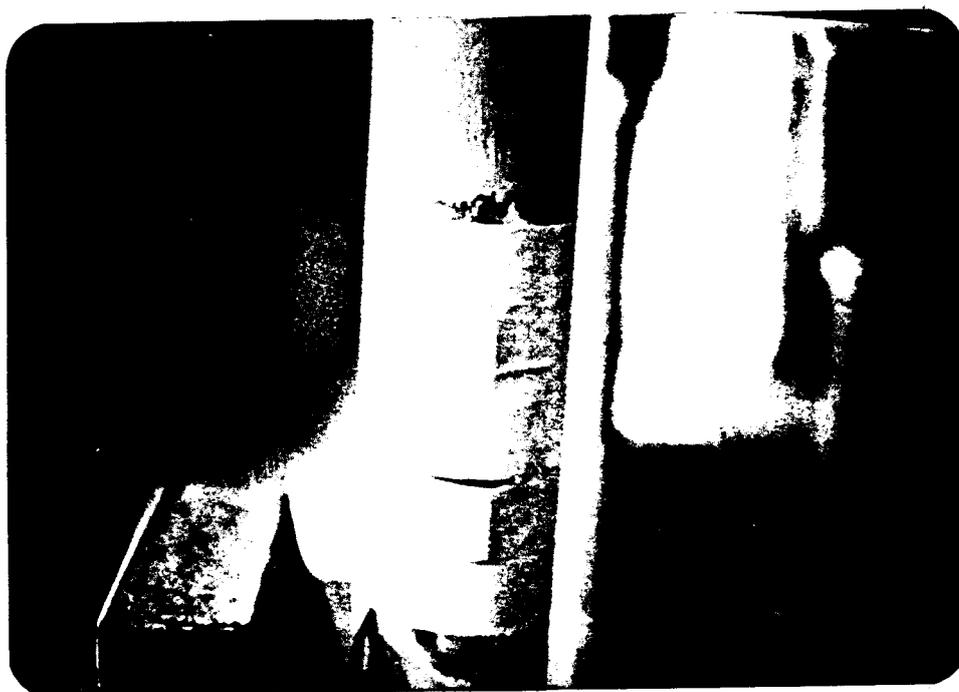
Posicionados os extensômetros, a colagem é feita de maneira convencional.

3.9.3.3 Cura

Após a colagem, os sensores e terminais foram cobertos com mylar e, pressionados através de paralelepípedos de borracha com fitas de teflon. As Figuras 43 e 44 mostram detalhes.

3.9.3.4 Solda dos Sensores aos Terminais

Feitas com ferro de soldar, marca Ener, de baixa potência, segundo procedimentos habituais em extensometria. As Figuras 45 e 46 mostram o resultado.



Figuras : 43 e 44 — DETALHE DA CURA QUE FORAM
SUBMETIDO OS ESTENSÔMETROS

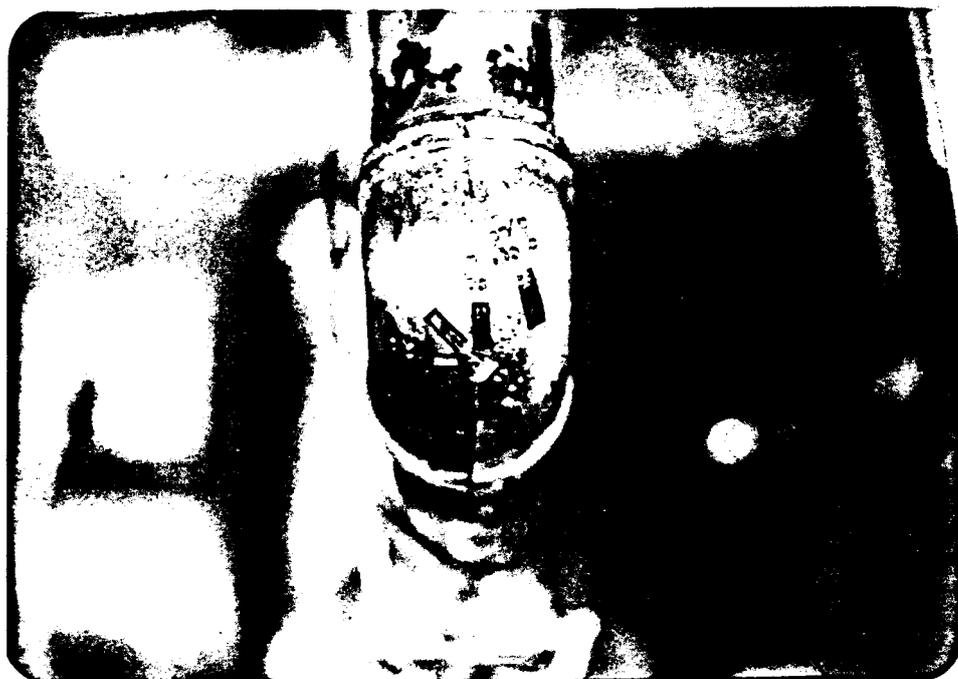
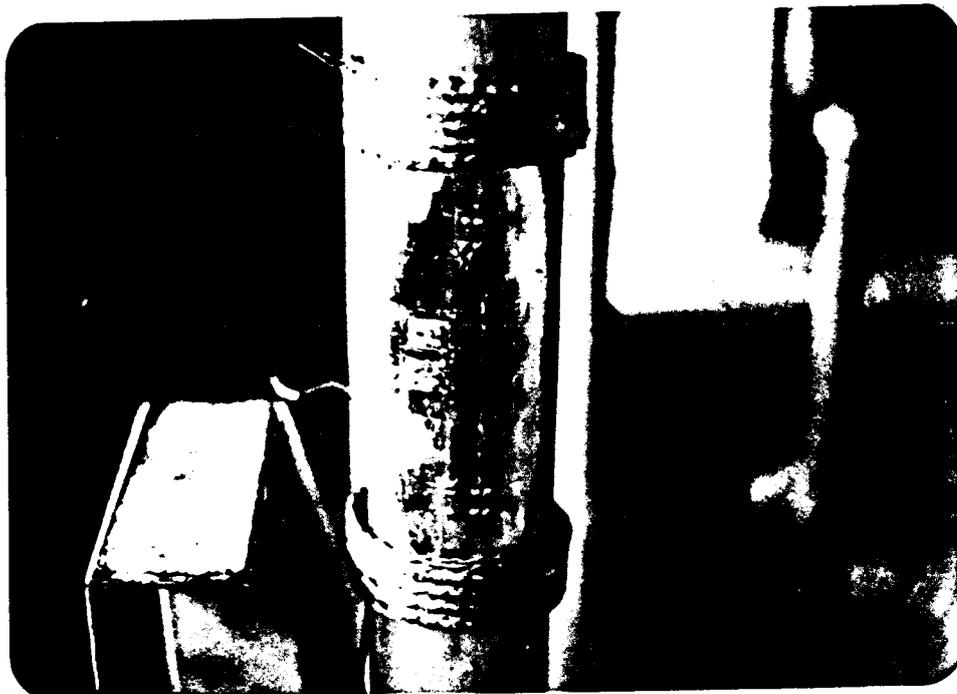


Figura: 45 e 46 — SOLDA DOS SENSORES AOS TERMINAIS

3.9.3.5 Pós-Cura

Devido à necessidade de se obter uma temperatura superior a 160°C , nas áreas de instalação dos sensores, foram construídos dois pequenos fornos envolvendo a tubulação. As Figuras 47 e 48 mostram detalhes.

3.9.3.6 Conexão dos Sensores à Instrumentação

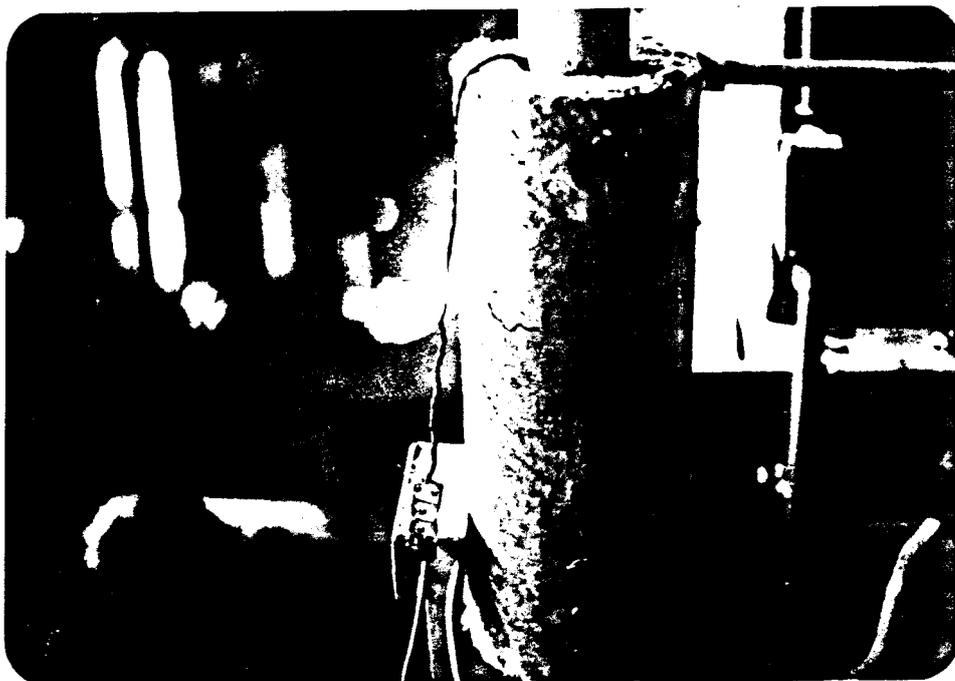
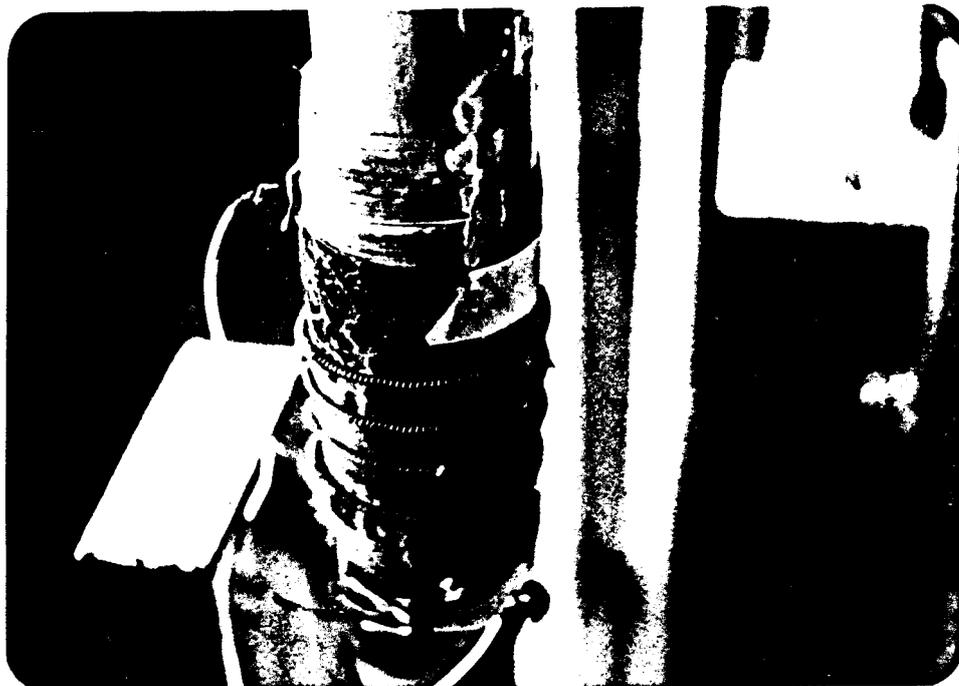
Junto aos terminais instalados com os sensores, foram usados fios com isolamento de amianto, devido a alta temperatura presente naquela área. As Figuras 49 e 50 mostram essa parte da fiação já soldada aos terminais.

Fora da área de influência desta temperatura, os cabos blindados, descritos anteriormente, foram usados. (Figura 51).

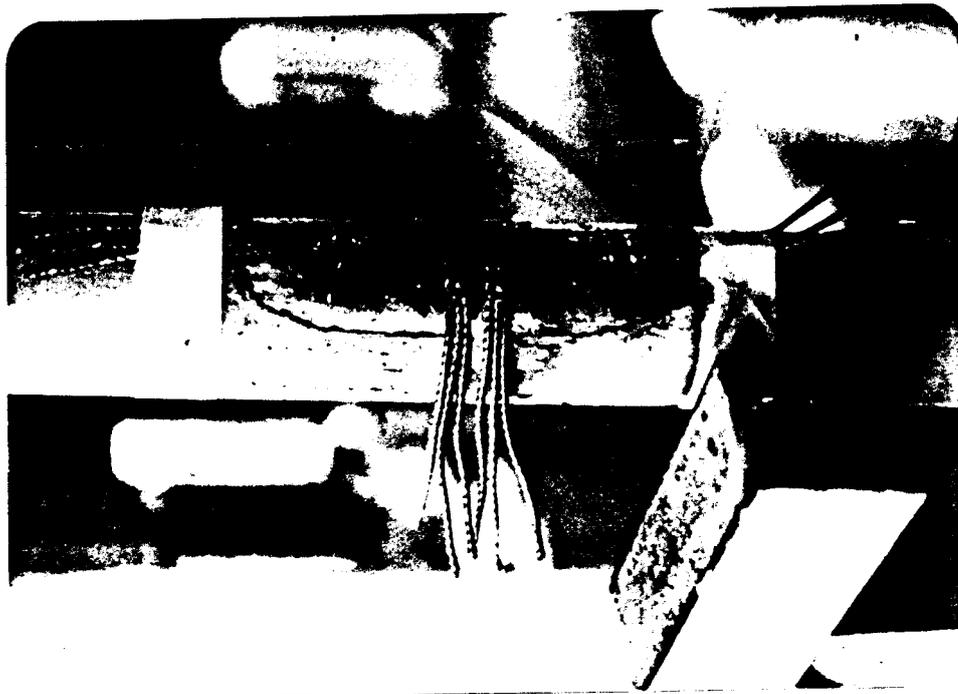
3.9.4 Seqüência dos Ensaios

A tubulação em estudo foi conectada a um pressurizador através de uma válvula de esfera A, sendo que sua outra extremidade foi bloqueada por uma outra válvula B, situada a uma distância de 14,5 metros da válvula A.

Com todos os equipamentos de registro de deformações e temperaturas já em funcionamento, foi aberta a válvu



Figuras: 47 e 48 — RECURSO USADO NA PÓS CURA DOS SENSORES



Figuras : 49 e 50 — DETALHE DE FIAÇÃO JÁ SOLDADA AOS TERMINAIS

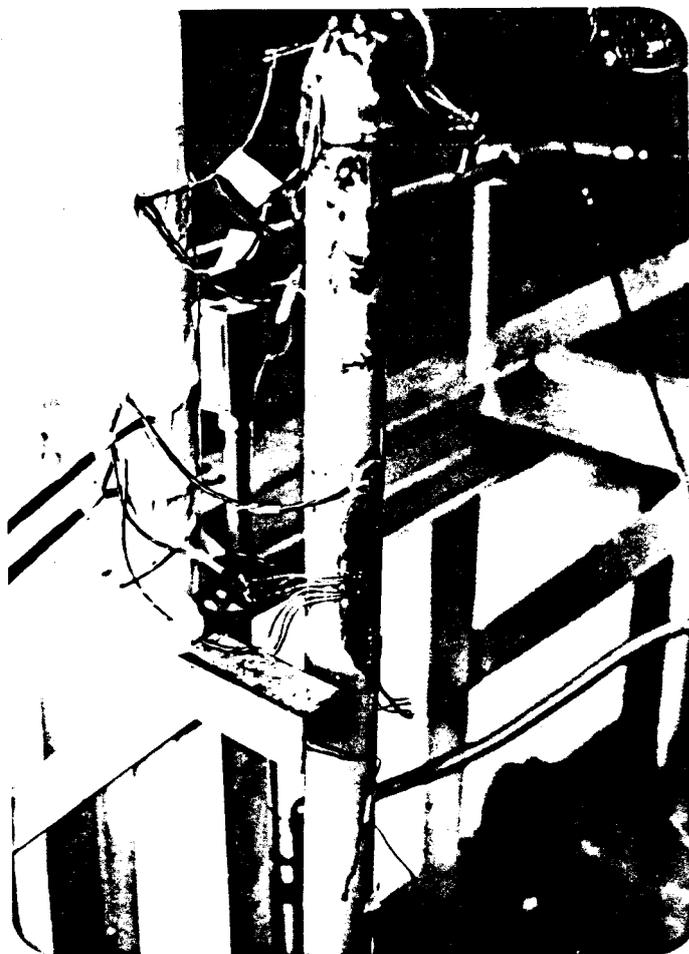


Figura: 51 - NOVO DETALHE DA FIAÇÃO

la A, permitindo a entrada de vapor d'água aquecido a 160°C com uma pressão de 5atm, e com uma velocidade de escoamento da ordem de 28 m/s.

Após o tempo necessário para que as leituras dos extensômetros mostrassem que a tubulação já se encontrava em condições de temperatura e deformação estacionárias, foi aberta a válvula B, provocando a descarga do sistema.

Foi suposto, que a partir da abertura da válvula A, a temperatura do vapor d'água foi constante e igual a 160°C .

4. RESULTADOS

As Figuras 52, 53 e 54 mostram os valores obtidos para as deformações e temperaturas em função do tempo.

Os valores obtidos pelos registradores foram corrigidos para a resistência da fiação e para variações de temperatura. Os outros tipos de correção não foram necessários. A fórmula utilizada para a correção, foi:

$$\epsilon = \frac{4\Delta V}{K'V} - \frac{[\epsilon_{AP,L} + (\alpha_{EST} - \alpha_L)\Delta T]}{1 + \frac{\Delta K\%}{100}}$$

onde:

ϵ é a deformação no instante de tempo considerado;

ΔV é a tensão de saída da ponte naquele instante;

V é a tensão de alimentação da fonte;

K' é o coeficiente de sensibilidade corrigido para a resistência da fiação;

$\epsilon_{AP,L}$ é a deformação aparente lida na curva mostrada na Figura 68, em função da temperatura obtida pelo sensor, correspondente ao extensômetro considerado.

$\Delta K\%$ é a variação percentual no fator de conversão do extensômetro, lido no mesmo gráfico da Figura ;

α_{EST} é o coeficiente de dilatação linear da estrutura sobre a qual é colado o extensômetro;

α_L é o coeficiente de dilatação linear do material sobre o qual o extensômetro foi colado para o traçado da curva de deformação aparente fornecida pelo fabricante;

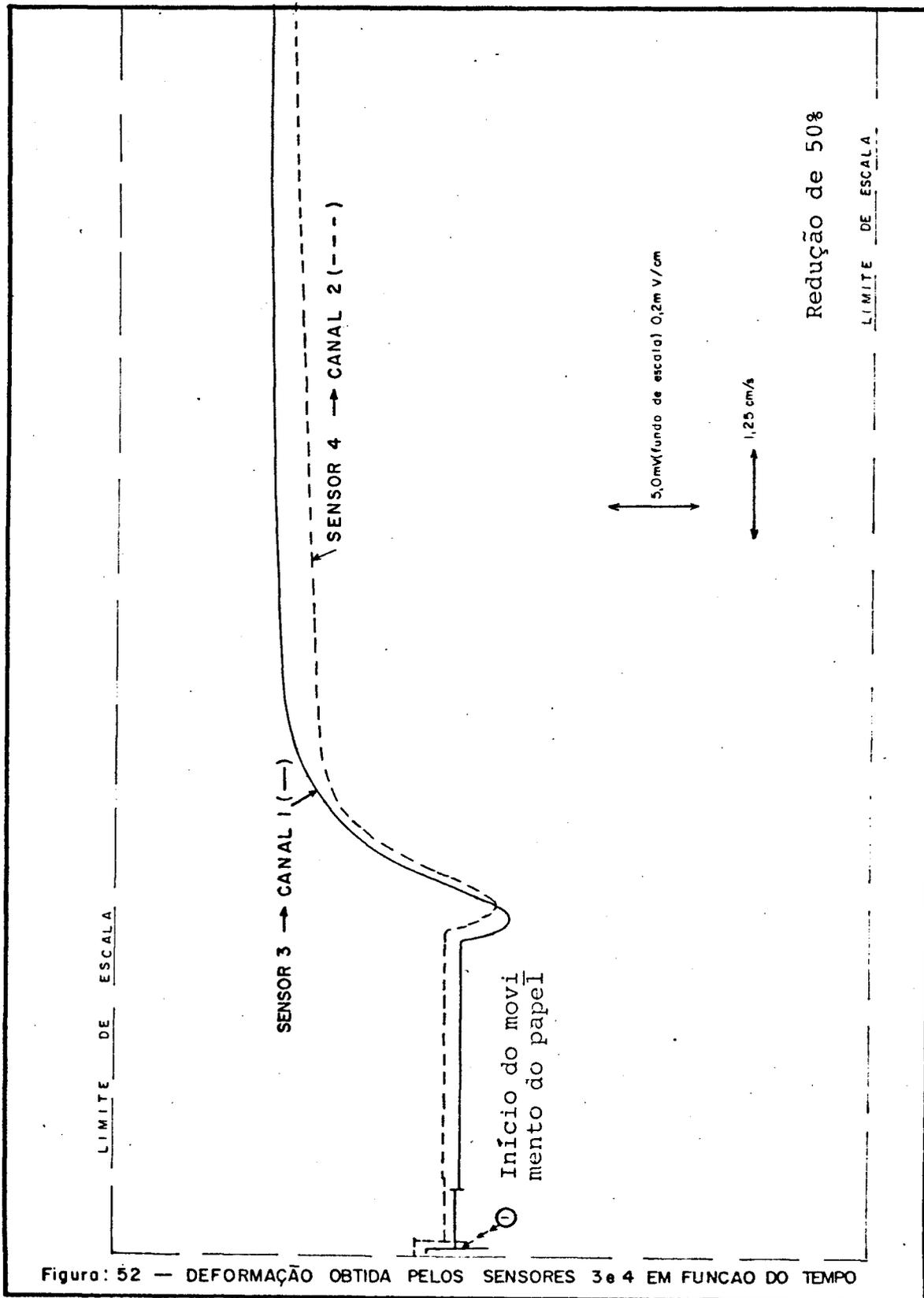
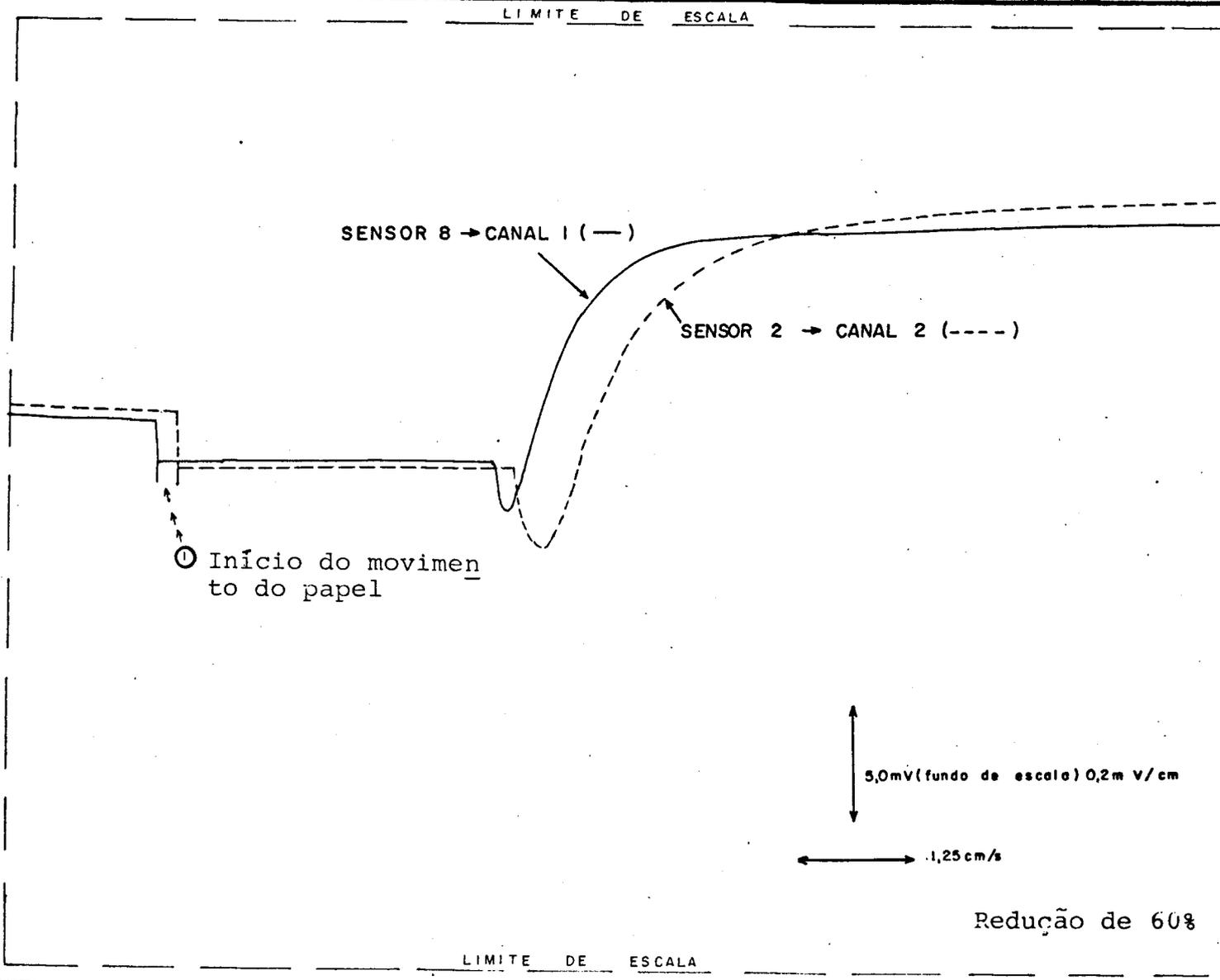


Figura: 52 — DEFORMAÇÃO OBTIDA PELOS SENSORES 3 e 4 EM FUNÇÃO DO TEMPO

Figura: 53 - DEFORMAÇÃO OBTIDA PELOS SENSORES 2 e 8 EM FUNÇÃO DO TEMPO



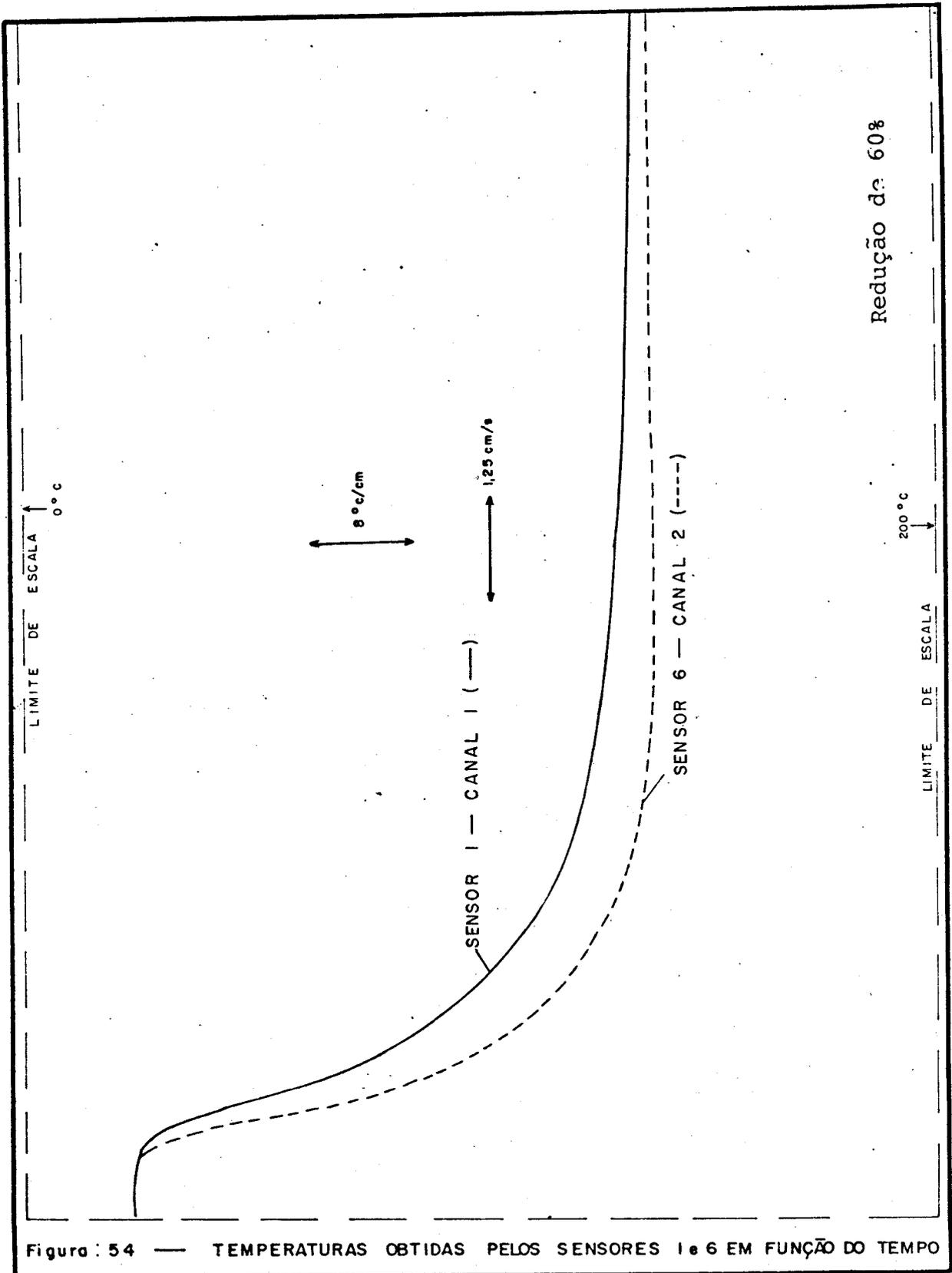


Figura : 54 — TEMPERATURAS OBTIDAS PELOS SENSORES 1 e 6 EM FUNÇÃO DO TEMPO

ΔT é a diferença entre a temperatura no instante de tempo considerado e a temperatura para a qual o circuito da fonte foi balanceado.

A partir destes dados foram calculados em função do tempo, os valores das tensões principais, das deformações principais, as deformações e tensões de cisalhamento máxima e as orientações das tensões e deformações principais.

As equações utilizadas foram as 118, 119, 120, 121, 122, 123 e 124, e os resultados obtidos estão mostrados nos Gráficos das Figuras 55 a 65.

É bom lembrar que os valores das deformações usadas nas equações 118 a 124, foram obtidos das Figuras 52 e 53, corrigidos segundo a fórmula de ϵ apresentada na página 143.

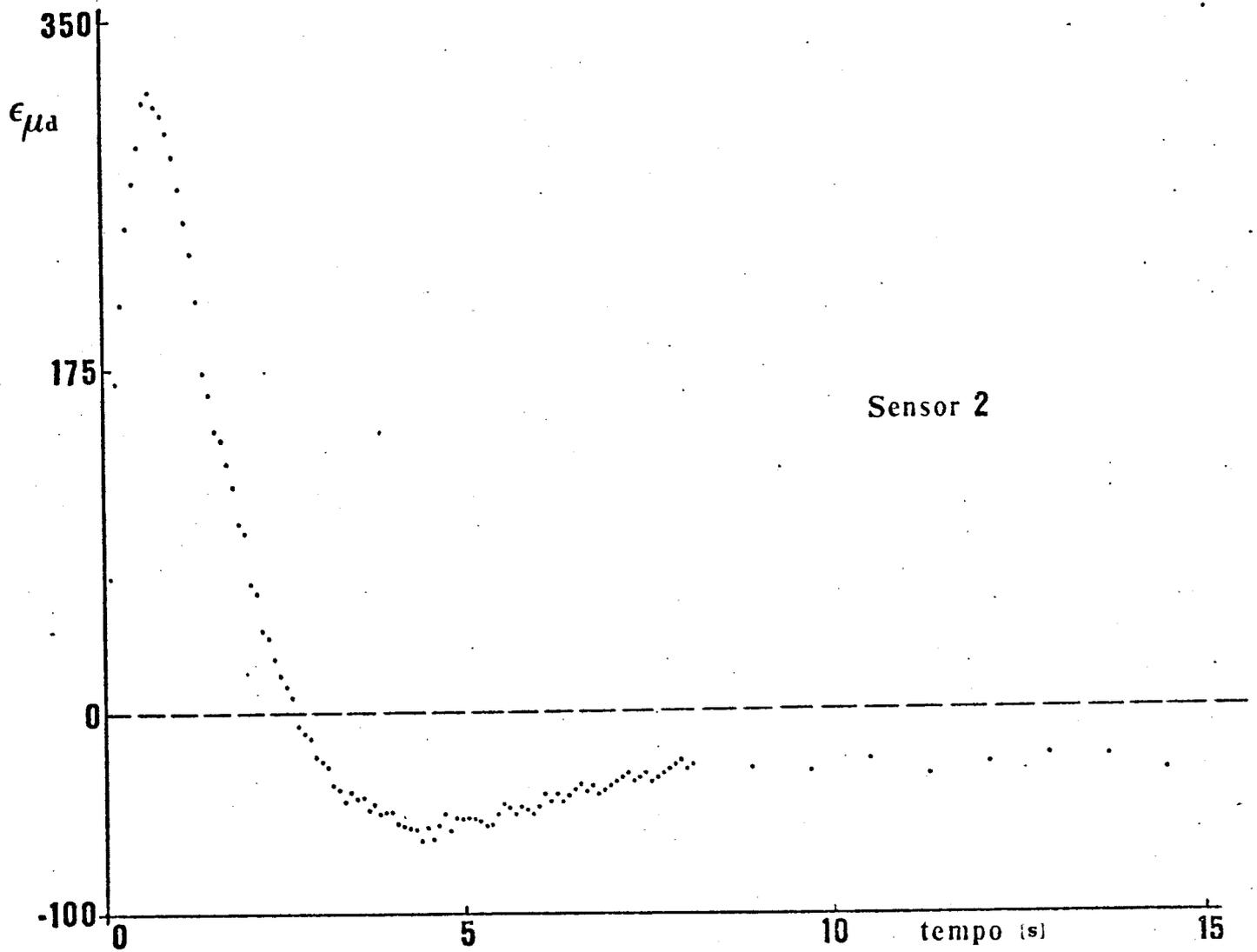


Figura : 55 — DEFORMAÇÃO SEGUNDO A DIREÇÃO 2 EM FUNÇÃO DO TEMPO

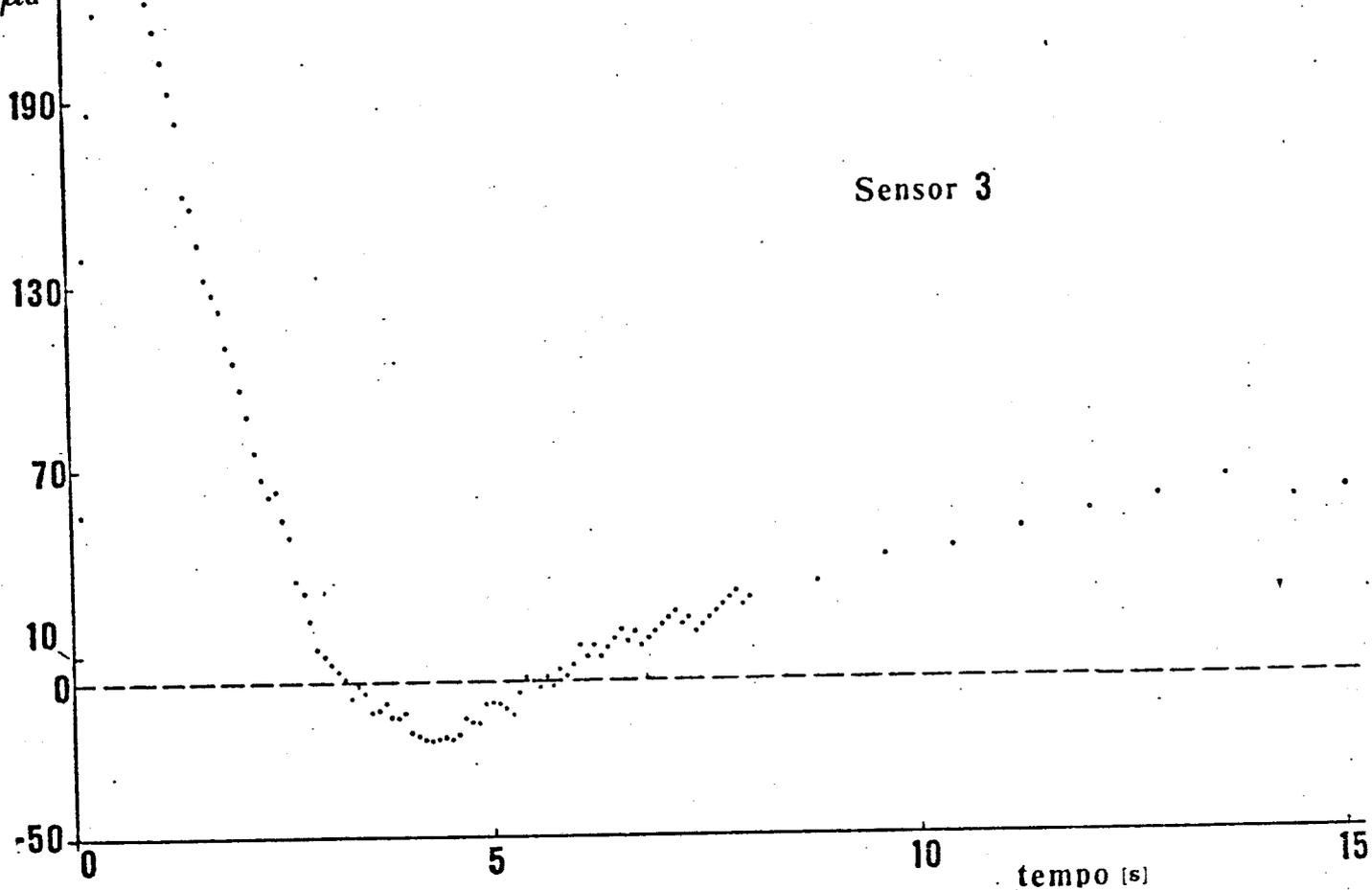


Figura: 56 — DEFORMAÇÃO SEGUNDO A DIREÇÃO 3 EM FUNÇÃO DO TEMPO

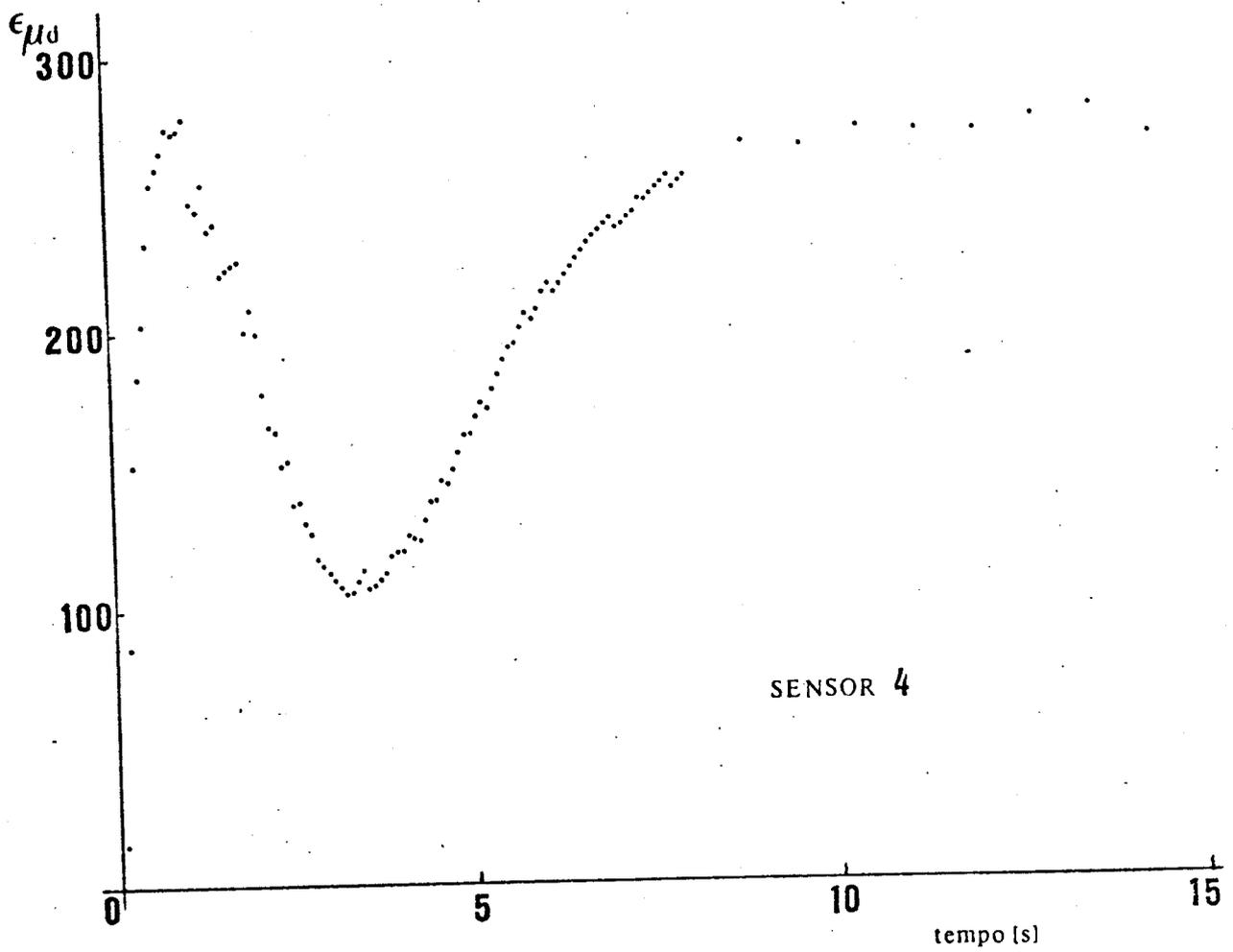


Figura : 57 — DEFORMAÇÃO SEGUNDO A DIREÇÃO 4 EM FUNÇÃO DO TEMPO

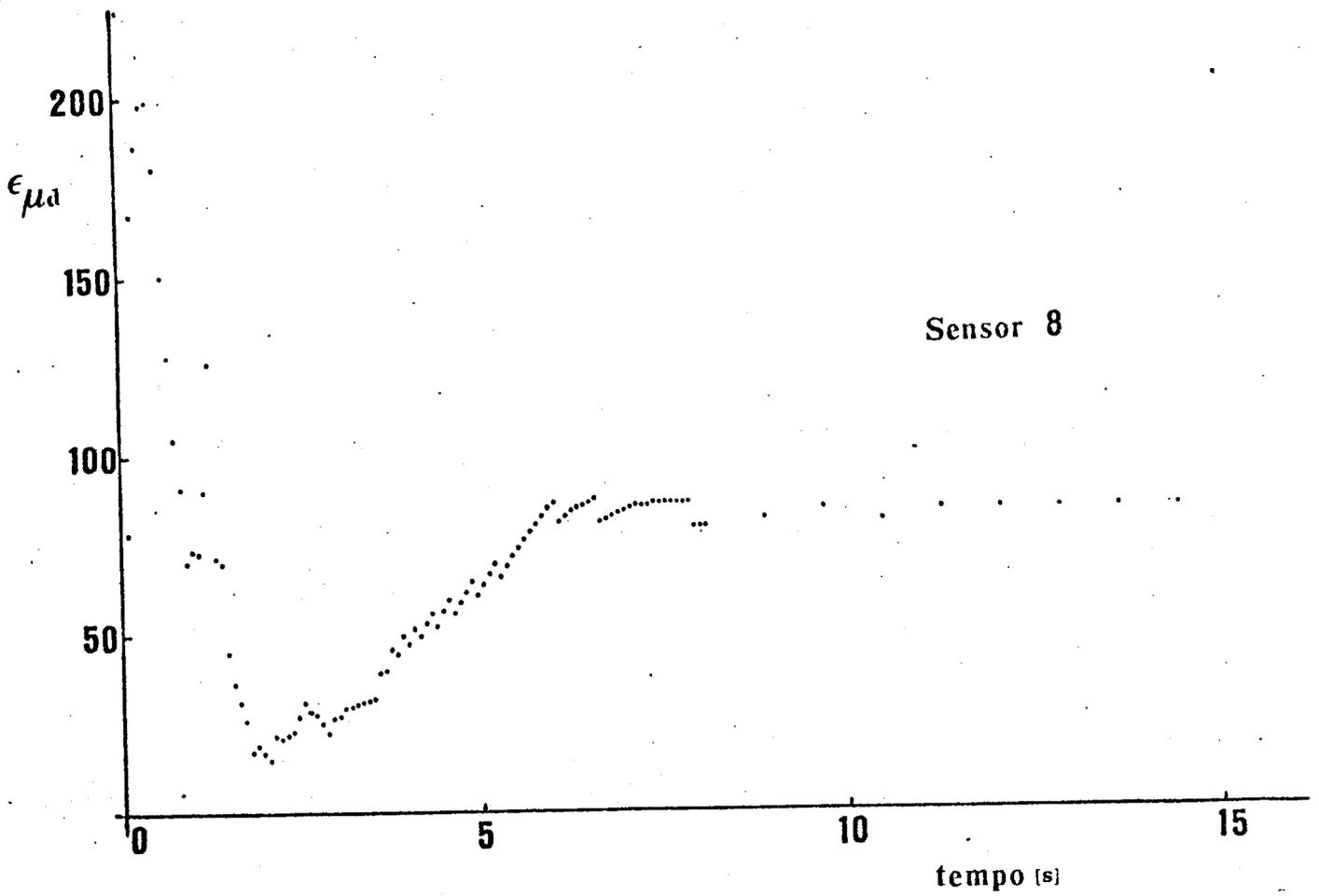


Figura:58 — DEFORMAÇÃO SEGUNDO A DIREÇÃO 8 EM FUNÇÃO DO TEMPO

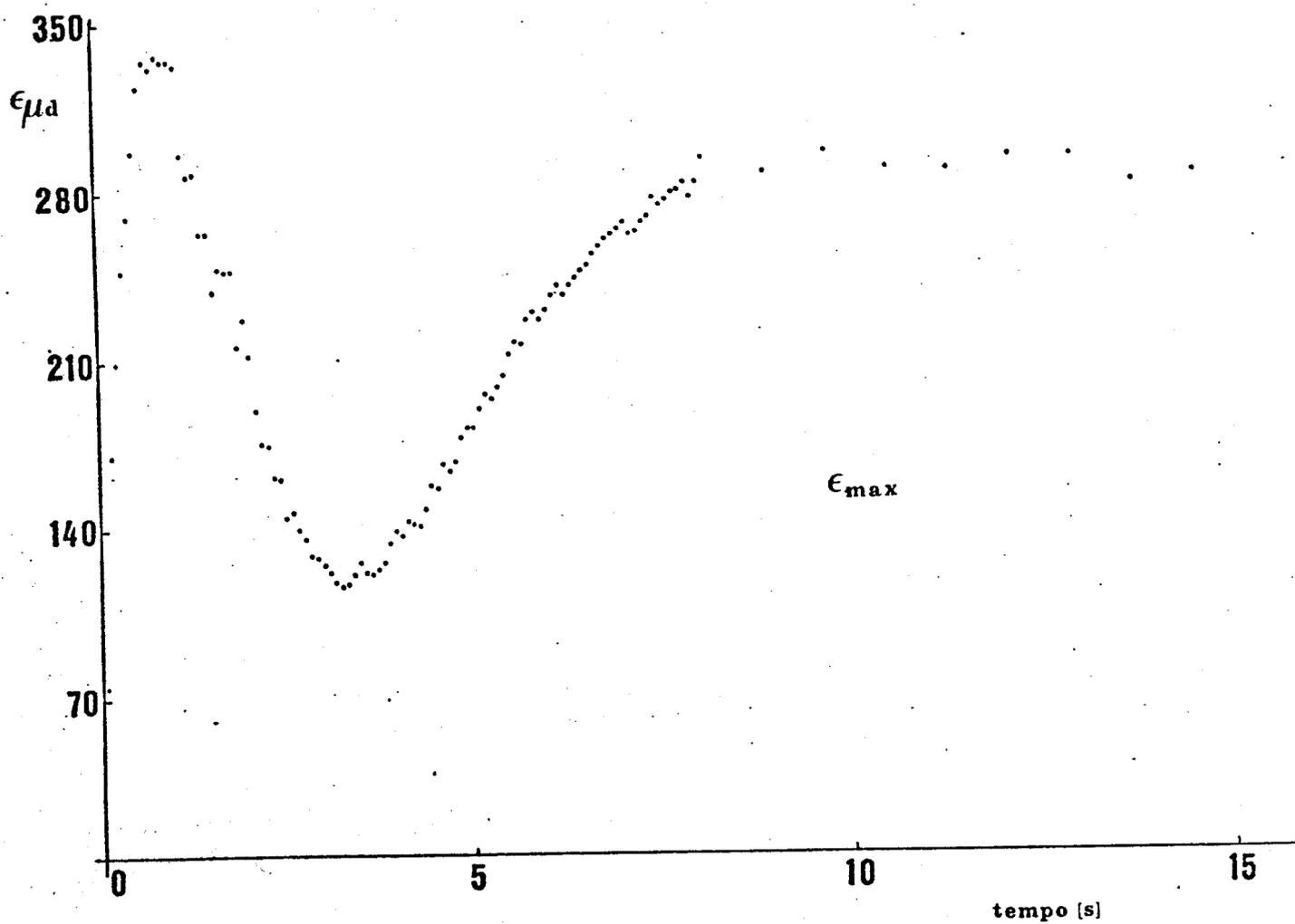


Figura : 59 — DEFORMAÇÃO PRINCIPAL MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO

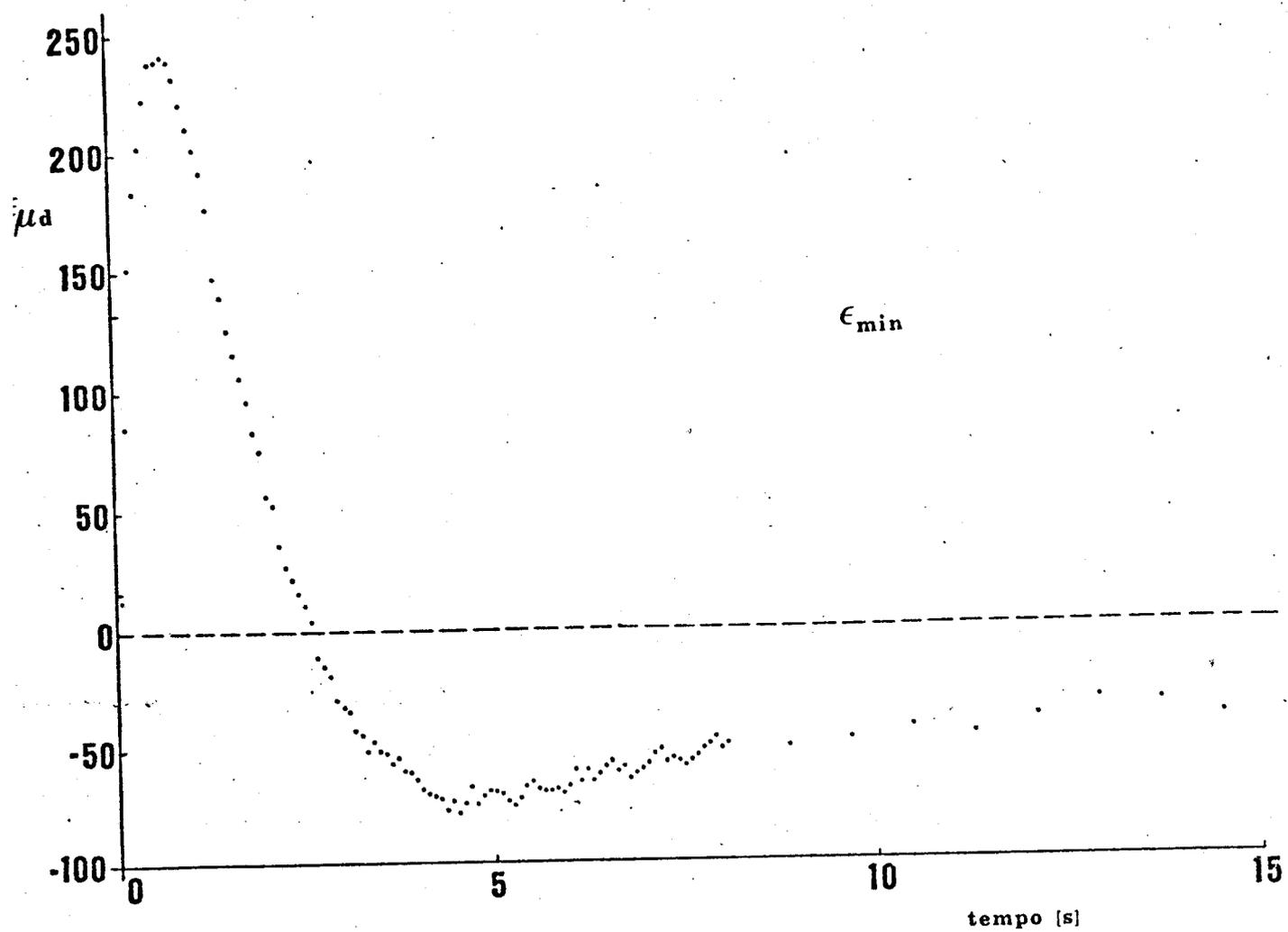


Figura: 60 — DEFORMAÇÃO PRINCIPAL MÍNIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO

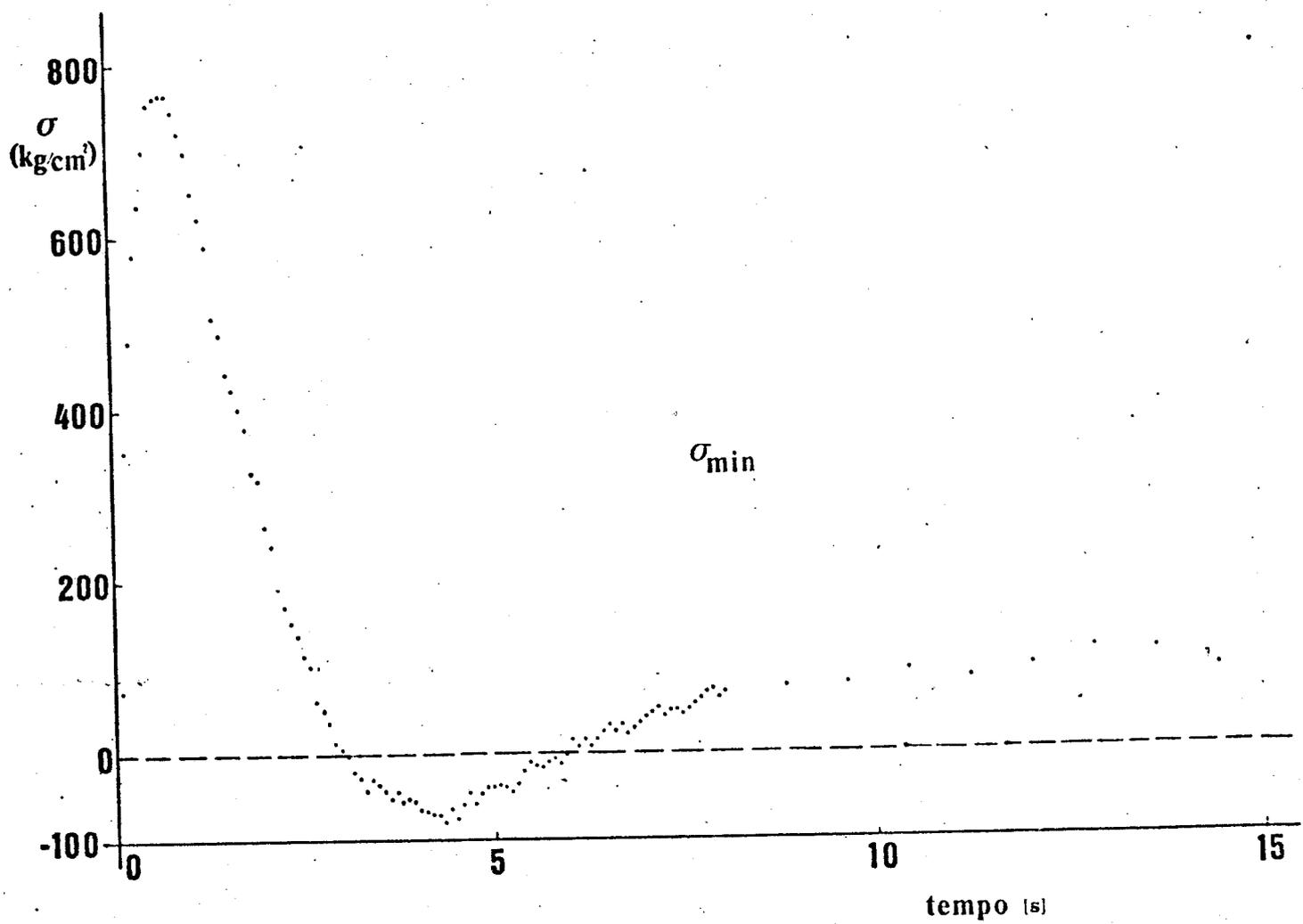


Figura: 61 — TENSÃO PRINCIPAL MÍNIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO

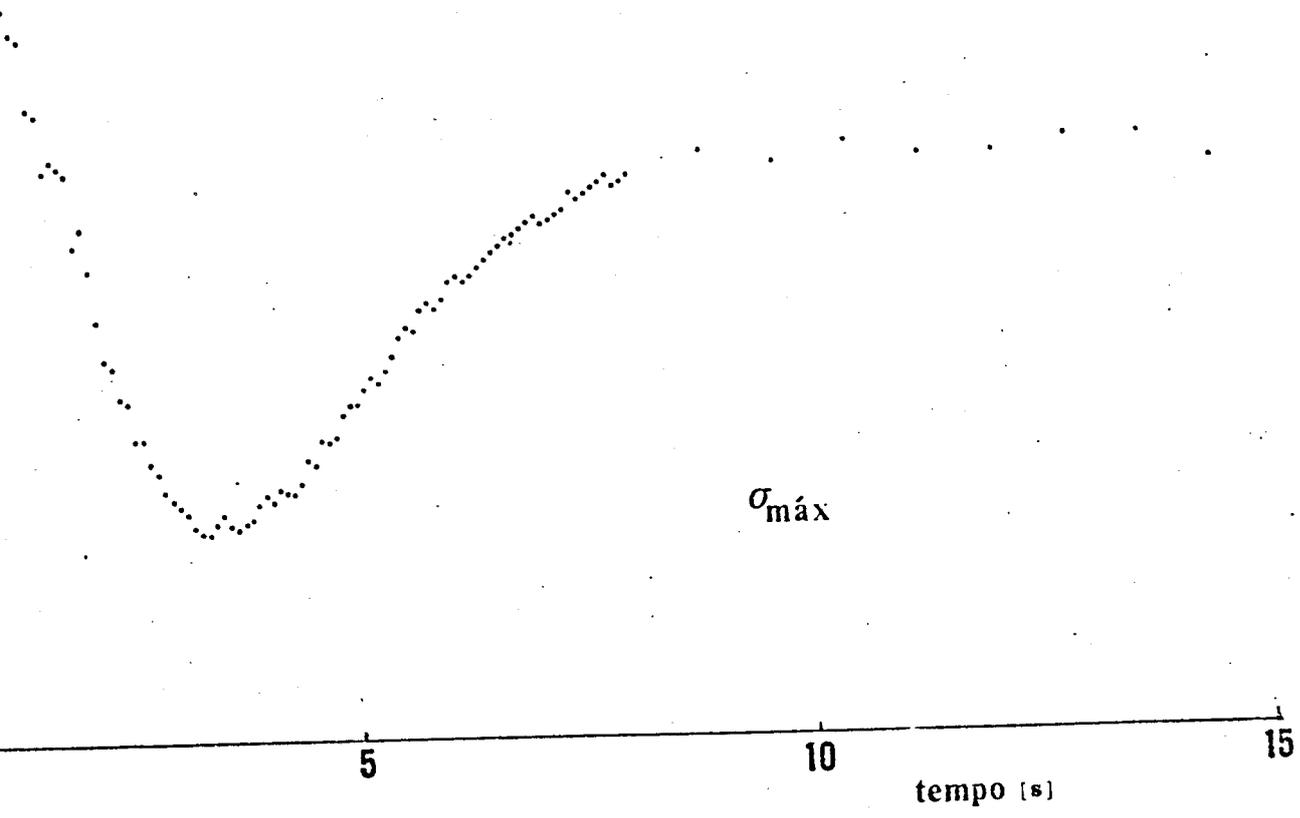


Figura : 62 — TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO

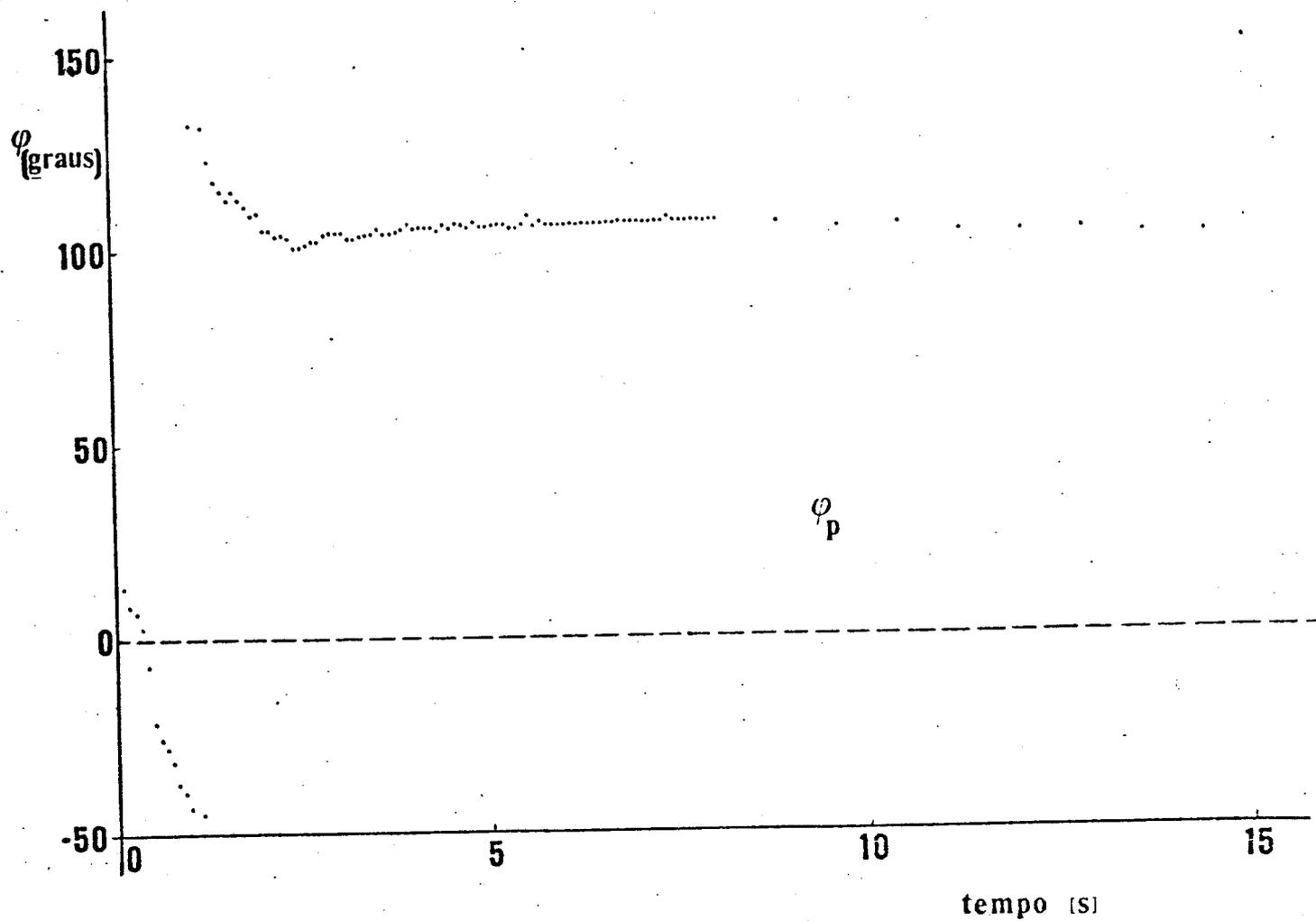


Figura : 63 — ÂNGULO DAS DEFORMAÇÕES PRINCIPAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO

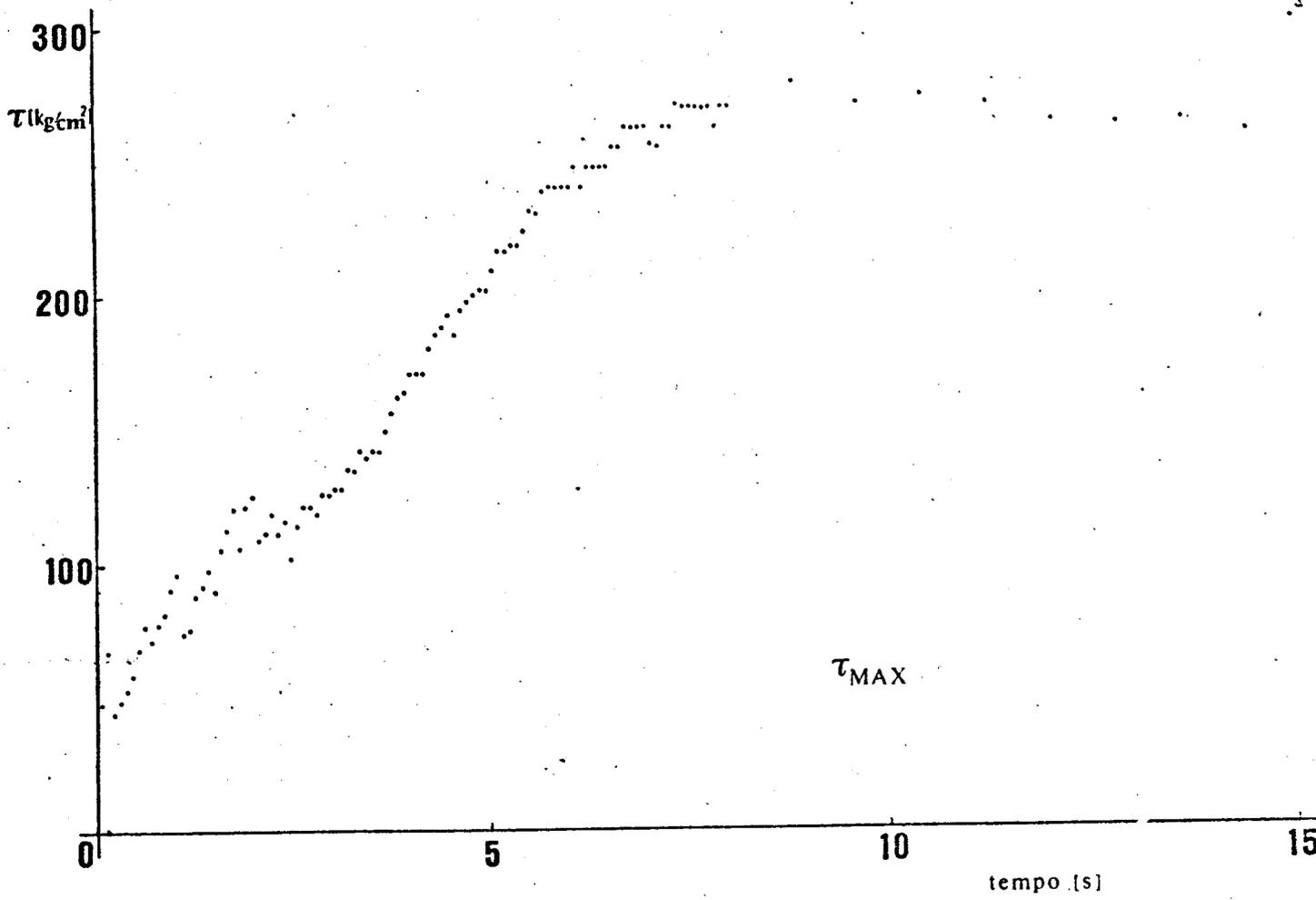


Figura: 64— TENSÃO DE CISALHAMENTO MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO

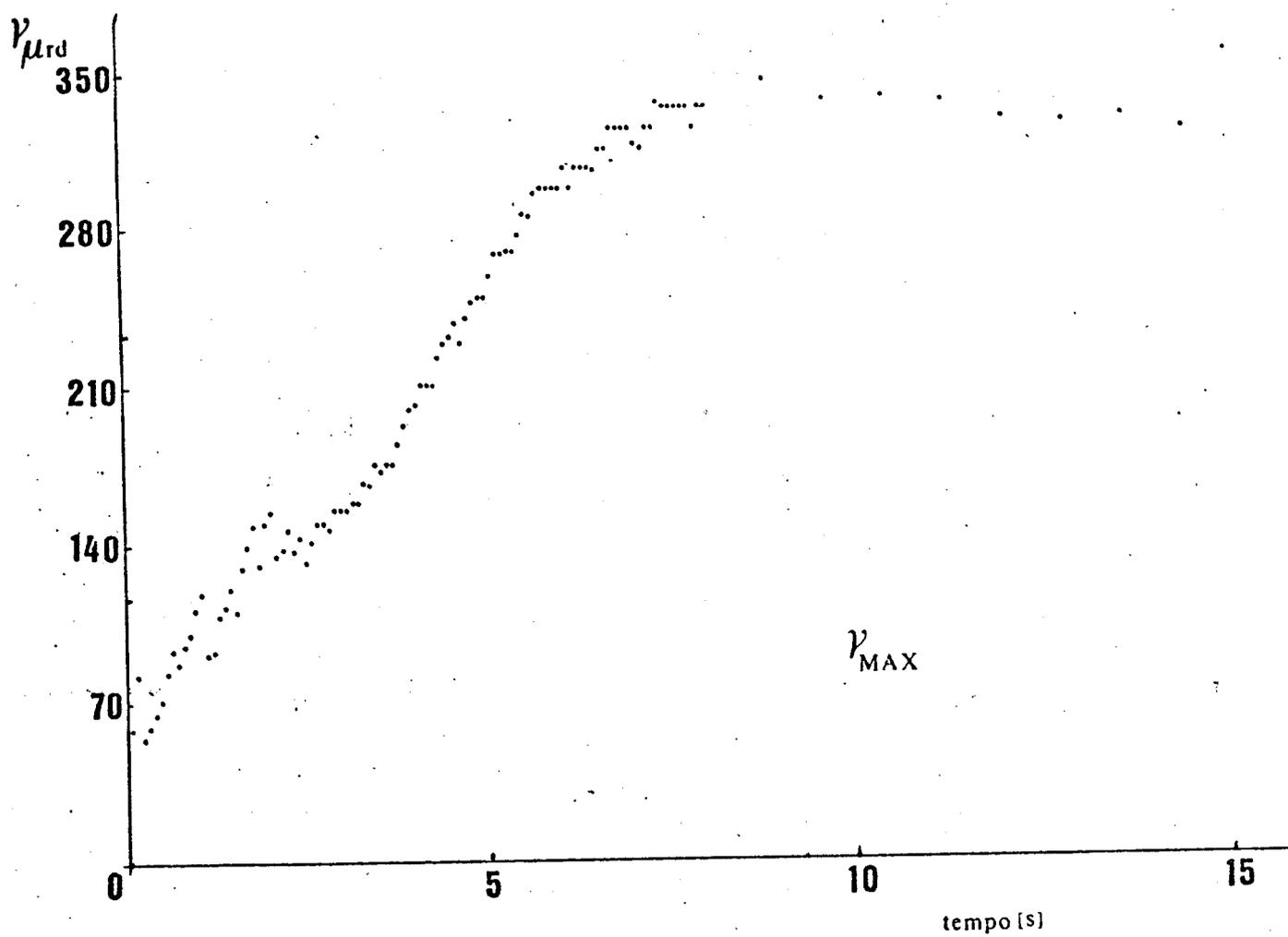


Figura: 65 — DEFORMAÇÃO DE CISLHAMENTO MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO

5. DISCUSSÃO

Considerando as condições do teste vê-se que a tubulação poderá sofrer deformações provenientes de três fatores:

- a) Pressão interna;
- b) Gradiente de temperatura na direção radial;
- c) Deformações de origem térmica provocadas pelo grau de engastamento da tubulação.

Destes fatores, o gradiente de temperatura na direção radial, é um fenômeno transiente (gráfico da Figura 54).

A fim de proceder à análise dos resultados é necessário conhecer as condições de operação do circuito termohidráulico durante a realização das medidas.

Estas condições foram as seguintes:

- a) A temperatura do vapor, depois de aberta a válvula A, é constante e igual a 160°C ;
- b) Velocidade do escoamento é da ordem de 28 m/s;
- c) A pressão do vapor d'água é de aproximadamente 5 kg/cm^2 .

Para a análise das curvas de deformação versus tempo relativas aos sensores quatro e oito, foi considerado conveniente que se fizesse uma estimativa (teórica) do comportamento no tempo do gradiente de temperatura radial para os referidos sensores. O método utilizado para obtenção desta estimativa está exposto no Apêndice A.

Os valores obtidos a partir desta teoria para o gra

diente de temperaturas estão mostrados nas Tabelas 1, 2 e 3 e plotados nas curvas 66 e 67.

De posse destes dados pode-se então interpretar o comportamento das deformações lidas pelos referidos extensômetros em instantes iniciais do teste. Assim, observa-se para o extensômetro oito, um crescimento brusco da deformação até um valor máximo de aproximadamente $200\mu d$ (Figura 58), atingido cerca de 0,5 seg após o início do teste.

Observando-se o comportamento do gradiente de temperatura radial com o tempo verifica-se uma boa correlação entre o máximo da deformação com o valor máximo deste gradiente de temperatura (Figura 67).

Para o máximo valor do gradiente de temperatura radial, no tubo, o valor teórico (Apêndice A), esperado para leitura do extensômetro é $167\mu d$, contra aproximadamente $200\mu d$ observado experimentalmente (Figura 58).

Pode-se supor que esta diferença de $30\mu d$ seja devida a imprecisão experimental.

Pode-se, portanto, concluir que, nos instantes iniciais ($\leq 0,5$ seg) do teste, praticamente toda a deformação sofrida pela estrutura se deve à presença do gradiente térmico no sentido radial.

Tabela 1 - Valores teóricos obtidos para transferência do calor do vapor d'água para a parede interna do tubo e joelho.

θ (segundos)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Descarga do Vapor (%)
0,01	11,82	9
0,02	22,61	16
0,03	32,46	24
0,04	41,46	30
0,05	49,67	36
.	.	.
.	.	.
.	.	.
0,1	81,2	59
0,2	113,92	83
0,3	127,10	93
0,4	132,42	97
0,5	134,56	99
.	.	.
.	.	.
.	.	.
1,0	135,98	100
.	.	.
.	.	.
.	.	.
10,0	136,00	100

$$\Delta T = T - T_{\infty}$$

$$T_0 = 160^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\infty} = 24^{\circ}\text{C}$$

Tabela 2 - Valores teóricos obtidos para variação da temperatura na parede do joelho (sensor 4)

θ (segundos)	T_{ext} ($^{\circ}C$)	$T_{int} - T_{ext}$ ($^{\circ}C$)
0,1	27	133
0,2	30	130
0,3	32	128
0,4	35	125
0,5	38	122
0,6	40	120
0,7	43	117
0,8	45	115
0,9	47	113
1,0	50	110
2,0	71	89
3,0	87	73
4,0	101	59
5,0	112	48
6,0	121	39
7,0	128	32
8,0	134	26
9,0	139	21
10,0	143	17
.	.	.
.	.	.
.	.	.
15,0	154	6
.	.	.
.	.	.
20,0	158	2

Tabela 3 - Valores teóricos obtidos para variação da temperatura na parede do tubo (sensor 8)

θ (segundos)	T_{ext} ($^{\circ}C$)	$T_{int} - T_{ext}$ ($^{\circ}C$)
0,1	33	127
0,2	41	119
0,3	49	111
0,4	56	104
0,5	63	97
0,6	69	91
0,7	75	85
0,8	80	80
0,9	86	74
1,0	90	70
2,0	124	36
3,0	142	18
4,0	151	9
5,0	155	5
6,0	157	3
7,0	158,75	1,25
8,0	159,36	0,64
9,0	159,67	0,33
10,0	159,83	0,17
.	.	.
.	.	.
.	.	.
15,0	159,99	0,01
.	.	.
.	.	.
.	.	.
20,0	160,0	0,00

$$T_{\infty} = 24^{\circ}C$$

$$T_0 = 160^{\circ}$$

$$T = T_{ext}$$

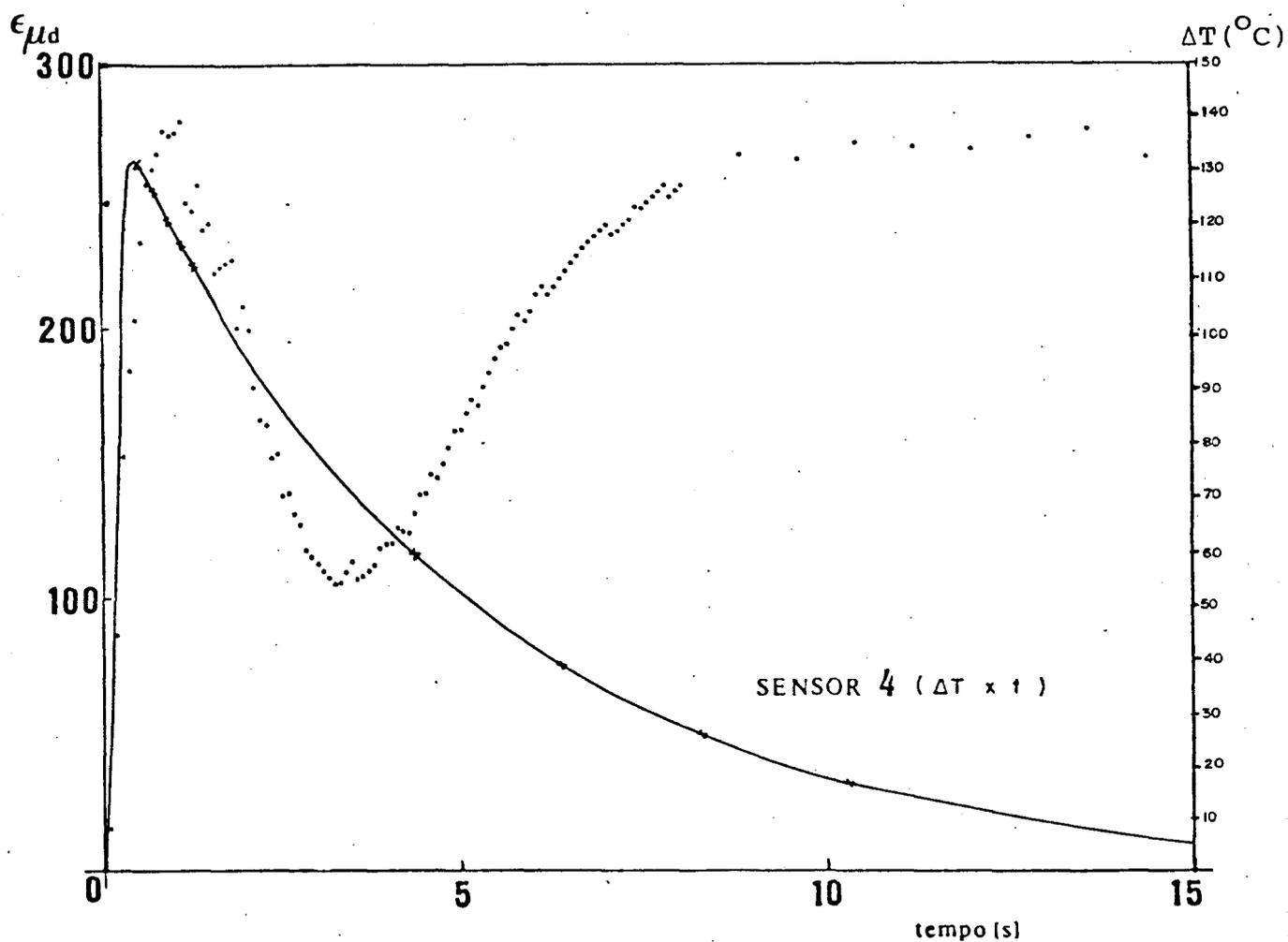


Figura: 66 — Gradiente de Temperatura Teórico em Função do Tempo.

Obs.: Os valores do tempo, correspondente ao gradiente de temperatura, para serem lançados no Gráfico foram somados a 0,55 seg, que é o instante em que a temperatura interna do tubo atinge a 160°C .

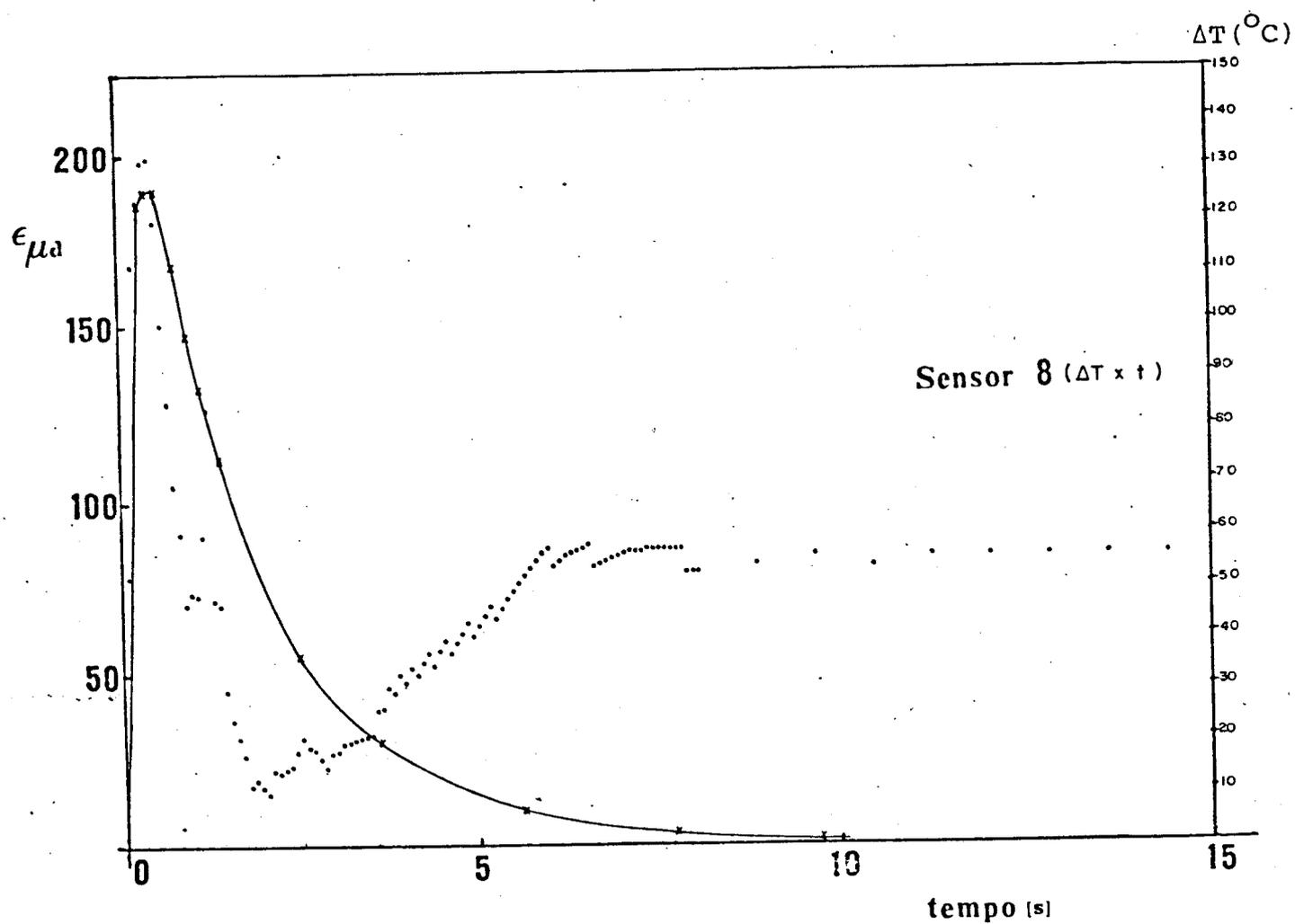


Figura : 67 — Gradiente de Temperatura Teórico em Função do Tempo.

Prosseguindo no exame da curva da Figura 67, observa-se também outra variação brusca do valor de deformação para um tempo da ordem de 1 seg. após o início do teste, correspondendo a uma deformação medida de aproximadamente $50\mu d$.

Levando-se em conta que o tempo necessário para que o sensor 8 (oito) sinta os efeitos da condição dinâmica da pressão interna (Apêndice A) pode ser calculado conhecendo-se a velocidade de escoamento do vapor e que este tempo calculado é da ordem de 1 seg., pode-se concluir que o aparecimento do segundo pico na Figura 67, se deve ao fator dinâmico da pressão interna.

A partir deste ponto a deformação medida pelo sensor oito cai rapidamente para um valor mínimo de aproximadamente $14\mu d$ (Figura 58), correspondendo a um tempo de dois segundos e onde os fenômenos transientes já devem ter desaparecido.

Este valor mínimo corresponde à deformação provocada no tubo pela pressão interna, em condições estáticas, de 5 kg/cm^2 (Apêndice A).

Após atingido o valor mínimo, a deformação medida começa a subir lentamente até se estabilizar em $80\mu d$ (Figura 58).

Este comportamento pode ser interpretado como o aparecimento de deformações térmicas devido a existência de engastamento parcial da estrutura. De fato (Apêndice A), se a estrutura fosse perfeitamente engastada, deveria se obter

546 μ d para o valor da deformação térmica a uma temperatura de 160°C. Isto mostra que deve existir um grau de engastamento da ordem de 20% em relação ao caso ideal.

Para o sensor quatro (4) (Figuras 57 e 66) tudo se passa de maneira análoga, mas nota-se que a largura do pico inicial de deformação é bem mais pronunciada que no caso do sensor oito.

Isto pode ser explicado desde que se leve em conta que a espessura da parede onde está localizado o sensor 4 é maior que onde está localizado o sensor 8.

Neste caso, o gradiente de temperatura radial permanece com valores altos por mais tempo (Figura 66), fazendo com que se perdesse mais sua contribuição para a deformação total sofrida pelo sistema.

Isto também contribui para que o pico relativo ao aparecimento do fator dinâmico da pressão interna seja praticamente invisível, como pode ser observado na Figura 66.

Nota-se também que a deformação térmica originada do engastamento, visto pelo sensor 4, é sensivelmente maior, indicando um maior grau de engastamento naquela região da tubulação.

Uma análise conjunta das leituras dos extensômetros 2, 3 e 4 permitem o cálculo das deformações principais máximas e mínimas (Figuras 59 e 60).

Estes valores possibilitam determinar as tensões principais máximas e mínimas, tensão de cisalhamento máxima,

a direção das deformações principais, e a deformação de cisalhamento.

Estes resultados estão mostrados nas Figuras 61 a 65. Observa-se que, no caso estudado, a tensão principal máxima é bastante inferior a tensão de escoamento do material (Tabela 4).

CERTIFICADO DE ENSAIOS DIETS.PD-062/79

SOLICITANTE: LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE TENSÕES - Sr. Tanius Mansur
REFERÊNCIA:
MATERIAL: Tubo de aço galvanizado
TIPO DE TESTE: Tração
NORMA OU DESCRIÇÃO DO TESTE: Velocidade de Ensaio: 0,01 cm/min
Velocidade de Registro: 1,0 cm/min
.....
.....
.....

RESULTADOS E OBSERVAÇÕES

Tabela 4 - Ensaio de tração realizados em amostra natural da tubulação testada.

AMOSTRA	l_0 (mm)	A (mm ²)	T (°C)	σ_E (Kgf/mm ²)	σ_{Rup} (Kgf/mm ²)	E (Kgf/mm ²)
01	16,0	4,91	23	26,2	30,5	
02	16,0	4,91	49	28,5	32,1	
03	15,9	4,91	80	28,0	36,7	
04	16,0	4,91	120 ⁺²	28,0	39,7	
05	15,6	4,91	175 ⁺⁵	32,0	44,5	
06	36,0	4,91	24	25,7	30,5	2,10.10 ⁶

DATA 20/12/79

EMITENTE

Paulo Ney A. Barros
PAULO NEY A. BARROS

Serastião V. Silva
SERASTIÃO V. SILVA

APROVAÇÃO

Roberto F. Di Lorenzo

ROBERTO F. DI LORENZO

6. CONCLUSÃO

O método utilizado mostrou-se completamente eficiente na determinação de fenômenos transientes e estacionários, aos quais foi submetida a estrutura. Melhor detalhamento do fenômeno poderia ser obtido com a instalação de mais extensômetros estrategicamente distribuídos.

Verificou-se uma predominância das tensões de origem térmica sobre as provenientes da pressão interna em sua fase dinâmica e estática. Assim, observou-se nos instantes iniciais o aparecimento de uma tensão relativamente importante que pode ser atribuída ao aparecimento na tubulação, de um gradiente de temperatura transitório no sentido radial. Verificou-se também, o aparecimento de tensões oriundas das ondas de pressão.

Após os fenômenos transientes de temperatura e pressão conclui-se que a tensão remanescente se deve a existência de engastamento na estrutura e, à pressão interna. Destas duas solicitações a predominante é devido a engastamento da estrutura.

Verificou-se também, que as tensões principais possuem valor bem abaixo do limite de escoamento do material, indicando com isto, que a referida tubulação pode ser submetida à aquelas condições de trabalho sem perigo de falhas estruturais.

7. NOVOS TRABALHOS

Como sugestão para novos trabalhos, sugerimos:

- Que se faça a monitoração das deformações em vários pontos do referido circuito para um estudo da influência dos fatores aqui apresentados ao longo de toda tubulação.

- Que se estude as vibrações de circuitos termohidráulicos quando o mesmo for colocado em operação.

- Que se faça o mesmo estudo aqui apresentado, substituindo o vapor por água.

APÊNDICE "A"
=====

1. AValiação DO TEMPO NECESSÁRIO PARA QUE O EXTENSÔMETRO OITO SINTA O EFEITO DINÂMICO DEVIDO À PRESSÃO INTERNA

A velocidade do movimento vibratório, devido ao efeito dinâmico na parede da tubulação, pode ser expresso /15/ como:

$$v = \frac{C\sigma}{E}$$

onde:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

σ é a tensão solicitante (neste caso é a tensão longitudinal na parede da tubulação);

E é o módulo de elasticidade do material da tubulação;

ρ é a densidade do material da tubulação.

$$C = \sqrt{\frac{21 \times 10^{10} \text{ N/m}^2}{8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}}$$

$$C = 5123 \text{ m/s.}$$

$$p \cdot \pi r^2 = \sigma l \cdot 2\pi r \cdot e.$$

$$\sigma l = \frac{pr}{2e} = 17,92 \text{ kgf/cm}^2 \text{ ou } 179.200 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$v = 5123 \times \frac{179200}{2,1 \times 10^6} \cong 43 \text{ m/s}$$

$$t_1 = \frac{14,5}{43} \text{ m} = 0,34 \text{ seg.} \quad (\text{tempo de volta})$$

$$t_2 = \frac{1450}{2800} \text{ m} = 0,52 \text{ seg.} \quad (\text{tempo de ida})$$

$$\text{Tempo total} = t = 0,34 + 0,52 \cong 0,9 \text{ seg.}$$

A este tempo deve-se acrescentar o tempo de compressibilidade do fluido.

2. TEMPERATURA EM REGIME TRANSIENTE

A equação que governa a temperatura de descarga de um corpo em regime transiente /16/ é:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-\left(\frac{\bar{h} \cdot A_s}{c \cdot \rho \cdot v}\right) \theta} \quad (\text{Eq. 1.A})$$

onde:

T é a temperatura do corpo num dado instante;

c é o calor específico do corpo;

ρ é a densidade do corpo;

v é o volume do corpo;

A_s é a área da superfície do corpo;

T_0 é a temperatura inicial do corpo;

T_∞ é a temperatura final que o corpo alcançará.

θ é o tempo considerado

A quantidade $\left(\frac{C \cdot \rho \cdot V}{\bar{h} \cdot A_s}\right)$ tem a dimensão de tempo e é chamada constante de tempo. Seu valor é indicativo da velocidade de resposta de um sistema simples a uma mudança instantânea na temperatura do meio.

A equação 1.A é análoga a equação que descreve a descarga do condensador em um circuito RC:

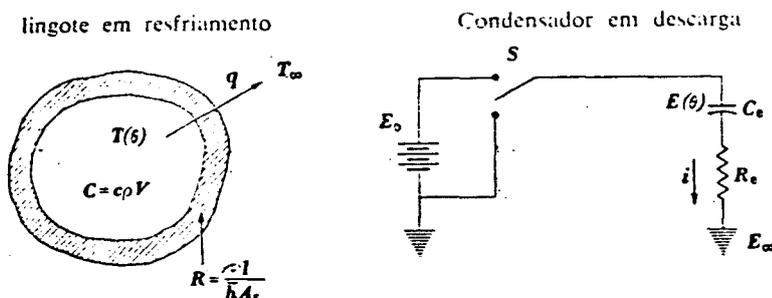


Figura: A 1 — A FIGURA MOSTRA A EQUIVALÊNCIA EXISTENTE ENTRE O CIRCUITO TÉRMICO E O ELÉTRICO /16/

$$\frac{E - E_\infty}{E_0 - E_\infty} = e^{-\left(\frac{1}{R_e \cdot C_e}\right) \theta} \quad (\text{Eq. 2.A})$$

onde:

θ é o tempo;

E é o potencial num dado instante;

E_{∞} é o potencial da terra;

E_0 é a voltagem em $\theta = 0$.

Comparando as equações 1.A e 2.A, nota-se que em ambas o potencial cai exponencialmente com o tempo. Observa-se também que $\frac{1}{h \cdot A_s}$ é a resistência térmica R na superfície do corpo e, c.p.v. é equivalente a uma "capacitância térmica de descarga" C do corpo, no sentido que ela indica a quantidade de energia interna a ser removida do corpo, para cada variação unitária de seu potencial de temperatura.

Em termos destas comparações, pode-se escrever a equação 1.A, como:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\left(\frac{\theta}{RC}\right)} \quad (\text{Eq. 3.A})$$

3. CIRCUITO DE RESISTÊNCIAS TÉRMICAS PARA O CILINDRO

Para um cilindro oco, mostra-se /17/, que:

$$R_a = \frac{1}{h_a \cdot A_a} ; R_p = \frac{\ln \frac{b}{a}}{2\pi K l} ; R_b = \frac{1}{h_b \cdot A_b} \quad (\text{Eq. 4.A})$$

onde:

R_a é a resistência na superfície A;

R_p é a resistência na parede cilíndrica;

R_b é a resistência na parede B;
 A_a é a superfície interior;
 A_b é a superfície exterior;
 a e b são raios interno e externo, respectivamente;
 l é o comprimento do cilindro;
 h_a é o coeficiente de transmissão de calor do fluido interior do cilindro;
 h_b é o coeficiente de transmissão de calor do fluido exterior do cilindro;
 K é a condutividade térmica do material de que o cilindro é feito.

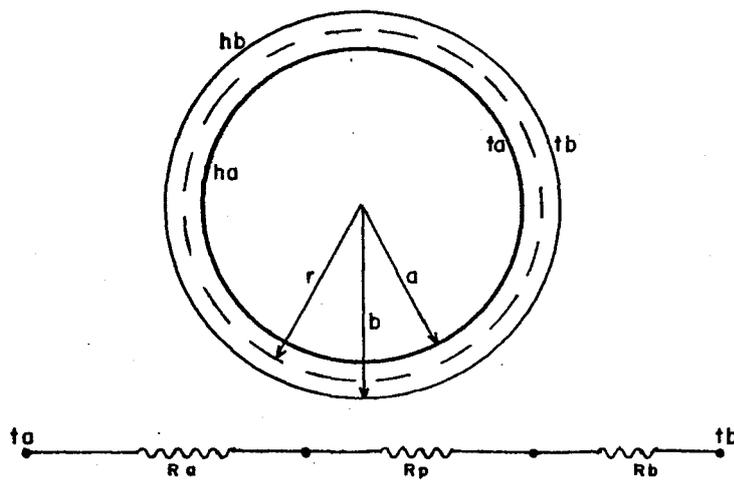


Figura : A 2 — CIRCUITO DE RESISTÊNCIA TÉRMICA PARA O CILINDRO DE PAREDE ÔCA /17/

4. DETERMINAÇÃO DOS PRODUTOS RC QUE COMPÕE O CIRCUITO TÉRMICO

4.1 Cálculo do Número de Reynolds

O número de Reynolds foi calculado para determinar o tipo de escoamento na tubulação.

A fórmula que determina o número de Reynolds /16/ , /17/ , /18/ , é:

$$\text{Red} = \frac{VD\rho}{u} \quad (\text{Eq. 5.A})$$

onde:

V é a velocidade média dentro da tubulação;

D é o diâmetro do condutor;

ρ é a densidade do fluido;

u é a viscosidade absoluta do fluido.

Para os valores de teste, encontra-se $\text{Red} = 43.900$, determinando portanto, um regime turbulento.

4.2 Cálculo de ha

O valor encontrado para o número de Reynolds sugere para o cálculo de ha /16/ a fórmula:

$$h_a = 0,023 \frac{v^{0,8} K_a}{D^{0,2} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{0,8}} \quad (\text{Eq. 6.A})$$

4.3 Determinação de Ra.Ca.

Como foi visto anteriormente, $Ra = \frac{1}{h_a \cdot A_a}$ e $Ca =$
 $= c_{pa} \cdot \rho_a \cdot v_a.$

$$Ra.Ca. = \frac{c_{pa} \cdot \rho_a \cdot v_a}{h_a \cdot A_a}$$

$$Ra.Ca. = \frac{c_{pa} \cdot \rho_a \cdot \pi \cdot a^2 \cdot v_a}{h_a \cdot 2 \cdot \pi \cdot a \cdot l}$$

$$Ra.Ca. = \frac{c_{pa} \cdot \rho_a \cdot a \cdot v_a}{2 h_a} \quad (\text{Eq. 7.A})$$

Para os valores da tubulação (a), para h_a determinado acima e para c_{pa} e ρ_a encontrados em tabelas /19/, /20/, determina-se $Ra.Ca. = 0,11 \text{ seg}$ para o ponto onde está localizado o extensômetro oito e o extensômetro quatro.

4.4 Determinação de Rp.Cp.

Sabe-se que $Rp = \frac{\ln \frac{b}{a}}{2\pi K l}$ e que $Cp = c_{pp} \cdot \rho_p \cdot v_p.$

$$Rp.Cp. = \frac{\ln \frac{b}{a}}{2\pi K l} \cdot c_{pp} \cdot \rho_p \cdot \pi \cdot (b^2 - a^2) l$$

$$Rp.Cp. = \frac{\ln \frac{b}{a} \cdot c_{pp} \cdot \rho_p \cdot (b^2 - a^2)}{2K} \quad (\text{Eq. 8A})$$

Para os valores da tubulação b e a, e para os valores de K, c_{pp} e ρp , encontrados nas tabelas /16/ e /17/, determina-se $R_p.C_p = 1,5$ seg para o ponto onde está localizado o extensômetro oito e 4,7 seg para o ponto onde está o extensômetro quatro.

5. ESTIMATIVA DOS GRADIENTES DE TEMPERATURA

5.1 Aquecimento da Parede Interna do Tubo

A temperatura que o tubo atinge no tempo θ é dada pela expressão:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\left(\frac{1}{Ra.Ca.}\right)\theta} \quad (\text{Eq. 9.A})$$

Substituindo nesta expressão os valores do teste encontra-se os gradientes de temperatura que são mostrados na Tabela 1. Estes valores são os mesmos para os pontos da tubulação onde estão os extensômetros quatro e oito.

5.2 Variação da Temperatura na Parede Externa do Tubo

Através da analogia de um circuito elétrico RC e do

circuito térmico em questão, chega-se a:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = 1 - e^{-\left(\frac{1}{R_p \cdot C_p}\right) \theta} \quad (\text{Eq. 10.A})$$

Os valores obtidos desta fórmula para o ponto onde está o extensômetro oito, são mostrados na Tabela 3. Os valores para o ponto onde está instalado o extensômetro quatro, são mostrados na Tabela 2.

5.3 Transferência do Calor do Tubo para o Ambiente

Verifica-se experimentalmente (Figura 54) que o valor máximo atingido pela temperatura na superfície externa do tubo é da ordem de 140°C. Isto se deve ao fato do tubo não estar isolado em sua face externa e, portanto, trocando calor com o meio ambiente.

6. DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES

6.1 Tensões Devidas ao Gradiente de Temperatura ao Longo do Raio

A teoria da elasticidade /15/, /19/, /20/ mostra co

mo deve ser o cálculo das tensões térmicas num cilindro oco .
 Desta teoria resulta uma fórmula geral para a tensão radial e
 outra para a tensão tangencial. Destas duas fórmulas, a que se
 rá utilizada neste trabalho é a da tensão tangencial, já que
 a tensão radial não é detectada pelo extensômetro. Esta fórmu
 la é:

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu} \left[\frac{1}{r^2} \int_a^r \alpha \cdot T_1 r \cdot dr + \frac{r^2 + a^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \int_a^b \cdot T_1 r \cdot dr - \alpha T_1 \right]$$

(Eq. 11.A)

onde:

- E é o módulo de elasticidade do material do tubo;
- μ é o coeficiente de Poisson;
- r é o raio cujos limites são a e b;
- a é o raio interno do cilindro;
- α é o coeficiente de dilatação linear do material do tubo;
- T_1 é a distribuição da temperatura a uma distância r num instante θ .

A fórmula geral que permite avaliar a distribuição da temperatura T_1 em função de um instante θ e de um raio r, é:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = 1 - e^{-\frac{\theta}{RC}}$$

O máximo gradiente de temperatura ocorre aproximadamente 0,5 seg após o início do teste. Deve ser lembrado que este valor de 0,5 seg é o tempo gasto para a temperatura da superfície interna do tubo atingir 99% da temperatura do vapor e não o tempo que deverá ser empregado na fórmula anterior. Para a utilização da fórmula anterior, o tempo tomado foi $\theta = 0,1$ seg e, das condições de teste $\Delta T = T_0 - T_\infty = 136^\circ\text{C}$.

Tomando-se a massa como função do raio para o cálculo de C e, fazendo-se $\theta = 0,1$ seg e ainda levando-se em consideração os outros parâmetros que envolvem o teste (raio interno, raio externo, material da tubulação), determina-se T como sendo:

$$T = T_\infty - \Delta T \left(1 - e^{-\frac{0,27}{2,36r^2 - 10,48}} \right) \quad (\text{Eq. 12.A})$$

Como pode ser visto pela equação 11.A, a integral que tem de ser resolvida é:

$$I = \int_a^b \alpha \cdot T_1 \cdot r \cdot dr \quad (\text{Eq. 13.A})$$

$$I = \int_a^b \alpha r \left[T_\infty + \Delta T \left(1 - e^{-\frac{0,27}{2,36r^2 - 10,48}} \right) \right] dr$$

$$I = \int_a^b \alpha r T_\infty dr + \int_a^b \alpha r \Delta T dr - \int_a^b \Delta T \alpha r e^{-\frac{0,27}{2,38r^2 - 10,48}} dr$$

Fazendo:

$$I_1 = \int_a^b \alpha r T_\infty dr ; I_2 = \int_a^b \alpha r \Delta T dr ; I_3 = \int_a^b \Delta T \alpha r e^{-\frac{0,27}{2,36r^2 - 10,48}} dr$$

Vem:

$$I_1 = \int_{2,14}^{2,54} 13 \times 10^{-6} \times 24 \cdot r \cdot dr = 312 \times 10^{-6} \times 0,94 = 292,03 \times 10^{-6}$$

$$I_2 = \int_{2,14}^{2,54} 13 \times 10^{-6} \times 136 r \cdot dr = 1768 \times 10^{-6} \times 0,94 = 1661,92 \times 10^{-6}$$

Fazendo

$$I_3' = \int_a^b e^{-\frac{0,27}{2,36r^2 - 10,48}} r \cdot dr \quad \text{e resolvendo-a por método}$$

numérico, tem-se:

$$I_3' = 0,79. \text{ Daí, } I_3 \text{ é:}$$

$$I_3 = 0,79 \times 13 \times 10^{-6} \times 136 = 1396,72 \times 10^{-6}$$

A integral I é, portanto:

$$I = I_1 + I_2 - I_3 = (292,03 + 1661,92 - 1396,72) \times 10^{-6}$$

$$I = 557,0 \times 10^{-6}.$$

De posse deste valor, o cálculo da tensão tangencial devido ao gradiente de temperatura radial pode ser calculada como:

$$\sigma_t = \frac{2,1 \times 10^6}{1-0,3} \left[\frac{1}{2,54^2} \times 557 \times 10^{-6} + \frac{2,54^2 + 2,14^2}{2,54^2 (2,54^2 - 2,14^2)} \times 557 \times 10^{-6} - 13 \times 10^{-6} \times 33 \right]$$

$$\sigma_t = 3 \times 10^6 (0,16 \times 557 \times 10^{-6} + 0,91 \times 557 \times 10^{-6} - 429 \times 10^{-6})$$

$$\sigma_t = 500,97 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

6.2 Deformação Devido a σ_t

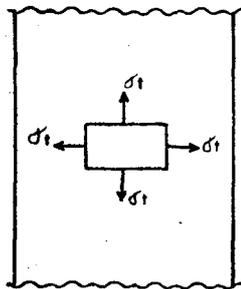


Figura : A3 — TENSÕES ATUANTES

$$\epsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} - \mu \frac{\sigma_t}{E} = \frac{\sigma_t}{E} (1 - \mu)$$

Para os valores obtidos, tem-se:

$$\epsilon_t = \frac{500,97}{2,1 \times 10^6} (1 - 0,3) = 166,9 \times 10^{-6} \cong 167 \mu\text{d.}$$

6.3 Cálculo da Tensão e Deformação Devido à Pressão Interna Estática

A tensão transversal é, como se sabe /15/, dada por:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot r}{e}$$

onde:

p é a pressão interna;

r é o raio interno;

e é a espessura da parede da tubulação.

Para os valores de tubulação em estudo:

$$\sigma_t = 26,75 \text{ kgf/cm}^2$$

A tensão longitudinal é dada pela fórmula:

$$\sigma_l = \frac{1}{2} \sigma_t$$

$$\text{Portanto, } \sigma_l = 13,38 \text{ kg/cm}^2.$$

Estas tensões provocam no extensômetro oito as deformações:

$$\epsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} = 12,74 \text{ } \mu\text{d}; \quad \epsilon_l = \frac{\sigma_l}{E} = 6,37 \text{ } \mu\text{d}.$$

Atuando conjuntamente, a solicitação ao extensômetro oito é:

$$\epsilon = 12,74 - 0,3 \times 6,37 = 10,83 \text{ } \mu\text{d}.$$

6.4 Cálculo das Tensões e Deformações Devido ao Grau de Engastamento de Estrutura

Para um tempo acima de 10,5 segundos, não existe um gradiente térmico ao longo do raio e a pressão interna é estática e o efeito da tensão térmica é devido ao engastamento.

A deformação devido ao engastamento pode ser calculada pela fórmula:

$$\epsilon = -\alpha\Delta T = -13 \times 10^{-6} \times 140 = -1820 \text{ } \mu\text{d.}$$

Este valor se refere a um engastamento perfeito.

A deformação que solicitaria o extensômetro oito se a tubulação fosse perfeitamente engastada, seria:

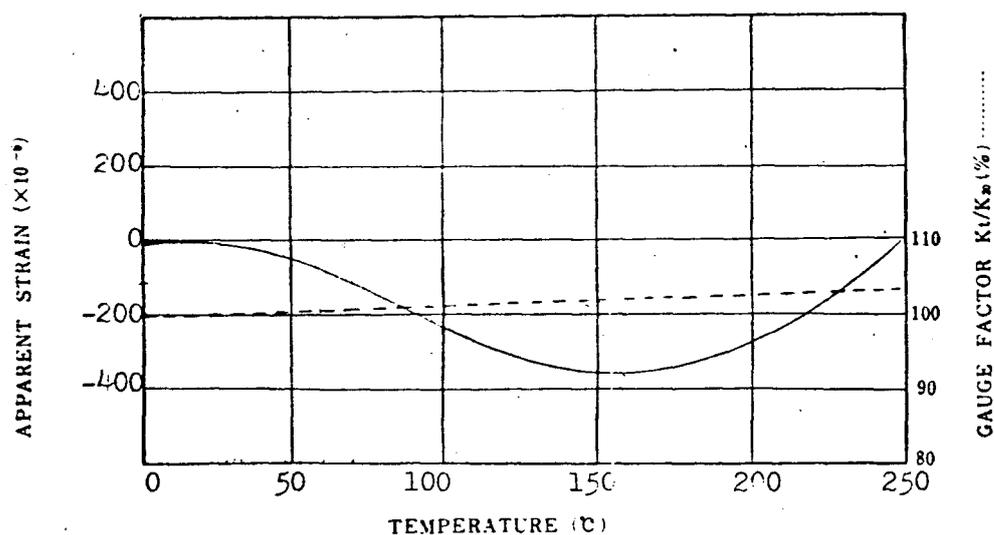
$$\epsilon = +1820 \times 0,3 = 546 \text{ } \mu\text{d.}$$

A este valor de 546 μd deve ser somado 10,83 μd , para se obter a deformação total atuante sobre o extensômetro oito, após o tempo de 10,5 seg. Acontece que o valor lido é menor que este (Gráfico 58).

Esta diferença é motivada pelo grau de engastamento muito menor que o do engastamento perfeito.

APÊNDICE "B"
=====

GAUGE TYPE: NFLA-6-17
 LOT NO.: 270711
 ADHESIVE TYPE: NP-50
 TEST OBJECTS: Stainless Steel



TML Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.

Figura : 68 — CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS EXTENSÔMETROS USADOS

Obs.: A curva da deformação aparente em função da temperatura para estes extensômetros da TML foi traçada com $K = K^*$. É por este motivo que a fórmula da página 143 se apresenta simplificada.

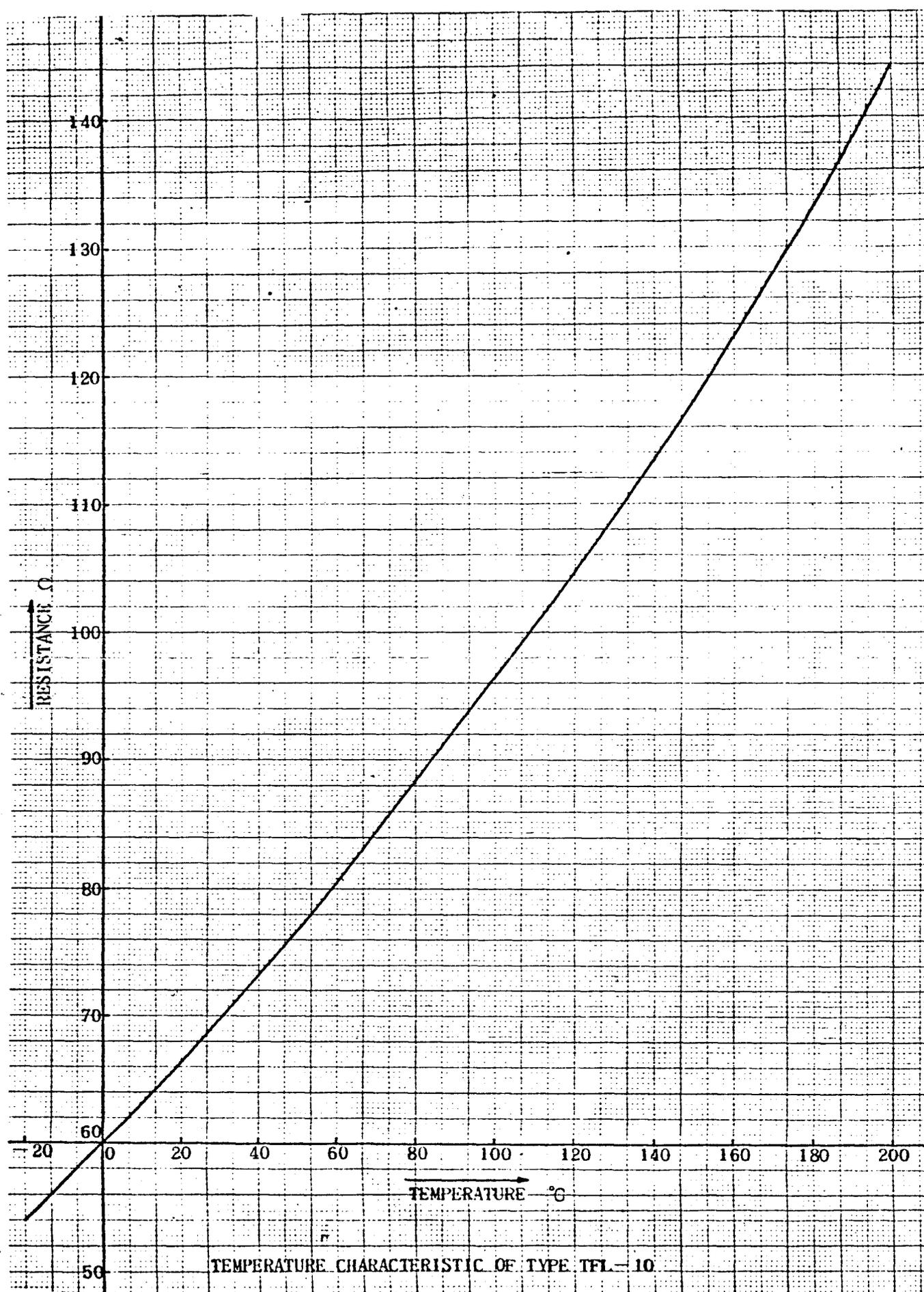


Figura: 69 — CURVA CARACTERÍSTICA DO SENSOR DE TEMPERATURA

COMPATIBLE ADHESIVES &
OPERATIONAL TEMPERATURE RANGE

- P-2 -20~180°C
- CN -20~100°C
- NP-50 -20~200°C

* TEMPERATURE GAUGE—SERIES "T"

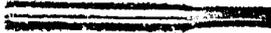
Gauge Pattern (actual size)	Type	Dimensions (mm)		Resistance at 0°C (Ω)	Temperature Range (°C)	Sensitivity (approx.)	Gauges per Package
		Gauge Length Width	Base				
	TFL-10	10×5	18×7	A 602±0.1 B 600±0.1 C 598±0.1	-20~200	0.43Ω/°C (80~200°C) 0.34Ω/°C (-20~80°C)	10
 ($\frac{1}{2}$)	TMS	—	φ8×45	60	-20~100 2m Leads attached	0.31Ω/°C	5
 ($\frac{3}{8}$)	TK	—	φ15×50	120 Ω Half-bridge	-20~100 2m Leads attached	50×10 ⁻⁶ /°C	1

Figura 70 - Características dos sensores de temperatura.

Tabela 5 - Valores das Grandezas Físicas Utilizadas

Coefficiente de dilatação linear do aço inox:

$$\alpha = 17,3 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \quad /21/$$

Coefficiente de dilatação linear do aço carbono:

$$\alpha = 12,1 - 13,0 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \quad /21/$$

Temperatura de balanceamento da ponte de Wheatstone:

$$T = 26^{\circ}\text{C}$$

Velocidade média do fluido:

$$V = 2800 \text{ m/s} = 91,87 \text{ pes/seg}$$

Diâmetro interno da tubulação:

$$D_i = 4,28 \text{ cm}$$

Diâmetro externo da tubulação:

$$D_{ext} = 5,08 \text{ cm}$$

Densidade do vapor d'água:

$$\rho = 0,0328 \text{ lbm/pe}^3 \quad /16/$$

Viscosidade absoluta do vapor d'água:

$$\mu = 1,0 \times 10^{-5} \frac{\text{lbm}}{\text{pe} \cdot \text{seg}} \quad /16/$$

continua ...

Continuação da Tabela 5 ...

Calor específico à pressão constante do vapor d'água:

$$C_p = 0,456 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm } ^\circ\text{F}} \quad /16/$$

Condutibilidade térmica do vapor d'água a 300^oF:

$$K = 0,0171 \frac{\text{BTU}}{\text{h pe } ^\circ\text{F}} \quad /16/, /17/$$

Condutibilidade térmica do aço carbono:

$$K = 25,5 \frac{\text{BTU}}{\text{h pe } ^\circ\text{F}} \quad /17/$$

Calor específico do aço carbono:

$$C_p = 0,13 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm } ^\circ\text{F}} \quad /17/$$

Densidade do aço carbono:

$$\rho = 490 \frac{\text{lbm}}{\text{pe}^3} \quad /17/$$

Coefficiente de transmissão de calor convectivo do ar
à temperatura de 20 - 30^oC:

$$h_b = \frac{2\text{BTU}}{\text{h pe}^2 ^\circ\text{F}} \quad /16/$$

BIBLIOGRAFIA

- /1/ Enciclopedie Vishay D'Analyse Des Contraintes.
- /2/ Experimental Stress Analysis and Motion Measurement
Richard C. Dove, Paul H. Adams.
- /3/ Experimental Stress Analysis. James W. Dally ,
William F. Riley.
- /4/ Fotoelasticidad Tomo I. Max Mark Frocht.
- /5/ Uma Contribuição ao Estudo das Medidas das Tensões
em Estruturas e ao Ensaio de Motoniveladores. Sér
gio Sartori.
- /6/ Análise Experimental de Tensões. Extensometria .
C.D.T.N.
- /7/ Manual Phillips de Extensometria.
- /8/ The Strain Gage Primer. C.C. Perry, H.R. Lissner.
- /9/ Micro-Measurements - Strain Gage Excitation Levels.
- /10/ Micro-Measurements - Strain Gage Selection.
- /11/ Análise Experimental de Tensões, Vol. I. J.Lobo Fia
lho.
- /12/ Micro-Measurements - Strain Gage Temperatura Ef
fects.
- /13/ Introdução à Resistência dos Materiais. Otávio Gas
par Ricardo.

- /14/ Cálculo de Rosetas (I). Walter Celso Lima.
- /15/ Teoria de La Elasticidad. S. Timos Henko, J.N.Goodier.
- /16/ Princípios de Transmissão de Calor. Frank Kreith.
- /17/ Ingenieria de Reatores Nucleares. Samuel Glasstone,
Alexander Seasonske.
- /18/ Mecânica dos Fluidos e Hidráulica. Ronald V. Giles.
- /19/ Applied Elasticity. Chi-Teh Wang, ScD.
- /20/ Analisis de La Tension Térmica. D.J. Johns.
- /21/ HandBook of Chemistry and Physics.