

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**ESTUDO ANALÍTICO EXPERIMENTAL DE TENSÕES  
EM UM DESAERADOR DE USINA TERMELÉTRICA**

Nilton da Silva Maia

**Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico - Comportamento Mecânico dos Materiais

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
Fevereiro de 1998



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel: +55 31 499.5145, Fax: +55 31 443.3783  
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

## “Estudo Analítico Experimental de Tensões em um Desaerador de Usina Termoelétrica”

**NILTON DA SILVA MAIA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

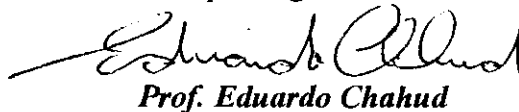
Dissertação aprovada em: 18 de fevereiro de 1998.

Por:



*Prof. Eduardo Bauzer Medeiros*

Orientador – Doutor - Deptº Engenharia Mecânica – E.E.UFMG



*Prof. Eduardo Chahud*

Examinador – Doutor - Deptº Engenharia de Estruturas – E.E.UFMG



*Prof. Ernani Sales Palma*

Examinador – Doutor - Deptº Engenharia Mecânica – E.E.UFMG



*Tanius Rodrigues Mansur*

Examinador – Mestre – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN

***“Um problema só surge quando estão  
presentes todas as condições para solucioná-lo”***

***Karl Max***

***À minha avó Dolores da Costa Prado (In memoriam)***

*Gostaria de agradecer a todos que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho e em especial às seguintes pessoas:*

*ao Bauzer,  
ao Denis,  
ao Emerson,  
ao Expedito,  
ao Geraldo Scoralick,  
ao Geraldo de Paula,  
ao Humberto,  
ao Iglesias,  
ao Jefferson,  
ao José Antônio,  
ao José Lúcio,  
ao José Marcos,  
ao Liessi,  
ao Marco Antônio,  
ao Múcio,  
ao Nirlando,  
ao Roberto,  
ao Rogério,  
à Márcia,  
à Marli,  
ao Osmar,  
ao Paulo de Tarso,  
ao Santiago,  
ao Tanius,  
ao Vlami,  
ao Wellington,*

*Gostaria de agradecer também o apoio institucional dado pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN e à Companhia Energética de Minas Gerais, em cujas dependências foi desenvolvida toda a parte experimental deste trabalho.*

## RESUMO

Vasos desaeradores operam em condições que variam entre extremos de temperatura e pressão, e simultaneamente com água e vapor. Como consequência tensões cíclicas afetam a estrutura bem como sua exposição ao ambiente. Além disso uma usina termelétrica não pode ser normalmente parada para inspeção de um de seus vasos de pressão, sem que haja queda no fornecimento de energia elétrica, causando prejuízos a uma determinada região.

Esta dissertação avalia as tensões principais em um desaerador típico operando em uma usina termelétrica. O problema das tensões principais é analisado primeiro numericamente e posteriormente por meio de extensômetros elétricos. Os principais resultados aqui apresentados indicam a necessidade de monitoração constante, pois a literatura tem mostrado que o vaso desaerador algumas vezes trabalha fora das condições ideais de projeto. Além disto, existem os efeitos da corrosão, os quais são difíceis de serem analisados e que podem modificar as tensões ao longo da vida útil do vaso desaerador.

Finalmente, são organizadas sugestões as quais devem ser úteis na confecção de um guia estabelecendo procedimentos práticos numa Usina Termelétrica.

## **ABSTRACT**

Deaerator vessels operate in conditions which vary between extremes of temperature, pressure, and simultaneously with water and steam. As a consequence, cyclic stresses develop in a structure which is additionally affected by weather exposure. Additionally, a powerplant cannot normally be stopped for inspection of one of its pressure vessels, since energy "blackouts" or even more serious consequences would certainly take place. The resulting engineering problem is complex, requiring considerable skill and good judgement

The present dissertation addresses the problem of stress evaluation in a typical deaerator operating in a thermoelectric powerplant. It addresses the stress analysis problem which is initially numerically evaluated, and at a further stage by means of a strain gauge set-up. The main results which are presented clearly indicate the need for constant monitoring, since this experience has shown that deaerator vessels can sometimes operate outside the originally intended condition. Also it is usually difficult to analyse the effects of corrosion, and how it can impose stress modifications along the lifetime of the vessel.

Finally, the previous considerations are organised as recommendations which should hopefully provide a useful guide in establishing practical procedures inside a thermoelectric plant.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Descrição do problema e dos objetivos .....	1
1.2 Motivação para desenvolvimento do trabalho.....	3
1.3 Contribuição do trabalho .....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 Extensômetros elétricos .....	4
2.1.1 Critérios e recomendações para a escolha de extensômetros.....	4
2.1.2 Seleção de parâmetros .....	5
2.1.2.1 Escolha da liga metálica.....	5
2.1.2.2 Escolha de uma compensação .....	5
2.1.2.3 Escolha do material de fabricação do suporte.....	6
2.1.2.4 Escolha do comprimento do elemento sensor.....	6
2.1.2.5 Escolha de um arranjo geométrico de elementos sensores sobre o suporte.....	7
2.1.2.6 Escolha da resistência elétrica do elemento sensor .....	8
2.2 Adesivos e outros materiais .....	8
2.2.1 Adesivos.....	8
2.2.2 Cabos de conexão.....	9
2.2.3 Solda para conexão dos cabos aos extensômetros .....	9
2.2.4 Coberturas Protetoras.....	10
2.3 Procedimentos de instalação .....	10
2.3.1 Preparo da superfície .....	10
2.3.2 Preparo de adesivos e procedimentos de colagem de extensômetros.....	11
2.3.3 Proteção dos extensômetros .....	11
2.4 Soldagem dos Extensômetros .....	13
2.5 Cabos .....	13
2.6 Instrumentação para extensometria .....	13

2.7 Correção de resultados .....	14
2.7.1 Correção dos resultados associados à variação da temperatura.....	15
2.7.1.1 Efeitos de temperatura sobre o extensômetro.....	15
2.7.1.2 Compensação para a deformação aparente.....	18
2.7.1.3 Procedimentos de correção.....	19
2.7.2 Erros de alinhamento .....	22
2.7.3 Correção dos resultados relativamente à sensibilidade transversal dos extensômetros.....	25
2.7.4 Correção dos resultados devido a não linearidade da ponte de Wheatstone ...	29
2.7.5 Correção dos resultados devido à resistência dos fios.....	29
 3. DEFORMAÇÕES E TENSÕES .....	 31
3.1 Detalhamento das medidas com extensômetros elétricos .....	31
3.1.1 Utilização de um só extensômetro.....	31
3.1.2 Utilização de dois extensômetros .....	32
3.1.3 Rosetas.....	32
3.1.3.1 Roseta retangular ou estrela.....	34
3.1.3.2 Roseta equiangular ou delta.....	35
 4. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL .....	 37
4.1 Manutenção Preditiva .....	37
4.2 Integridade Estrutural.....	40
4.2.1 Avaliação de Integridade Estrutural (AIE) .....	40
4.2.2 Itens de uma Avaliação de Integridade Estrutural.....	41
4.3 Conceitos e terminologia utilizados na avaliação de integridade estrutural .....	41
4.3.1 Conceito de Vida Útil.....	41
4.3.2 Monitoração.....	42
4.3.3 Danos.....	42
4.3.4 Mecanismo de Acumulação de Danos.....	42
4.4 Critérios de projeto.....	43
4.5 Margens de segurança.....	43



4.5.1 Métodos de análise .....	44
4.5.2 Propriedades dos materiais.....	44
4.5.3 Dimensões seccionais .....	45
4.5.4 Qualidade .....	45
4.5.5 Tensões residuais.....	45
4.5.6 Variações de comprimento.....	45
4.5.7 Condições de serviço .....	46
4.5.8 Tipos de danos .....	46
4.6 Modos de danos .....	46
4.7 Critérios de escoamento.....	47
4.8 Critério plástico .....	47
4.9 Critérios de fratura.....	51
4.10 Critérios da fadiga.....	51
4.11 Critérios da deformação.....	53
4.12 Outros critérios.....	53
<b>5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>54</b>
5.1 Identificação dos pontos a monitorar .....	54
5.2 Extensômetros.....	55
5.3 Adesivos.....	56
5.4 Sensores de Temperatura.....	56
5.5 Cablagem.....	57
5.6 Sensores de Deslocamento.....	57
5.7 Localização do Vaso Desaerador .....	58
5.8 Instalação dos Extensômetros .....	58
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
6.1 Resultados computacionais .....	63
6.1.1 Simulação do comportamento global das tensões via programa ANSYS .....	63
6.1.2 Simulação do comportamento das tensões principais via programa ANSYS para os pontos a serem monitorados.....	67

6.2 Resultados experimentais.....	68
6.3 Propriedades do material do vaso desaerador.....	75
7. CONCLUSÕES.....	76
8. SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO.....	78
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
10. ANEXOS .....	81
10.1 ANEXO A: Descrição da Instrumentação Utilizada .....	81
10.2 ANEXO B: Dados da Usina Térmica de Igarapé.....	82

## NOTAÇÃO

$\psi$  = ângulo entre a deformação principal máxima e o eixo onde se vai medir a deformação

$\varepsilon$  = deformação unitária

$\varepsilon_1$  = deformação lida, não corrigida para a deformação aparente ou fator de conversão com a temperatura

$\varepsilon_{app}$  = deformação aparente na temperatura do ensaio para o material onde está colado o extensômetro

$\varepsilon_{app>L}$  = deformação aparente obtida a partir da curva fornecida pelo fabricante

$\varepsilon_m$  = deformação mecânica

$\varepsilon_{máx}$  = deformação máxima

$\varepsilon_{mín}$  = deformação mínima

$\varepsilon_t$  = deformação normal ao longo da direção transversal do extensômetro

$\sigma_1$  = tensão principal máxima

$\sigma_3$  = tensão principal mínima

$\sigma_{adm}$  = tensão admissível

$\sigma_{crit}$  = tensão crítica

$\sigma_{esc}$  = tensão limite de escoamento.

$\sigma_{rup}$  = tensão de ruptura

$\sigma_{máx}$  = tensão mecânica máxima atuante

$\sigma_{mín.}$  = tensão mecânica mínima atuante

$\mu$  = coeficiente de Poisson

$\mu d$  = microdeformação

$\gamma$  = coeficiente térmico de resistividade do fio em expansão

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear do extensômetro

$\beta$  = coeficiente de dilatação linear (valor médio no intervalo de temperatura  $\Delta T$ ) da estrutura sobre o qual o extensômetro está colado

$\beta_L$  = coeficiente de dilatação linear (valor médio no intervalo de temperatura  $\Delta T$ ) do material sobre o qual o extensômetro foi colado para a confecção da curva fornecida pelo fabricante

$\theta$  = coeficiente de resistividade

$\rho$  = resistividade do material

$\Delta L_{ext}$  = expansão livre do extensômetro

$\Delta K(\%)$  = variação percentual do fator de conversão para a temperatura de ensaio

$\Delta L_m$  = expansão livre do material sob teste

$\Delta R$  = variação da resistência elétrica

$\Delta T$  = diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura para a qual o circuito da ponte foi balanceado

AIE = avaliação de integridade estrutural

ANSYS = programa de simulação computacional

CDTN = Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CEMIG = Companhia Energética de Minas Gerais

DELPHI = linguagem computacional

E = módulo de elasticidade ou módulo de young do material

f = fator de forma

FC = fator de carga

FFT = transformada rápida de fourier

G = módulo de elasticidade transversal do material

I = corrente elétrica

K = variação da sensibilidade do extensômetro

K(TE) = fator de conversão à temperatura de ensaio

$K_a$  = sensibilidade axial do extensômetro

$K_e$  = fator de conversão efetivo do extensômetro ligado por uma linha de resistência não nula.

$K_t$  = sensibilidade transversal do extensômetro

KYOWA = fabricante de extensômetros e sensores à base de extensômetros

Lu = carga de colapso ou carga de dano

$M_{pl}$  = momento plástico

$M_{ys}$  = momento de primeiro escoamento

$n$  = erro absoluto, em microdeformações

$P$  = potência elétrica

QFRA-3 = roseta retangular

$R$  = resistência elétrica

$R_e$  = resistência elétrica do extensômetro

$R_f$  = resistência total da linha em série com o extensômetro de um braço da ponte

$\Delta R_e$  = variação de resistência do extensômetro

STC = coeficiente de compensação de temperatura

$T$  = temperatura

$T1$  = tensão principal máxima

$T3$  = tensão principal mínima

TML = Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.

$V$  = tensão elétrica aplicada

## 1. INTRODUÇÃO

Os equipamentos existentes em usinas termelétricas devem atender a uma série de requisitos de confiabilidade e segurança, combinados ao fator custo e aspectos de operação destes equipamentos. As grandezas físicas envolvidas também costumam representar condições de operações mais críticas do que em sistemas de menor porte. Além disto, paradas no sistema são praticamente impossíveis, só podendo ocorrer em casos (não desejáveis) de catástrofe. Pelas razões anteriores, é necessário estabelecer um controle adequado da operação de toda a usina, em particular dos componentes sujeitos a condições de operação crítica.

Para o planejamento da operação de uma usina deve ser estabelecida uma análise onde se determine o método de acompanhamento e manutenção de componentes e sistemas, em particular aqueles sujeitos à “operação crítica”. A partir desta primeira avaliação e do tipo de componente/sistema envolvido pode então ser definido o planejamento de operação. O tipo de acompanhamento que uma parte do sistema necessita depende também da técnica mais eficiente para um determinado tipo de problema. Este tipo de análise revelou que o vaso desaerador de uma usina termelétrica é um componente que necessita de monitoração regular. Diversos casos de falha tem sido relatados [1] para este componente, o que pode resultar em conseqüências catastróficas não só para o fornecimento, mas também para a segurança de operação de toda a usina.

Para estudar o problema do vaso desaerador da Usina Termelétrica de Igarapé, a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) se uniu ao CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) para efetuar a Avaliação de Integridade Estrutural deste componente. Partiu-se para uma caracterização mecânica do vaso desaerador, por meio de inspeção visual e ensaios não destrutivos com o objetivo de identificar e avaliar as trincas com posterior correção. Para dar continuidade a essa caracterização mecânica do vaso desaerador, montou-se um complexo sistema de monitoração baseado em extensometria obtendo-se assim as tensões principais atuantes em serviço.

### 1.1 Descrição do problema e dos objetivos

O desaerador de uma usina termelétrica é um vaso de pressão que tem como finalidade minimizar a concentração de oxigênio e outros gases na linha de alimentação da caldeira. Esquema típico é mostrado na Figura 1. Diversos modos de falhas e problemas de operação estão relatados na literatura [1], variando de problemas mais simples como desaeração insatisfatória (para o oxigênio é comum recomendar-se uma concentração menor que 10 ppb) até problemas mais graves envolvendo falhas estruturais. A operação adequada do desaerador pode ser garantida através de projeto bem elaborado e uma garantia de condições de operação normal, tais como evitar entradas não programadas de água fria, temperaturas de operação inadequadas, obstrução de entradas de dutos, etc. A questão de integridade estrutural é porém mais grave e mais complexa, demandando

monitoração constante das condições de operação, bem como inspeção regular do estado dos componentes.

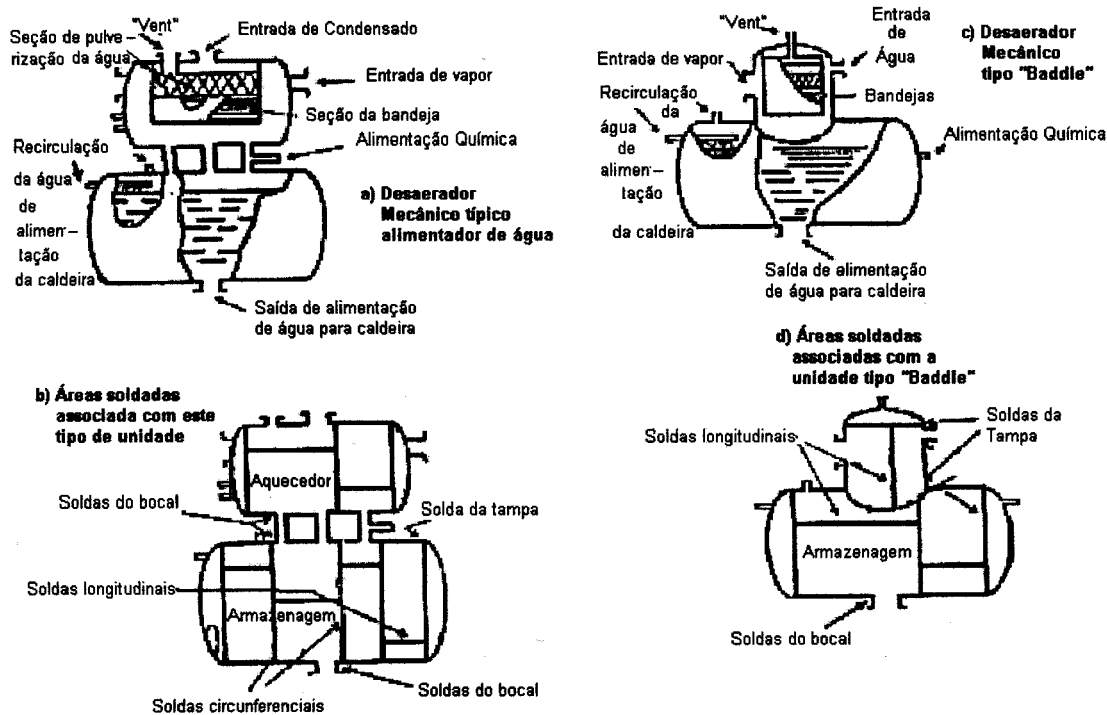


Figura 1 - Esquemas típicos de um vaso des aerador [1]

O vaso des aerador está sujeito, durante a sua operação, a tensões provenientes do seu peso próprio, sua carga, cargas térmicas e de pressões aplicadas, normais ou decorrentes de operação não programada, e fatores externos ao sistema que possam provocar alteração no campo de tensões. Nesta última categoria, está principalmente colocada a questão da corrosão deste vaso, apontada pela maioria dos trabalhos como a principal causa de falha estrutural [1]. Para garantir a segurança de operação, o sistema deve receber acompanhamento contínuo com monitoração e avaliação do campo de tensões durante a vida útil do equipamento.

Neste trabalho, o objetivo principal foi estabelecer um programa de monitoração e análise de tensões para um vaso des aerador em operação em uma usina termelétrica, de modo a permitir uma avaliação correta do campo de tensões ao longo do tempo e coletar dados para uma futura avaliação da integridade estrutural. Esta monitoração foi efetuada através do acompanhamento das tensões de serviço, nos pontos determinados pelos modelos de simulação computacional.

## 1.2 Motivação para desenvolvimento do trabalho

Entre os diversos vasos de pressão utilizados em uma usina termelétrica, pode-se citar o vaso desaerador como um dos componentes que apresenta alguns dos maiores problemas de variação de condições de operação, principalmente durante a partida do sistema.

A função do vaso desaerador no ciclo de uma instalação a vapor é reduzir, a níveis aceitáveis, o oxigênio e outros gases dissolvidos da água de alimentação da caldeira geradora de vapor.

Contaminações severas de oxigênio ocorrem na água de alimentação da caldeira geradora de vapor, quando ocorrem problemas mecânicos com os vasos desaeradores, bomba de alimentação, vedações nas gaxetas das turbinas e sistemas operando sob vácuo [1].

Um problema que existe nas instalações dessa natureza, é que o sistema não pode ser paralisado para inspeção, sem que ocorram graves prejuízos econômicos, por vezes à toda área que recebe energia elétrica da usina envolvida.

Além de problemas econômicos, a literatura indica a existência de falhas catastróficas em vasos desaeradores de usinas termelétricas similares, ocasionando vítimas fatais [1].

Para evitar que ocorram falhas deste tipo, é necessário conhecer o comportamento desse componente durante a operação.

A combinação destas circunstâncias indica claramente a necessidade do desenvolvimento de um método de acompanhamento das solicitações em um vaso desaerador.

## 1.3 Contribuição do trabalho

Este trabalho contribuirá para o desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de inspeção e monitoração em componentes mecânicos em operação visando verificar as condições reais de solicitação.

Em particular, para o caso do vaso desaerador, além de caracterizar mecanicamente o ambiente térmico, quantificando as temperaturas nos pontos analisados, permitirá uma operação mais segura após o estabelecimento de um programa mais consistente e periódico de inspeção com uma estimativa dos custos necessários, após avaliar os valores das tensões principais obtidas.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

A análise experimental de tensões constitui-se no emprego de técnicas experimentais para medir deformações, deslocamentos ou tensões atuantes em equipamentos sujeitos a diversos tipos de carregamentos, estáticos ou dinâmicos [2]. Essas técnicas podem ser subdivididas em dois grupos:

1. “Campo global”: são aquelas que permitem medir (geralmente com menor resolução) a distribuição de deformações e tensões numa grande área da estrutura. Dentre estas, destacam-se a Fotoelasticidade, a técnica do Verniz Frágil, a técnica de Moiré entre outras.
2. “Pontuais”: são utilizadas para estudar pontos específicos da estrutura. A principal delas é a extensometria, que utiliza extensômetro de resistência elétrica (strain gage) para medir deformações. A extensometria baseia-se na variação da resistência elétrica de um condutor quando deformado. Durante os ensaios, os extensômetros devem estar perfeitamente colados à superfície do equipamento, para que as deformações lhe sejam transmitidas sem atenuações.

Além do custo, uma grande vantagem dos extensômetros de resistência elétrica é poderem ser instalados em equipamentos que trabalham sob condições operacionais reais. Portanto, as deformações medidas são as verdadeiras deformações atuantes durante o funcionamento da estrutura [3].

### 2.1 Extensômetros elétricos

O extensômetro elétrico é baseado no princípio de variação de resistência elétrica de um fio ao variar seu comprimento, sob a ação de esforços [4]. Este fio é colado num suporte muito fino, que permite a sua colagem sobre a superfície a ser monitorada, de modo a acompanhar a deformação da mesma.

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

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

A seguir, apresentam-se critérios para utilização dos extensômetros.

#### 2.1.1 Critérios e recomendações para a escolha de extensômetros

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 ensaio e na economia total da instalação [4, 5, 6].

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:

- a) liga metálica da qual é composta o elemento sensor;
- b) material do suporte;
- c) comprimento do elemento sensor;
- d) arranjo do(s) elemento(s) sensor(es) sobre o suporte;
- e) coeficiente de compensação de temperatura do extensômetro (STC “self temperature compensation coefficient”);
- f) resistência elétrica do elemento sensor.

A escolha dos extensômetros é realizada, após o conhecimento das condições do teste, quais sejam:

- a) precisão desejada;
- b) estabilidade na medida;
- c) máxima deformação que se deseja medir;
- d) duração do teste;
- e) tolerância a carregamentos cíclicos que o extensômetro deve suportar;
- f) facilidade e simplicidade de instalação.

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

## 2.1.2 Seleção de parâmetros

### 2.1.2.1 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.

### 2.1.2.2 Escolha de uma compensação

A expressão “extensômetro autocompensado” caracteriza um extensômetro destinado a ser utilizado sobre um material com coeficiente de dilatação conhecido.

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

Conhecido o coeficiente de dilatação do material sobre o qual o extensômetro é colado, procura-se, dentre as opções oferecidas pelo fabricante, aquele que satisfaça esta condição.

### 2.1.2.3 Escolha do material de fabricação do suporte

Como a liga metálica do elemento sensor, o material do suporte não é um parâmetro especificável independentemente. Geralmente, os fabricantes oferecem vários tipos de materiais para suporte do elemento sensor, dentre eles:

- a) polyimide;
- b) epoxi;
- c) resina epoxy-phenolic com fibra de vidro;
- d) aço inox;
- e) etc.

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

### 2.1.2.4 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 2, é indicado o valor de deformação média entre os limites de localização do elemento sensor e o valor de deformação máximo é ignorado.

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

Conhecido o coeficiente de dilatação do material sobre o qual o extensômetro é colado, procura-se, dentre as opções oferecidas pelo fabricante, aquele que satisfaça esta condição.

### 2.1.2.3 Escolha do material de fabricação do suporte

Como a liga metálica do elemento sensor, o material do suporte não é um parâmetro especificável independentemente. Geralmente, os fabricantes oferecem vários tipos de materiais para suporte do elemento sensor, dentre eles:

- a) polyimide;
- b) epoxi;
- c) resina epoxy-phenolic com fibra de vidro;
- d) aço inox;
- e) etc.

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

### 2.1.2.4 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 2, é indicado o valor de deformação média entre os limites de localização do elemento sensor e o valor de deformação máximo é ignorado.

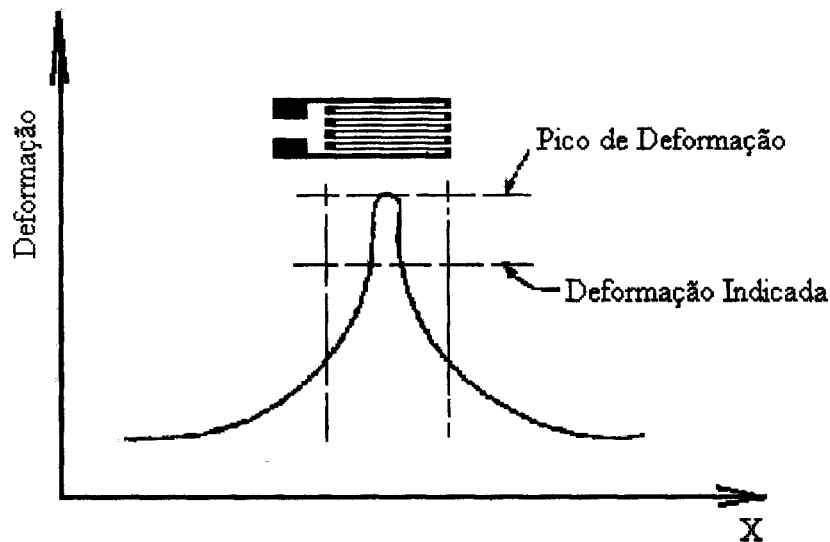


Figura 2 - Extensômetro sujeito a um elevado gradiente de deformação [5]

Como uma regra prática, o comprimento do elemento sensor não deve ser maior que 0,1 vezes o raio de um furo, entalhe ou uma dimensão correspondente de qualquer outro concentrador geométrico de tensões, no qual a deformação será medida. Entretanto, verifica-se, para extensômetros pequenos [6] 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.

Devem ser escolhidos sempre que possível extensômetros grandes, pois são de fácil manuseio e permitem maiores tensões de excitação. São também aplicáveis em materiais não homogêneos, como o concreto, onde valores de deformação realmente significativos só são obtidos mediante a tomada de uma amostra relativamente grande da superfície.

#### 2.1.2.5 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 aproximação.

Para um estado de tensão biaxial, é necessário o uso de extensômetro 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.

### 2.1.2.6 Escolha da resistência elétrica do elemento sensor

As medidas de deformação com extensômetro são realizadas geralmente através 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:

- a) se a temperatura do elemento sensor for muito maior que a do corpo de prova, o fator STC perde o seu significado pois todos os dados (relativos ao STC) fornecidos pelo fabricante são obtidos com baixos níveis de excitação;
- b) os efeitos provocados pela fluência do suporte são consideravelmente ampliados, uma vez que dependem sobretudo da temperatura do conjunto suporte/adensivo;
- c) pode ocorrer instabilidade no circuito da ponte, já que cada extensômetro conectado ao circuito pode dissipar calor de forma diferente.

Como a tensão de alimentação da ponte é mantida constante, a potência dissipada irá variar só com a variação da corrente. Se a resistência aumenta, a corrente diminui, e conseqüentemente diminui a potência dissipada. Isto indica que quanto maior é a resistência elétrica de um extensômetro, menores são os efeitos listados acima.

- a) adesivos à base de cianoacrilato, usados em instalações rápidas;
- b) adesivos à base de epóxi, usados em temperaturas mais elevadas ou medições mais precisas;
- c) adesivos à base de material cerâmico, usados em altas temperaturas.

Existem também colas nitro-celulósicas, que são utilizadas nos extensômetros com suporte de papel e aquelas à base de poliéster usadas em extensômetros com suporte de poliéster. Geralmente, os fabricantes de extensômetros disponibilizam catálogos que relacionam os extensômetros com os adesivos, bem como todas as propriedades das colas, necessárias à aplicação.

Os extensômetros com base metálica são fixados por meio de descarga elétrica (solda a ponto).

### 2.2.2 Cabos de conexão

Um extensômetro estando colado à estrutura deverá ser ligado aos instrumentos de medição através de cabos [5]. A escolha dos cabos de conexão é feita levando-se em consideração as seguintes condições de testes:

- a) temperatura;
- b) tipo de ensaio: estático ou dinâmico;
- c) arranjo dos extensômetros na ponte de Wheatstone;
- d) instrumentação utilizada;
- e) comprimento de fiação;
- f) condições de ruídos eletromagnéticos no local de ensaio.

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

- a) material isolante do cabo;
- b) tipo de fio (rígido ou flexível);
- c) número de condutores independentes no cabo;
- d) bitola;
- e) blindagem.

### 2.2.3 Solda para conexão dos cabos aos extensômetros

Em extensometria, a escolha das soldas está essencialmente ligada à temperatura de ensaio, portanto, o principal parâmetro que deve ser especificado para a solda é a sua temperatura de fusão [5, 8]. Entretanto, outras características devem ser observadas quando o extensômetro trabalha em condições especiais de temperatura, carregamento dinâmico, ambiente hostil, etc. Estas características são: resistência à fadiga, mudança 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 eles:

- a) soldando os finos fios do extensômetro diretamente nos fios de ligação;
- b) utilizando terminais impressos;
- c) soldando os fios de ligação diretamente ao extensômetro.

## 2.2.4 Coberturas Protetoras

O desempenho dos extensômetros é sensivelmente afetado pelo ambiente, o que normalmente exige uma proteção química/mecânica das instalações extensométricas [5, 8, 9]. Química porque as instalações devem ser protegidas contra umidade, ambientes corrosivos e, mecânicas porque deve-se proteger contra solicitações 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 todas situações.

## 2.3 Procedimentos de instalação

### 2.3.1 Preparo da superfície

Pode-se instalar extensômetros elétricos sobre quase todos os tipos de superfícies, desde que sejam corretamente preparadas [5; 9]. A preparação de uma superfície consta essencialmente de cinco etapas básicas, abaixo relacionadas:

- a) desengraxamento;
- b) abrasão;
- c) traçado das linhas de referência para orientação dos extensômetros;
- d) condicionamento químico;
- e) neutralização.

Entretanto, existem casos em que a superfície necessita de outros tipos de tratamento para se poder aplicar os extensômetros, como por exemplo pode-se citar o concreto.

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



- a) não tocar a superfície com os dedos;
- b) esfregar esponjas, gazes ou cotonetes sobre a superfície somente uma vez e apenas num sentido;
- c) não permitir que elementos contaminantes atinjam a superfície depois de preparada;
- d) evitar longos intervalos de tempos entre as operações de preparo, neutralização e a instalação dos extensômetros.

A maioria dos fabricantes de extensômetros fornecem a seqüência de preparo da superfície na qual ele será instalado e indicam os produtos que devem ser utilizados.

### 2.3.2 Preparo de adesivos e procedimentos de colagem de extensômetros

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

Dois tipos de adesivos são os mais utilizados em extensometria, adesivos à base de cianoacrilato e epóxi.

Estes adesivos polimerizam-se em torno de 2 minutos, existindo porém catalisadores que diminuem este tempo e não afetam o desempenho final do extensômetro, desde que convenientemente aplicados.

Os adesivos à base de epóxi geralmente são fornecidos em dois componentes (resina e catalisador) ou, na forma de uma mistura pré-catalisada 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 catalisador 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 pelo fabricante [5].

### 2.3.3 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 efetuada a instalação.

O desempenho do extensômetro pode ser gravemente afetado pelas condições ambientais, tais como:

- a) umidade;
- b) temperaturas;
- c) pressão hidrostática;
- d) radiação nuclear;
- e) água;
- f) gás corrosivo;
- g) abrasão;
- h) 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 restrição quanto à temperatura de utilização.

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

- a) contra umidade;
- b) temperaturas extremas;
- c) proteção mecânica.

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

- a) polyuretano em solução de xileno;
- b) resina acrílica em solução de tolueno;
- c) ceras impermeáveis à umidade;
- d) resinas de epóxi que polimerizam à temperatura ambiente;
- e) 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 o alcancem 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. As proteções mecânicas devem evitar a aplicação de cargas indesejadas diretamente sobre o extensômetro, ela é composta de uma cobertura metálica, além das outras coberturas impermeáveis utilizadas normalmente.

Quando se trata de instalações sujeitas a temperaturas extremas, as proteções são dos mesmos tipos que as anteriores. A diferença é que os produtos empregados devem

resistir à temperatura em questão, assim como o extensômetro, o adesivo, a solda e os fios de ligação.

## 2.4 Soldagem dos Extensômetros

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

A soldagem pode ser feita de três modos diferentes:

- a) soldando-se os fios do extensômetro aos fios de ligação;
- b) utilizando-se terminais impressos;
- c) soldando-se os fios de ligação diretamente no extensômetro.

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 uma 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 algum esforço inesperado 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-se os efeitos de termopar e aumentando a vida de fadiga do extensômetro.

## 2.5 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.

## 2.6 Instrumentação para extensometria

Considera-se aqui como os extensômetros interagem com o sistema de aquisição de dados. Mostra-se, na Figura 3, um diagrama de blocos apresentando esta interação.

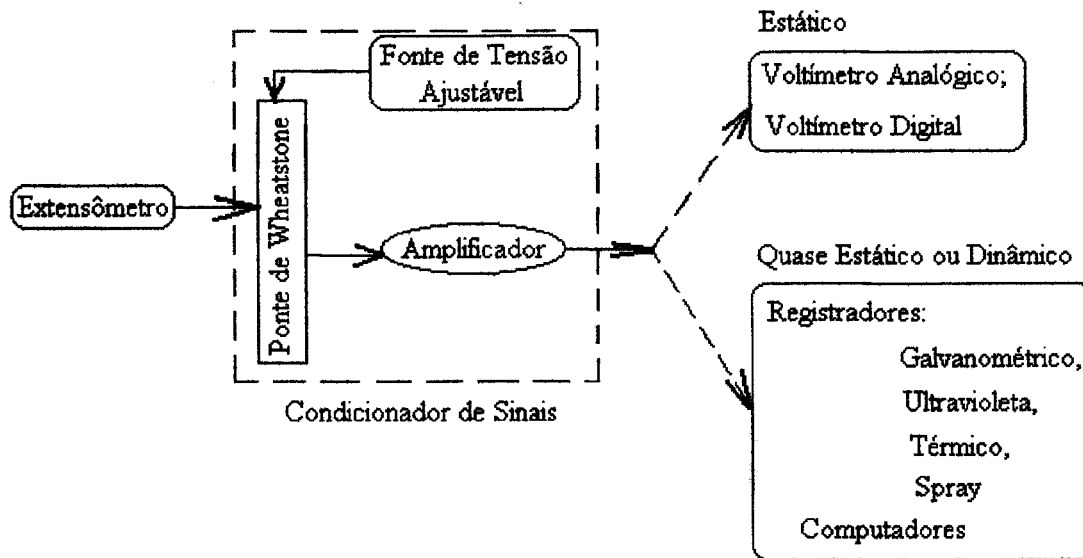


Figura 3 - Diagrama de Blocos

**Descrição:**

O extensômetro é ligado à ponte de Wheatstone que se encontra no condicionador de sinais. O circuito da ponte de Wheatstone 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 fixado. Inicialmente, estando a estrutura isenta de carregamento, tem-se na saída da ponte de Wheatstone, um valor de tensão que corresponde ao desequilíbrio inicial entre as resistências que compõem o circuito da ponte de Wheatstone.

Uma vez equilibrada a ponte de Wheatstone e a estrutura carregada, o sinal obtido é enviado ao amplificador de ganho ajustável.

**2.7 Correção de resultados**

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 deformação transversal [5, 8, 9, 10, 11].

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

## 2.7.1 Correção dos resultados associados à variação da temperatura

### 2.7.1.1 Efeitos de temperatura sobre o extensômetro

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

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

- variação da sensibilidade do extensômetro (K);
- expansão ou contração linear do elemento sensor;
- expansão ou contração linear do material sob teste;
- variação da resistividade do extensômetro.

Na Figura 4, mostra-se a variação da sensibilidade K para as ligas Advance ou Constantan. (45% Ni, 55% Cu) e Karma (74% Ni, 20% Cr, 3% Al, 3% Fe).

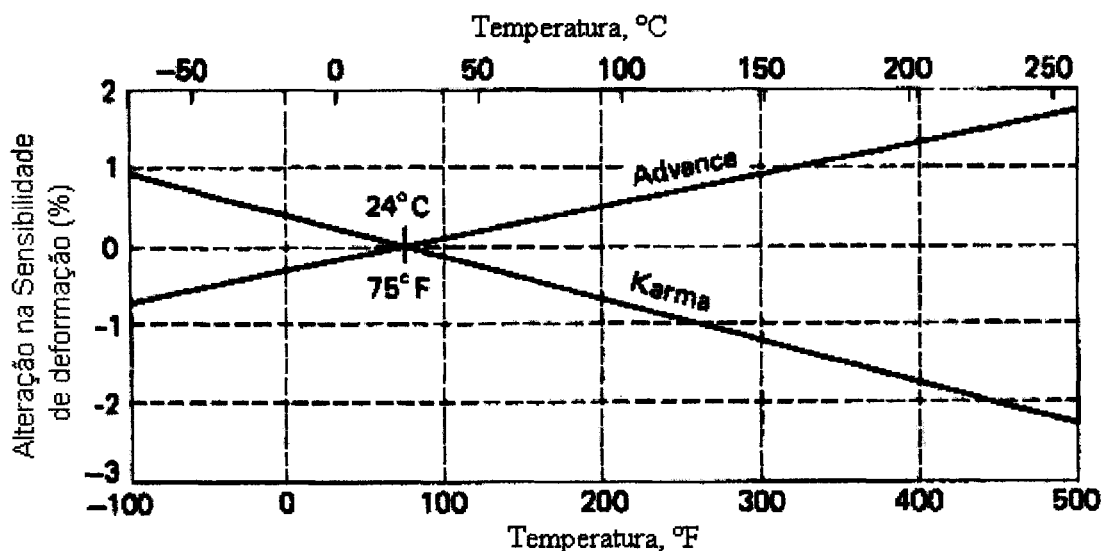


Figura 4 - Variação da sensibilidade para as ligas ADVANCE E KARMA [8]

A influência dos outros efeitos é mostrada a seguir:

Seja,

$\alpha$  o coeficiente de dilatação linear do extensômetro;  
 $\beta$  o coeficiente de dilatação linear do material de teste;  
 $\theta$  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:

$\Delta L_{\text{ext}} = \alpha L \Delta T$  (Expansão livre do extensômetro);  
 $\Delta L_{\text{m}} = \beta L \Delta T$  (Expansão livre do material sob teste).

A deformação resultante do extensômetro é dada por:

$$\frac{\Delta L}{L} = \beta \Delta T - \alpha \Delta T = (\beta - \alpha) \Delta T \quad (1)$$

Portanto,

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\theta=0} = K \frac{\Delta L}{L} = K(\alpha - \beta) \Delta T \quad (2)$$

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  $A = A(T)$ .

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

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3)$$

onde:

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

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

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

Portanto, a Equação 3 pode ser escrita como:

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

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\alpha=\beta} = (\theta - \alpha) \Delta T = \gamma \Delta T \quad (4)$$

onde  $\gamma = (\theta - \alpha)$  é denominado “coeficiente térmico de resistividade do fio em expansão”.

Associando-se os dois efeitos analisados:

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

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\Delta T} = K(\beta - \alpha) \Delta T + \gamma \Delta T \quad (5)$$

Então como pode ser visto na Equação 5, 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 deformação se processa muito rapidamente, é necessário conhecer-se a curva de deformação aparente do extensômetro utilizado [8]. Esta deformação aparente deve ser evitada ou corrigida, conforme se discute a seguir.

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

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

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

$$\varepsilon_{APP, L} = \left[ K(\alpha - \beta)\Delta T + \gamma\Delta T \right] \frac{1}{K}$$

$$\varepsilon_{APP, L} = \left[ (\beta - \alpha) + \frac{\gamma}{K} \right] \Delta T \quad (6)$$

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  $\varepsilon_m = (\beta - \alpha) \Delta T$ , a qual não ocorrerá na estrutura ensaiada. O elemento sensor reage a esta deformação indicando uma mudança na resistência. Se a liga do elemento sensor e o material de base têm 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.

### 2.7.1.2 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. 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 indesejáveis 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 KARMA modificado, são tais que estas ligas podem minimizar a deformação aparente sobre uma ampla faixa de temperatura, quando fixados em materiais com coeficientes de expansão térmica para os quais eles são destinados.

Extensômetros que possuem esta propriedade são chamados de “auto compensados para temperatura” STC.



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 de um quarto de ponte, completando o circuito com três resistores de alta qualidade para que seja minimizada a alteração do valor referencial em função do aumento de temperatura como pode ser visto na Figura 5.

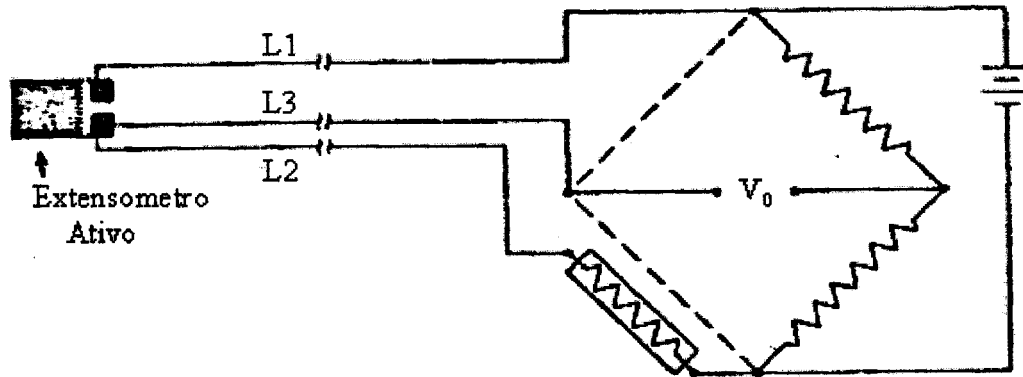


Figura 5 - Ponte completada com resistores padrões [5]

Os fabricantes de extensômetros fazem acompanhar, em cada lote, um gráfico contendo a curva de deformação aparente em função da temperatura e, esta curva só é utilizável para os extensômetros identificáveis deste lote.

### 2.7.1.3 Procedimentos de correção

Descreve-se a seguir os procedimentos para correção da deformação devido à influência indesejável da temperatura. Na Figura 6 mostra-se as curvas de deformação aparente e variação do fator de conversão  $K$ , em função da temperatura.

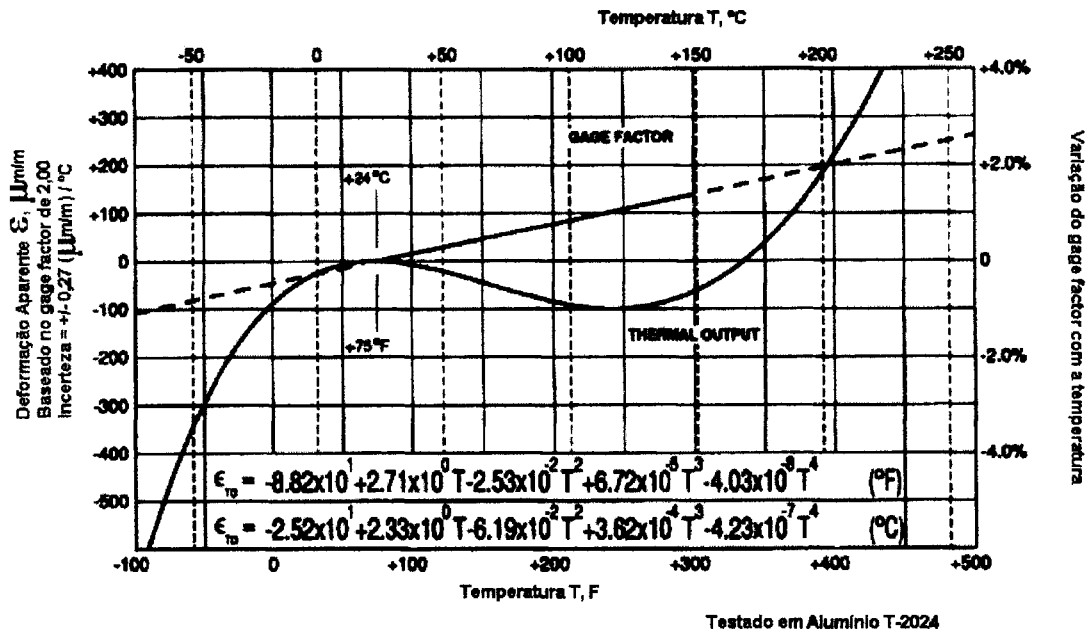


Figura 6 - Deformação Aparente induzida pela temperatura [11]

Dois passos, apresentados a seguir, são utilizados para conversão da temperatura:

- 1) Corrige-se a deformação lida  $\epsilon_1$  para a deformação aparente  $\epsilon_{app}$  através da fórmula:

$$\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_{app}$$

onde:

$\epsilon$  é a deformação corrigida para a deformação aparente;

$\epsilon_1$  é a deformação lida, não corrigida para a deformação aparente ou fator de conversão com a temperatura;

$\epsilon_{app}$  é a deformação aparente na temperatura do ensaio para o material onde está colado o extensômetro.

O  $\epsilon_{app}$  é determinado através das seguintes considerações:

A curva de correção 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 6 aqui apresentada, o material utilizado para o traçado da curva foi o Alumínio e o extensômetro pode estar sendo utilizado por exemplo no aço.

Tem-se então que:

$$\varepsilon_{app} = \left[ (\beta - \alpha) + \frac{\gamma}{K} \right] \Delta T \text{ de uma maneira geral} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{app,L} = \left[ (\beta_L - \alpha) + \frac{\gamma}{K} \right] \Delta T \text{ para o caso da Figura 6} \quad (8)$$

Se  $\beta = \beta_L$  temos que  $\varepsilon_{app} = \varepsilon_{app,L}$

$$\varepsilon_{app} - \varepsilon_{app,L} = (\beta - \beta_L) \Delta T \text{ assim}$$

$$\varepsilon_{app} = \varepsilon_{app,L} + (\beta - \beta_L) \Delta T \quad (9)$$

onde :

$\varepsilon_{app,L}$  é a deformação aparente obtida a partir da curva fornecida pelo fabricante.

$\beta$  é o coeficiente de dilatação linear (valor médio no intervalo de temperatura  $\Delta T$ ) da estrutura sobre o qual o extensômetro está colado;

$\beta_L$  é o coeficiente de dilatação linear (valor médio no intervalo de temperatura  $\Delta T$ ) do material sobre o qual o extensômetro foi colado para a confecção da curva fornecida pelo fabricante;

$\Delta T$  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-se a Equação 10:

$$K(TE) = K + \frac{K(\Delta K\%)}{100} \quad (10)$$

onde:

$K(TE)$  é o fator de conversão à temperatura de ensaio;

$K$  é o fator de conversão nominal do extensômetro;

$\Delta K(\%)$  é a variação percentual do fator de conversão para a temperatura de ensaio (retirado da Figura 6).

A deformação corrigida para a deformação aparente será dada por:

$$\varepsilon = \left\{ \varepsilon_l - \left[ \varepsilon_{app} \cdot L + (\beta - \beta_L) \Delta T \right] \frac{K(TE)}{K} \right\} \frac{K}{K + \frac{K(\Delta K\%)}{100}} \quad (11)$$

### 2.7.2 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 mal alinhamento [4].

Como pode ser visto na Figura 7, qualitativamente, quando  $\psi$  é  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ , um pequeno erro angular produzirá um erro muito pequeno na deformação indicada. Para ângulos entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  a Figura 7 mostra que o erro na deformação indicada, devido a um pequeno desalinhamento angular, pode ser bem significativo.

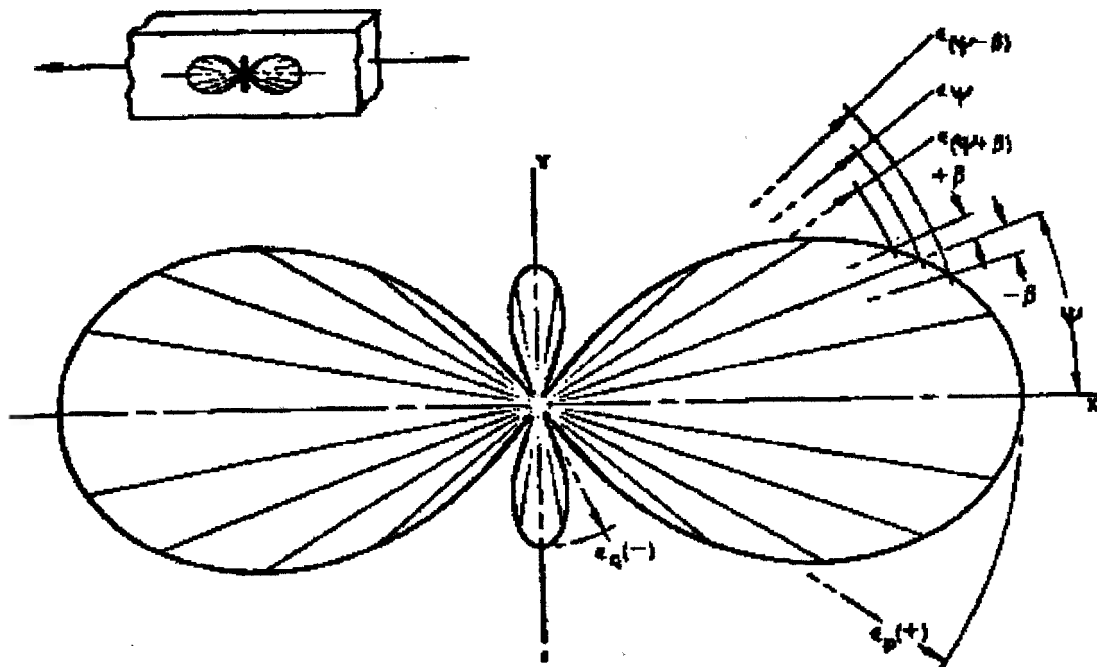


Figura 7 - Distribuição Polar de deformação correspondendo a tensão uniaxial, ilustrando o erro na indicação de deformação quando o extensômetro é desalinhado por mais ou menos  $\beta$  do ângulo  $\psi$  [4].

Através do círculo de Mohr para deformação, Figura 8, pode ser visto que o erro na medida de deformação, devido ao mal alinhamento do extensômetro, é expresso por:

$$n = \varepsilon(\psi \pm \beta) - \varepsilon\psi \quad (12)$$

onde:

$n$  é o erro absoluto, em microdeformações;

$\epsilon_\psi$  é a deformação ao longo do eixo fixado para medidas, também em microdeformações; e

$\epsilon(\psi \pm \beta)$  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:

$$\epsilon(\psi \pm \beta) = \left( \frac{\epsilon_{max} + \epsilon_{min}}{2} \right) + \left( \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}}{2} \right) \cos 2(\psi \pm \beta) \quad (13)$$

$$\epsilon(\psi) = \left( \frac{\epsilon_{max} + \epsilon_{min}}{2} \right) + \left( \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}}{2} \right) \cos 2\psi \quad (14)$$

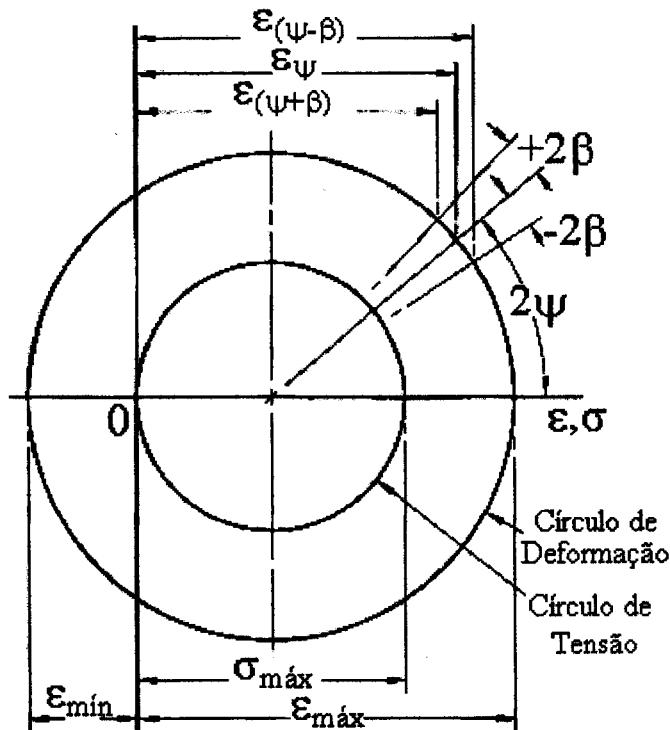


Figura 8 - Círculo de Mohr para deformação e tensão [4]

Subtraindo a Equação 14 da Equação 13, vem:

$$n = \left( \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}}{2} \right) [\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi] \quad (15)$$

Se desejar exprimir o erro em percentagem, vem:

$$n' = \left\{ \frac{\left( \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{2} \right) [\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi]}{\left( \frac{\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}}{2} \right) + \left[ \left( \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{2} \right) \cos 2\psi \right]} \right\} 100$$

Dividindo o numerador e denominador por  $\left( \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{2} \right)$  tem-se:

$$n' = \left[ \frac{\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi}{\left( \frac{\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}} \right) + \cos 2\psi} \right] 100 = \left[ \frac{\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi}{\left[ \left( \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{min}} \right) + 1 \right] + \cos 2\psi} \right] 100$$

Colocando  $R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{min}}$  vem:

$$n' = \left[ \frac{\cos 2(\psi \pm \beta) - \cos 2\psi}{\left( \frac{R_\varepsilon + 1}{R_\varepsilon - 1} \right) + \cos 2\psi} \right] 100 \quad (16)$$

Como pode ser observado nas Figuras 7 e 8; nas Equações 15 e 16, o erro devido ao mal alinhamento depende de três fatores:

- a) a razão algébrica da deformação principal máxima para a deformação principal mínima;
- b) o ângulo  $\psi$  entre a deformação principal máxima e o eixo onde se vai medir a deformação;
- c) o ângulo  $\beta$  entre a direção que se queria medir e a direção de fixação do extensômetro.

### 2.7.3 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 de sensibilidade transversal podem ser desprezados porém, em alguns casos, devem ser feitas correções.

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 deformação principal máxima, sendo ainda o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) para o material igual a 0,285.

O fator de conversão pode ser escrito como:

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

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \tag{17}$$

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

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a \varepsilon + K_t \varepsilon_t \tag{18}$$

onde:

$K_a$  é a sensibilidade axial;

$K_t$  é a sensibilidade transversal;

$\varepsilon$  é a deformação normal ao longo da direção longitudinal do extensômetro; e

$\varepsilon_t$  é a deformação normal ao longo da direção transversal do extensômetro.

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a \left( \varepsilon + \frac{K_t}{K_a} \varepsilon_t \right)$$

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

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a (\varepsilon + F \varepsilon_t) \quad (19)$$

Das Equações 19 e 17 vem:

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

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

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

$$K = K_a (1 - \mu F) \quad (20)$$

A deformação aparente  $\varepsilon_c$  obtida em qualquer campo de deformação com base no fator de conversão fornecido pelo fabricante, é:

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

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

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon \left( 1 + \frac{F \varepsilon_t}{\varepsilon} \right)}{1 - \mu F}$$

Donde:

$$\varepsilon = \varepsilon_c \left[ \frac{(1 - \mu F)}{1 + \frac{F \varepsilon_t}{\varepsilon}} \right] \quad (21)$$



A Equação 21 fornece o verdadeiro valor da deformação no sentido axial do extensômetro.

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

$$\xi = \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{\varepsilon} \right) 100 \quad (22)$$

$$\xi = \left[ \frac{F \left( \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} + \mu \right)}{1 - \mu F} \right] 100 \quad (23)$$

Quando a deformação transversal  $\varepsilon_t$  é igual a  $-\mu\varepsilon$  (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  $\mu_0$  diferente de  $\mu$ , existe erro.

Dois procedimentos para correção dos dados têm sido desenvolvidos.

O primeiro requer um conhecimento antecipado da razão  $\varepsilon_t/\varepsilon$  do estado de deformação.

$$\text{Desde que } \varepsilon = \varepsilon_c \left( \frac{1 - \mu F}{1 + \frac{F \varepsilon_t}{\varepsilon}} \right) \quad (24)$$

O fator de conversão (FC) é:

$$\text{FC} = \frac{1 - \mu F}{1 + \frac{F \varepsilon_t}{\varepsilon}} \quad (25)$$

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

Da Equação 24 onde  $\varepsilon$  é a deformação verdadeira, tem-se que:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R}{K^*} \quad e \quad \varepsilon_c = \frac{\Delta R/R}{K}$$

Substituindo as Equações de  $\varepsilon$  e  $\varepsilon_c$  na Equação 24, vem:

$$\frac{\Delta R/R}{K^*} = \frac{\Delta R/R}{K} \left( \frac{1 - \mu F}{1 + F \varepsilon_t / \varepsilon} \right)$$

$$K^* = K \left( \frac{1 + F \varepsilon_t / \varepsilon}{1 - \mu F} \right) \quad (26)$$

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

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon \left( 1 + \frac{F \varepsilon}{\varepsilon} \right)}{1 - \mu F} \text{ que}$$

$$\varepsilon'_x = \varepsilon_x \left( \frac{1 + \frac{F \varepsilon_y}{\varepsilon_x}}{1 - \mu F} \right) \text{ ou}$$

$$\varepsilon'_x = \frac{1}{1 - \mu F} (\varepsilon_x + F \varepsilon_y) \quad (27)$$

e analogamente:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{1 - \mu F} (\varepsilon_y + F \varepsilon_x) \quad (28)$$

onde  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  são as deformações verdadeiras.

Resolvendo o sistema formado pelas Equações 27 e 28, vem:

$$\varepsilon_x = \frac{1 - \mu F}{1 - F^2} (\varepsilon'_x - F \varepsilon'_y) \quad (29)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1 - \mu F}{1 - F^2} (\varepsilon_y' - F \varepsilon_x') \quad (30)$$

#### 2.7.4 Correção dos resultados devido a não linearidade da ponte de Wheatstone

Os erros devidos a não linearidade ocorrem porque, quando as medidas de deformação são feitas com uma ponte de Wheatstone não balanceada, há certas condições abaixo 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.

O erro percentual cresce com a grandeza da deformação medida e pode tornar-se significativo para grandes deformações; por exemplo: o erro é em torno de 0,1% em 1000  $\mu\text{d}$ , 1% em 10.000  $\mu\text{d}$  e 10% em 100.000  $\mu\text{d}$ , ou; como uma regra prática conveniente, o erro, em percentagem, é aproximadamente igual ao valor da deformação.

Maiores detalhes sobre este item podem ser verificados nas referências [5 e 8].

#### 2.7.5 Correção dos resultados devido à resistência dos fios

Os erros provocados pelos fios de ligação de um extensômetro são de duas naturezas [5, 12]:

- a) os fios de ligação são resistências montadas em série com o circuito dos extensômetros;
- b) a resistência destes fios varia com a temperatura.

O segundo fenômeno pode ser eliminado pela montagem a 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 ler a resistência do extensômetro  $R_e$ , a ponte lê a resistência total  $R'$  igual a soma de  $R_e$  e  $R_f$ , resistência da linha. Entretanto, a variação de resistência devido às deformações é  $\Delta R_e$  já que  $R_f$  é constante.

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

$$K = \frac{\frac{\Delta R_e}{R_e}}{\varepsilon}$$

O fator de conversão efetivo é:

$$K_e = \frac{\frac{\Delta R_e}{R'}}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta R_e}{R_e + R_f}}{\varepsilon} \text{ sendo:}$$

$R_e$  = resistência do extensômetro, em ohms;

$R_f$  = resistência total da linha em série com o extensômetro de um braço da ponte, em ohms;

$R' = R_e + R_f$ ,

$\Delta R_e$  = variação da resistência do extensômetro, em ohms;

$\varepsilon$  = deformação do extensômetro, em  $\mu d$ ;

$K$  = fator de conversão nominal do extensômetro;

$K_e$  = fator de conversão efetivo do extensômetro ligado por uma linha de resistência não nula.

A dessensibilização:

$$D = \frac{K_e}{K} = \frac{R_e}{R_e + R_f}$$

$$K_e = \left( \frac{R_e}{R_e + R_f} \right) K$$

A correção do fator  $K$ , relativamente ao comprimento da fiação, é obtida substituindo na equação que fornece  $\varepsilon$ ,  $K$  por  $K_e$ .

### 3. 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 solitação da estrutura, no ponto considerado [9, 13, 14, 15, 16].

Apresenta-se, neste item a teoria de deformação e tensão, necessária à prática extensométrica.

#### 3.1 Detalhamento das medidas com extensômetros elétricos

##### 3.1.1 Utilização de um só extensômetro

O estado de deformação e conseqüentemente de tensão, com a utilização de um extensômetro só é possível em casos muito particulares [5, 9, 15]. O mais expressivo destes casos, é o de tração ou compressão numa barra sujeita a carregamento axial.

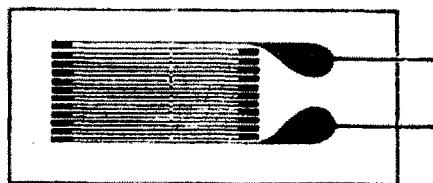


Figura 9 - Extensômetro colado segundo a direção de X [5]

Se  $\epsilon_x$  é a medida obtida utilizando-se um extensômetro como na Figura 9 tem-se:

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

$$\sigma_x = E \epsilon_x$$

$$\sigma_y = 0$$

### 3.1.2 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.

Os extensômetros devem ser colados perpendicularmente. Se  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  são os valores obtidos para deformação, temos:

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

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

### 3.1.3 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 a que está submetido um ponto qualquer de uma estrutura utiliza-se a equação:

$$\varepsilon_\psi = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\psi + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\psi \quad (31)$$

Para a determinação de  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , e  $\gamma_{xy}$ , é necessário e suficiente calcular três deformações longitudinais  $\varepsilon_\psi$ , segundo três direções arbitrárias  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ , e  $\psi_3$ .

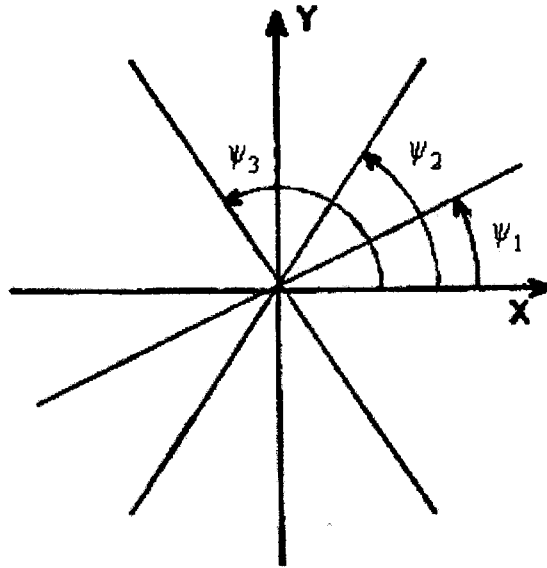


Figura 10 - Posicionamento dos extensômetros em três direções arbitrárias.

Sejam X e Y dois eixos arbitrários que passam por um ponto O para o qual se quer determinar  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , e  $\gamma_{xy}$ . Aplicando-se a Equação 31 para  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ , e  $\psi_3$ , tem-se três equações e três incógnitas, as quais resolvidas, fornecerão  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , e  $\gamma_{xy}$ .

$\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  são dadas em microdeformações ( $\mu\text{m/m}$ ) e  $\gamma_{xy}$  em radianos.

Determinados  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , e  $\gamma_{xy}$ , determina-se, em seguida,  $\varepsilon_{\text{máx}}$  e  $\varepsilon_{\text{mín}}$  utilizando-se as equações:

$$\varepsilon_{\text{máx}} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}}{2} \quad (32)$$

$$\varepsilon_{\text{mín}} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}}{2} \quad (33)$$

De posse de  $\varepsilon_{\text{máx}}$  e  $\varepsilon_{\text{mín}}$  determina-se  $\sigma_{\text{máx}}$  e  $\sigma_{\text{mín}}$  utilizando-se as equações:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{\text{máx}} + \mu \varepsilon_{\text{mín}}) \quad (34)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{\min} + \mu \varepsilon_{\max}) \quad (35)$$

A orientação das deformações principais é obtida através da equação:

$$\text{Tg}2\psi_p = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (36)$$

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.

### 3.1.3.1 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-se estes valores na Equação 31, obtém-se:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_3$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$$

À partir de substituições matemáticas [8], tem-se:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \quad (37)$$

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \quad (38)$$

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \quad (39)$$

A orientação das deformações principais é obtida pela equação:



$$\psi_p = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right] \quad (40)$$

Substituindo-se novamente [12], tem-se

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right] \quad (41)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right] \quad (42)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \quad (43)$$

### 3.1.3.2 Roseta equiangular ou delta

Neste tipo de roseta,  $\psi_1 = 0^\circ$ ,  $\psi_2 = 60^\circ$  e  $\psi_3 = 120^\circ$ . Seguindo-se o mesmo raciocínio do item anterior, chega-se aos valores desejados [9].

$$\varepsilon_{\max} = A + \sqrt{B^2 + C^2} \quad (44)$$

$$\varepsilon_{\min} = A - \sqrt{B^2 + C^2} \quad (45)$$

$$\gamma_{\max} = 2 \left( \sqrt{B^2 + C^2} \right) \quad (46)$$

$$\psi_p = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{C}{B} \quad (47)$$

Substituindo-se  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\min}$  nas expressões de  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  e  $\tau_{\max}$ , resulta:

$$\sigma_{\max} = E \left( \frac{A}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{B^2 + C^2} \right) \quad (48)$$

$$\sigma_{\min} = E \left( \frac{A}{1-\mu} - \frac{1}{1+\mu} \sqrt{B^2 + C^2} \right) \quad (49)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{E}{1+\mu} \sqrt{B^2 + C^2} \quad (50)$$

onde:

$$A = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}$$

$$B = \varepsilon_1 - \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \right)$$

$$C = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sqrt{3}}$$

## 4. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

### 4.1 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva apresenta a vantagem de prever o estado dos componentes, informando quando o mesmo apresentará falha, dentro de boa margem de certeza [17]. Para tal, há a necessidade de executar aquilo que é chamado “diagnóstico”. Através do mesmo sabe-se qual o estado de determinado ou determinados componentes, quando os mesmos apresentarão falhas e como programar a sua substituição antes da ocorrência da situação crítica que leva ao colapso e conseqüente parada do equipamento. Além do mais, a manutenção preditiva deve estar informada como um componente defeituoso transmite as conseqüências de tal defeito ou irregularidade aos demais componentes associados intimamente ao componente irregular. Tal interação constitui uma realimentação fazendo com que a irregularidade de um componente produza efeitos em componentes ligados ao primeiro, originando um processo em cascata.

Para a elaboração de um diagnóstico, é necessário conhecer qual o mecanismo de deterioração que leva a geração de falhas e como uma falha influencia os componentes associados. A operação de um equipamento ou componente fornece parâmetros que permitem executar o diagnóstico com boa margem de segurança. No caso comum, basta verificar uma alteração nos parâmetros que o “problema” está resolvido com a substituição do componente em questão. Entretanto, quando se trata de um processo racional, a substituição não é simplesmente executada mas sim são estudados os efeitos da alteração nos componentes associados e, principalmente, são investigadas as causas do desgaste visando obter meios de atenuar tais causas, quando não eliminá-las.

Na Figura 11, ilustra-se o conceito fundamental para o estabelecimento de um programa de Manutenção Preditiva, baseado em diagnósticos com margem de segurança satisfatória.

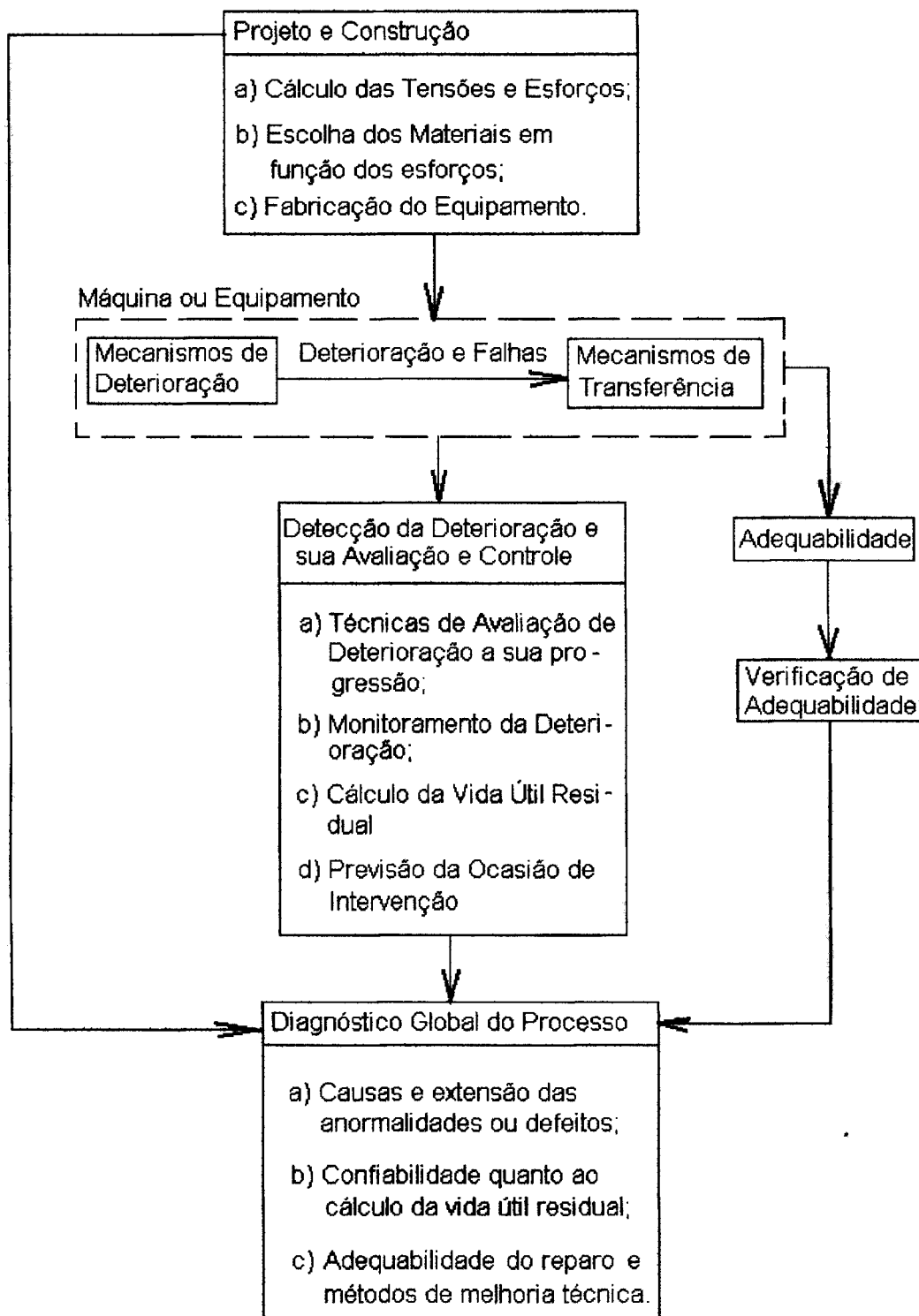


Figura 11 - Conceitos fundamentais da elaboração do diagnóstico de máquinas [17]

Existem processos e métodos bastante complexos e sofisticados para uso da Manutenção Preditiva. Alguns são baseados em análise em tempo real, outros na Transformada Rápida de Fourier (FFT) e outros em instrumentos mistos, que fornecem dados tanto em

tempo real quanto em FFT, com monitoração remota e centralizada, alguns com registro em microcomputador, outros com registro gráfico ou numérico, informando praticamente tudo o que está ocorrendo com cada componente de cada máquina da instalação. Tais métodos e complexos instrumentais exigem grupos de várias especialidades não somente em eletrônica como também em mecânica, eletricidade, hidráulica, química, etc., não dispensando matemáticos para resolver as equações que representam ou simulam a instalação industrial. É bastante comum o desejo de se implantar um sistema “avançado” e que indique imediatamente qualquer irregularidade, com o máximo de antecedência possível.

Existem métodos para saber o como está evoluindo uma dada irregularidade, assim como prever quando a irregularidade atingirá uma extensão tal que torne a situação perigosa. A confiabilidade do diagnóstico vai depender do método utilizado, existindo diagnóstico “normal” e diagnóstico “preciso”.

A determinação do estado real atual do equipamento é o passo fundamental para a emissão e elaboração de um diagnóstico que permita à Manutenção programar seus trabalhos e suas atividades. Tal verificação e predição exige a determinação dos elementos seguintes:

- a) localização, magnitude e causas da deterioração da máquina ou componente e as irregularidades decorrentes;
- b) quais as tensões que estão dando origem a deterioração e irregularidade na máquina ou componente;
- c) qual o desempenho da máquina, sua resistência e eficiência durante a operação;
- d) qual a importância da máquina na produção e quais as possibilidades de sua substituição, assim como quais as conseqüências de sua parada;
- e) com o reparo ou conserto, qual a confiabilidade da máquina e qual sua vida útil residual.

Evidentemente, a manutenção deverá saber a resposta a todos estes quesitos ou será inviável estabelecer um programa de manutenção preditiva. Para a resposta aos itens indicados, a manutenção deverá estar em condições de realizar o seguinte:

- 1) Levantar o estado do maquinário, esta técnica fornece os seguintes elementos:
  - a) controlar a tendência de cada componente e detecção prematura de eventuais anormalidades;
  - b) conhecer os problemas existentes em cada peça do maquinário ou equipamento;
  - c) verificar a necessidade de monitoração e proteção do maquinário ou a sua dispensa.

Os dados acima permitem que seja feito um diagnóstico “normal” de cada máquina e eventualmente de cada componente.

Quando o diagnóstico normal revelar a existência de anormalidades ou irregularidades, mas não indicar com clareza, qual a causa ou origem, pode-se realizar um diagnóstico de maior confiabilidade, chamado de “preciso” ou de “precisão”, o qual envolve as seguintes etapas:

- a) análise do posicionamento, extensão e causa de irregularidades e anormalidades;
- b) cálculo, medida e avaliação das diferentes tensões que são exercidas;
- c) quantificação e estimativa do desempenho, resistência, eficiência e confiabilidade do equipamento;
- d) confiabilidade e predição da vida útil residual do equipamento.

## 4.2 Integridade Estrutural

É a ciência, de caráter multidisciplinar, que engloba todos os conhecimentos e técnicas que, em conjunto, garantem a previsão do comportamento de uma estrutura quando solicitada sob condições de operação e ou de teste [18]. Diz-se que um componente estrutural está íntegro quando atende às funções para as quais foi projetado ou redirecionado, suporta os carregamentos máximos de teste e de trabalho, e apresenta um comportamento confiável, previsível e repetitório por tantos ciclos quanto forem necessários para a sua vida em serviço.

### 4.2.1 Avaliação de Integridade Estrutural (AIE)

É o resultado da aplicação de técnicas e procedimentos multidisciplinares que permitem estabelecer a situação ou estágio de dano em que uma estrutura se encontra, com a finalidade de prever seu comportamento futuro e indicar suas necessidades de inspeção, monitoração, recuperação, reforço e repotencialização.

## 4.2.2 Itens de uma Avaliação de Integridade Estrutural

Histórico da Estrutura	Análise de Solicitações	Propriedades do Material	Critérios de Avaliação de Danos
<ul style="list-style-type: none"> <li>* memória de cálculo;</li> <li>* registro de inspeção;</li> <li>* anormalidades;</li> <li>* dimensões e conformidade com os "as built";</li> <li>* etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* tensões;</li> <li>* temperatura;</li> <li>* tempo;</li> <li>* umidade;</li> <li>* pH;</li> <li>* fator de int. tensão, K, J, G, COD;</li> <li>* etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* análise química;</li> <li>* análise metalográfica;</li> <li>* escoamento, <math>\sigma_y</math>;</li> <li>* módulo de Young, E;</li> <li>* tenacidade, K<sub>c</sub>;</li> <li>* fadiga;</li> <li>* alongamento;</li> <li>* J<sub>c</sub>, G<sub>c</sub>, COD<sub>c</sub></li> <li>* etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* critérios de resistência;</li> <li>* fadiga (Gerber, Goodman);</li> <li>* critérios estocásticos e determinísticos;</li> <li>* critérios empíricos;</li> <li>* creep (critérios de Neubauer);</li> <li>* prova de carga com ou sem monitoração;</li> <li>* END com critérios de aprovação.</li> </ul>

## 4.3 Conceitos e terminologia utilizados na avaliação de integridade estrutural

### 4.3.1 Conceito de Vida Útil

O termo vida útil designa o tempo de vida durante o qual um dispositivo qualquer (peça, componente, máquina, equipamento, sistema, circuito, etc.) deve operar de maneira satisfatória, obedecendo as especificações do projeto e com ampla segurança, desde que sujeito a um processo de manutenção como indicado pelas instruções do fabricante, sem ser submetido a condições ambientais ou esforços superiores aos limites especificados. A vida útil de um dispositivo teoricamente representa a predição que uma determinada proporção dos elementos produzidos operarão satisfatoriamente durante o período indicado. Tal proporção é indicada pelo mínimo admissível ou, em termos probabilísticos, é utilizado um limite inferior de confiança. É bastante comum associar-se a vida útil de um produto a uma garantia, sendo necessário o levantamento do custo da substituição ou reparo das unidades que apresentam falhas antes do período esperado [17].

### 4.3.2 Monitoração

É um processo sistemático e continuado de acompanhamento (por instrumentação e vistorias) do comportamento global ou pontual de uma estrutura, com a finalidade de conhecer sua resposta real às diversas solicitações durante seu funcionamento. A monitoração das estruturas permite o relacionamento direto entre causa (ex.: cargas de serviço) e efeito (ex.: tensões induzidas), proporcionando a comparação do comportamento real com os resultados previstos por modelos matemáticos, empíricos, ou mesmo com resultados de monitoração anteriores, sobre a mesma estrutura ou outras similares [18].

### 4.3.3 Danos

É a transformação cumulativa sofrida por uma estrutura, em decorrência de suas condições de trabalho, que possa comprometer futuramente sua funcionalidade [19].

### 4.3.4 Mecanismo de Acumulação de Danos

É o processo capaz de introduzir dano em uma estrutura [19, 20]. Listam-se abaixo os mecanismos de dano e os tipos de falhas mais comuns:

- a) deformações elásticas excessivas induzidas por força ou temperatura;
- b) escoamento e deformação plástica excessiva;
- c) esmagamento pontual (“brinelling”);
- d) fratura dúctil;
- e) fratura frágil;
- f) fadiga: alto ciclo, baixo ciclo, térmica, superficial, por impacto, corrosão, “fretting”, propagação de trincas;
- g) corrosão: ataque químico direto, galvânica, “crevice”, “pitting”, intergranular, seletiva, erosão, cavitação, “fretting”, corrosão sob tensão, biológica;
- h) fluência e relaxação;
- i) corrosão - fadiga;
- j) dano por hidrogênio;
- k) desgaste adesivo, abrasivo, corrosivo, deslizamento, rolamento;
- l) ataques superficiais - por gases ou fundidos;
- m) flambagem;
- n) instabilidade: elástica, dinâmica.



## 4.4 Critérios de projeto

Uma estrutura só é viável tecnicamente se estiver de acordo com os requisitos de segurança e de performance exigidos. As normas de segurança exigem que as cargas sejam adequadamente suportadas por toda vida útil da estrutura [21]. As cargas avaliadas podem ser prescritas ou definidas por códigos e especificações, ou ainda, por experiências anteriores.

O projeto final, assim como o procedimento utilizado para se chegar até ele, é grandemente influenciado pelo tipo de carga, pois, dependendo dela, a análise pode ser estática ou dinâmica. A vida útil de uma estrutura termina se as condições de uso mudarem a ponto de torná-la antieconômica ou comprometida pela ocorrência de algum colapso ou dano. O dano classifica-se em dano de resistência ou de utilização. O colapso, devido à utilização, é relacionado com a utilização normal e os limites inaceitáveis de deformações, deslocamentos, vibrações, tensões ou outros efeitos indesejáveis. O dano de resistência é associado com o colapso ou deformações inelásticas de magnitude inaceitável. É possível ocorrerem vários tipos diferentes de dano de resistência, dependendo das condições de carregamento e do tipo de estrutura.

Em muitos casos, as hipóteses de projetos e procedimentos possíveis dependem do tipo de colapso que se espera ocorrer. Normalmente, muitos tipos diferentes de dano são possíveis e, conseqüentemente, muitas hipóteses têm de ser consideradas simultaneamente.

Nos próximos itens, são considerados a necessidade de maior margem de segurança e os vários critérios de projetos.

## 4.5 Margens de segurança

As cargas de trabalho são normalmente definidas por normas e especificações ou são cargas específicas de trabalho do componente estrutural. Estas cargas geralmente representam uma idealização das condições reais de carregamento.

É comum, entre todos os métodos clássicos de projetos, o requisito de que uma estrutura seja projetada de forma que sua mínima resistência calculada seja maior que a máxima carga estimada de projeto. Portanto é introduzido um *fator de segurança* ou *fator de carga* maior que a unidade.

Nos métodos de tensão admissível ou projeto elástico, a margem de segurança necessária contra escoamento local ou completo é calculada permitindo-se tensões que sejam, no máximo, iguais à tensão limite de escoamento dividida por um fator de segurança (FS). Portanto,

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{esc}}{FS} \quad (51)$$

Em termos mais gerais, o fator de segurança pode ser expresso como:

$$FS = \frac{\sigma_{crit}}{\sigma_{adm}} \quad (52)$$

No método elástico, a tensão crítica é tomada como a tensão limite de escoamento  $\sigma_{esc}$ . Para materiais frágeis, é utilizada a tensão de ruptura  $\sigma_{rup}$ , sempre em combinação com um fator de segurança maior.

No método plástico, a segurança contra o colapso é calculada multiplicando-se as cargas de trabalho  $L$  pelo fator de carga  $FC$ . Então o colapso ou carga de dano  $Lu$  pode ser expresso como [21]:

$$Lu = FC \cdot L \quad (53)$$

A utilização de uma margem de segurança, como um fator de segurança ou como um fator de carga, necessita de alguns exames adicionais. A idéia de que tais margens de segurança servem apenas para proteger uma estrutura contra excesso de carga, representa uma simplificação muito grande, pois a ação combinada de vários fatores pode colocar em perigo a segurança de uma estrutura. Estes fatores são detalhados a seguir.

#### 4.5.1 Métodos de análise

Por razões práticas, os métodos de análise e de projeto são em muitos casos aproximados e limitados. Este fator introduz a possibilidade de desvios das tensões calculadas ou das cargas permitidas.

#### 4.5.2 Propriedades dos materiais

As propriedades de qualquer material representam idealizações simplificadas. Por exemplo, o aço é considerado um material homogêneo e isotrópico cujo comportamento é idealmente elástico-linear ou perfeitamente elastoplástico. As propriedades físicas de qualquer tipo de material, tais como tensão de escoamento, resistência à tração, variam consideravelmente.

Conseqüentemente, os padrões especificados por normas normalmente representam valores extremos (máximo ou mínimo) ao invés de valores médios. A idealização do

material e possíveis variações em suas propriedades físicas requerem alguma margem adicional de segurança para garantir que um projeto seja seguro.

#### 4.5.3 Dimensões seccionais

Devido às variações inerentes a qualquer processo de fabricação, as dimensões da seção transversal de qualquer barra podem ser menores ou maiores do que aquelas especificadas. São permitidas tolerâncias máximas por muitas especificações. Mesmo que as dimensões sejam mantidas através de controles cuidadosos de aceitação ou fabricação, as tensões reais podem exceder aquelas calculadas para uma seção suposta uniforme.

#### 4.5.4 Qualidade

Particularmente em seções industrializadas, pode ocorrer produção de baixa qualidade, com seções fora das especificações, e o desenvolvimento de altas tensões internas em pontos dessas seções.

#### 4.5.5 Tensões residuais

Devido aos processos de fabricação, alguns materiais como aço, por exemplo, possuem tensões residuais. Uma desuniformidade de resfriamento causa tensões residuais de compressão nas regiões de uma seção transversal que se resfria em primeiro lugar. Em uma seção de formato I, estas áreas são geralmente localizadas nas pontas da flange e na região média da alma. A magnitude das tensões residuais pode ser bastante alta; para aços estruturais comuns são comuns tensões residuais de compressão de cerca de 90 MPa [21].

Para seções soldadas, além das tensões residuais já presentes nos elementos compostos, podem se desenvolver valores bastante altos de tensão residual. Dependendo da técnica de solda utilizada e da seqüência empregada, estes valores podem ser muito diferentes daqueles habitualmente observados em perfis laminados.

Embora haja esforços internos que provenham de tensões residuais em uma seção, estes esforços estão em equilíbrio. As tensões causadas por cargas externas atuam juntamente com as tensões residuais já presentes na seção. O valor da tensão resultante pode diferir muito daquele que ocorreria sem tensões residuais; desse modo, precisam ser introduzidas considerações especiais nos projetos.

#### 4.5.6 Variações de comprimento

Especialmente em sistemas estruturais internamente hiperestáticos, podem resultar tensões devido à falta de ajuste ou encaixe, causada por variações de medidas na

fabricação, ou por falta de habilidade de montagem. As variações de comprimento podem gerar tensões “de ajuste”, além das provocadas pelas cargas.

#### 4.5.7 Condições de serviço

O uso previsto de uma estrutura, seja ele temporário ou permanente, para uso público ou privado e a duração e frequência das cargas esperadas influenciarão a margem de segurança necessária. Condições ambientais, tais como temperaturas externas, umidade e presença de agentes corrosivos, podem também requerer um aumento na margem de segurança, devido à possibilidade de redução das áreas das seções transversais, desenvolvimento de fraturas frágeis, e o aparecimento de tensões devido a temperaturas excessivas.

#### 4.5.8 Tipos de danos

Mesmo nos projetos calculados pelo método da tensão admissível, reconhece-se que uma possível falha influenciaria o valor do fator de segurança. O fator de segurança contra instabilidade, por exemplo, é maior do que para muitos outros tipos de danos.

### 4.6 Modos de danos

Muitos materiais estruturais apresentam danos da forma dúctil ou da forma frágil. Materiais dúcteis, quando testados à tração na temperatura ambiente, apresentam escoamento plástico e uma taxa normal de deformação. O dano dúctil é caracterizado pelo escoamento resultante do deslizamento ao longo de planos de esforços críticos, sendo normalmente acompanhado por grandes deformações. Por outro lado, o dano frágil é caracterizado por trincas em planos bem definidos.

Embora qualquer tipo de dano seja indesejável, do ponto de vista técnico o dano do tipo frágil é altamente indesejável, pois normalmente não se nota nenhuma informação a respeito da ocorrência do dano iminente e possível colapso. O dano da forma dúctil é resultado de escoamento, geralmente gradual e acompanhado por grandes deformações; portanto, menos catastrófico.

Uma distinção entre diferentes tipos de danos, tais como dano local, dano seccional e dano da estrutura como um todo (dano estrutural), também, pode ser feita. O dano local em uma barra particular ou conexão pode resultar numa falha seccional. Analogamente, uma ou mais falhas seccionais podem resultar em instabilidade ou colapso de toda a estrutura.

## 4.7 Critérios de escoamento

Um dos mais antigos métodos de cálculo é baseado na hipótese de que a estrutura é considerada em colapso se em algum ponto forem alcançadas as tensões de escoamento. Neste método, o fato de a tensão de escoamento ter sido atingida em um ponto qualquer é considerado crítico para a estrutura. Com base no comportamento elástico linear ideal, de acordo com a lei de Hooke, o projeto baseia-se então na suposição de que as tensões, em qualquer lugar da estrutura, não podem exceder a tensão admissível. A determinação da tensão admissível é baseada em experiências anteriores com a devida margem de segurança para cobrir variações nas propriedades do material e propriedades seccionais, além de possíveis variações na carga de trabalho, tensões secundárias, tensões residuais, etc. Muitas normas e especificações determinam tensões admissíveis, dividindo a tensão do ponto de escoamento por um “fator de segurança” apropriado (Equação 51). Este método de cálculo é chamado normalmente de método elástico; porém, pode ser chamado também de método da tensão admissível ou método da tensão de trabalho. Deve-se observar que o escoamento local ocorre em quase todas as estruturas devido a concentração de tensões, a tensões residuais e o fato de que os materiais são, na verdade, não homogêneos. O critério de escoamento, na verdade, refere-se ao escoamento resultante da aplicação das cargas, sendo por esta razão aconselhável o uso de materiais com suficiente ductilidade para que o escoamento localizado que sempre ocorre nas estruturas seja tolerável.

O critério de escoamento aplica-se somente aos materiais que têm comportamento dúctil. Sob certas condições de serviço ou trabalho, tais materiais podem comportar-se de maneira frágil; neste caso, o critério de escoamento não se aplica.

Ao contrário dos materiais que geralmente se comportam como dúcteis, muitos outros materiais estruturais comportam-se como quebradiços. Alguns exemplos desses materiais são: concreto, algumas ligas de aço de alta resistência e alumínio. Para tais materiais, o uso do critério de escoamento não é adequado; seria ideal que se usasse a tensão limite de resistência como tensão crítica em conjunto com um fator de segurança maior.

## 4.8 Critério plástico

O método plástico faz uso do seguinte critério: o fato de se alcançar a tensão de escoamento em um certo ponto da estrutura não significa necessariamente que a barra ou a ligação da estrutura considerada esteja danificada como um todo. O escoamento localizado em um ponto não resulta necessariamente em um fluxo plástico ilimitado e dano seccional naquele ponto. A vinculação da estrutura como um todo e suas condições de apoio podem ser de tal ordem que, mesmo ocorrendo dano na seção, esta não resultará em dano ou colapso estrutural.

Antes do colapso estrutural, deformações excessivas ou instabilidade resultam em falha da estrutura. Três diferentes tipos do chamado “*fenômeno de coação*” podem ocorrer,

seja separadamente, consecutivamente ou simultaneamente. Estes três fenômenos de coação são os seguintes:

1. O primeiro fenômeno a ocorrer, quando o aço é usado como material estrutural, é a uniformização das tensões dentro da seção transversal da barra como um todo. Esta equalização de tensões, antes que a falha estrutural ocorra, é básica para o estudo elástico da estrutura. As hipóteses de distribuição uniforme de tensões em barras carregadas axialmente, cargas iguais em juntas parafusadas e a não consideração de concentração de tensões residuais são todas suposições básicas simplificadas que normalmente são usadas em projetos do tipo tensão admissível, baseada na equalização de tensões como um resultado de escoamento plástico localizado. No caso de uma barra axialmente carregada, com um orifício redondo, a suposição básica de distribuição uniforme de tensão (Figura 12) através da seção é incorreta. No entanto, em um estudo da tensão admissível, a hipótese de uma distribuição uniforme da tensão de trabalho é justificada uma vez que a seção falhará somente quando for atingida a tensão de escoamento em toda a seção. Esta última distribuição de tensão é uniforme: portanto, é aplicada um fator de segurança à carga máxima.

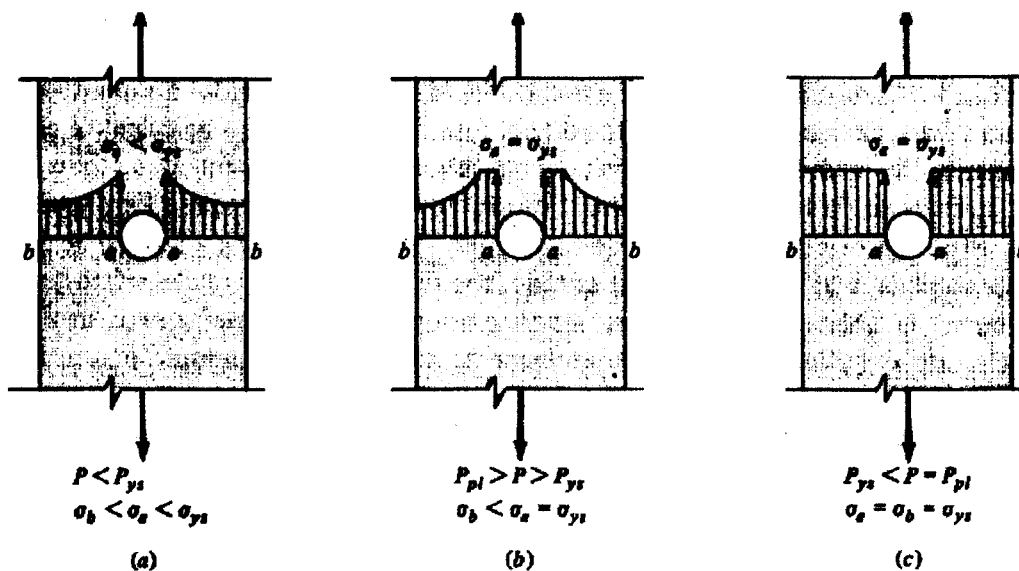


Figura 12 - Equalização ou adaptação de tensões dentro de uma seção transversal [21]

Mesmo com a carga de trabalho, o escoamento pode ocorrer independentemente da suposição feita no projeto pela tensão admissível de que o primeiro escoamento representa falha. O exemplo de uma barra axialmente carregada demonstra que, desde que o fator de segurança e o fator de carga sejam considerados iguais, nenhuma vantagem econômica resulta ao se considerar mais correto o conceito de carga de ruptura. A uniformização de tensões nas seções submetidas à flexão pura, resultando na formação de articulações plásticas, representa uma extensão lógica deste fenômeno (Figura 13). O exemplo de uma seção fletida, em contraste com a discutida acima para uma barra carregada axialmente, demonstra que, considerando-se a capacidade de momento plástico  $M_{pl}$  ao invés de momento de primeiro escoamento  $M_{ys}$ , podem ser usadas seções mais econômicas.

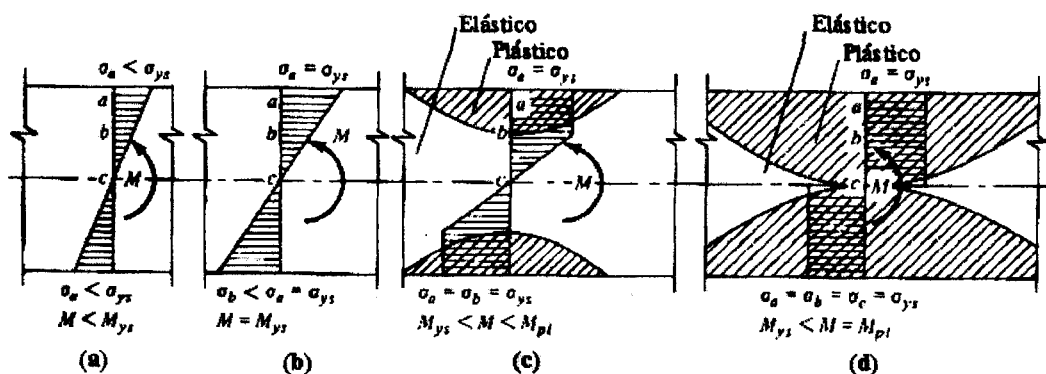


Figura 13 - Equaliza o de tensão em uma se o transversal de uma viga submetida   flexão. (a) Elástica. (b) Elástica. (c) Elastoplástica. (d) Articula o plástica [21].

A capacidade adicional do momento fletor obtida por levar-se em conta a plastifica o total de uma se o fletida   a primeira capacidade de reserva, expressa em termos do fator de forma  $f = M_{pl} / M_{ys}$ .

- Um segundo fenômeno que pode ocorrer em uma estrutura de aço como resultado de falha seccional   a redistribui o de forças internas. Em vigas contínuas, pórticos, este fenômeno   conhecido como redistribui o de momentos. Se uma estrutura   hiperestática, a falha seccional causar , em outras se es, cargas adicionais impostas,

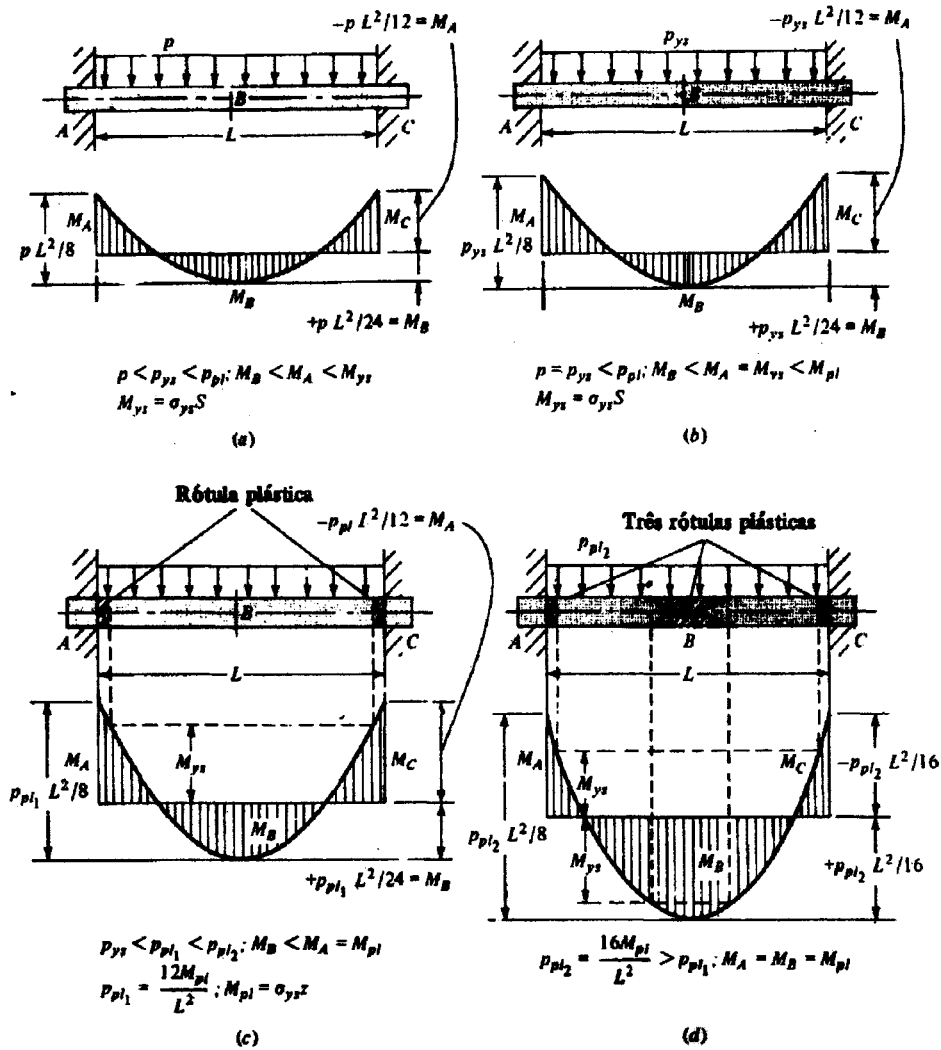


Figura 14 - Viga de seção uniforme engastada em ambas as extremidades sob várias cargas [21].

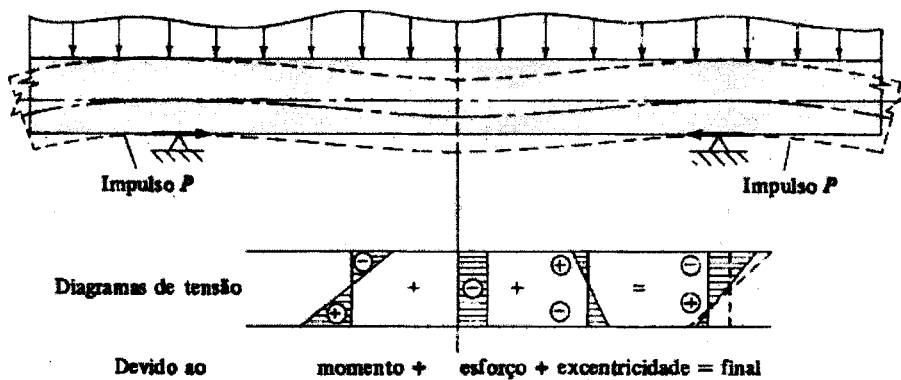


Figura 15 - Terceira capacidade de reserva [21].



3. O terceiro fenômeno, menos conhecido, é aquele resultante do desenvolvimento de tensões adicionais axiais secundárias devido às condições de suporte. Tais tensões secundárias podem ou não resultar em uma terceira capacidade de reserva. Por exemplo, se uma viga contínua tem duas articulações adjacentes, restritivas ao alongamento horizontal ao longo da face inferior, haverá o desenvolvimento de um esforço horizontal como resultado do momento positivo predominante. Tais esforços modificarão a distribuição de tensão, não somente nas localizações das articulações plásticas mas ao longo de toda a viga (Figura 15).

#### 4.9 Critérios de fratura

A maioria dos materiais estruturais comporta-se de maneira dúctil, mesmo que na presença de concentradores de tensões. No entanto, para certas condições de trabalho, como baixas temperaturas, impacto do carregamento em barras com grandes descontinuidades e peças de grande momento de inércia, como é o caso de chapas grossas, os componentes estruturais podem comportar-se de maneira frágil. Cada uma destas condições restringe a capacidade do material de escoar em pontos localizados, portanto, podem gerar fratura frágil.

Fratura frágil é um tipo de colapso catastrófico em componentes estruturais que usualmente ocorre sem escoamento prévio e a velocidades extremamente altas (tão altas como 200 m/s em aços) [21]. A fratura é normalmente caracterizada por uma superfície plana de fratura e níveis médios de tensão abaixo da tensão de escoamento do material.

A resistência de um material à fratura frágil é medida pela tenacidade à fratura, da mesma maneira que a resistência de um material é medida pela sua resistência ao escoamento. Portanto um meio de se prevenir a fratura frágil em um projeto é usar material com boa tenacidade à fratura. No entanto, a tenacidade à fratura de um dado material (e portanto sua resistência à fratura frágil) pode variar consideravelmente com a temperatura, carregamento, tamanho do defeito e concentração de tensões. Assim, pode-se avaliar significativamente a resistência de uma estrutura quanto à fratura frágil.

#### 4.10 Critérios da fadiga

Embora a ênfase de resistência dos materiais seja para os casos de carregamento estático, a grande maioria dos elementos mecânicos e estruturais, na realidade, são submetidos a cargas cíclicas. Este tipo de carga e o método de análise são estudados pela “fadiga”.

Exemplos de barras submetidas a cargas repetidas ou cargas de fadiga são muitos e incluem peças de máquinas, peças de automóveis, pontes, aviões, navios, etc. Na verdade, fadiga é quase sempre o estudo mais crítico nos projetos do que qualquer outro para a segurança estrutural e confiabilidade nos componentes estruturais.

Um carregamento de fadiga consiste na aplicação e remoção contínua de uma carga muitas vezes, em alguns casos bem acima de um milhão de ciclos. Quando uma barra é submetida a carregamento de fadiga, uma trinca pode desenvolver-se em um ponto de máxima tensão.

Concentrações agudas de tensões, devido a irregularidades tanto estruturais como metalúrgicas (descontinuidades) em qualquer local, são normalmente pontos para iniciação de trincas.

Se a fratura frágil não ocorrer, tais trincas podem propagar-se lentamente com a repetição das cargas.

A crescente utilização de solda muitas vezes tem resultado em trincas de fadiga inesperadas ou prematuras devido a defeitos na soldagem, os quais, eventualmente, agem como provocadores de tensão. Um completo conhecimento das trincas por fadiga e subsequente propagação da trinca é essencial.

Existem duas abordagens principais nos projetos quanto à fadiga. Uma é baseada no conceito de “vida segura”, enquanto a outra é baseada em “*falha segura*” [21]. A primeira abordagem exige que nenhuma trinca por fadiga se desenvolva durante toda a vida prevista da estrutura e é essencialmente um estudo do comportamento inicial da fadiga. Isto implica que a vida de uma estrutura pode ser prevista e que, antes do término, a estrutura pode ser reparada, substituída ou retirada. Para projetos bem sucedidos, muitos elementos básicos devem ser considerados, tais como:

- 1) a forma e a frequência de aplicação das cargas de trabalho durante a vida operacional da estrutura;
- 2) a forma e o tamanho de todos os componentes e suas conexões, os quais devem ser planejados de tal forma que prevejam suficiente reserva de resistência à fadiga em comparação com a carga real;
- 3) devem ser feitos ensaios sistemáticos de fadiga nos elementos estruturais: tais ensaios devem ser realizados para, experimentalmente, se comprovar o tempo de vida segura da estrutura;
- 4) são necessárias medidas adicionais para se evitar efeitos atmosféricos na resistência à fadiga.

A falha segura, método de projeto que considera impossível a proteção total contra trincas, é essencialmente um estudo de propagação de trincas por fadiga, que usa conceitos de mecânica de fratura. O projeto deve garantir que a propagação das trincas não conduzirá à completa falha estrutural por escoamento geral ou por fratura frágil.

Existem várias formas de se conseguir tal controle:

- 1) fazendo-se inspeções periódicas para se detectar trincas de tamanho mínimo para assim controlar sua propagação;

- 2) limitando-se trincas antes que se propaguem completamente através da vida útil do componente estrutural;
- 3) provocando-se caminhos preferenciais para proteção contra estragos devido à falha de um elemento estrutural, gerando, assim, uma hiperestaticidade.

#### 4.11 Critérios da deformação

O desenvolvimento recente de materiais de alta resistência tem resultado em elementos estruturais mais resistentes de menor rigidez.

Atualmente, só são utilizados elementos de baixa resistência onde deflexões e deformações constituem um critério de controle do projeto.

Além de deflexões elásticas, que são recuperáveis, algumas estruturas sofrem deflexões com deformação lenta, como resultado de carregamentos periódicos longos. Se estas deformações são significantes, tais efeitos de deformação lenta precisam ser considerados no projeto.

#### 4.12 Outros critérios

Além dos vários critérios discutidos, outros podem ser de importância. Entre eles tem-se: resposta dinâmica, corrosão e tensões secundárias devido à mudança de temperatura.

## 5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Identificação dos pontos a monitorar

Para identificar as regiões de maior solicitação e, portanto, de maior interesse para a colagem dos extensômetros elétricos, foi realizado pela Supervisão de Ensaios e Metrologia do CDTN uma simulação à temperatura ambiente utilizando-se o código computacional ANSYS, que utiliza técnicas de elementos finitos na simulação numérica de problemas de engenharia. Foram definidos 10 pontos a serem monitorados. Nessa simulação, assumiu-se que a integridade do vaso desaerador estava garantida, sem a presença de trincas, corrosão ou tensões residuais [22]. Na Figura 16, apresenta-se um esboço do vaso desaerador, bem como a localização dos pontos monitorados.

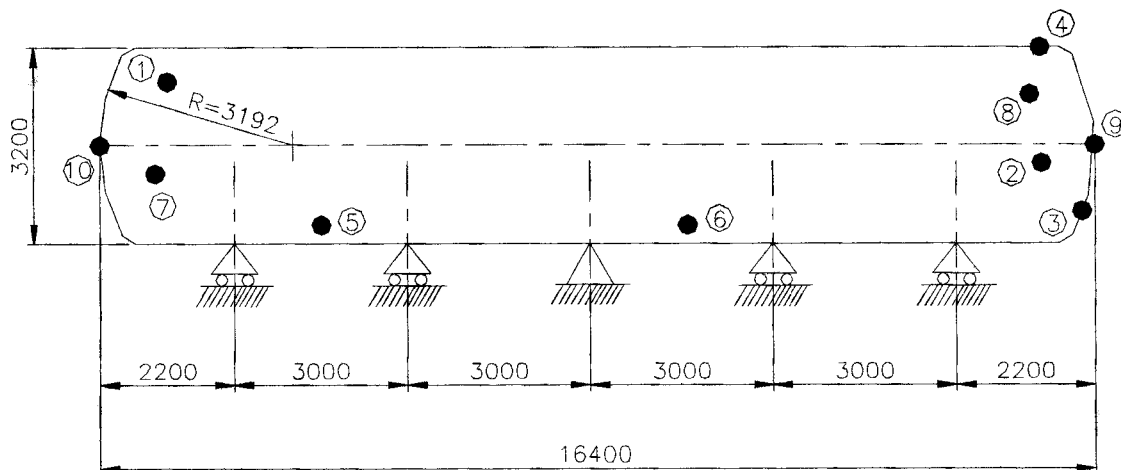


Figura 16- Esboço do vaso desaerador com a localização dos pontos monitorados

Para determinar o estado de tensões nestes pontos do vaso desaerador foi necessário medir deformações em três direções, utilizando-se rosetas retangulares, uma vez que não se conhecia a priori o sentido das tensões principais. A Figura 17 mostra a disposição dos extensômetros elétricos em cada ponto monitorado.

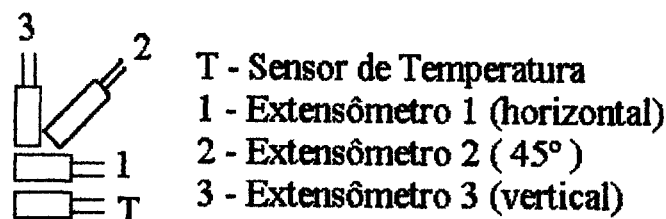


Figura 17 - Disposição dos extensômetros em cada ponto monitorado

Cada ponto monitorado consiste de uma roseta retangular e um sensor de temperatura.

As temperaturas foram medidas utilizando-se sensores de temperatura, fabricados com a mesma técnica que se fabrica os extensômetros elétricos. A diferença está no fato de que a liga da qual são fabricados os sensores de temperatura são insensíveis à deformação mecânica. São sensíveis somente à variação de temperatura.

## 5.2 Extensômetros

A escolha do extensômetro foi determinada pelas seguintes condições:

- temperatura máxima esperada: 160 °C
- deformação máxima: 10.000  $\mu$ d (1,0 %)
- características do ensaio: dinâmico (de baixa frequência e com carregamentos aleatórios)

Para atender a estas exigências, foi escolhido a roseta retangular QFRA-3, da TML (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.), com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

- série do Extensômetro: QF foil gauge;
- material do elemento sensor: Cu-Ni, Foil;
- material da base: Polyimide;
- faixa de temperatura operacional:
  - choque térmico: -196 a ~ + 230 °C
  - normal : -20 a ~ +200 °C
  - compensado para temperatura (quando empregado em aço): +10 a ~ +100 °C;
- limite de deformação: 3%;
- limite de Fadiga:  $1 \times 10^6$  ciclos;
- comprimento do elemento sensor: 3 mm;
- largura do elemento sensor: 1,7 mm;
- área do suporte: 11 x 11 mm<sup>2</sup>;
- resistência nominal:  $120 \pm 0,5 \Omega$ ;
- fator de conversão (gauge factor approx.): 2,1;
- coeficiente de expansão térmica:  $11,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ;
- adesivos da TML compatíveis e faixa de temperatura operacional:
  - P-2 (-30 a 180 °C);
  - CN (-30 a 100 °C);
  - NP-50 (-30 a 230 °C);
  - C-1 (-196 a 200 °C);
  - EA-2 (-196 a 80 °C)

Na Figura 18 mostra-se a curva de deformação aparente e de variação do fator de conversão K com a temperatura para o extensômetro QFRA-3.

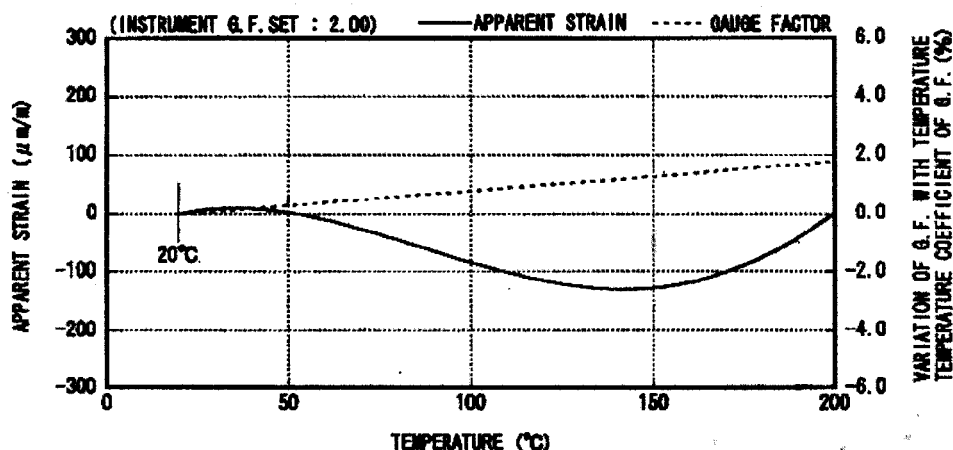


Figura 18 - Curva de deformação aparente e de variação do fator de conversão K para o extensômetro QFRA-3

### 5.3 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 ao tamanho e posição do vaso desaerador.

Baseado nas condições de teste, o adesivo escolhido foi o NP-50, marca TML, cujas características são:

- temperatura de cura: ambiente;
- tempo de cura: 1 a 2 horas sobre pressão de contato de 0,5 a 3 Kg/cm<sup>2</sup>;
- material compatível: metal;
- Faixa de temperatura operacional: -30 a 300 °C.

### 5.4 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  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- sensibilidade:  $0,43 \text{ } \Omega / ^\circ\text{C}$  ( $80$  a  $200^\circ\text{C}$ );  
 $0,34 \text{ } \Omega / ^\circ\text{C}$  ( $-20$  a  $80^\circ\text{C}$ );

## 5.5 Cablagem

Dos extensômetros até o transmissor de 4 a 20 mA, foram utilizados fios rígidos resistentes até  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  de fabricação da TML ( $3 \times 0,18 \text{ mm}^2$  modelo 67.9.24) e do transmissor de 4 a 20 mA até o multiplexador foram utilizados cabos blindados de fabricação da KMP / Pirelli tipo AF  $3 \times 1 \times 28 \text{ AWG}$ .

## 5.6 Sensores de Deslocamento

Foram instalados três sensores de deslocamento, resistivos, para acompanhamento da expansão térmica, sendo um em cada apoio móvel do lado direito e um no último apoio móvel do lado esquerdo, com capacidade de leitura de 100 mm e ligados a um registrador HP de 10 canais. Os sensores de deslocamentos são da marca KYOWA.

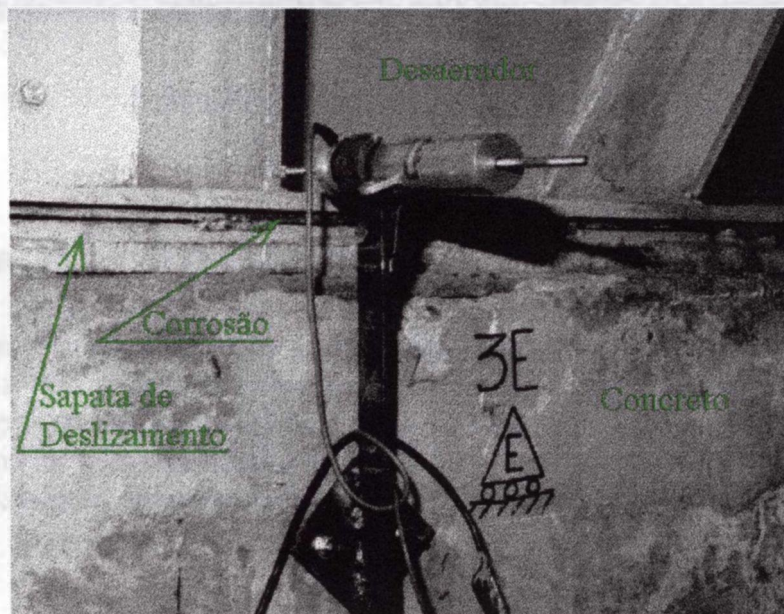


Figura 19 - Sensor de deslocamento, fixado no apoio móvel do lado esquerdo do vaso desaerador

## 5.7 Localização do Vaso Desaerador

O vaso desaerador fica na área de circulação da usina, a céu aberto, trabalha à uma temperatura de até 152 °C, dependendo da pressão de operação. Essas condições inóspitas requerem uma instrumentação refinada e bem trabalhada para obter-se os valores de deformação a que o vaso desaerador está submetido; assim, procurou-se compatibilizar os recursos técnicos disponíveis com as condições de operação do vaso desaerador.

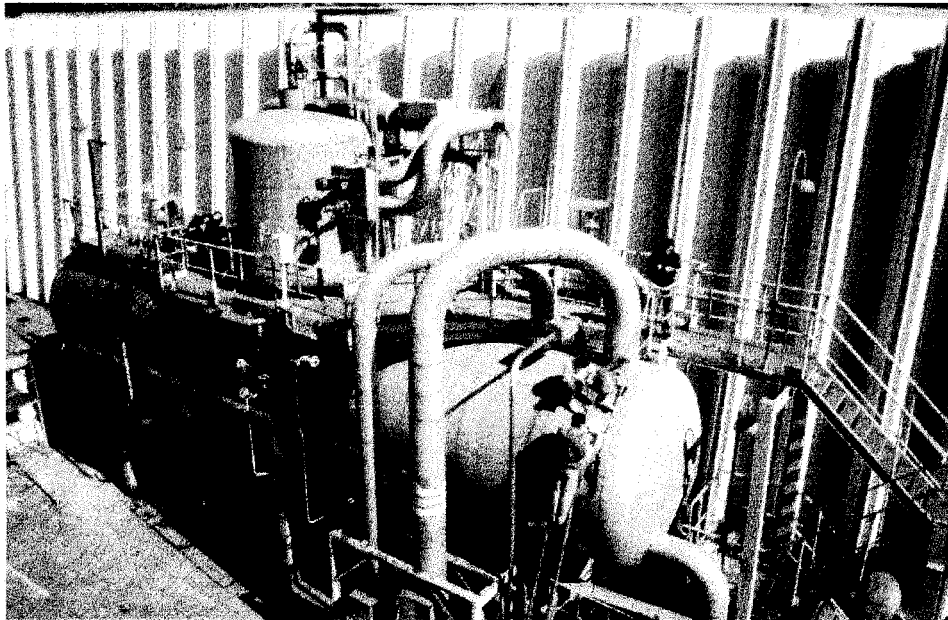
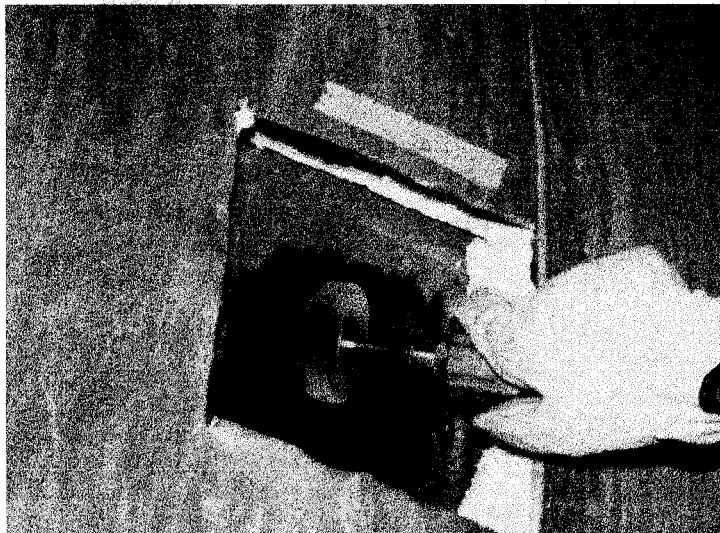


Figura 20 - Vista geral do vaso desaerador

## 5.8 Instalação dos Extensômetros

Em cada ponto monitorado, após a montagem de um aparato para movimentação ao longo do vaso desaerador, foi retirada a proteção mecânica e térmica que o envolve e iniciada a preparação da superfície para colagem dos extensômetros seguindo procedimentos [5, 8] e recomendações dos fabricantes. As Figuras 21 à 25 ilustram as etapas para instalação dos extensômetros.





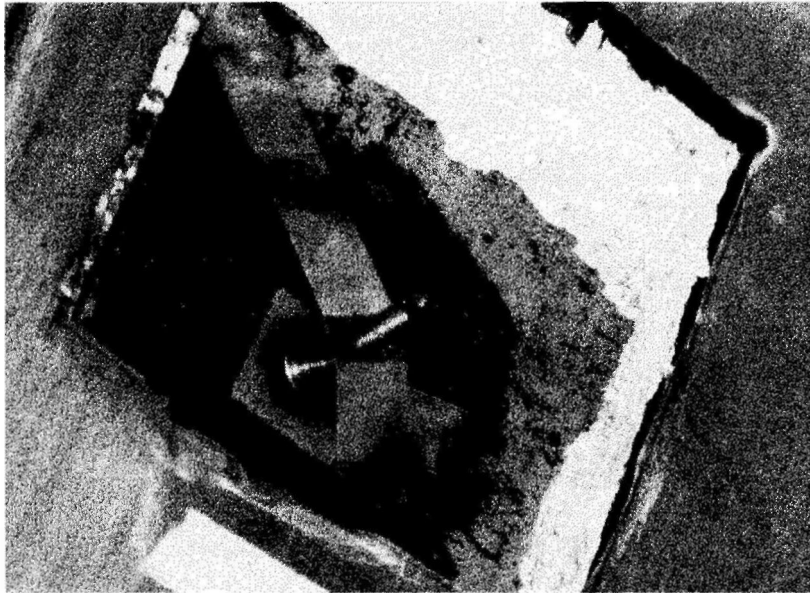


Figura 23 - Dispositivo para manter a pressão de colagem

Depois de colados, foram realizadas as conexões dos fios de ligação do extensômetro ao transmissor de 4 a 20 mA, através da solda por descarga elétrica.

Ao se terminar a soldagem, foi aplicada, em cada ponto monitorado, uma camada de aproximadamente 4 mm de espessura do revestimento KE - 348 (Figura 24) de fabricação da TML, para impermeabilização dos extensômetros. Este revestimento tem as seguintes propriedades:

- tempo de cura requerido: 15 a 20 horas à temperatura ambiente e ao ar livre;
- temperatura de trabalho: -60 à 250 °C.



Figura 24 - Detalhe da impermeabilização efetuada nos extensômetros

Após a impermeabilização, foram efetuadas as proteções mecânicas, através do posicionamento sobre a área impermeabilizada de uma capa metálica que foi soldada à parede do vaso desaerador através de descarga elétrica.

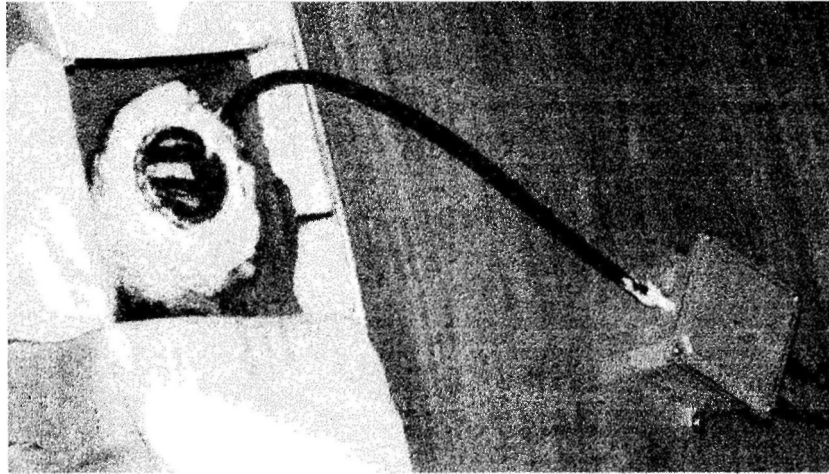


Figura 25 - Detalhe da proteção mecânica e o transmissor de 4 a 20 mA.

Os transmissores de 4 a 20 mA foram aparafusados à proteção mecânica do revestimento térmico do vaso desaerador, próximo aos pontos monitorados e a conexão do extensômetro aos transmissores foi efetuada através de um condulet flexível, Figura 25.

Os cabos provenientes dos transmissores de 4 a 20 mA foram levados à sala de monitoração, Figura 26, e ligados ao multiplexador, que por sua vez foi ligado ao microcomputador que continha o programa de aquisição de dados, em ambiente DELPHI, desenvolvido no CDTN. Este programa tem a capacidade atualmente (em função do multiplexador) de ler simultaneamente 40 canais com intervalo de até 5s entre as varreduras.

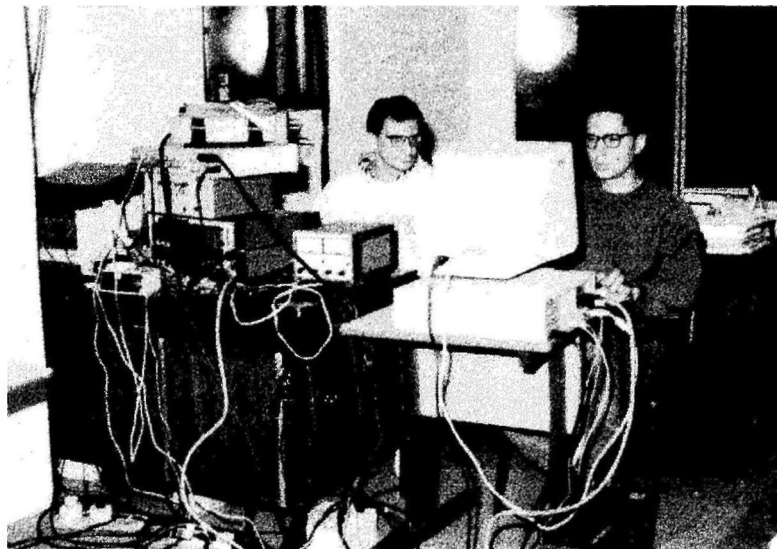


Figura 26 - Sala de monitoração com os equipamentos de aquisição de dados

Os cabos dos sensores de deslocamento também foram levados à sala de monitoração e ligados ao registrador de 10 canais da HP.

A excitação das pontes de Wheatstone foi feita com fonte de tensão contínua convencional e o desequilíbrio lido foi enviado ao multiplexador através de um transmissor de 4 a 20 mA. A coleta e o armazenamento dos desequilíbrios lidos foram efetuados por um software de aquisição de dados específico desenvolvido no CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear).

A monitoração de cada ponto pode ser visualizada através do diagrama de blocos apresentado na Figura 27.

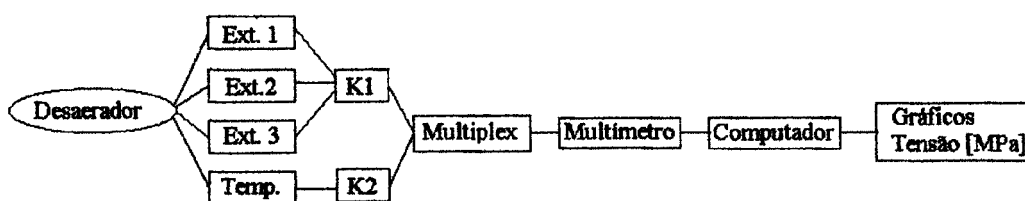


Figura 27 - Diagrama de blocos para cada ponto monitorado

Terminada a instrumentação do vaso desaerador, foi efetuado um teste à temperatura ambiente, adicionando-se primeiramente água até 2,4 m de altura de água e posteriormente pressão até 3 Kgf/cm<sup>2</sup> através de compressores de ar comprimido da usina termelétrica. Foram coletados dados referentes à condição de 1, 2 e 3 Kgf/cm<sup>2</sup>.

O programa de aquisição de dados ficou monitorando, em intervalos de aproximadamente 30 minutos, o vaso desaerador durante um mês antes da partida para verificar a estabilidade das medidas e flutuação do sinal em função das variações da temperatura ambiente.

Durante a partida da usina termelétrica, o sistema de aquisição de dados ficou ligado, efetuando varreduras com intervalos de 5 segundos, para registrar as pequenas variações de temperatura e tensões atuantes no vaso desaerador.

Em regime (fornecendo 125 MW) o intervalo de leitura foi estipulado em aproximadamente 30 minutos.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Resultados computacionais

#### 6.1.1 Simulação do comportamento global das tensões via programa ANSYS

A simulação efetuada pela Supervisão de Ensaios e Metrologia do CDTN [22], utilizando-se o código de simulação computacional ANSYS, verificou o comportamento geral das tensões atuantes no vaso desaerador nas seguintes condições:

1. temperatura ambiente;
2. pressão interna de 4 Kgf/cm<sup>2</sup>;
3. não existência de trincas internas;
4. desprezou-se o peso próprio;
5. não existência de corrosão;
6. não existência de tensões residuais.

A simulação foi efetuada a temperatura ambiente em função da versão do código de simulação computacional disponível no CDTN, o qual não permite simulação de efeitos térmicos.

A simulação serve como base e comparação para o problema.

Os resultados obtidos para as tensões atuantes em Kgf/mm<sup>2</sup> são apresentados nas figuras a seguir:



Figura 28 - Simulação computacional, via ANSYS, dados referentes ao eixo X lado inferior



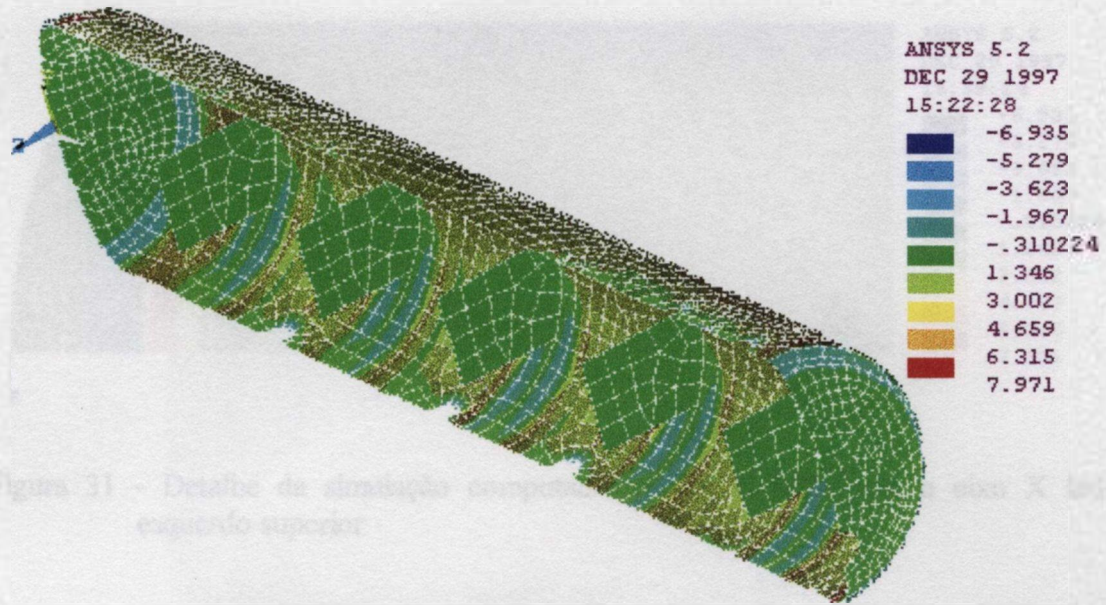


Figura 29 - Detalhe da simulação computacional via ANSYS dados referentes ao eixo X, mostrando os enrijecedores internos



Figura 30 - Detalhe da simulação computacional via ANSYS para o eixo X lado direito superior



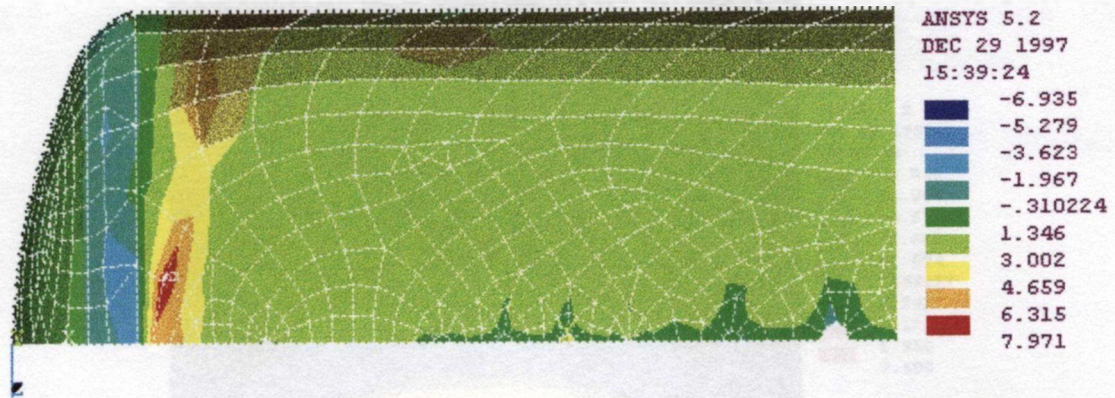


Figura 31 - Detalhe da simulação computacional via ANSYS para o eixo X lado esquerdo superior

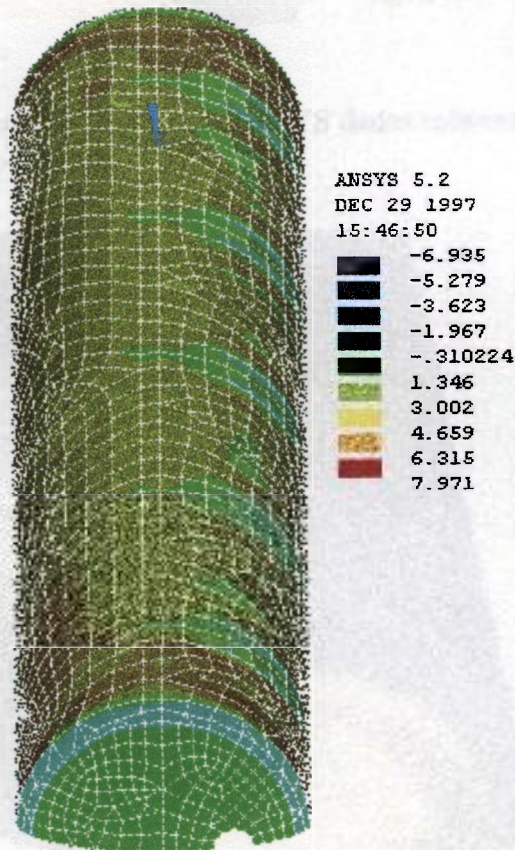


Figura 32 - Simulação computacional via ANSYS dados referentes ao eixo X, mostrando o lado da boca de visita.



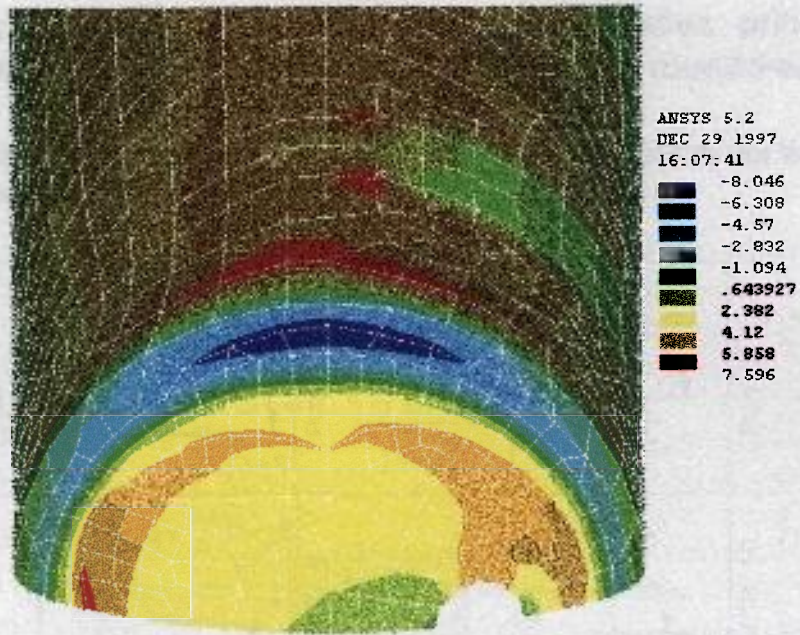


Figura 33 - Simulação computacional via ANSYS dados referentes ao eixo Y, mostrando o lado da boca de visita.

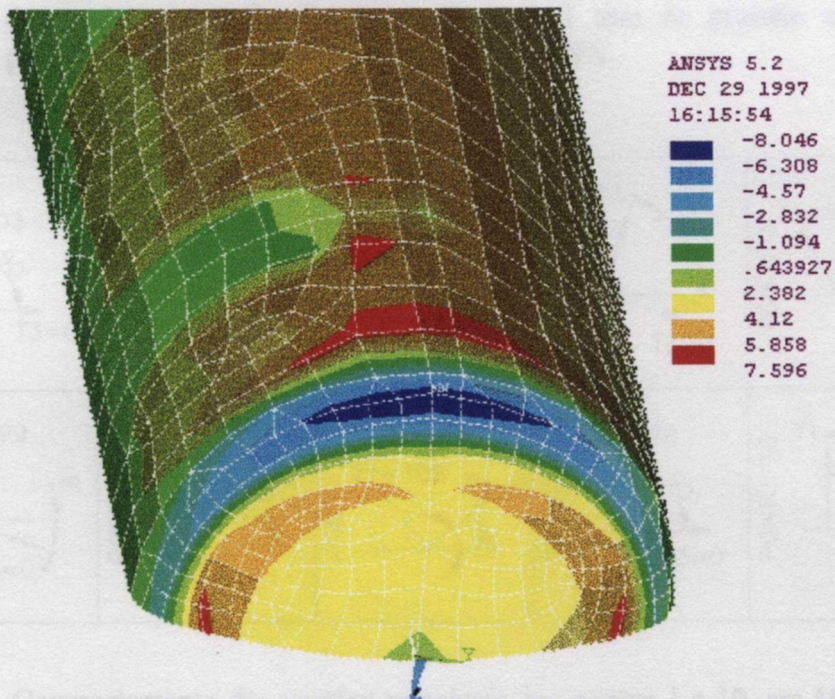


Figura 34 - Simulação computacional via ANSYS dados referentes ao eixo Y, mostrando o lado oposto ao da boca de visita.



### 6.1.2 Simulação do comportamento das tensões principais via programa ANSYS para os pontos a serem monitorados

Nas figuras abaixo, são apresentados os valores das tensões principais em MPa para cada ponto a ser monitorado.

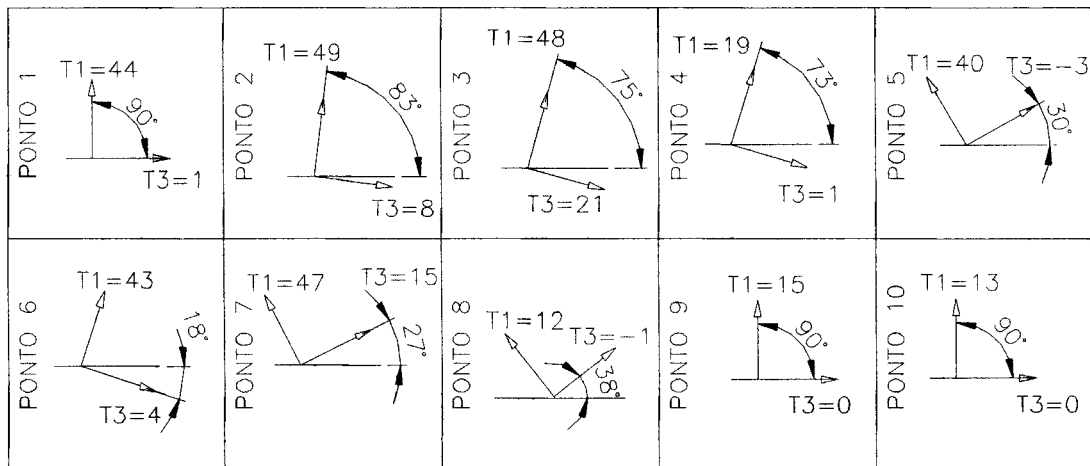


Figura 35 - Comportamento das tensões principais dos pontos 1 a 10, em MPa, do vaso desaerador contendo 2,4 m de água e 2 atm de pressão obtidas pelo programa de simulação computacional ANSYS.

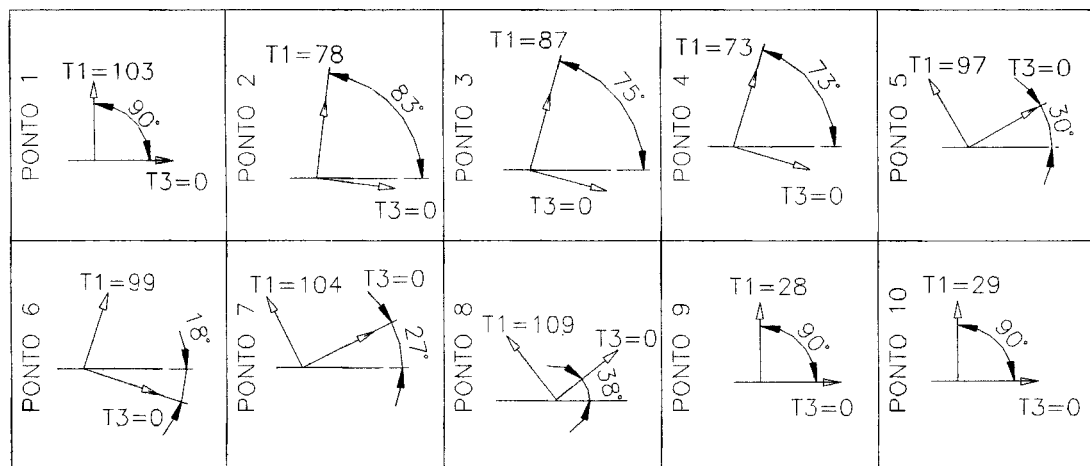


Figura 36 - Comportamento das tensões principais dos pontos 1 a 10, em MPa, do vaso desaerador contendo 2,4 m de água e 4 atm de pressão obtidas pelo programa de simulação computacional ANSYS.

## 6.2 Resultados experimentais

Foram coletados dados durante a partida, operação e parada da usina termelétrica em duas fases sendo:

- primeira fase: agosto de 96 a dezembro de 96; nesta fase, observou-se uma não repetibilidade dos valores de repouso, causados provavelmente por um número insuficiente de ciclos nos extensômetros para que pudessem responder de acordo com a solicitação da estrutura;
- segunda fase: janeiro de 97 à agosto de 97; nesta fase, observou-se uma repetibilidade dos resultados quando da solicitação da estrutura para as mesmas condições. Nessa fase, teve-se a oportunidade de se efetuar testes programados com a injeção de ar comprimido para simular as condições de pressão no vaso desaerador, sem o efeito das tensões térmicas e para vários incrementos de carregamentos efetuados, obteve-se estabilidade nas medidas e nos valores de retorno ao zero. Antes destes testes de pressão, o sistema ficou medindo a flutuação das tensões em vazio (apenas pela variação da temperatura ambiente) e obteve-se uma variação de aproximadamente 10 MPa, para cada ponto monitorado, para um mês de monitoração.

Utilizando-se procedimento de cálculo específico para extensometria [12, 13], e tendo como base as Equações 41, 42 e 43 determinou-se os valores das Tensões Principais Máxima e Mínima em cada ponto monitorado.

Apresenta-se, a seguir, os esboços da orientação e intensidade das tensões principais em MPa para cada ponto monitorado, conforme Figura 16.

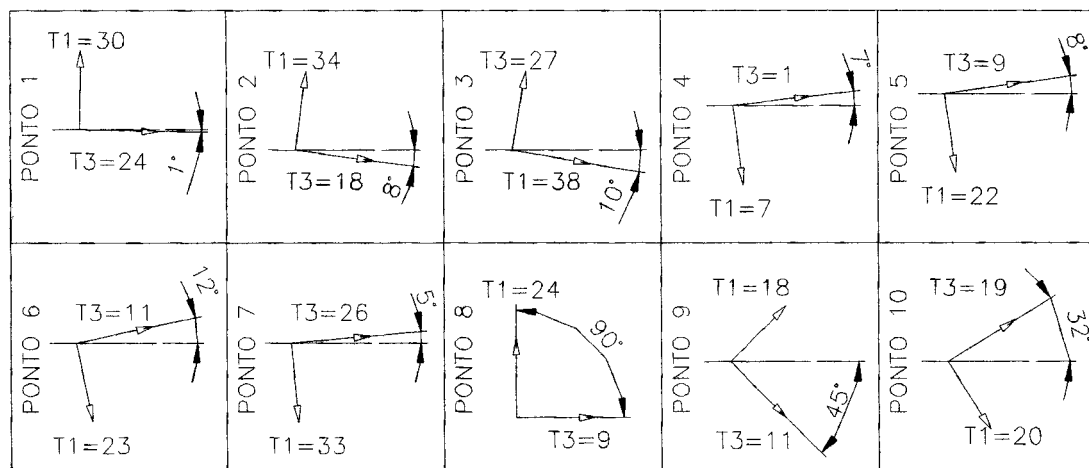


Figura 37 - Comportamento das tensões principais experimentais dos pontos 1 a 10, em MPa, do vaso desaerador contendo 2,4 m de altura de água e 2 atm de pressão obtida via ar comprimido à temperatura ambiente.

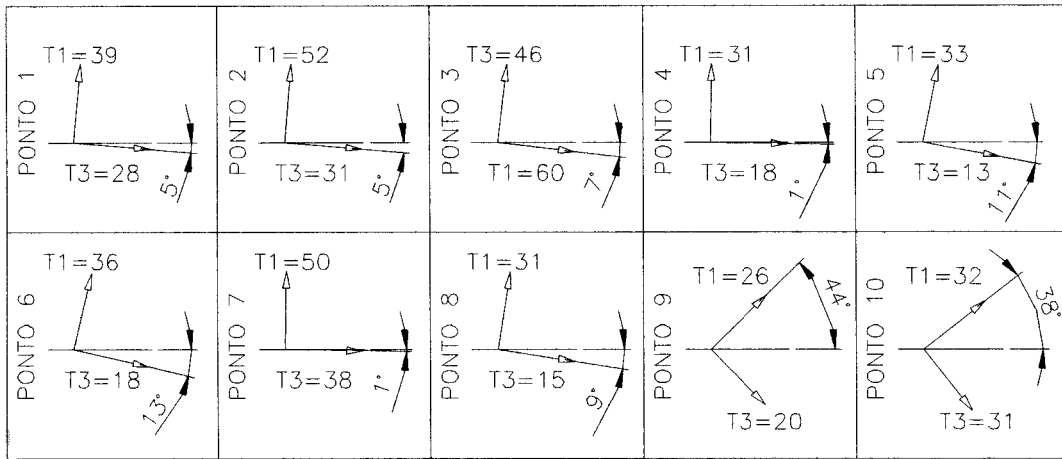


Figura 38 - Comportamento das tensões principais experimentais dos pontos 1 a 10, em MPa, do vaso desaerador contendo 2,4 m de altura de água e 3 atm de pressão obtida via ar comprimido à temperatura ambiente.

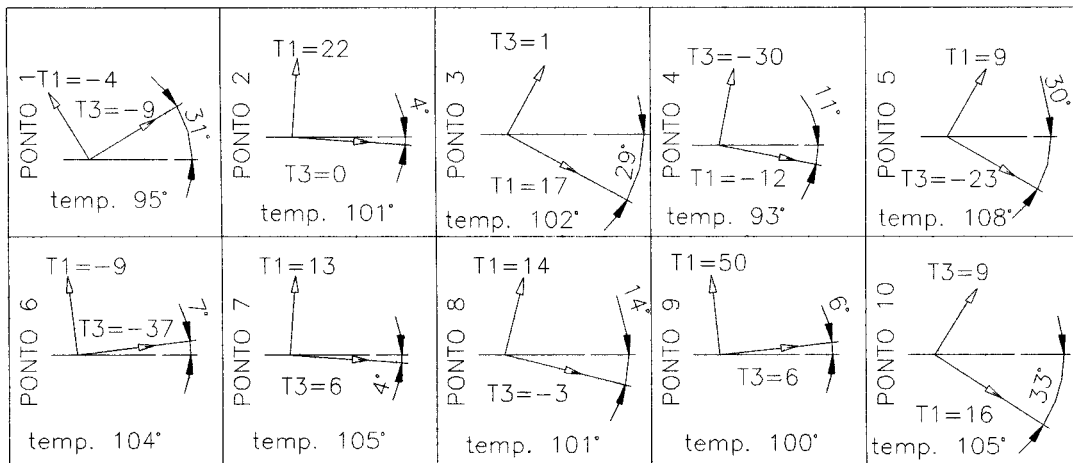


Figura 39 - Comportamento das tensões principais experimentais, dos pontos 1 a 10, em MPa, do vaso desaerador em REGIME com a usina fornecendo 40 MW.

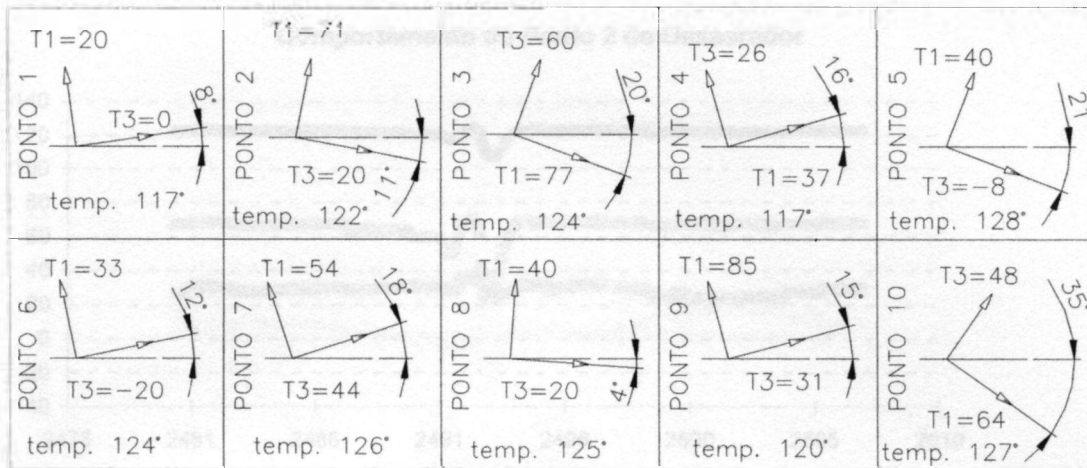


Figura 40 - Comportamento das tensões principais experimentais nos pontos 1 a 10, em MPa, do vaso desaerador em REGIME com a usina fornecendo 125 MW.

As figuras a seguir apresentam os gráficos do comportamento das temperaturas, tensões principais (máxima e mínima) e tensões de cisalhamento obtidos para cada ponto monitorado durante um transiente, ocorrido em 01/06/97, pela abertura indesejável de uma válvula de alimentação de água fria. Destaca-se aqui que estes gráficos são apenas uma parte dos dados levantados durante a operação da Usina Termelétrica. Eles foram os escolhidos devido aos valores das tensões principais serem os mais significativos entre obtidos até agora.

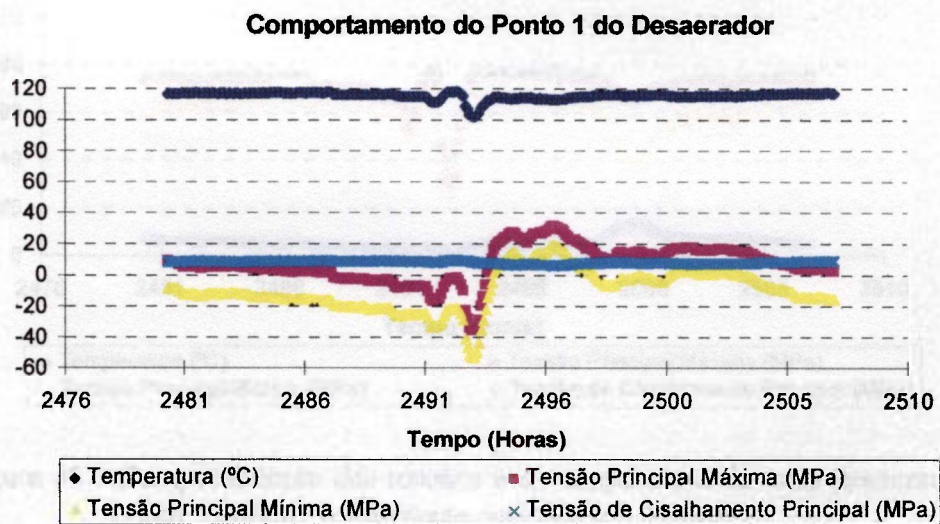


Figura 41 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 1 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

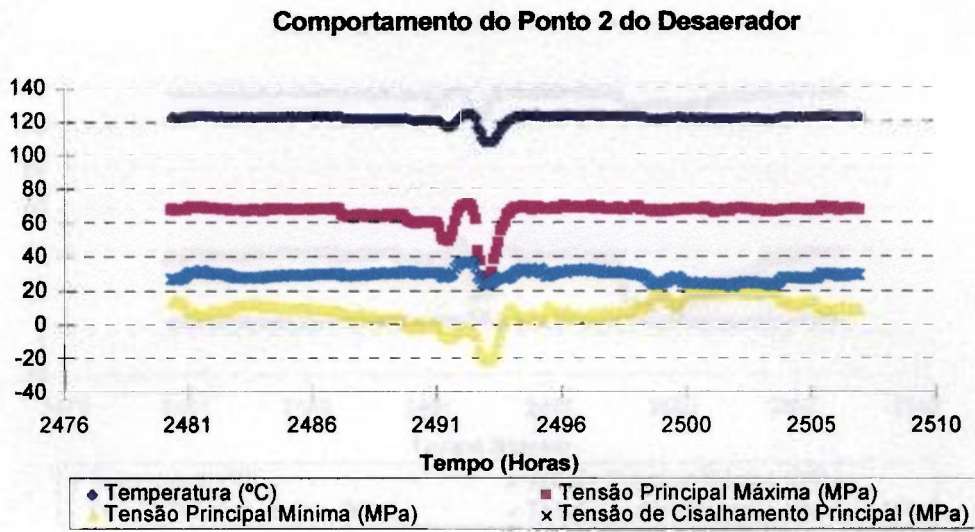


Figura 42 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 2 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

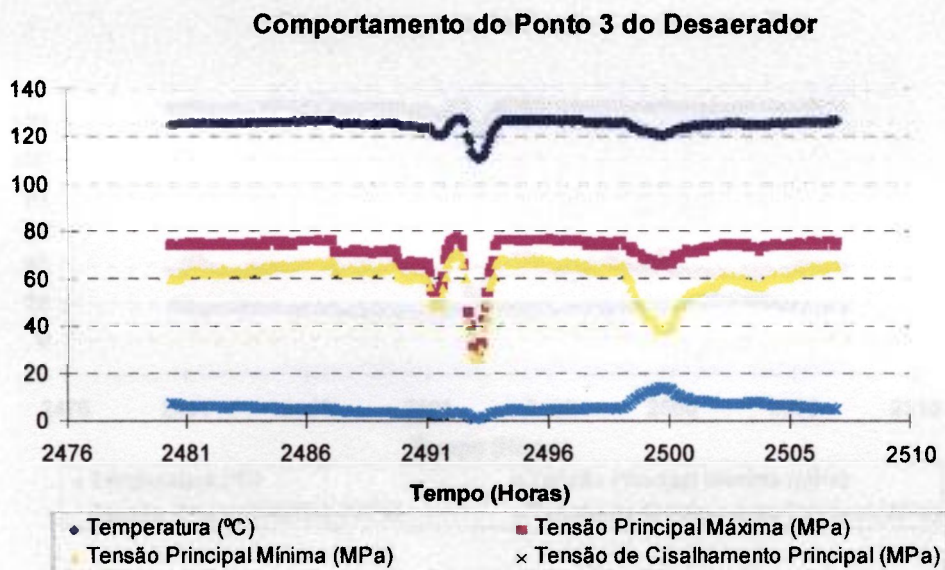


Figura 43 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 3 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.



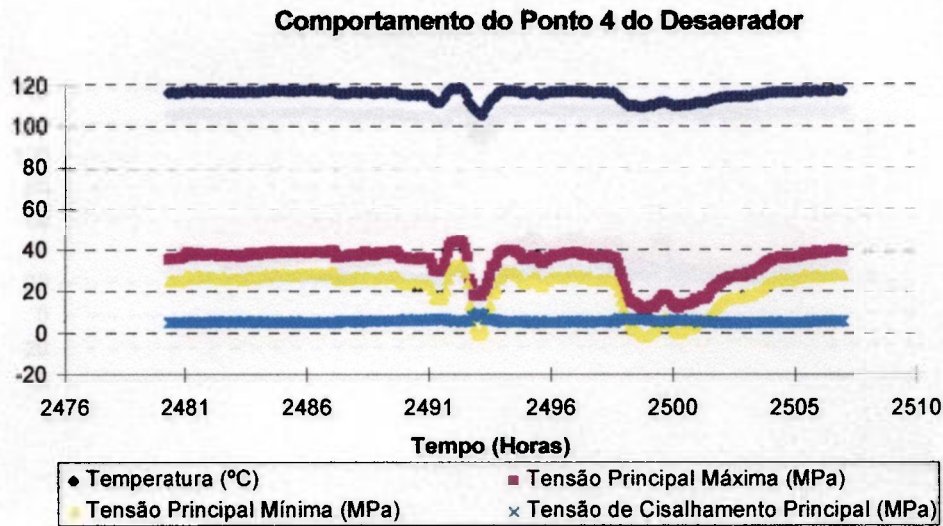


Figura 44 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 4 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

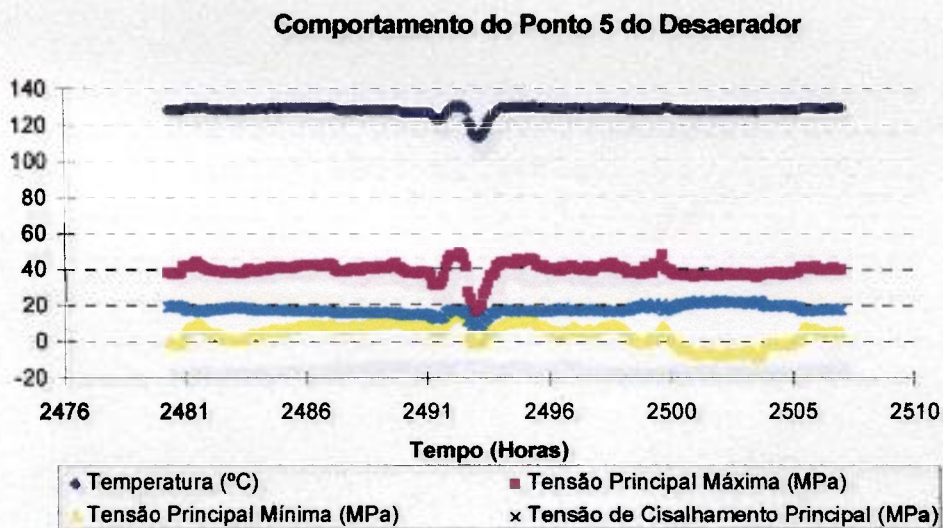


Figura 45 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 5 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

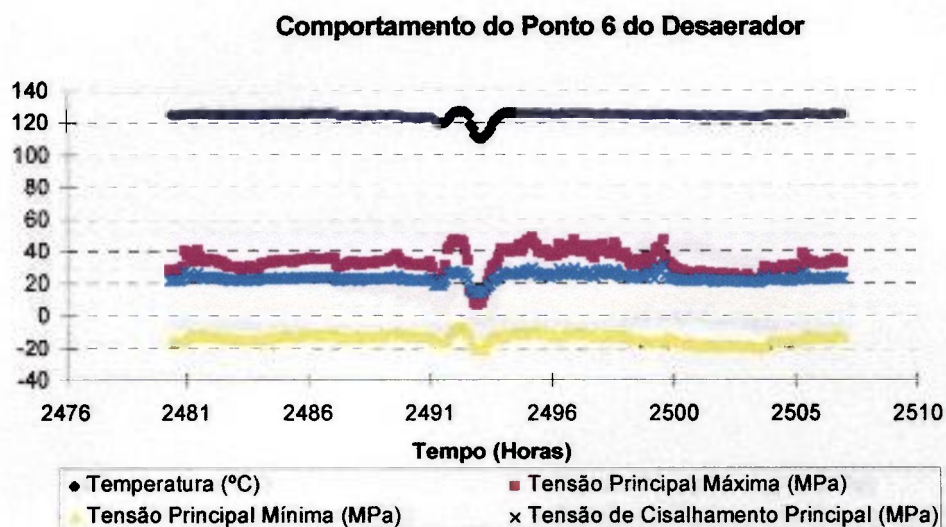


Figura 46 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 6 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

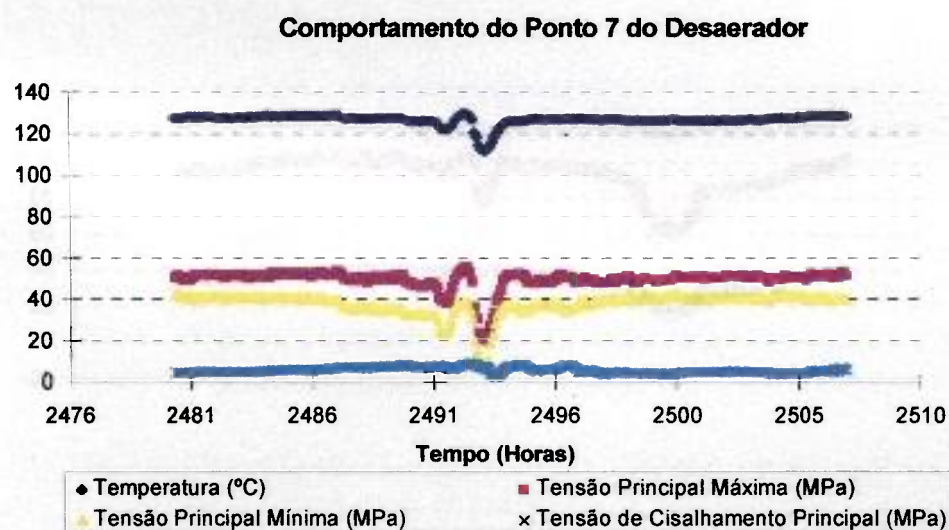


Figura 47 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 7 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

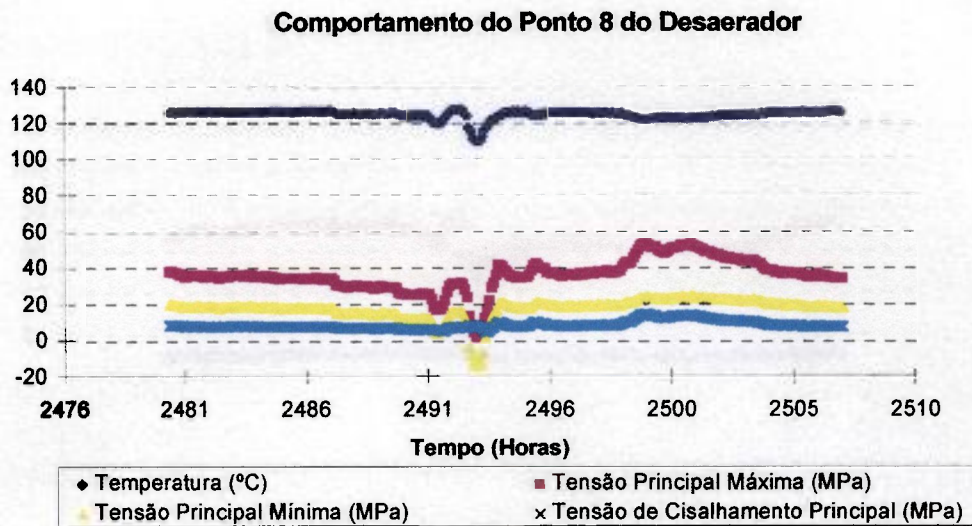


Figura 48 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 8 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

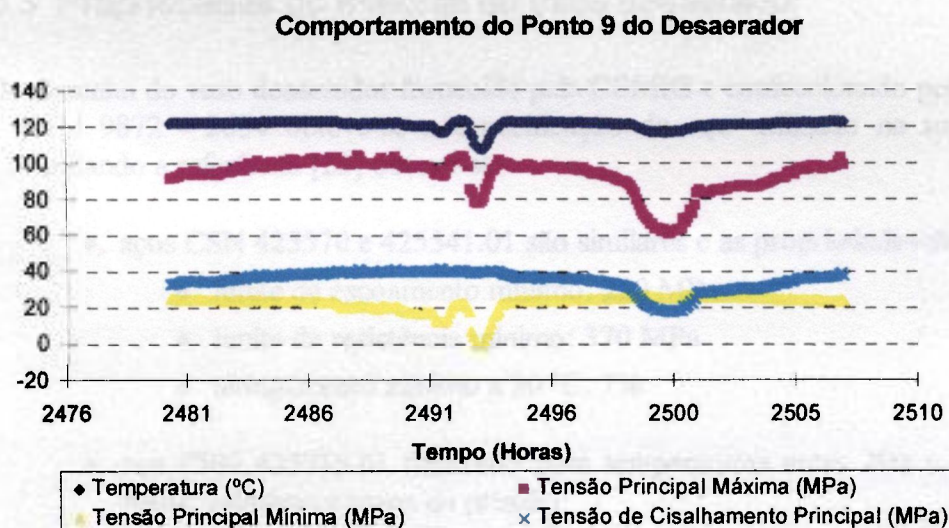


Figura 49 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 9 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.



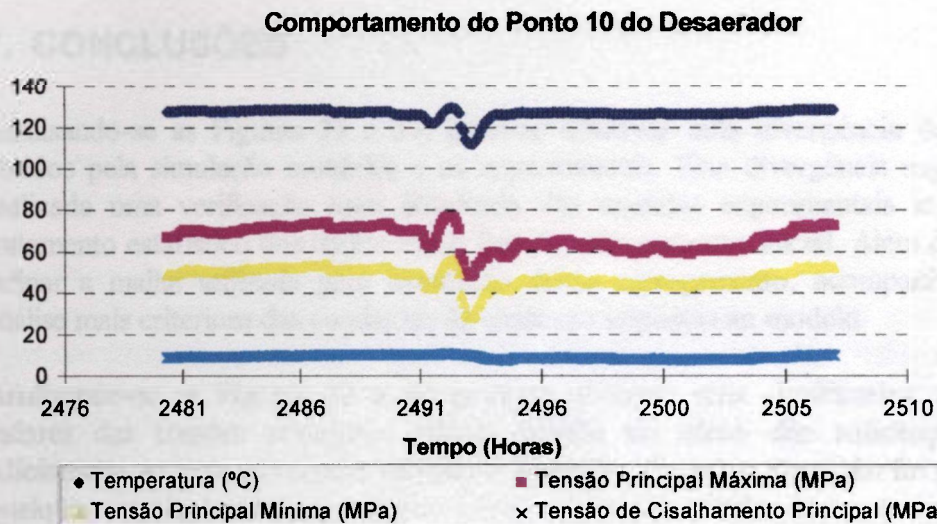


Figura 50 - Comportamento das tensões e da temperatura do vaso desaerador para o ponto 10 durante o transiente ocorrido em 01/06/97.

Os deslocamentos dos apoios móveis do vaso desaerador, medidos através dos sensores de deslocamento, apresentaram valores da ordem de 5 mm, orientados no mesmo sentido.

### 6.3 Propriedades do material do vaso desaerador

Do desenho do vaso desaerador fornecido pela CEMIG e confeccionado pela SKODA nº 1 KTU 9872 - 2654 obteve-se a especificação do aço utilizado na sua fabricação. Consultando a referência [23] obteve-se:

- aços CSN 425570 e 425541.01 são similares e as propriedades mecânicas são:
  - limite de escoamento mínimo: 250 MPa
  - limite de resistência mínimo: 370 MPa
  - alongamento mínimo a 20 °C: 7%
- aço CSN 425715.01 (indicado para temperaturas entre 200 e 300 °C, para tubos, caldeiras e vasos de pressão):
  - limite de escoamento mínimo: 230 MPa
  - limite de resistência mínimo: 350 MPa
  - alongamento mínimo a 20 °C: 18%
- aço CSN 425310.11 (aço de boa soldabilidade, laminado a quente e normalizado, indicado para caldeiras e vasos de pressão):
  - limite de resistência entre 363 e 440 MPa

## 7. CONCLUSÕES

Analisando-se as Figuras 35 e 37, pode-se observar uma divergência dos resultados obtidos pela simulação numérica e os experimentais. Esta divergência sugere que seja realizada uma verificação mais detalhada das medidas experimentais através de um tratamento estatístico dos dados nessa fase de carregamento inicial. Além disto, deve-se refinar a malha utilizada para simulação desse carregamento, acompanhado de uma análise mais criteriosa das condições de contorno impostas ao modelo.

Analisando-se as Figuras 37 à 40 pode-se observar uma significativa mudança nos valores das tensões principais obtidas devido ao efeito das solicitações térmicas adicionadas ao vaso des aerador durante a operação. Na etapa atual não foi possível fazer qualquer correlação entre o valor das tensões principais obtidas à temperatura ambiente e à temperatura de operação.

Analisando-se as Figuras 36 e 40, verifica-se que na primeira está sugerido um estado uniaxial de tensões e ao se inserir as tensões térmicas devido a operação (125 MW que corresponde a aproximadamente 4 Kgf/cm<sup>2</sup> de pressão interna) o estado de tensões passa a ser biaxial, justificando a necessidade de se gerar um modelo nas condições de temperatura de operação do vaso des aerador.

A técnica de análise experimental de tensões empregada, extensometria, se mostrou adequada para aquisição dos sinais de deformação do vaso des aerador e não interferiu na operação da Usina Termelétrica.

O vaso des aerador continua sendo monitorado para verificação das tensões principais em condições mais severas de operação, dando continuidade ao trabalho de caracterização mecânica para Avaliação de Integridade Estrutural do vaso des aerador.

Adotando-se o valor conservativo de 230 MPa [23] para o limite de escoamento do vaso des aerador pode-se verificar que, durante a operação e mesmo na simulação efetuada via o programa computacional ANSYS, os valores das tensões principais obtidos nos pontos monitorados estão muito abaixo desse valor.

Avaliando-se as tensões obtidas durante o transiente registrado em 01/06/97, devido à abertura acidental de uma válvula (por problemas de aterramento indesejado) que originou uma descarga de água fria no vaso des aerador, pode-se observar que, para o ponto 9, a tensão principal máxima atingiu valores próximos à 100 MPa e que esse valor representa aproximadamente 50% do valor da tensão de escoamento adotada para o material do vaso des aerador.

Assim, o fator de segurança, levando em conta a tensão de escoamento (Critério de Escoamento), seria de:

$$FS = \frac{230}{105} \cong 2 .$$

Este fator de segurança não é aconselhável para estruturas que estejam submetidas a solicitações dos tipos acidentais [24], que é como o fenômeno de transiente pode ser caracterizado.

Considerando-se que os limites de operação estão críticos, é necessária uma nova análise. Esta análise deve ser baseada não apenas em simples critérios de falha de normas mas sim em avaliação criteriosa dos esforços dinâmicos, utilizando técnicas de mecânica de fratura em conjunto com avaliação do carregamento dinâmico real do vaso de pressão. De qualquer forma, fica clara a importância de caracterizar e acompanhar as tensões aplicadas ao vaso desaerador.

Justifica-se, pois, a necessidade de simular o comportamento do vaso desaerador à temperatura de trabalho para verificar se seria esse o ponto de maior solicitação, caso contrário, é necessário realizar uma monitoração experimental nesses novos pontos, afim de assegurar que não estejam ocorrendo deformações localizadas em pontos que não estejam sendo monitorados.

A preocupação é pertinente devido aos valores de deslocamento medidos nos apoios móveis do vaso desaerador pois pode-se observar que os apoios denominados móveis, durante o início da operação, não se comportam como na teoria, impedindo a livre expansão do vaso desaerador e depois liberando-o por pulsos, que podem ser notados, através de enormes ruídos emitidos quando o vaso desaerador consegue vencer tais restrições que não estão previstas na teoria.

## 8. SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Deve-se continuar a monitoração contínua do vaso desaerador para um acompanhamento da evolução das tensões principais atuantes no vaso desaerador, de forma a comparar os valores das tensões com o estado das trincas internas do vaso, verificadas antes da instrumentação do vaso, para certificar que os pontos monitorados têm condições de detectar a propagação das trincas do desaerador.

Deve-se verificar a possibilidade de monitorar novos pontos do vaso desaerador para se obter um perfil de temperatura a que o vaso desaerador está submetido, e verificar se o transiente de temperatura, durante a partida, é o único responsável pelas mudanças de orientação das tensões.

Deve-se efetuar uma simulação da real situação a que o vaso desaerador está submetido, para comparar com os valores obtidos via extensometria.

Deve-se fazer um tratamento estatístico dos dados para se verificar o percentual de propagação de erros, em função das leituras dos extensômetros separados e depois a sua implicação nas equações para cálculo das tensões principais.

Deve-se promover uma monitoração, através de sensores de deslocamento, em todos os apoios do vaso desaerador para obtenção dos valores de deslocamentos e verificar se estão se comportando de acordo com a teoria ou se os apoios deslizantes estão sendo afetados pela corrosão que foi observada em suas bases. É importante que essa monitoração seja capaz de medir os deslocamentos axiais e transversais bem como sugerir algum efeito de flexão ou torção nos apoios.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NACE - National Association of Corrosion Engineers: *Recommended Practice for Prevention, Detection and Correction of Desaerator Cracking*, 1990.
- [2] Araújo, N. B. M.; Castro, S. T.: *Garantia da Integridade Estrutural do Rotor da Turbina da Usina Hidrelétrica de São Simão para funcionamento em Potências Superiores à Nominal*, 11º Congresso Brasileiro de Manutenção, pp 456-467, Belo Horizonte, 1996.
- [3] Gomes, P. T. V.; Lourenço, O R.; Maia, N. S.; Mansur, T. R.: *High temperature strain measurements*, Proceedings SPIE - The International Society for Optical Engineering, pp 244-249, vol 2921, Singapore, 1996.
- [4] Mansur, T. R.: *Análise de Tensões em tubulação submetida a transientes de pressão interna e temperatura* - Tese de Mestrado/UFMG - 1981.
- [5] Avril J.: *Encyclopedie Vishay D'Analyse Des Contraintes*, Vishay-Micro mesures, 1974.
- [6] Micro Measurements, *Strain Gage Selection*, Nota Técnica, TN-505-2, 1989.
- [7] Fialho, J. L., *Análise Experimental de Tensões*, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa - 1969.
- [8] Dally, J. W. e Riley, W. F. *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, third edition, 1991.
- [9] Lissner, H. R. e Perry, H. R., *The Strain Gage Primer*, second edition - 1962.
- [10] Adams P. H. e Dove, R. C., *Experimental Stress Analysis and Motion Measurement*, 1965.
- [11] Micro Measurements, *Strain Gage Temperature Effects*, Nota Técnica, TN-128-2, 1976.
- [12] Di Lorenzo, R. F.; Mansur, T. R.; Moraes, J. R. G: *Correção de Medidas Extensométricas e Avaliação dos Erros nos Resultados Experimentais*, Nota Técnica/ NUCLEBRÁS, 1985.
- [13] Beer, F. P., *Resistência dos Materiais*, McGraw-Hill, 1982.
- [14] Lima, W. C.; *Cálculo de Rosetas (I)*.
- [15] Max Mark Frocht; *Fotoelasticidad*, volume I, 1950.

- [16] Ricardo, O G.; *Introdução à Resistência dos Materiais*, Universidade de Campinas, 1977.
- [17] Nepomuceno, L. X.; *Técnicas de Manutenção Preditiva* - 1989.
- [18] Castro, J. T. P.; Freire, J. L. F.; Manfredi, C.; Otegui, J. L.; *Aspectos Gerais da Avaliação de Integridade e Extensão de Vida de Estruturas e Equipamentos Industriais* - Apostila PUC/RJ.
- [19] ABCM, *Prática Recomendada para Inspeção de Equipamentos e Instalações que Operam em Temperaturas Elevadas*; 1992.
- [20] Narayanan, T. V.; "State of the Art of Life Assessment and Extension of Power in Chemical Plants in North America"; Anais do IEV 93, ABCM, 1-13, 1993.
- [21] Easley, J. T.; Rolfe, S. T.; Willems, N.; *Resistência dos Materiais*, McGraw-Hill - 1983.
- [22] Mourão, R. P.; Terra, J. L.: *Verificação Estrutural do Tanque Desaerador da Usina Termoelétrica de Igarapé*, Relatório de Progresso / CNEN, 1995.
- [23] Kolar J.; Seidler, A.; *Výber Norem, pro dílny kovoprůmyslu*, Praha 1952.
- [24] The American Society of Mechanical Engineers; *Boiler and Pressure Vessel Code ASME*, 1992.
- [25] Abe T.; Fujiwara H.; Tanaka K; *Residual Stresses - III* - Science and Technology Vols 1 e 2, Elsevier Applied Science, Londres - 1992.
- [26] Di Lorenzo, R. F.; Mansur, T. R.: *Medição de Tensões em Tubulação submetida a Transientes de Pressão Interna e Temperatura*, X ENFIR, pp 389-392, Águas de Lindóia, São Paulo, 1995.
- [27] Harvey, J. F.; *Theory and Design of Modern Pressure Vessels*, Van Nostrand Reinhold, second edition - 1974.
- [28] Maia, N. S.; Mansur, T. R.; Medeiros, E. B.; *Análise de Tensões de um Vaso Desaerador em Operação em Usina Termoelétrica*; III Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica, Cuba; 1997.

## 10. ANEXOS

### 10.1 ANEXO A: Descrição da Instrumentação Utilizada

A instrumentação utilizada é composta de:

- a) condicionadores de sinais que amplificam o sinal gerado pelos extensômetros (strain gage) e o transformam em um sinal de 4 a 20 mA;
- b) multiplexador de sinais com resistor de 500 ohms 1% para conversão do sinal de corrente de 4 a 20 mA para tensão de 2 a 10 V. Este multiplexador é controlado por computador para chaveamento do sinal desejado;
- c) multímetro digital de 6 e 1/2 dígitos que faz a conversão do sinal de tensão analógico para digital e transmite via interface IEEE488 para o computador. A escala de leitura e o momento de leitura são controlados por computador;
- d) computador 486 DX2 66, com interface IEEE488, é o responsável pela seleção do canal a ser lido, a escala de leitura do multímetro, o dispara da leitura no multímetro e o armazenamento da leitura. O computador realiza esta tarefa através do programa desenvolvido em linguagem Delphi.

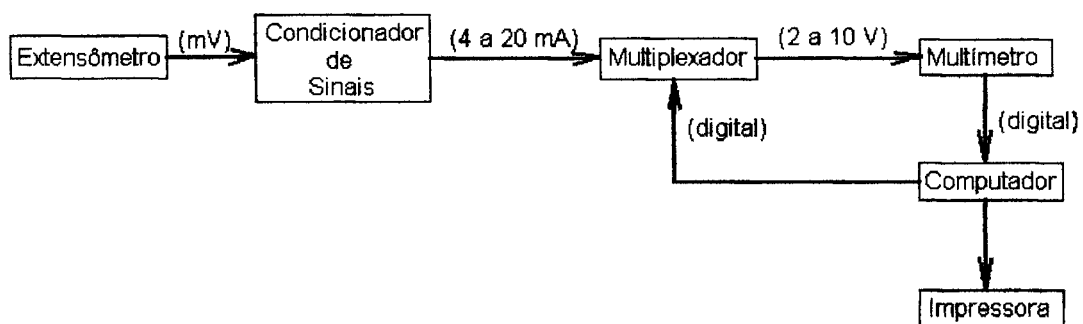


Figura 51 - Diagrama esquemático da instrumentação com o fluxo de sinal

## 10.2 ANEXO B: Dados da Usina Térmica de Igarapé

O vaso desaerador da Usina Termelétrica da CEMIG, em Juatuba, tem comprimento aproximado de 16400 mm e diâmetro externo de 3200 mm. A temperatura do vaso desaerador varia entre 125 e 152 °C, dependendo da pressão de operação que varia entre 1,8 e 4,0 Kgf/cm<sup>2</sup>.

### DADOS TÉCNICOS DA USINA

#### GERADOR

	GERADOR PRINCIPAL	GERADOR AUXILIAR
Fabricante:	SKODA	SKODA
Potência Nominal Aparente:	156,25 MVA	1,40 MVA
Potência Nominal Ativa:	125,00 MW	770 KW
Fator de Potência Nominal:	0,8	0,55
Tensão Nominal:	13,8 ± 5% KV	600 V

#### TURBINA

Fabricante:	SKODA-PILSEN
Tipo:	Condensação
Potência:	125 MW
Rotação:	3600 rpm
Número de Estágios:	27
Pressão:	132 Kgf / cm <sup>2</sup>

#### CALDEIRA

Fabricante:	SKODA - TLMACE
Vazão Nominal:	410 t / h
Tipo:	Aquatubular com reaquecimento
Pressão:	150 Kgf / cm <sup>2</sup>