



### **Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT**

#### **Monitoração de deformações e cálculo de vida em fluência de componentes de usinas termelétricas**

**FERNANDA FIGUEIREDO MARTINS DOS SANTOS(1); BRUNO REIS CARDOSO(1); HELOISA CUNHA FURTADO(1); CARLOS FREDERICO TROTTA MATT(1); CEPEL(1);**

#### RESUMO

A monitoração de deformações é um método de avaliação importante quando aplicado em componentes que operam sob regime de fluência. De acordo com a resposta dos sensores, o acúmulo de deformações com o tempo ou a taxa de deformação, é possível estimar as propriedades de fluência do material. A análise destes dados permite a avaliação do tempo de ruptura e de sua vida remanescente. O objetivo deste trabalho é apresentar um programa para o cálculo da vida residual em componentes de usinas termelétricas que operam em altas temperaturas baseado no monitoramento em tempo real da taxa de deformação.

#### PALAVRAS-CHAVE

Monitoração – Fluência – Vida Residual – Usinas termelétricas

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

No setor elétrico, a questão do envelhecimento dos componentes de plantas térmicas e refinarias têm sido bastante estudada e tratada como um dos pontos mais importantes no que diz respeito à segurança e extensão da vida útil da instalação. A necessidade de melhorias nos métodos de testes, monitoração e diagnóstico é de extrema relevância no campo da engenharia de manutenção, estabelecendo como meta principal a confiabilidade da operação dos componentes. A interrupção da produção por alguma falha imprevista pode colocar risco a segurança do operador, além de provocar perdas econômicas e aumentar os custos com a reparação de algum equipamento danificado.

Cada vez mais freqüente no campo da manutenção e inspeção, a manutenção preditiva consiste na medição freqüente de grandezas físicas, consideradas representativas do comportamento do equipamento, para que, através da análise dessas, seja emitido um laudo sobre a sua condição operacional. Os sistemas de monitoração são, portanto, ferramentas básicas para a implantação de estratégias preditivas de manutenção.

A monitoração de deformações, foco deste trabalho, tem se tornado um método de avaliação de vida remanescente muito atraente, principalmente quando aplicada em equipamentos e tubulações que operam sob regime de fluência. Para essa monitoração faz-se uso de extensômetros (strain gages) especiais para utilização em elevadas temperaturas. De acordo com a resposta dos sensores – o acúmulo de deformações com o tempo ou a taxa de deformação por fluência – é possível estimar curvas de fluência para diversos níveis de tensão. A análise destes dados permite a avaliação do tempo de ruptura e da vida remanescente do material. Dessa maneira, ações podem ser programadas para os períodos de manutenção periódica das usinas.

O projeto MONITERMO – “Estimativa de vida residual a partir da monitoração em tempo real das deformações de tubulações em usinas de geração térmica”, propôs o desenvolvimento de uma metodologia para monitorar a deformação de tubulações de usinas térmicas e associá-la a um modelo matemático para o cálculo da vida remanescente dos materiais. O sistema é formado pela integração do conjunto de hardware e software que atuam na aquisição e no tratamento de dados e, fornece aos usuários as informações coletadas e processadas. Baseado nos dados de deformação, temperatura e pressão monitorados, o software calcula a vida remanescente do material com base em métodos paramétricos definidos

O projeto foi patrocinado pela CHESF, Furnas, Eletrobrás, Eletronorte e CGTEE, sendo que esta última cedeu as linhas de vapor reaquecido quente e superaquecido da caldeira 3 da Usina Presidente Médici como laboratório de campo.

## 2.0 – METODOLOGIA

O projeto MONITERMO pode ser dividido em quatro etapas principais:

- *Escolha do sensor adequado, através de ensaios em laboratório*
- *Análise da distribuição das tensões principais (MEF)*
- *Instalação e monitoração em campo*
- *Implementação do Programa MONITERMO*

### 2.1 Escolha do sensor

A primeira e uma das mais importantes etapas deste projeto foi a escolha de um sensor medidor de deformações – extensômetro – adequado. O extensômetro elétrico é um dispositivo de medida que transforma pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua característica principal, por exemplo, em sua resistência elétrica ou capacitância. Como principais características, o extensômetro deve ser estável, preciso e robusto o suficiente para ser aplicado em ambientes agressivos e em elevadas temperaturas, tal qual uma caldeira térmica. Os testes foram realizados por meio de ensaios de tração a temperatura ambiente e ensaios de fluência de curta duração. Foram avaliados três modelos: dois resistivos e um capacitivo.

Os resultados dos ensaios realizados mostraram que o extensômetro **KYOWA**, mostrado na Figura 1, é o mais adequado para realização deste projeto, por apresentar resultados mais precisos e de maior confiabilidade. Este sensor apresentou reprodutibilidade em seus resultados, que se mostraram mais consistentes e precisos, quando comparados aos outros sensores testados.



FIGURA 1 – Extensômetro resistivo encapsulado modelo KHCM-10-120-G15-11-C2MV, da japonesa KYOWA INSTRUMENTS

### 2.2 Análise da distribuição das tensões principais

Para definir as regiões a serem monitoradas pelos extensômetros, realizou-se uma análise por elementos finitos das linhas de vapor, objetivando a avaliação do comportamento mecânico das mesmas. A partir dessa análise, foram definidas as regiões sujeitas aos maiores níveis de tensão mecânica.

A análise foi realizada com auxílio do programa ALGOR que possui o módulo PipePak, específico para análise de tubulações. Essa análise considerou a operação em base da caldeira, com temperatura e pressão constantes e iguais as de operação. Em relação a monitoração da temperatura, foram instalados termopares em toda extensão das linhas.

Os modelos geométricos foram construídos com base nas plantas baixas das linhas de vapor. Para tal, foi realizada uma análise minuciosa de todos os suportes existentes nas linhas, que foram classificados de acordo com TELLES

[1]. O tipo de suporte e as reações mecânicas causadas por ele ao trecho da tubulação no qual ele está fixado são dados de entrada na etapa de simulação numérica. As Figuras 2 e 3 mostram os resultados das simulações realizadas. Foram definidos 17 pontos de monitoração.

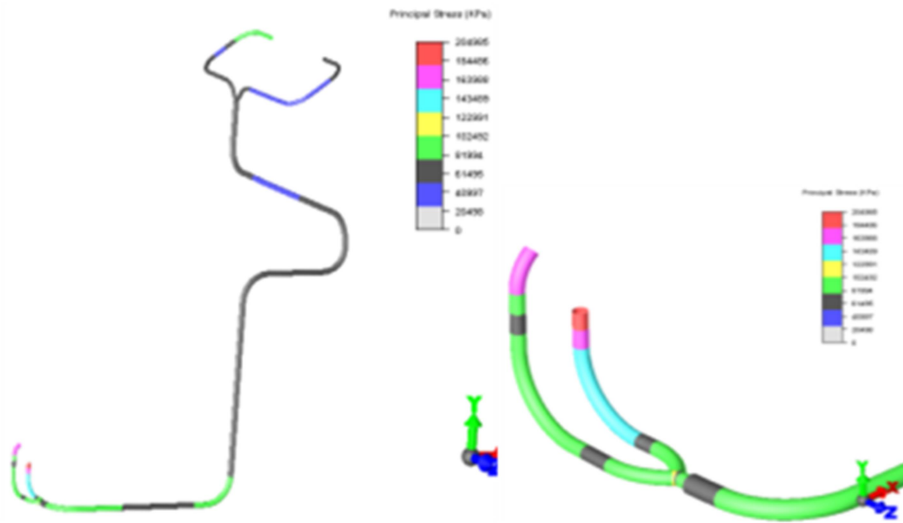


FIGURA 2 – Análise de tensões da linha de vapor reaquecido quente

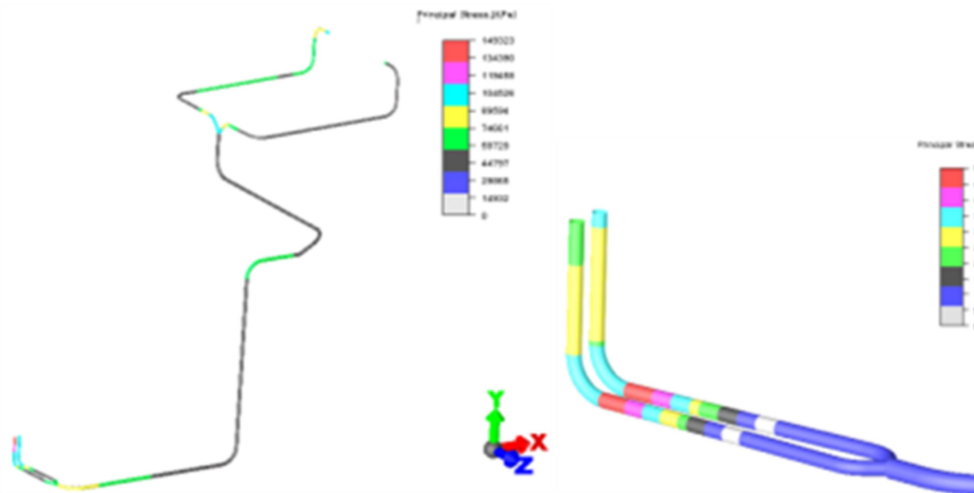


FIGURA 3 – Análise de tensões da linha de vapor superaquecido

### 2.3 Instalação e monitoração em campo

Os extensômetros foram soldados à superfície das tubulações, previamente preparada por lixamento e polimento mecânico. Em cada ponto de instalação dos extensômetros foram realizados ensaios não destrutivos de réplica metalográfica e dureza Vickers, com o objetivo de se registrar o estágio de degradação destas regiões antes do início da monitoração. Conforme pode ser observado na Figura 4, alguns pontos apresentaram trincas superficiais, corroborando a análise por elementos finitos que indicou àqueles pontos como os mais solicitados mecanicamente. O material das linhas de vapor é o aço DIN 10CrMo910 que equivale ao ASTM A335 P22. A dureza nominal para este material varia na faixa de 130-196HV.

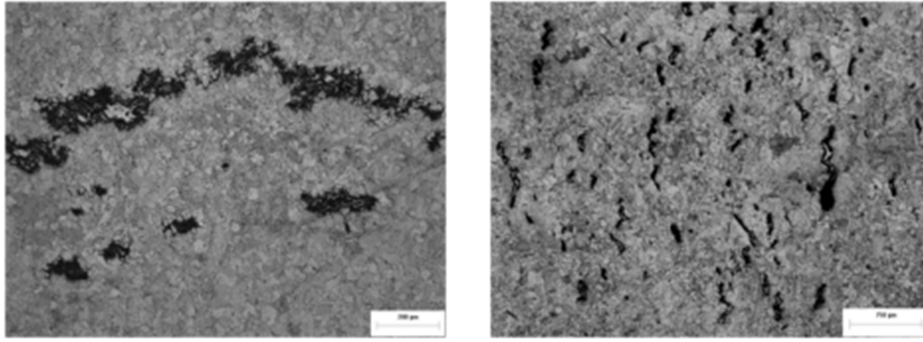


FIGURA 4 – Estrutura metalográfica de dois dos pontos monitorados.

A fixação dos sensores se deu por meio de solda capacitiva a ponto. Foram soldados 2 sensores em cada ponto, dispostos perpendicularmente entre si, para monitoração das deformações nas direções longitudinal e axial, conforme mostrado na Figura 5.

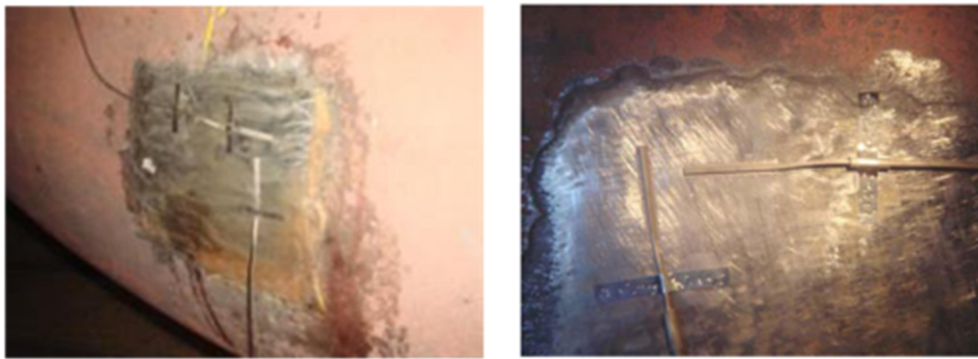


FIGURA 5 – Extensômetros soldados à tubulação.

#### 2.4 Programa MONITERMO

O programa MONITERMO tem por finalidade monitorar e calcular a vida residual de componentes de caldeiras térmicas, considerando as condições de operação da mesma. O sistema é formado pela integração do conjunto de *hardware* e *software* que atuam na aquisição e no tratamento de dados, e fornece ao usuário as informações coletadas neste processo.

Os dados monitorados em campo – deformação, medida pelos extensômetros instalados; temperatura, medida pelos termopares espalhados ao longo das linhas de vapor e a pressão do vapor, medida pelo sistema supervisor da usina, são armazenados periodicamente, a cada cinco minutos, em um banco de dados que pode ser acessado via *internet*. Estes registros compõem um histórico e o programa permite ao usuário a realização de análises sobre o desempenho e o comportamento do equipamento monitorado, além de prover ferramentas e recursos para o tratamento destas informações.

A metodologia de cálculo de vida residual desenvolvida dentro do projeto MONITERMO baseou-se em dois métodos distintos e muito utilizadas análise de vida de materiais sob condições de fluência: Método de Larson e Miller [2] e Método de Monkman e Grant [3], definidos pelas equações 1 e 2 , respectivamente.

$$PLM = T [20 + \log(tR)] \quad (1)$$

$$\log t_r = a_0 + a_1 \log \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

Onde:

PLM: Parâmetro de Larson-Miller  
tR: Tempo de ruptura

T: Temperatura  
de/dt: taxa de deformação

Para as variações nas condições de operação, a regra de Robinson, para determinação do dano acumulado, é aplicada na forma:

$$\frac{t_1}{t_{r1}} + \frac{t_2}{t_{r2}} = 1 \quad (3)$$

Na fratura,  $t_1$  e  $t_2$  são os tempos nas temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente, e  $t_{R1}$  e  $t_{R2}$  são os tempos de ruptura estimados nestas condições. Da mesma forma, a fração da vida consumida pode ser estimada e a vida remanescente calculada, levando em conta a provável continuação na mesma proporção das diferentes temperaturas de operação envolvidas.

### 3.0 - RESULTADOS

A Figura 6 apresenta uma tela de saída do programa MONITERMO, que mostra a evolução da temperatura durante o período de análise.

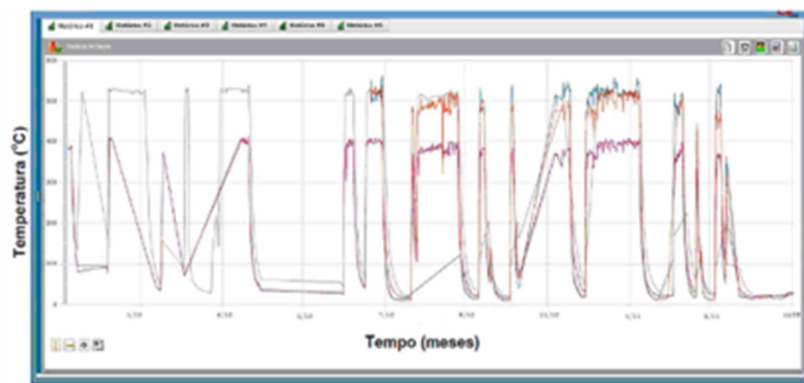


FIGURA 6 – Evolução da temperatura durante o período de análise.

Conforme pode ser observado, os sensores apresentam um comportamento similar entre eles, principalmente nos trechos referentes às partidas e paradas. A temperatura máxima atingida durante o período de análise foi de 533°C, na região mais próxima à turbina da linha de vapor superaquecido.

Além disso, os gráficos apresentados mostram que a operação da caldeira ocorreu de maneira cíclica durante este período, refletindo o modo de operação característico da maioria das caldeiras brasileiras, que apresentam muitos ciclos de partidas e paradas no decorrer de sua vida operacional.

As Figuras 7 e 8 apresentam os gráficos de deformação *versus* tempo, obtidos pelos sensores instalados em uma das linhas de vapor, nas direções x (circunferencial) e y (longitudinal), respectivamente.

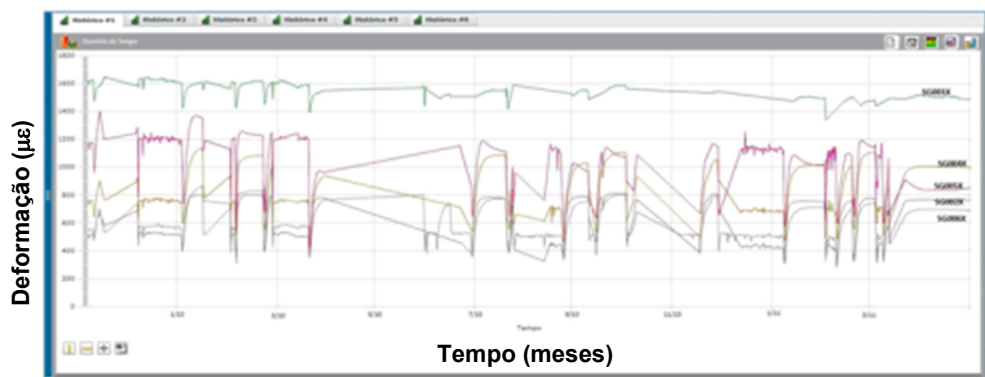


FIGURA 7 – Histórico de evolução da deformação na direção circunferencial (x) durante o período de monitoração.

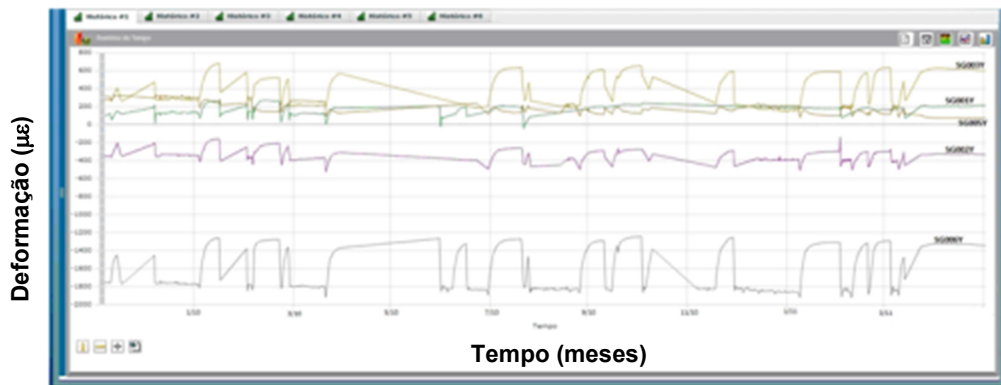


FIGURA 8 – Histórico de evolução da deformação na direção circunferencial (x) durante o período de monitoração.

Conforme pode ser observado nos gráficos apresentados, os valores de deformação na direção x de cada par correspondente são sempre maiores do que os valores medidos na direção y. Esse fato já era esperado, uma vez que, em tubos pressurizados, a tensão é sempre maior na direção circunferencial e, conseqüentemente a deformação também será.

A comparação dos gráficos das Figuras 7 a 8 com a evolução da temperatura durante o período de análise (Figura 6) mostra a influência das partidas e paradas, ou seja, da variação da temperatura no comportamento das deformações medidas pelos extensômetros, que respondem de forma imediata a tais variações.

A Tabela 1 apresenta os valores de vida remanescente (%) de alguns dos pontos monitorados, calculados pelas metodologias de Monkman-Grant e Larson-Miller.

Tabela 1 – Vida remanescente nas regiões monitoradas

| Sensor      | Vida remanescente (%) | Método de Cálculo |
|-------------|-----------------------|-------------------|
| 03FRS-SG001 | 46,9997               | Monkman-Grant     |
|             | 47,0000               | Larson-Miller     |
| 03FRS-SG002 | 46,9996               | Monkman-Grant     |
|             | 47,0000               | Larson-Miller     |
| 03FRS-SG003 | 33,9996               | Monkman-Grant     |
|             | 34,0000               | Larson-Miller     |
| 03FRS-SG004 | 46,9994               | Monkman-Grant     |
|             | 47,0000               | Larson-Miller     |
| 03FRS-SG005 | 46,9996               | Monkman-Grant     |
|             | 46,9949               | Larson-Miller     |
| 03FRS-SG006 | 33,9993               | Monkman-Grant     |
|             | 33,9958               | Larson-Miller     |
| 03FRS-SG007 | 33,9855               | Monkman-Grant     |
|             | 33,9937               | Larson-Miller     |
| 03FRS-SG008 | 33,9994               | Monkman-Grant     |
|             | 33,9966               | Larson-Miller     |

Conforme pode ser observado, os valores de vida remanescente, calculados para o mesmo ponto, têm valores equivalentes tanto pelo Método de Monkman-Grant [8] quanto pelo Método de Larson-Miller [9], com diferença menor que 0,01% entre eles.

Vale ressaltar que os pontos 03FRS-SG003, 03FRS-SG006, 03FRS-SG007, 03FRS-SG008 da linha de vapor reaquecido quente e os pontos 03FSR-SG006 e 03FSR-SG007, que apresentam os menores valores vida remanescente, são os pontos onde foram encontradas trincas superficiais no exame metalográfico, na ocasião da instalação dos extensômetros.

#### 4.0 CONCLUSÃO

Os resultados da análise da evolução das deformações em campo mostraram que a deformação na direção x (circunferencial) é sempre maior do que na direção y (longitudinal). Assim, considerar apenas a deformação em x torna a análise mais conservativa.

Uma análise mais minuciosa dos resultados sugere que a fadiga termomecânica seja o principal mecanismo de degradação atuante, devido à grande frequência de ciclos na operação dessa caldeira. A fluência, ao contrário, passa a ser um mecanismo de degradação secundário, atuando apenas em curtos intervalos de tempo em que a operação em regime permanente ocorre.

#### 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Telles, P. C. S., "Tubulações Industriais" 10ª Ed., LTC, 2005

(2) MONKMAN, F.C., GRANT, N.J., 1956, "An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests", *Proc. ASTM*, v.56, pp. 593–620.

(4) LARSON, F.R., AND MILLER, J., 1952, "A Time-Temperature relationship for Rupture and Creep Stress". *Trans ASME*, v.74, pp. 765

#### 6.0 DADOS BIOGRÁFICOS



##### **Fernanda Figueiredo Martins dos Santos**

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006) e é mestre em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ (2011). Trabalha como Pesquisadora II na ELETROBRAS CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, onde desenvolve trabalhos nas áreas de Avaliação de Integridade Estrutural em Plantas Térmicas, Análise de Falhas, Extensometria, Prognóstico e Monitoração. É autora de 3 capítulos dos livros; Análise de Falhas em Materiais Utilizados em Equipamentos Elétricos; - Volumes 2 e 3; além de diversos trabalhos técnicos em sua área de atuação. Atualmente é aluna do curso de doutorado do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ.