

AVALIAÇÃO DE UM STRAIN GAGE RESISTIVO ENCAPSULADO SOB CONDIÇÕES DE FLUÊNCIA¹

Fernanda Figueiredo Martins dos Santos²

Bruno Reis Cardoso³

Heloisa Cunha Furtado⁴

Resumo

As plantas térmicas e refinarias do mundo estão envelhecendo e seus componentes e tubulações têm vida finita devido à prolongada exposição a elevadas temperaturas, tensões e ambientes agressivos. A fluência é o mecanismo de degradação dominante no tempo de vida em operação destes componentes. Monitoração e prognóstico da taxa de acúmulo de danos são essenciais para estimativa de vida remanescente das plantas térmicas. A literatura mostra que vários tipos de *strain gages* podem ser utilizados em sistemas de monitoração; entretanto existem muitas divergências a respeito do melhor *strain gage* a ser utilizado. O presente trabalho apresenta uma avaliação preliminar do comportamento em fluência de um modelo de *strain gage* resistivo encapsulado.

Palavras-chave: *Strain gage*; Ensaios de fluência; Taxa de deformação.

EVALUATION OF A CAPSULE RESISTANCE STRAIN GAGE UNDER CREEP CONDITIONS

Abstract

Thermal plants and refineries in the world are aging and their piping and components have a finite life due long-term exposition to high temperatures, stresses and harsh environments. Creep is one of the dominant degradation mechanisms in the operating life of these components. Monitoring and prognostic of the damage accumulation rate are essential to estimate the remaining life of thermal plants. Literature shows that high temperature strain gauges should be used in monitoring systems, although there are divergences in which model best suits the conditions of an industrial plant. The present paper presents a preliminary evaluation on the behavior of a capsulated resistance strain gage under creep conditions.

Key words: Strain gage; Creep tests; Strain rate.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduação, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

³ Msc, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

⁴ Dsc, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

1 INTRODUÇÃO

As plantas térmicas e refinarias do mundo estão envelhecendo e seus componentes e tubulações têm vida finita devido à prolongada exposição a elevadas temperaturas, tensões e ambientes agressivos. O tempo de vida e a operação em regime cíclico das usinas termelétricas torna imperativa a realização de avaliações de integridade, objetivando a análise dos seus componentes de forma a garantir a continuidade de uma operação segura ou recomendar reparos e modificações que permitam a retomada da operação por um período pré-determinado ou a extensão da vida útil da usina.^(1,2)

Devido à exposição a temperaturas críticas, a fluência é um dos principais mecanismos de degradação de componentes das usinas, e envolve deformação dependente do tempo. A fluência é um fenômeno que ocorre em todos os metais, em maior ou menor intensidade, consistindo de deformação plástica, cuja taxa varia com o tempo, sob aplicação de uma carga (ou tensão) constante, abaixo da tensão de escoamento, podendo levar à ruptura. Tal fenômeno é mais significativo sob altas temperaturas (considera-se para efeitos de fluência temperaturas acima da metade da temperatura absoluta de fusão). Os principais danos que ocorrem durante a fluência consistem em variações microestruturais, rearranjo de discordâncias e o desenvolvimento de vazios e micro-trincas nos contornos de grão, podendo levar o componente à fratura.⁽³⁾

O tempo operacional de muitas usinas de energia e petroquímicas é limitado pelos componentes que operam em regime de fluência. A monitoração e o prognóstico da taxa de acúmulo de danos causados são, portanto, essenciais para elaboração de um plano de avaliação de integridade das plantas.

A monitoração da deformação tem se tornado um método não destrutivo bastante atrativo para avaliação de vida remanescente. Para tal, é essencial que os sensores de deformação – os *strain gages* – sejam robustos, de maneira a suportar as condições agressivas presentes no ambiente de uma planta térmica.

Uma grande variedade de *strain gages* de diferentes especificações está disponível atualmente no mercado. Para a correta escolha dos *strain gages*, alguns fatores devem ser considerados, tais como: faixa de temperatura à qual ele será submetido, corrente máxima suportada pelo sensor e o limite máximo de alongamento do próprio *strain gage*. Uma escolha inadequada poderá resultar em uma aquisição de medidas errônea. Dois tipos básicos de *strain gages* são utilizados para medição de deformação estática: resistivos e capacitivos.^(4,5)

A norma ASTM E 1319-98⁽⁵⁾ afirma que os *strain gages* capacitivos são os mais indicados para medição de deformação por fluência e que, ao contrário dos *strain gages* resistivos, não são afetados por variações de temperatura, oxidação, relaxação, e mudanças de fase em materiais sensíveis à deformação. Ainda segundo a norma, esses fatores causariam variações na resistência dos *strain gages*, e por isso, os modelos resistivos não são indicados para medições de longo tempo.

Entretanto, na literatura ainda existem divergências a respeito do melhor modelo aplicável às condições de uma planta industrial. Baumann e Schulz⁽⁶⁾ afirmam que, para medições por longos tempos, a temperaturas acima de 400°C, além dos capacitivos, os *strain gages* resistivos encapsulados também podem ser utilizados com êxito. Os autores afirmam ainda que, os critérios para seleção do *strain gage* mais adequado são

a temperatura máxima aplicada, o tempo de medição e as condições do ambiente. Testes com o modelo resistivo encapsulado vêm sendo realizados também em diversos centros de pesquisa, inclusive o EPRI.⁽⁷⁾

O objetivo deste trabalho é apresentar uma avaliação preliminar do comportamento de um modelo de *strain gage* resistivo encapsulado para altas temperaturas sob condições de fluência. Os ensaios avaliaram não só o comportamento do *strain gage*, como a estabilidade deste em testes de longa duração.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O *strain gage* utilizado para o desenvolvimento de neste trabalho foi do tipo resistivo encapsulado para elevadas temperaturas. A escolha de *strain gage* encapsulado se deve a própria configuração do sensor, mais robusto e resistente a condições ambientais mais severas.

A princípio realizou-se um ensaio de tração, em uma máquina EMIC/modelo DL 30000, localizada no laboratório de ensaios mecânicos do CEPEL. O objetivo deste ensaio foi realizar uma avaliação inicial do *strain gage*. O ensaio foi realizado em um tubo da liga 2,25Cr-1Mo, material largamente utilizado em usinas termelétricas. Para tal, além do *strain gage* em estudo, outro sensor resistivo de grande confiabilidade no mercado utilizado em temperaturas inferiores as 175°C, foi fixado no tubo. Este segundo *strain gage* foi utilizado como referência na análise dos resultados. O ensaio foi realizado a temperatura ambiente, com carga máxima de 4.000 Kgf (regime elástico). A fixação do *strain gage* encapsulado é feita através de solda a ponto. A Figura 1 mostra os *strain gages* fixados no tubo.

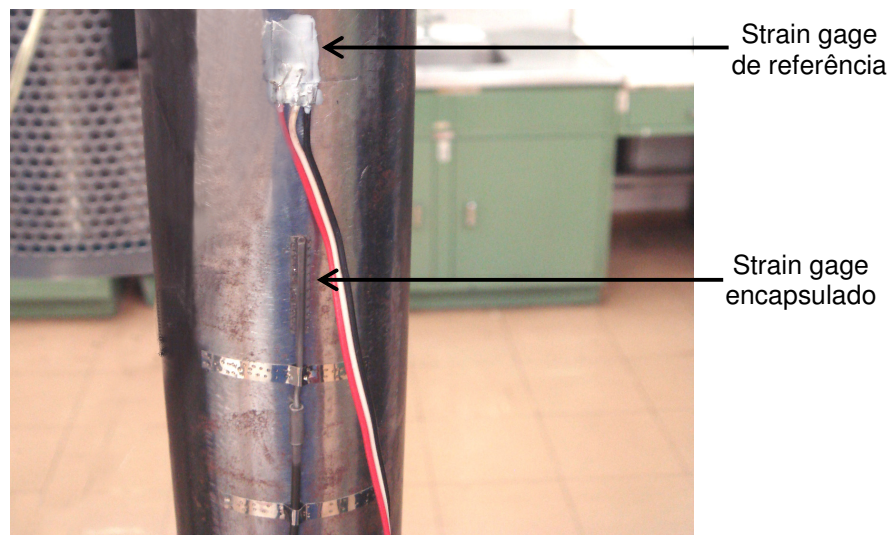


Figura 1. *Strain gages* soldados no tubo para ensaio de tração no regime elástico em temperatura ambiente.

A Tabela 1 apresenta as principais características dos sensores utilizados.

Tabela 1 – Características principais dos *strain gages* utilizado no trabalho

Tipo	Resistência do Sensor (Ω)	Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Gage Factor	Limite de deformação ($\mu\epsilon$)
Encapsulado, uniaxial, compensação de temperatura	120	650	~2	10.000
Referência	120	175	2,04	5.0000

Em seguida realizaram-se ensaios de fluência a 550°C com tensão de 150 MPa. Os ensaios foram realizados em máquina STM/modelo MF 1000, localizada no Laboratório de Fluência do CEPEL. Os ensaios foram realizados em corpos de prova não convencionais, desenvolvidos especialmente para estes ensaios. Os corpos de prova foram confeccionados com o aço 2,25Cr-1Mo, equivalente ao utilizado no tubo.

Os *strain gages* foram soldados no centro dos corpos de prova. O ensaio foi de longa duração, com tempo de aquisição superior a 8.000 horas. Com esse ensaio pôde-se avaliar a estabilidade do *strain gage* em elevada temperatura. Para garantir que a deformação se localizaria exatamente no local onde o sensor estaria soldado, entalhes foram feitos na região central de um dos corpos de prova ensaiados. Para validar o efeito do concentrador de tensões, realizou-se uma análise de elementos finitos, na qual a condição de ensaio foi simulada, utilizando o programa ALGOR[®] V22. Com esse ensaio esperava-se notar a sensibilidade do sensor a uma taxa de deformação elevada.

A Figura 2 mostra os sensores soldados nos corpos de prova utilizados para os ensaios de fluência.

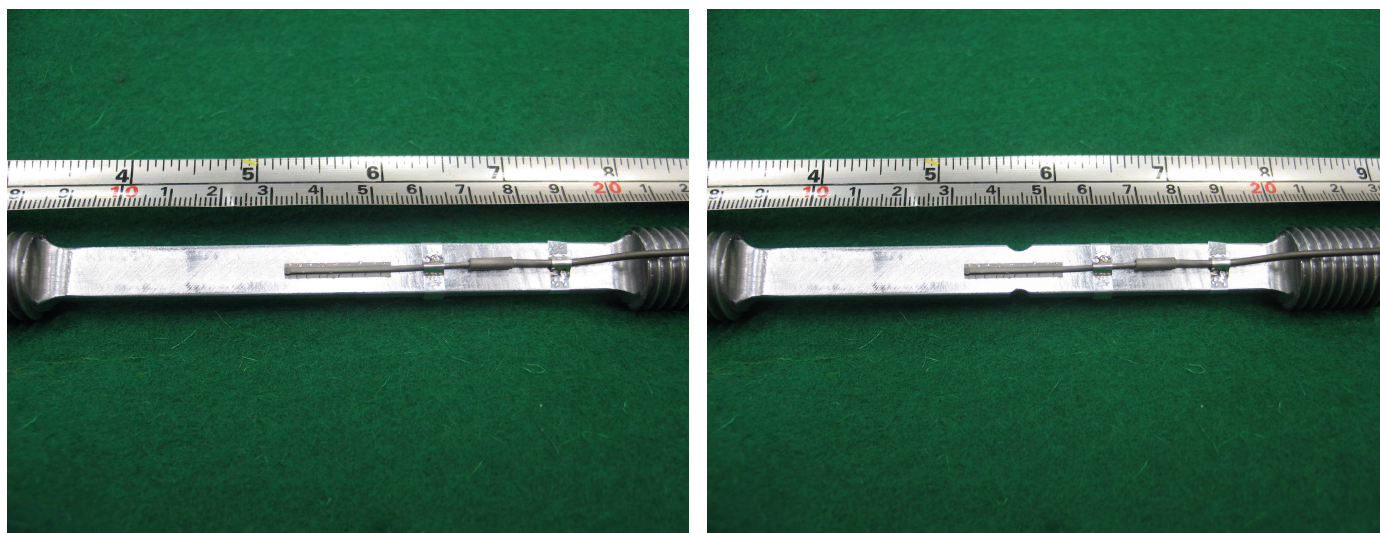


Figura 2. Corpos de prova utilizados nos ensaios de fluência: sem entalhe (a) e com entalhe (b).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de tração realizado no tubo. Conforme pode ser observado, o *strain gage* encapsulado apresentou um resultado bastante similar ao *strain gage* utilizado como referência.

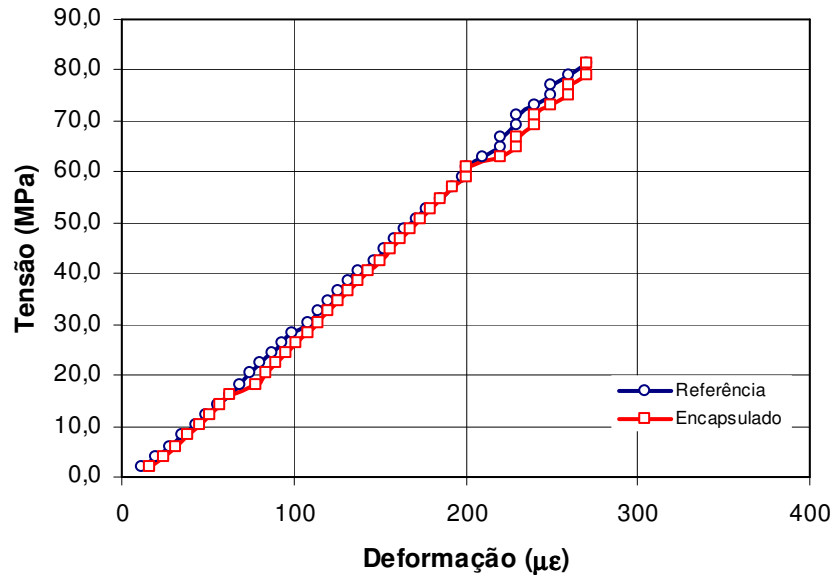


Figura 3. Resultado do ensaio de tração, comparando o *strain gage* avaliado com o sensor de referência.

O objetivo do ensaio de tração era realizar uma primeira avaliação do *strain gage* encapsulado, no qual diz respeito a sua estabilidade e consistência na medição da deformação imposta. Com base no gráfico da Figura 3, pode-se dizer que o sensor atendeu plenamente os requisitos esperados no ensaio: estabilidade e concordância com o sensor de referência.

A Figura 4 apresenta as análises realizadas para os dois corpos de prova utilizados neste trabalho. As análises simulam as condições realizadas no ensaio de fluência: 550°C e 150 MPa.

De acordo com as análises apresentadas, pode-se observar que no corpo de prova entalhado as maiores tensões e, conseqüentemente, as maiores deformações se concentram justamente no entalhe. Esse resultado é muito importante para avaliação dos *strain gages*, pois se espera que o sensor possa responder de maneira eficaz a uma taxa de deformação mais elevada.

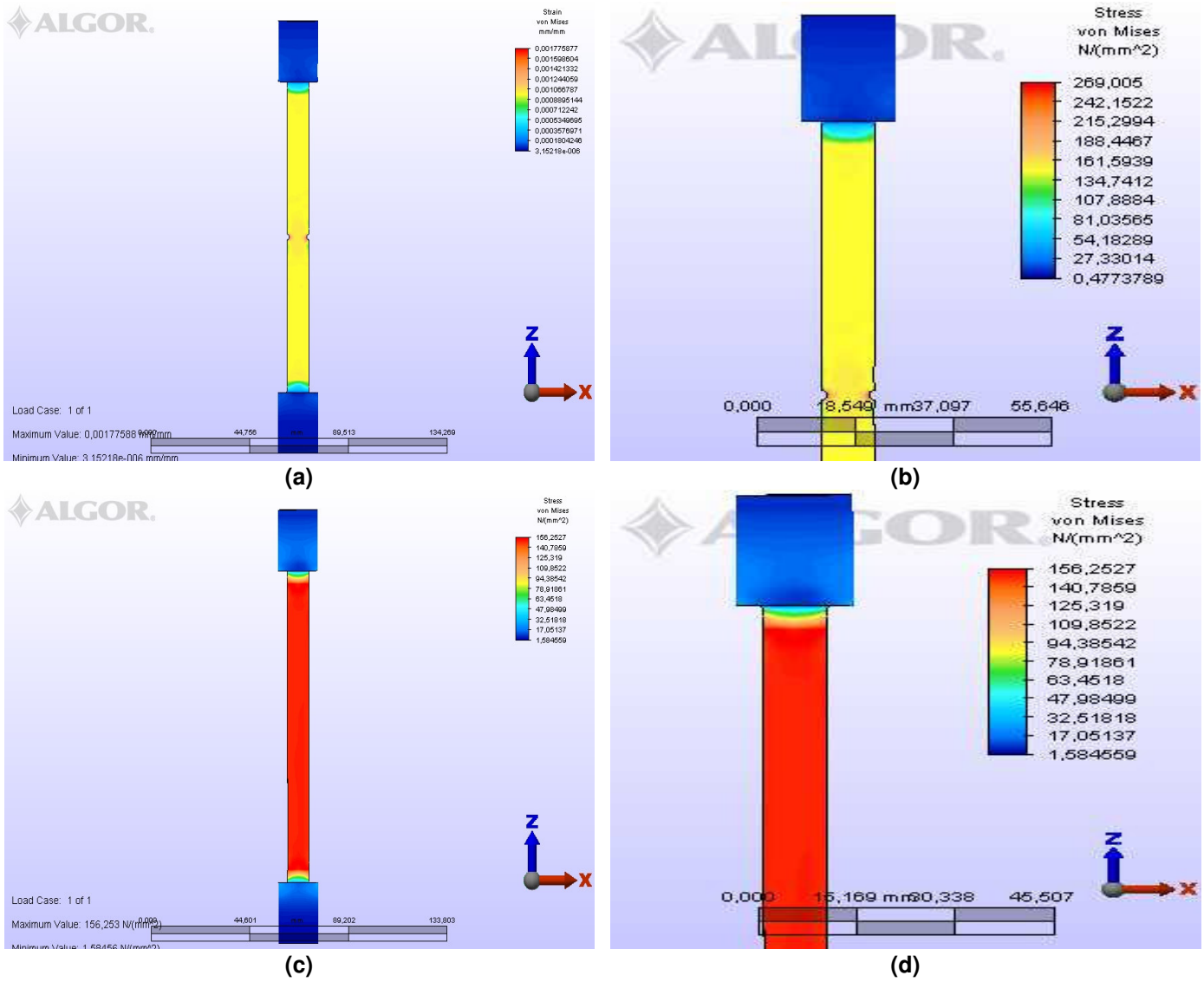


Figura 4. Análise em elementos finitos dos corpos de prova; com entalhe: vista geral (a) e detalhe dos valores de tensão(b); sem entalhe: vista geral (c) e detalhe dos valores de tensão (d).

A presença do concentrador de tensões elimina possíveis erros que possam ocorrer na medição do *strain gage*, como por exemplo, a estricção ocorrer em um ponto diferente de onde o sensor fosse soldado. A deformação se localizaria neste ponto de estricção e o *strain gage* mediria uma deformação que não estaria representando a condição real do material, o que poderia levar a erros na avaliação dos resultados.

A Figura 5 apresenta os resultados dos ensaios de fluência. As curvas de fluência obtidas pelos *strain gages* soldados nos dois corpos de prova foram apresentadas no mesmo gráfico, para comparação e análise dos resultados obtidos. A figura também apresenta as equações que representam o estágio secundário de fluência para cada um dos corpos de prova.

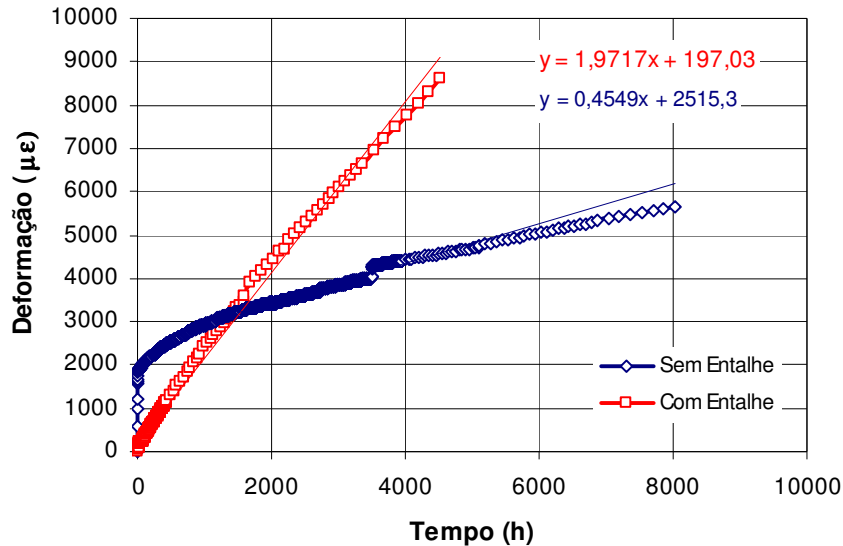


Figura 5. Curvas de fluência obtidas pelos *strain gages* soldados nos corpos de prova.

De maneira geral, o sensor mostra-se bastante estável em ensaios a elevadas temperaturas e de longa duração (> 8.000 h), como mostra a curva de fluência do corpo de prova não entalhado, contrariando a literatura que alega a falta de estabilidade deste tipo de *strain gage*.

Como era esperado, o entalhe atuou como um concentrador de tensões no corpo de prova. Pode-se observar que, apesar de ambos ensaios ocorrerem nas mesmas condições, a taxa de deformação no ensaio com o corpo de prova entalhado é bem superior, como comprova a equação do estágio secundário de fluência. Isso mostra que o sensor é capaz de fornecer resultados seguros para diferentes condições de fluência.

4 CONCLUSÃO

A metodologia de ensaios proposta no presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de um *strain gage* resistivo destinado a medições de deformação em temperaturas elevadas, similares as de operação de plantas termelétricas, acima de 500°C. Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que o *strain gage* encapsulado adapta-se bem as necessidades impostas pelos parâmetros adotados na pesquisa, como precisão, estabilidade e robustez.

Novos ensaios serão realizados com o *strain gage* encapsulado objetivando melhores avaliações e análise da estabilidade deste sensor. Paralelamente, ensaios com *strain gages* capacitivos para elevadas temperaturas também serão realizados, para avaliação e comparação entre os sensores.

REFERÊNCIAS

- 1 Furtado, H.C.; May, I.L. **High Temperature Degradation in Power Plants and Refineries** – Materials Research, Vol. 7 No.1,1 103-110 (2004)
- 2 Furtado, H.C.; Lisboa, M.B. **Avaliação de Integridade e Extensão de Vida Útil de Usinas Termelétricas** – XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de energia Elétrica (SNPTEE), 2001
- 3 Furtado, H.C.; May, I.Le. **Modelling of creep damage to estimate remaining life** – Materials Science and Engineering A234-236, 87-90 (1997)
- 4 Morris, A.; Dear, J.; Kourmpetis, M.; Maharaj, C.; Puri, A.; Fergusson, A. **Monitoring Creep Strain in Power Station Engineering Plant** – Applied Mechanics and Materials Vols 7-8 pp 31-36 - 2007
- 5 **Standard Guide for High-Temperature Static Strain Measurement** ASTM E 1319-98 (Reapproved 2003)
- 6 Baumann, B.; Schulz, M. **Long-time high temperature strain gauge measurements on pipes and dissimilar welds for residual lifetime evaluation** – Nuclear Engineering and Design 130 (383-388), 1991
- 7 **High Temperature Strain Gaging** – Technical Update Report, EPRI Project Manager, 2005.