

PROPOSTA DE UMA ROSETA EXTENSOMÉTRICA PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM UMA CHAPA SUBMETIDA A CARREGAMENTOS BIAXIAIS GRANDES

José Luiz Fernandes¹
Jaime Tupiassú Pinho de Castro²

Resumo

Simulou-se por elementos finitos a metodologia de medição de tensões residuais pela técnica do furo cego "Hole-Drilling" em uma chapa fina submetida a carregamentos nominais uni e biaxiais até da ordem da resistência ao escoamento (Se) do material API 5LX60. No caso do carregamento nominal biaxial foram consideradas as relações entre as cargas nominais de $\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,25, 0,50, 0,75$ e $1,00$. Neste estudo projetou-se e simulou-se uma roseta extensométrica contendo 5 extensômetros posicionados a 0, 90, 150, 225 e 300 graus. Avaliou-se o erro relativo entre a solução numérica, a solução teórica proposta pela ASTM E837 (elástica) e pelo modelo proposto por Savin (elastoplástico). Verificou-se que os erros relativos para as deformações principais ϵ_1 e ϵ_2 , obtidos pelos extensômetros tendem a diminuir para a roseta que leva em consideração os extensômetros redundantes. Vale ressaltar que a roseta extensométrica proposta com 5 extensômetros não eliminou o problema da excentricidade, e sim quantificou com maior precisão este tipo de efeito.

Palavras-chave: Tensões residuais; Método da furação instrumentada; Simulação numérica; Elementos finitos.

60º Congresso da ABM, Rio de Janeiro, 25-28 de julho de 2005 – Belo Horizonte - MG

¹ Engenheiro Mecânico, D.Sc., Professor Adjunto, Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação – Engenharia Mecânica / CEFET - Rio, jfernandes@cefet-rj.br

² Engenheiro Mecânico, Ph.D., Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica / PUC - Rio, jtcastro@mec.puc-rio.br

INTRODUÇÃO

As normas de testes de fadiga em juntas soldadas recomendam que sejam usados corpos de prova (CPs) que tenham dimensões reais (as curvas SN obtidas a partir de pequenos CPs são em geral superestimadas, segundo Branco, 1999). Contudo, desenvolver um programa de ensaios em escala real é muito caro. Sendo assim, é de interesse avaliar qual o menor corpo de prova cuja relação L/t (L sendo o comprimento ao longo do eixo longitudinal do cordão de solda e t a espessura da junta soldada) garante as mesmas propriedades da estrutura real. Há pelo menos 4 fatores que podem influir naquela relação L/t : 1) *as tensões residuais em torno do cordão de solda*; 2) *a distribuição de microconcentradores de tensão (devido ao acabamento superficial)*; 3) *a distribuição de descontinuidades internas* e 4) *a microestrutura*. Destes 4 fatores, a tensão residual é o mais difícil de controlar, e é assim o principal parâmetro controlador das dimensões do menor corpo de prova admissível para ensaios de fadiga das juntas soldadas. Este corpo de prova deve ter uma relação L/t que garanta um perfil de tensões residuais idêntico ao da estrutura real.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram feitas várias juntas soldadas de aço API 5L X0, cuja caracterização é descrita em Fernandes, (2002 a-b; 2003c). Algumas medições de tensões residuais (σ_{res}) nestas juntas soldadas foram efetuadas por meio de um equipamento portátil de análise de tensões por raios-X, denominado RAYSTRESS LE P 1002. Este equipamento foi desenvolvido para trabalhar com o método de dupla exposição para obtenção e registro das linhas de difração. Uma melhor descrição deste equipamento pode ser vista em Ivanov, (1994), Fernandes, (2002 e 2004).

Os resultados da varredura longitudinal ao longo do cordão de solda, geraram os perfis de σ_{res} longitudinais e transversais, mostrados na figuras 1. Nesta figura os valores de σ_{res} foram obtidos por retirada de camadas, localizadas, por meio de um polimento eletrolítico local. Na figura 1 verifica-se que não se conseguiu uma uniformidade na medição das σ_{res} no cordão de solda ao longo da espessura.

De acordo com a figura 1, os valores medidos apresentaram dispersões muito grandes, devido a pouca penetração dos raios-X no metal de solda (no máximo $11\mu\text{m}$). Além do mais as tensões residuais medidas pelo equipamento portátil RAYSTRESS não são as tensões residuais macroscópicas (Tipo I), mas uma combinação de tensões residuais do tipo II (Tensões Residuais Microestruturais) e Tipo III (Microtensões Residuais Localizadas) (Macherauch, 1986; Ivanov, 1994).

Como nas juntas soldadas as σ_{res} podem assumir valores maiores que a resistência ao escoamento (S_e) (Figura 1), para a caracterização de um corpo de prova que contivesse as σ_{res} completamente desenvolvidas, estas não poderiam ser caracterizadas pelo método de Rx. Sendo assim, optou-se pelo uso da metodologia de medição de σ_{res} denominado método da furação instrumentada (“Hole-Drilling”). Entretanto, esta metodologia tradicional de medição de tensões residuais apresenta uma limitação de só ser validada para tensões elásticas, o que limita sua aplicação a tensões residuais menores que cerca de $1/3$ da resistência ao escoamento do material ($\sigma_{RES} \leq S_e/3$), devido ao efeito de concentração de tensões introduzido pelo furo. Na prática, colam-se extensômetros dispostos em torno do furo, e se mede

então o gradiente de deformações residuais abaixo dos extensômetros. Há, então, a necessidade de se ter modelos que correlacionem as tensões na borda do entalhe, como no caso o modelo elastoplástico de Neuber e modelos que quantifiquem em torno da borda do furo como o modelo de SAVIN.

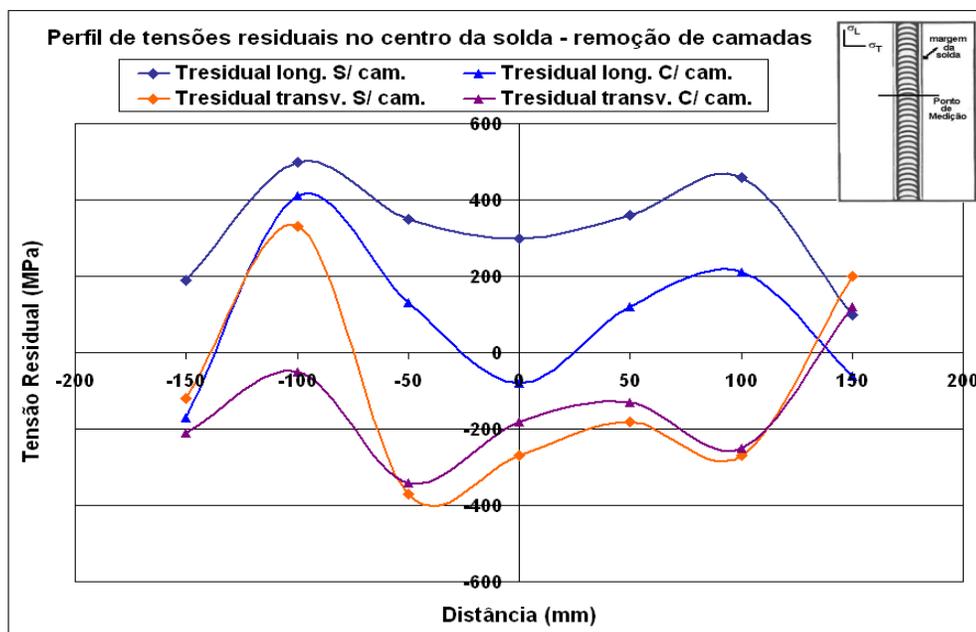


Figura 1. Perfil de tensões residuais longitudinais e transversais ao longo da junta de topo soldada de material API 5L X60 considerando a retirada de camada no ponto onde houve a incidência do feixe de raios-X.

Fernandes (2003a) desenvolveu um modelo numérico por elementos finitos (*EF*) para simular o efeito de um furo circular passante numa chapa fina submetida a cargas nominais trativas uni e biaxiais que variam até a resistência ao escoamento (S_e). No caso biaxial considerou-se relações entre as componentes nominais da carga de $\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,25, 0,50, 0,75$ e $1,00$. O modelo de *EF* foi validado comparando suas previsões do perfil de tensões radiais e tangenciais com as previsões analíticas de KIRSH (modelo elástico) e de SAVIN (modelo elastoplástico sem encruamento). Também considerou-se no modelo numérico as propriedades do aço API 5L X60, medidas em laboratório.

Fernandes (2003b) desenvolveu um modelo elastoplástico numérico por elementos finitos para calcular o concentrador de tensões (K_σ) e de deformações (K_ϵ) de um furo circular passante numa chapa fina sob cargas nominais uniaxiais e biaxiais que variam até a resistência ao escoamento. Foram usadas as propriedades da curva tensão \times deformação real do aço API 5L X60, medidas em laboratório. Avaliou-se o erro relativo entre as previsões feitas pela regra de Neuber e as obtidas via elementos finitos.

PROCEDIMENTO NUMÉRICO

Fernandes (2002a e 2004) desenvolveu-se um modelo numérico de elementos finitos que simula a medição das deformações residuais por meio de uma roseta extensométrica tipo MM EA-XX-062RE-120, que possui três extensômetros situados

a 0, 90 e 225 graus e um furo passante com diâmetro de 3,42 mm, suposto feito em uma placa de comprimento 400 mm, largura de 150 mm e espessura 2 mm (Figura 2). Esta roseta possui uma distância entre o centro do furo até o centro dos extensômetros de 5,14 mm e área dos extensômetros de 3,18 x 3,18 mm. Neste modelo foram consideradas as propriedades do aço API 5L X60, levando-se em conta os pontos da curva tensão versus deformação real do ensaio de tração monotônico obtida em laboratório por Fernandes (2002a-b e 2003c) e também a integração da deformação abaixo da área dos extensômetros utilizando o método da quadratura de Gauss. (Bathe, 1996; Andrade, 1998).

Os resultados da simulação da medição das tensões e deformações residuais foram considerados como sendo a subtração da deformação radial, sob os extensômetros da placa com furo, das deformações radiais de uma placa sem furo, conforme desenvolvido em Fernandes (2002a). Autores como Ajovalasit (1979), Kabiri (1984) e Beghini (1994), atestam que a deformação residual calculada pelo extensômetro deverá ser integrada abaixo da área dos extensômetros, para quantificar o gradiente de deformações residuais existente.

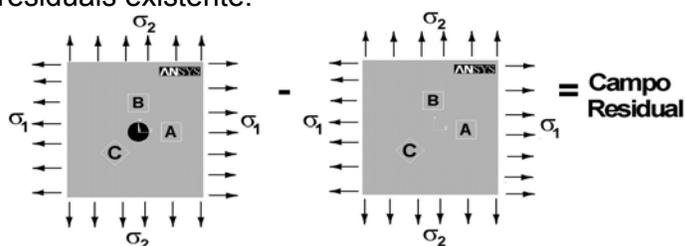


Figura 2. Modelo de elementos finitos simulando a medida de tensões residuais.

Fernandes (2002a e 2004) para definir a quantidade de pontos ótimos comparou as quantidades de pontos obtidas pela solução de *EF*, com as equações elásticas propostas pela norma ASTM E-837 e por Kabiri (1984). Enquanto houvesse divergência entre a solução numérica e as soluções teóricas, aumentava-se a quantidade de pontos. Sendo assim, definiu-se a quantidade de 81 pontos como sendo ótima. Esta quantidade de pontos caracteriza as 81 deformações radiais residuais.

Porém devido a haver a necessidade de se efetuar a integração das deformações radiais, obtidas por elementos finitos ANSYS, abaixo da área do extensômetro, utilizou-se uma metodologia de integração numérica, proposta por Bathe (1996), que utiliza a discretização do elemento isoparamétrico que contém nove nós e possui uma função de interpolação parabólica. Para a integração numérica foi realizada uma adaptação no programa desenvolvido por Andrade (1998) em MATLAB.

A PROPOSTA DA NOVA ROSETA EXTENSOMÉTRICA

O método da furação instrumentada utiliza basicamente uma roseta com três extensômetros para medir o campo de deformações em torno da borda do furo. Estes extensômetros são posicionados de acordo com um raio médio, que passa pelo centro de cada extensômetro e por um ângulo com relação ao eixo horizontal. As medidas de deformações que são lidas em cada extensômetro são avaliadas por meio das equações de rotação tensorial, na qual as componentes de deformação cartesianas ϵ_{xx} , ϵ_{yy} e γ_{xy} podem ser determinadas resolvendo simultaneamente estas equações. As deformações e direções principais podem ser determinadas

empregando também equações da teoria da elasticidade, conforme descrito em Fernandes (2002a).

Sendo assim na metodologia tradicional não se sabe qual foi a dispersão dos dados associada às medidas de tensões residuais, já que só foi realizada uma medida para cada extensômetro a cada profundidade. Logo, é de extrema importância que se tenha várias medidas para cada ponto, para que se possa associar uma dispersão na medida de tensões residuais. Na realidade existe uma diferença entre a estatística efetuada na medição de tensões residuais em pontos diferentes e a efetuada no mesmo ponto.

Em pontos diferentes, verificou-se que os gradientes de tensões e deformações, que existem nos diversos pontos, são aleatórios. Com a dificuldade de se resolver o problema da estatística associada à medição das tensões residuais em diversos pontos, deve-se então analisar estatisticamente as tensões e deformações residuais em um único ponto. Então, a forma de se ter uma medida com confiabilidade metrológica será adicionar extensômetros redundantes, para que se possa avaliar a dispersão dos resultados no mesmo ponto.

Sendo assim estas medidas redundantes são obtidas adicionando mais extensômetros na roseta extensométrica, além dos três extensômetros já existentes, que são suficientes para uma medição, porém não quantificam a dispersão dos dados associados à medição das tensões residuais. O problema agora será ter uma roseta otimizada para que a mesma não contenha uma quantidade excessiva de extensômetros, que atenderá os problemas da dispersão dos dados, porém seu custo não deverá ser elevado.

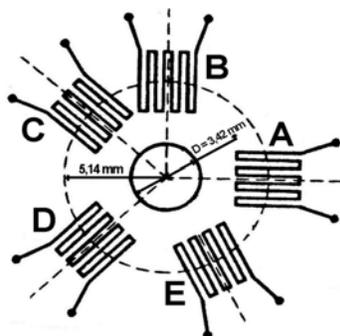
De acordo com o exposto acima pode-se então, propor uma roseta que possua 5 extensômetros. Com relação à disposição dos extensômetros seguiu-se os passos de Beghini (1994) e Schajer (1997) e optou-se por utilizar todos os extensômetros localizados na direção radial ao furo. Porque segundo Fernandes (2002a) é o melhor posicionamento que se pode ter para medição de tensões residuais em uma situação que se tem uma chapa fina com um furo passante.

As dimensões dos extensômetros e as distâncias ao centro do furo foram mantidas as mesmas da roseta exposta por BEGHINI (1994), que segue as recomendações da roseta MM EA XX 125 RE 120, que possui um furo de diâmetro 3,42 mm, distância entre o centro do furo até o centro dos extensômetros de 5,14 mm e área dos extensômetros de 3,18 x 3,18 mm. Os ângulos propostos foram de 0, 90, 150, 225 e 300 graus em relação ao eixo x, considerando o sentido anti-horário. Este posicionamento angular seguiu um critério puramente geométrico, onde não se desejava que os extensômetros tivessem qualquer contato entre si. A Figura 3 mostra a nova roseta extensométrica proposta com 5 extensômetros.

Para se testar a validade das medições feitas pela roseta, duas alternativas foram executadas. A primeira seria a construção de uma roseta extensométrica; porém devido ao custo envolvido e os tempos despendidos serem altos esta hipótese foi descartada. A segunda alternativa, a que foi utilizada, optou-se testar a validade da roseta extensométrica utilizando simulação numérica via elementos finitos. Aproveitando as mesmas condições testadas com sucesso, para o caso da roseta para três extensômetros, adicionando-se mais dois extensômetros.

Entendeu-se que, para efetuar a avaliação da dispersão dos resultados, haveria a necessidade de propor uma roseta extensométrica, que possuísse 5 extensômetros.

Sendo assim, para se efetuar as medidas das dispersões das tensões residuais deverão ser feitas leituras de três em três extensômetros, de forma que a distribuição das leituras siga a seguinte seqüência: ABC, ABD, ABE, ACD, ACE, ADE, BCD, BCE, BDE e CDE. Sendo A, B, C, D, E, os respectivos extensômetros de 0, 90, 150, 225 e 300 graus.



Posicionamento	Ângulos
A	0 graus
A → B	90 graus
A → C	150 graus
A → D	225 graus
A → E	300 graus

Figura 3. Desenho esquemático da proposta de uma roseta extensométrica com 5 extensômetros posicionados radialmente ao furo.

De posse destes dez valores de tensões residuais tira-se uma média e um desvio padrão destes resultados, tendo assim a dispersão das medidas das tensões residuais. Esta tabela é apresentada em Fernandes (2002a), onde tem-se dez conjuntos de três extensômetros, com os respectivos valores das deformações (ε_1 e ε_2) e tensões principais (σ_1 e σ_2), para cada conjunto de três extensômetros.

Nas Figuras 4 e 5, pode-se verificar os gráficos das deformações radiais residuais para uma roseta extensométrica que possua 5 extensômetros posicionados a 0, 90, 150, 225 e 300 graus. Nestas figuras aplicam-se carregamentos nominais, unidimensional (na direção y) e bidimensional, respectivamente. Para o carregamento bidimensional considerou-se as relações entre as cargas nominais ($\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,25, 0,50$ e $0,75$), sendo $0,1 \cdot S_e < \sigma_{ny} < S_e$ e as tensões equivalentes calculadas por Mises ($\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{nx}^2 + \sigma_{ny}^2 - \sigma_{nx}\sigma_{ny}}$).

A primeira etapa de validação do modelo numérico para a roseta com 5 extensômetros, consta de se fazer uma comparação com um modelo teórico. O modelo teórico escolhido foi o proposto na norma ASTM E-837, que leva em consideração a integração abaixo da área do extensômetro, conforme mostrado nas Figuras 4 e 5. Na Figura 4 avalia-se que, na parte elástica os erros relativos dos resultados integrados abaixo da área de cada extensômetro entre o modelo teórico como no modelo via elementos finitos tendo como valores máximos avaliados em 0,17%. Porém na parte plástica, que corresponde a carregamento acima de 0,35 da resistência ao escoamento, uma avaliação do erro relativo levaria a resultados errôneos, porque se compara um modelo teórico elástico para inferir resultados elastoplásticos.

Em virtude do exposto pode-se afirmar que o modelo numérico via elementos finitos está qualificado para o caso de uma roseta extensométrica que possui 5 extensômetros. Para o caso ideal de medição de tensões residuais pelo método da furação instrumentada, a média dos dez conjuntos de três extensômetros terá o mesmo valor de tensões residual quando comparada com qualquer um dos conjuntos de três extensômetros. Porém na prática aparecem erros intrínsecos no

processo de medição, como por exemplo, o efeito da excentricidade, que será abordado a seguir.

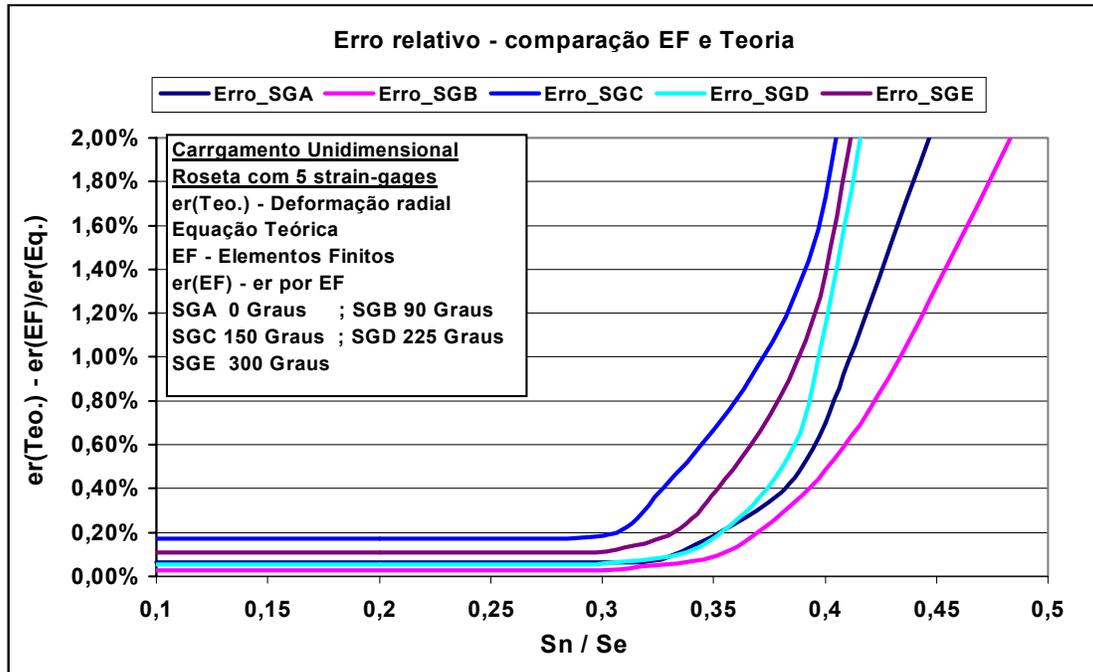


Figura 4. Erro Relativo da deformação radial residual entre a solução numérica via elementos finitos (EF) e a solução teórica, para o caso em que se tem um carregamento nominal aplicado na direção y.

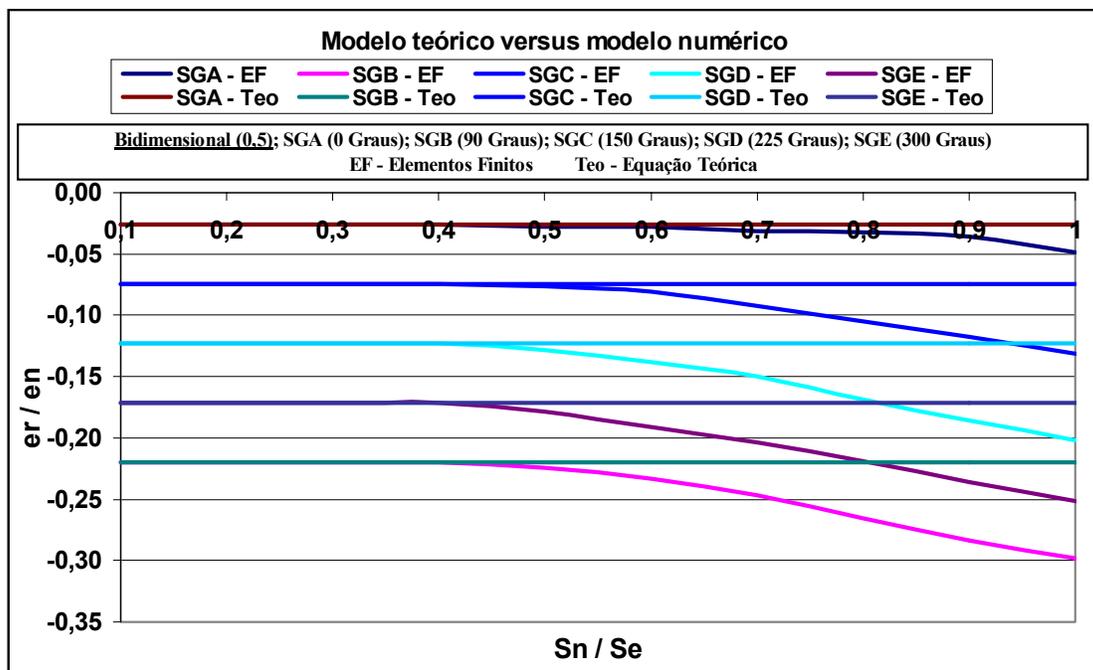


Figura 5. Comparação da medida de deformação radial residual feita por elementos finitos (EF) com a medida de deformação radial residual teórica, para o caso em que se tem um carregamento nominal aplicado com relação ($\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,50$).

Pode-se verificar, que todos os modelos teóricos foram propostos com relativo sucesso para analisar o problema da excentricidade, tratam o problema como sendo determinístico, não levando em consideração a quantificação dos erros experimentais associados devido ao efeito da excentricidade (Ajovalasit, 1979). Também verifica-se que todas as metodologias de procedimentos teóricos das tensões e deformações radiais residuais em torno da borda do furo, levando em conta a excentricidade, são confusas e necessitam de meios experimentais para a comparação com o modelo teórico.

De posse da roseta extensométrica proposta com 5 extensômetros, pode-se analisar a dispersão dos dados experimentais para cargas nominais que variam até a resistência ao escoamento, quando está presente o efeito da excentricidade. Neste caso, há a preocupação com a dispersão dos dados experimentais conhecendo-se o valor da excentricidade; porque com os dois extensômetros redundantes não se está mais tratando o problema como determinístico.

Sendo assim, considera-se uma comparação entre a roseta tradicional proposta pela ASTM E-837 (com três extensômetros), que não leva em conta o efeito da excentricidade com a roseta proposta de 5 extensômetros, levando em conta a média dos valores das deformações. Para cada valor da deformação radial residual foi realizada a integração abaixo da área do extensômetro, por mais se aproximar do que ocorre na prática. A partir deste ponto foram feitas as médias das deformações e tensões principais, levando em conta a análise de três em três extensômetros, o que proporcionou uma média de dez medidas, considerando que para uma roseta com 5 extensômetros podem se formar dez combinações de três extensômetros.

Analisou-se o erro relativo entre as medidas das deformações principais considerando a roseta proposta pela ASTM E-837, que é determinística, e a roseta proposta com 5 extensômetros para uma média de dez valores. Vale ressaltar que o fato de se ter uma roseta com extensômetros redundantes não irá eliminar o efeito da excentricidade e sim diminuir o erro relativo entre a roseta com 5 extensômetros em relação à roseta com três.

Nas Tabelas 1 e 2 são mostrados para o caso unidimensional e bidimensional ($\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,50$), os erros relativos associados ao cálculo das tensões residuais radiais, considerando modelo o determinístico (ASTM E-837) e o modelo numérico proposto com 5 extensômetros, que leva em conta as estatísticas em seu cálculo.

Verifica-se nas Tabelas 1 e 2 que à medida que as cargas vão se aproximando da resistência ao escoamento, os erros relativos tendem a diminuir. Este fato pode ser explicado como sendo devido ao aumento da tensão nominal, que torna os gradientes de deformações mais uniformes, ou seja, estes têm a tendência a se “planificarem”. Devido a isto o erro percentual tende a diminuir.

Um outro fato, que pode ser observado nestas tabelas, é que os erros relativos para as deformações principais e_1 e e_2 , tendem a diminuir, para a roseta que leva em consideração os extensômetros redundantes. O que leva à conclusão que, apesar da roseta com 5 extensômetros ter os erros relativos menores, a média das deformações residuais contribuiu muito para melhor quantificar o efeito da excentricidade.

Vale ressaltar que a roseta extensométrica com 5 extensômetros não diminui o efeito da excentricidade, e sim melhor quantifica este efeito. Fazendo-se uma

comparação entre as Tabelas 1 e 2, verifica-se que para o caso de carregamento nominais biaxial os erros relativos são menores.

Tabela 1. Comparação entre os erros relativos das deformações principais calculadas pela ASTM E-837 (modelo determinístico) e calculadas pela roseta proposta com 5 extensômetros (modelo estatístico) para o caso uniaxial. (e_1 e e_2 são as deformações principais nas direções 1 e 2, respectivamente).

CARGA σ_{ny}	ASTM E-837		Roseta Proposta	
	erro (e_1)%	erro (e_2)%	erro (e_1)%	erro (e_2)%
0,1 S_e	2,00	2,90	1,57	2,21
0,2 S_e	2,00	2,90	1,57	2,21
0,3 S_e	2,00	2,90	1,57	2,21
0,4 S_e	1,98	2,87	1,48	2,10
0,5 S_e	1,91	2,76	1,39	1,88
0,6 S_e	1,88	2,61	1,26	1,65
0,7 S_e	1,83	2,46	1,13	1,42
0,8 S_e	1,73	2,23	0,95	1,25
0,9 S_e	1,57	1,97	0,88	1,08
1,0 S_e	1,32	1,53	0,69	0,87

Tabela 2. Comparação entre os erros relativos das deformações principais calculadas pela ASTM E-837 e pela roseta proposta com 5 extensômetros para o caso biaxial, com relação entre as cargas nominais ($\sigma_{nx}/\sigma_{ny}=0,50$). (e_1 e e_2 são as deformações principais nas direções 1 e 2, respectivamente).

CARGA ($\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,50$)	ASTM E-837		Roseta Proposta	
	erro (e_1)%	erro (e_2)%	erro (e_1)%	erro (e_2)%
0,1 S_e	1,88	2,71	1,46	2,18
0,2 S_e	1,88	2,71	1,46	2,18
0,3 S_e	1,88	2,71	1,46	2,18
0,4 S_e	1,85	2,76	1,42	2,06
0,5 S_e	1,80	2,63	1,34	1,75
0,6 S_e	1,73	2,52	1,21	1,60
0,7 S_e	1,72	2,46	1,11	1,31
0,8 S_e	1,61	2,20	0,82	1,19
0,9 S_e	1,49	1,81	0,62	0,98
1,0 S_e	1,28	1,49	0,48	0,67

CONCLUSÕES

Desenvolveu-se uma roseta extensométrica com 5 extensômetros posicionados a 0, 90, 150, 225 e 300 graus em relação ao eixo x, contando no sentido anti-horário. Para testar a validade numérica da roseta proposta desenvolveu-se um programa por *EF* que simulasse carregamentos nominais uniaxiais e biaxiais que variam até a resistência ao escoamento para uma chapa fina com furo circular passante. No

modelo numérico considerou-se as propriedades do aço API 5L X60, obtidas em laboratório. Avaliou-se o erro relativo entre a solução numérica e a solução teórica da ASTM E837 (elástica) e Savin (elastoplástica). Verificou-se que os erros relativos para as deformações principais e_1 e e_2 , tenderam a diminuir para a roseta que leva em consideração os extensômetros redundantes. Sendo assim, a nova roseta extensométrica com 5 extensômetros tem como objetivo principal avaliar a dispersão das medidas de tensões residuais, pela técnica da furação instrumentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- 1 ANDRADE, B.L., (1998), Modelagem numérica de um problema de lubrificação parcial: contato/lubrificação em elasto-hidrodinâmica, **Proposta de Doutorado**, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 112p.
- 2 AJOVALASIT, A.,(1979), Measurement of residual stresses by the hole-drilling method: influence of hole eccentricity, **Journal of Strain Analysis**, Vol. 14, N° 4, 1979, pp. 171 – 178.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-837. Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain-gage method**, pp. 1 – 12.
- 4 BATHE, K.J., (1996), **Finite Element Procedures**, Pretence-Hall.
- 5 BEGHINI, M.; BERTINI, L.; RAFFAELLI, P., (1994), Numerical analysis of plasticity effects in the hole-drilling residual stress measurement, **Journal of Testing and Evaluation**, *JTEVA*, Vol. 22, N° 6, November, pp. 522 – 529.
- 6 BRANCO C.M. *et al.*, (1999), **Fadiga de estruturas soldadas**, Fundação Calouste Gulbenkian.
- 7 FERNANDES, J. L., (2002a) Uma Metodologia para a Análise e Modelagem de Tensões Residuais, **Tese de Doutorado**, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, setembro de 2002.
- 8 FERNANDES, J. L. e CASTRO, J.T.P., (2002b), Propagação de Trincas de Fadiga no aço API 5L X60, **COTEQ-SAET**, Agosto 2002, 10p.
- 9 FERNANDES, J. L. e CASTRO, J.T.P., (2003a), Análise Elastoplástica em torno de um Furo Circular numa Chapa Submetida a Carregamentos Biaxial e Uniaxial, **58° Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia – 58° ABM**, Rio de Janeiro, Julho 2003, 10p.
- 10 FERNANDES, J. L. e CASTRO, J.T.P., (2003b), Verificação por Elementos Finitos da Regra de Neuber, **58° Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia – 58° ABM**, Rio de Janeiro, Julho 2003, 10p.
- 11 FERNANDES, J. L. e CASTRO, J.T.P., (2003c), Análise das Propriedades Metalúrgicas e Mecânicas de um Aço API 5L X60 Soldado, **58° Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia – 58° ABM**, Rio de Janeiro, Julho 2003, 10p.
- 12 FERNANDES, J. L. e CASTRO, J.T.P., (2004), Simulação da Medição de Tensões Residuais numa Chapa Submetida a Carregamentos Biaxiais Grandes, **III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – III CONEM**, Belém do Pará, Agosto 2004, 10p.
- 13 IVANOV, S. A.; MONIN, V. I.; TEODÓSIO, J. R., (1994). New methods of X-Ray tensometry, **Proceeding of 10th International Conference on Experimental Mechanics**, Lisbon, Portugal, 18-22 July, pp. 757 – 761.
- 14 KABIRI, M., (1984), Measurement of residual stresses by the hole-drilling method: influences of transverse sensitivity of the gages and relieved strain coefficients, **Experimental Mechanics**, pp. 252 – 256.

15 SCHAJER, G. S.; TOOTOONIAN, M., (1997), A new rosette design for more reliable hole-drilling residual stress measurements, **Experimental Mechanics**, September, Vol. 37, N° 3, pp. 299 – 306.

A PROPOSAL OF STRAIN-GAGE ROSETTE FOR MEASUREMENT RESIDUAL STRESS AROUND A CIRCULAR HOLE IN A PLATE SUBMITTED BIAXIAL BIG LOADING

José Luiz Fernandes¹
Jaime Tupiassú Pinho de Castro²

Abstract

It was simulated by finite elements the measurement residual stress methodology named "Hole-Drilling" in plate submitted nominal biaxial big loading until the yielding stress for the API 5L X60. In the ratio biaxial nominal loading were considered of $\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,25, 0,50, 0,75$ e $1,00$. In this study was projected and a strain gage rosette containing 5 strain gages positioned 0, 90, 150, 225 and 300 degrees. The relative error was evaluated between the numeric solution and the theoretical solution proposed by ASTM E837 (elastic) and by Savin (elastoplastic). It was verified that the relative errors for the main strain ϵ_1 and ϵ_2 , obtained by the strain gages redundant to decrease. It is worth to emphasize that the strain gages rosette proposed with five strain gages didn't eliminate the problem of the eccentricity, but it quantified with larger precision this effect.

Key-words: Residual stress; Hole drilling methodology; Numerical simulation; Finite elements.

60th Nacional Congress of The Brazilian Society of Metallurgy and Materials (ABM), 25-28 july
2005 – Belo Horizonte - MG

¹ Mechanical Engineer, D.Sc., Adjoint Professor, Mechanical Engineering Department, CEFET-RJ,
jlfernandes@cefet-rj.br

² Mechanical Engineer, P.hD., Adjoint Professor, Mechanical Engineering Department, PUC-Rio,
jtcastro@mec.puc-rio.br