

SIMULAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS NUMA CHAPA SUBMETIDA A CARREGAMENTOS BIAXIAIS GRANDES

Artigo (53030) a ser enviado para análise - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica
CONEM 2004

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 (σ_e) do material. 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 simulou-se uma roseta extensométrica tipo MM EA-XX-062RE-120, que contém 3 extensômetros posicionados a 0, 90 e 225 graus. O modelo de elementos finitos foi validado através da norma ASTM-E837.*

Palavras Chaves: *Tensões Residuais, Método da Furação Instrumentada, Simulação Numérica, Elementos Finitos.*

1. 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, 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.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram feitas várias juntas soldadas de aço API 5L X0, cuja caracterização é descrita alhures (Fernandes *et al.* 2002 b-c; 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 (figura 1). Este equipamento foi desenvolvido para trabalhar com o método de dupla exposição para obtenção e registro das linhas de difração.

Este equipamento é composto por um tubo de emissão de raios-X integrado a uma fonte de alta tensão e pelo suporte do filme, e contém uma unidade chamada de bloco diretor, que permite o monitoramento e ajuste do nível de energia de alimentação do tubo de raios-X. O tubo utiliza dois anodos de cromo ($\lambda_{CR} K_{\alpha} = 2,29092 \text{ \AA}$) para a produção dos feixes e filtros de vanádio para torná-los monocromáticos. A profundidade de penetração efetiva da radiação do Fe é de aproximadamente $11 \mu\text{m}$. Os feixes difratados pelos planos cristalográficos $\{211\}$ do ferro formam cones que interceptam o filme segundo linhas cônicas. A tensão e a corrente de trabalho da fonte de raios-X são de 25 kV e 1,5 mA, respectivamente. O tempo de exposição, para o caso da medição das tensões residuais no material API 5L X60, metal de base e metal de solda foram 8 min e 15 min, respectivamente (Martins, 1996 e Ivanov, 1994 a e b).



Figura 1. Equipamento portátil de medições de tensões residuais RAYSTRESS em uma junta de topo soldada do material API 5L X60.

Os resultados da varredura longitudinal ao longo do cordão de solda, geraram os perfis de σ_{res} longitudinais e transversais, mostrados nas figuras 2 a 3. De acordo com as figuras 2 e 3, 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).

Como nas juntas soldadas as σ_{res} são da mesma ordem, ou até maiores que a resistência ao escoamento (S_e) (figuras 2 e 3), 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 ($\sigma_{\text{RES}} \leq S_e/3$), 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.

Fernandes (2003a) quantificou as deformações e tensões elastoplásticas na borda do entalhe considerando tensões aplicadas até da ordem da resistência ao escoamento do material, usando elementos finitos e o programa ANSYS.

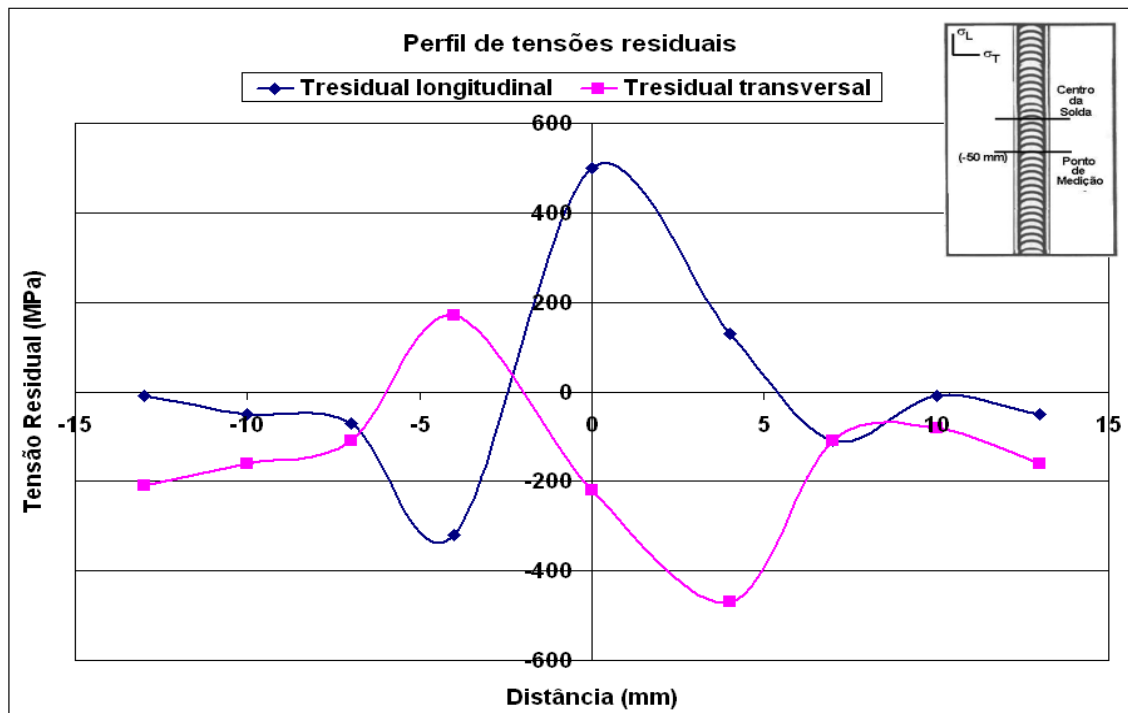


Figura 2. Perfil de σ_{res} longitudinais e transversais ao longo da junta de topo soldada de material API 5L X60, obtido por uma varredura longitudinal no cordão de solda.

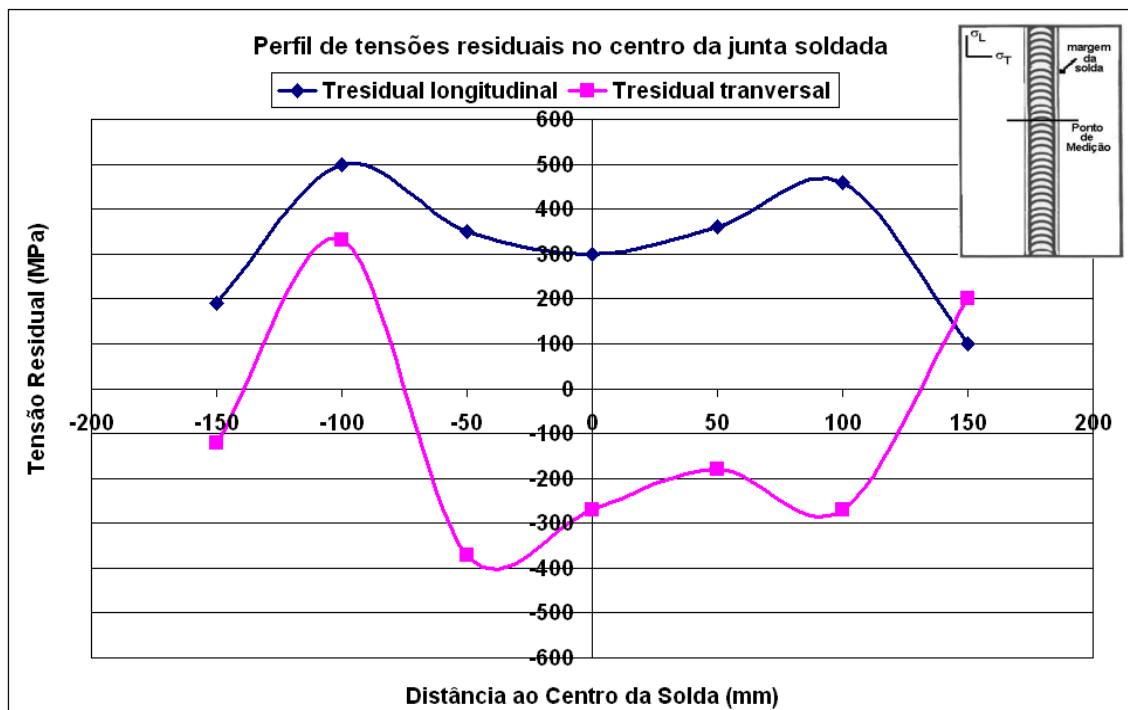


Figura 3. Perfil de σ_{res} longitudinais e transversais a -50 mm do centro ao longo da junta de topo soldada de material API 5L X60, obtido por varredura longitudinal e transversal no cordão de solda.

Como nas juntas soldadas as σ_{res} são da mesma ordem, ou até maiores que a resistência ao escoamento (S_e) (figuras 2 e 3), 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 ($\sigma_{\text{RES}} \leq S_e/3$), 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. Fernandes (2003a) quantificou as deformações e tensões elastoplásticas na borda do entalhe considerando tensões aplicadas até da ordem da resistência ao escoamento do material, usando elementos finitos e o programa ANSYS (Fernandes, 2002a).

3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

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 4). 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 e b; 2003c).

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). Nesta placa foram simulados carregamentos nominais que variaram de $0,1.S_e$ até S_e , tanto para o caso uniaxial como para o caso biaxial.

Autores como 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 deformações residuais existente.

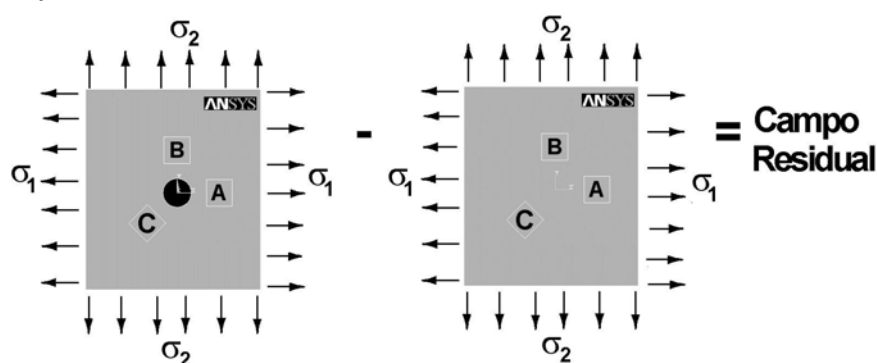


Figura 4. Modelo de elementos finitos simulando a medida de tensões residuais.

Fernandes (2002a) utilizou vários modelos, porém concluiu que a quantidade de pontos ótima foi de 81 pontos. Todas as quantidades de pontos foram comparadas 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, até que se chegou à quantidade de oitenta e um pontos, a partir de que não houve mais divergência entre os

modelos. Com a quantidade de pontos definidos, e os resultados de todas as 81 deformações radiais residuais, passou-se para a etapa de integração destes pontos numericamente. Sendo assim, para integrar os pontos 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. Estes nove nós são dispostos: quatro nós em cada aresta do quadrado, quatro nós no ponto intermediário das arestas e o nó restante no centro do quadrado. Foram necessárias nove áreas discretizadas ao longo da largura e do comprimento de 3,18 x 3,18 mm, totalizando assim oitenta e um pontos, que fornecem as informações que são retiradas do programa ANSYS. Para a integração numérica foi realizada uma adaptação no programa desenvolvido por Andrade (1998) em ambiente MATLAB.

Nas figuras 5 e 6, pode-se verificar o gráfico das deformações radiais residuais para uma roseta extensométrica que possua três extensômetros posicionados a 0, 90 e 225 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 ($\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,25, 0,50 \text{ e } 0,75$), sendo $0,1 \cdot S_e < \sigma_{ny} < S_e$ e as tensões equivalentes calculadas por Mises ($\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{nx}^2 + \sigma_{ny}^2 - \sigma_{nx}\sigma_{ny}}$).

Um ponto importante a ser considerado: existem vários tipos de rosetas extensométricas utilizadas na prática. E também que a disposição dos extensômetros deve variar com o tipo de roseta. Porém, observou-se que há uma simetria no problema do cálculo das tensões residuais da placa com furo, de forma que, a roseta de 45 graus fornece os mesmos resultados da roseta de 225 graus, ou seja, a cada suplemento angular os valores das deformações radiais residuais têm os mesmos valores. Um outro ponto que foi observado é o fato de que na prática como o tamanho do extensômetro estabelecido em 3,18 x 3,18 mm para um raio médio de 5,14 mm, não há condições geométricas de manter uma roseta com os ângulos dispostos de 0, 45 e 90 graus; porque haveria uma sobreposição entre os extensômetros. Logo a roseta, que foi usado por Beghini (1994), que é do tipo MM EA-XX-062RE-120, teve como ângulos escolhidos em 0, 90 e 225 graus, que é a mesma roseta proposta pela ASTM E-837.

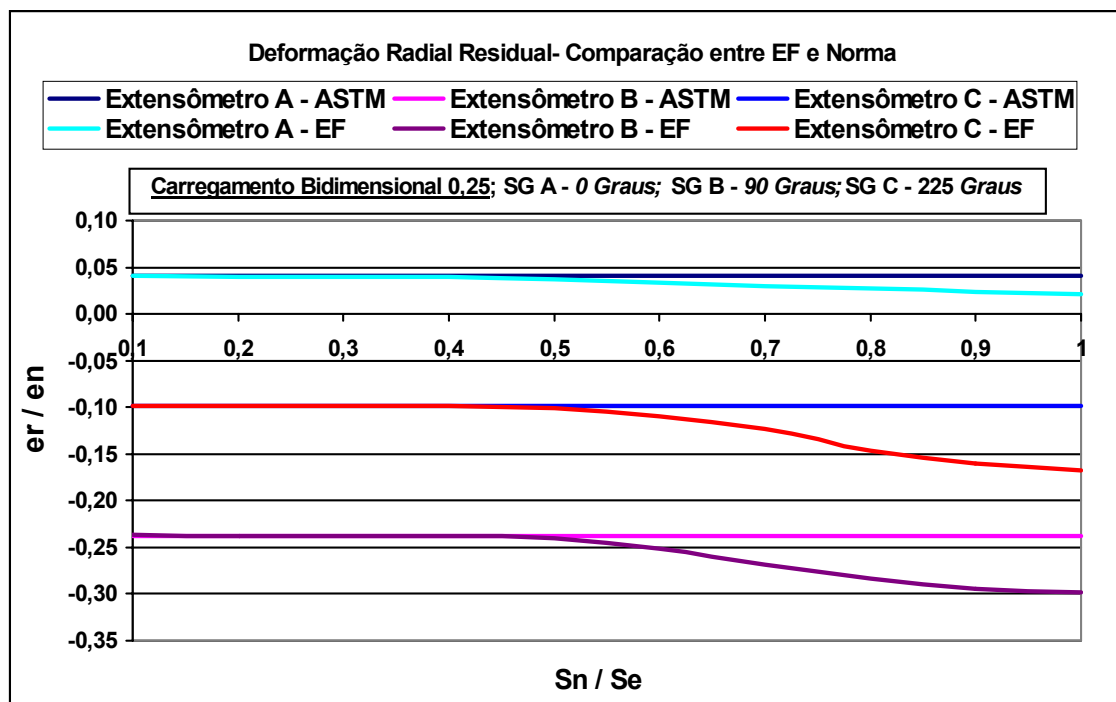


Figura 5. Comparação entre o modelo numérico com a equação proposta pela norma ASTM E-837 para o cálculo das deformações radiais residuais.

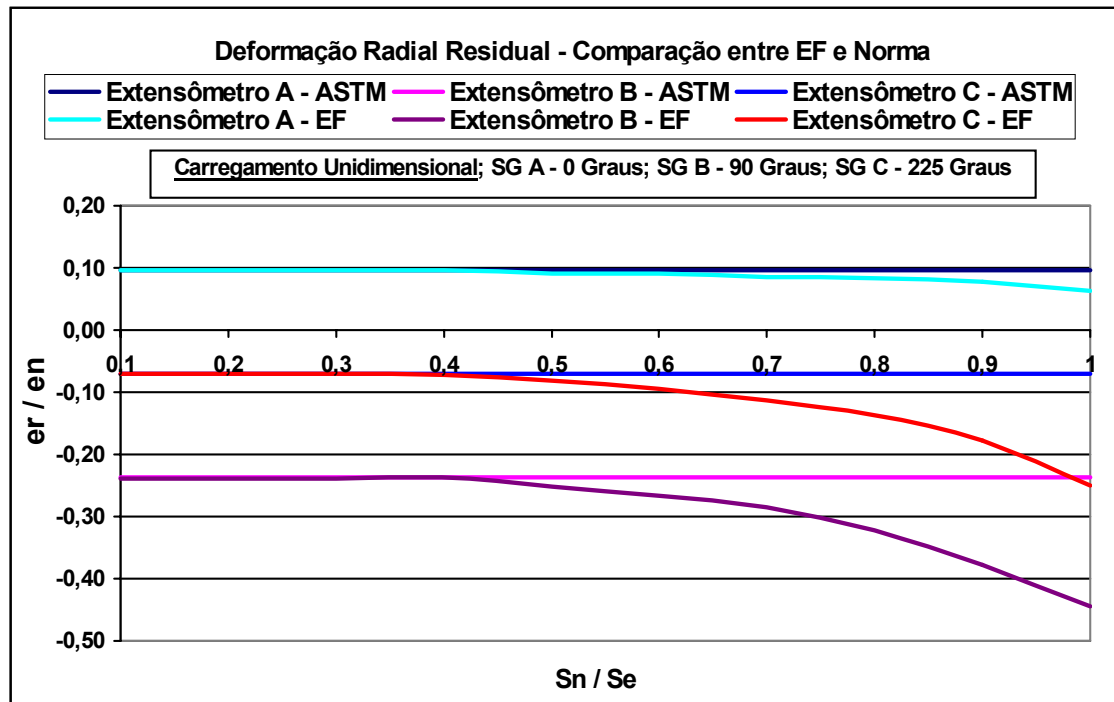


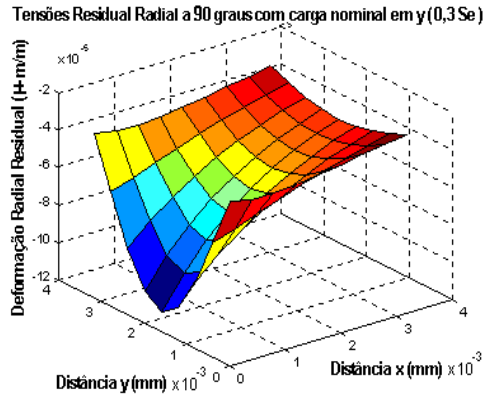
Figura 6. Comparação entre o modelo numérico e a equação proposta pela norma ASTM E-837 para as deformações radiais residuais, para uma relação nominal biaxial ($\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,25$).

Como a solução apresentada na norma ASTM E-837 é elástica, pode-se verificar nas figuras 5 e 6 que a partir da tensão nominal aplicada de $0,45.S_e$, há uma divergência entre as curvas teóricas e o modelo numérico. Este fato pode ser explicado, porque o modelo numérico está tratando o problema como sendo elastoplástico e o modelo teórico está tratando o problema como sendo elástico. Na realidade, a partir da tensão nominal de $0,45.S_e$ se está comparando um modelo elástico para uma previsão elastoplástica de deformação abaixo dos extensômetros.

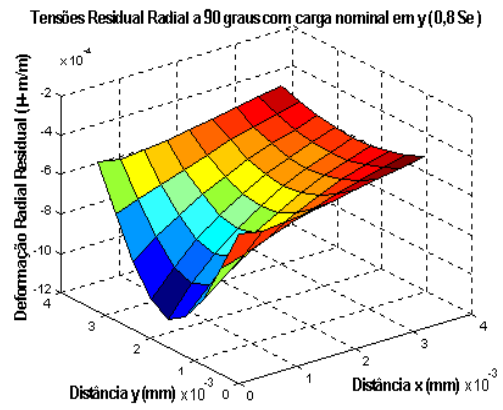
Um fato importante que justifica a integração das deformações radiais residuais abaixo da área dos extensômetros pode ser vista na figura 7. Nesta figura mostra-se o perfil tridimensional do comportamento do gradiente de deformações radiais residuais para os ângulos referentes a cada extensômetro de 0, (45 ou 225) e 90 graus, para cargas nominais, que estejam na parte elástica ($0,3.S_e$) e que estejam na parte plástica ($0,8.S_e$), considerando um carregamento uniaxial aplicado na direção y.

Pode-se observar que os gráficos apresentados na figura 7 não são gráficos quantitativos e sim qualitativos, porém dão uma boa visualização do que acontece abaixo dos extensômetros, quando os mesmos estão submetidos à medição de deformações radiais residuais. Na figura 7a e 7b, os gráficos têm uma forma de sela, que indica o posicionamento do extensômetro mais próximo da borda do furo e na região mais plana está mais afastado da borda do furo.

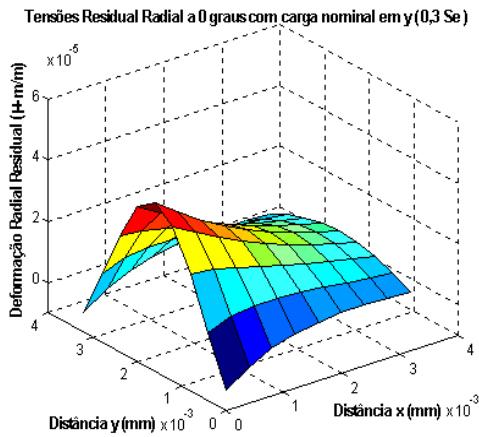
Um outro ponto importante a ser observado na figura 7, os valores das deformações residuais radiais apresentam em módulo, deformações maiores para o caso do extensômetro A (0 graus). A explicação para este fato é que quando uma placa está sendo submetida a um carregamento nominal na direção y, este extensômetro, tanto na placa com furo como na placa sem furo, está sendo submetido à compressão. Logo, as deformações radiais associadas a este extensômetro são negativas. Porém em módulo, a deformação radial vista pelo extensômetro para placa que não possui furo é maior do que a deformação radial para a placa com furo. Sendo assim, na subtração das deformações radiais nos pontos abaixo da área do extensômetro assumem valores positivos.



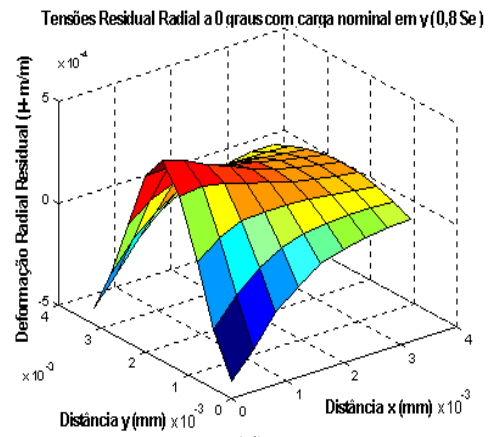
(a)



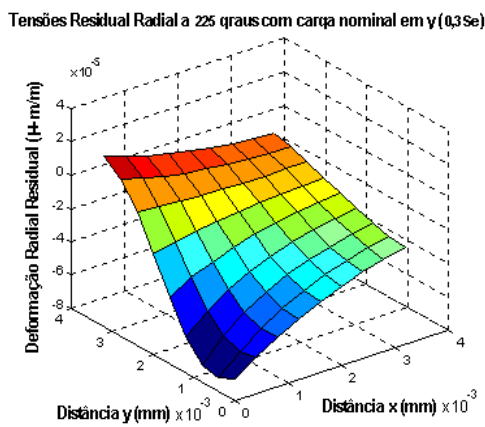
(b)



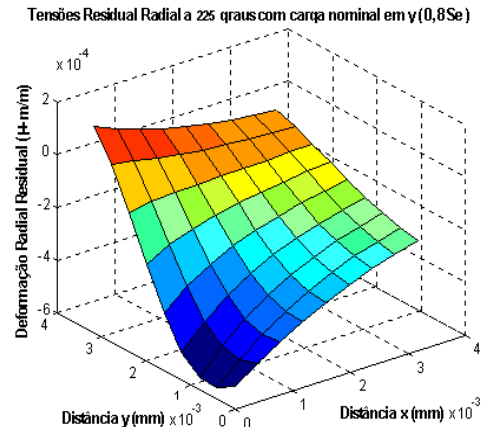
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 7. Gradiente de deformação residual radial abaixo da área do extensômetro de ângulo de (a)–(b) 0 graus, (c)–(d) 90 graus e (e)–(f) 225 graus. Para o caso elástico, as tensões nominais aplicadas são de 0,3.Se e para o caso elastoplástico de 0,8.Se. Considera-se, que a placa é fina com um furo circular passante e está sendo aplicado um carregamento unidimensional na direção y.

A mesma linha de raciocínio pode ser usada para explicar o porquê do extensômetro a 90 graus. Seguindo a mesma linha de raciocínio apresentada até agora, fez-se uma mesma análise dos valores das deformações radiais residuais integradas abaixo da área dos extensômetros para os casos em que há carregamentos (σ_{nx}/σ_{ny}) biaxiais de 0,25, 0,50 e 0,75, aplicados na placa que contém um furo circular.

A análise dos erros relativos $(e_r(ASM)-e_r(EF))/e_r(ASM)$ entre o modelo teórico apresentado na norma ASTM E-837 e modelo numérico desenvolvido via elementos finitos para cada extensômetro, na região elástica, até a tensão nominal de 0,35 da resistência ao escoamento,

apresentou valores máximos de 0,32%, o que indica que o modelo está qualificado para a simulação de tensões residuais radiais na fase elástica. As figuras 8, 9 e 10 mostram o erro relativo entre o modelo teórico apresentado na norma ASTM E-837 e modelo numérico desenvolvido via elementos finitos para os extensômetros de 0, 225 e 90 graus, respectivamente.

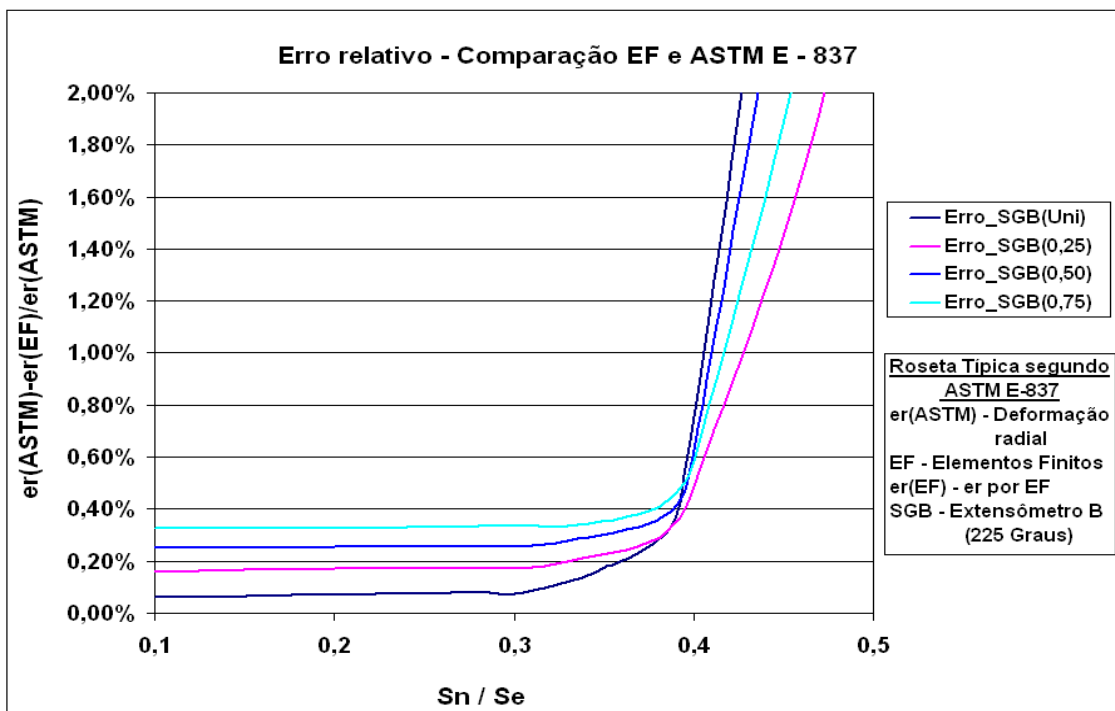


Figura 8. Erro relativo entre o modelo numérico e a equação proposta pela norma ASTM E-837 para o cálculo das deformações radiais residuais a 0 graus, levando em consideração a integração abaixo da área do extensômetro.

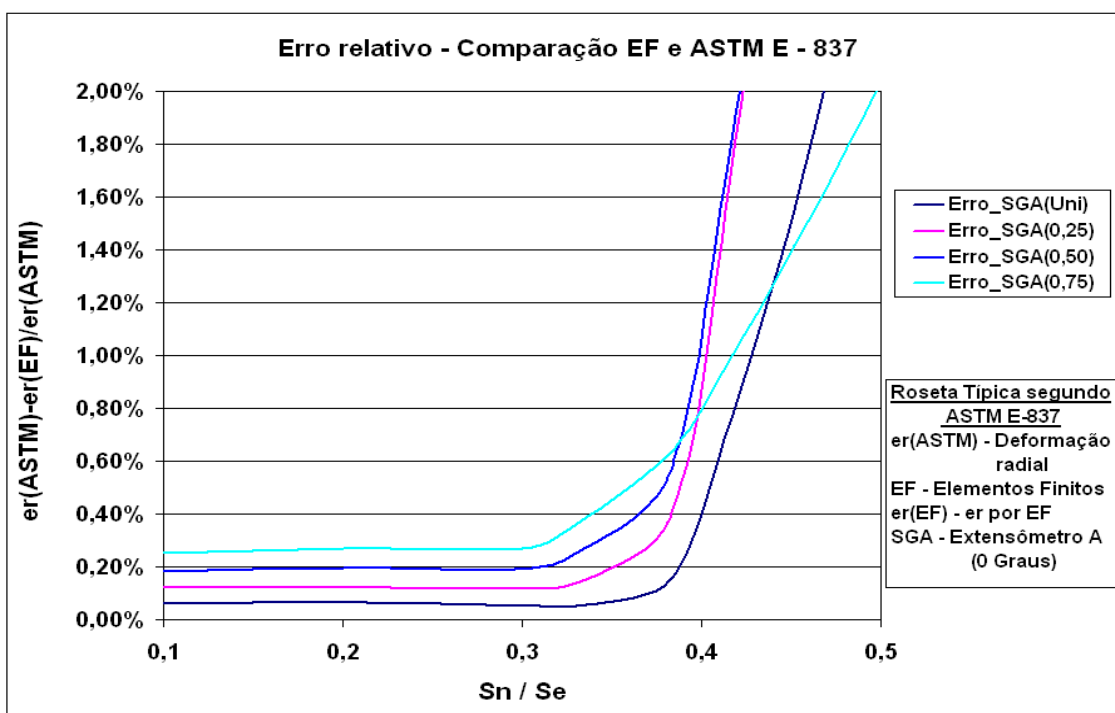


Figura 9. Erro relativo entre o modelo numérico e a equação proposta pela norma ASTM E-837 para o cálculo das deformações radiais residuais a 225 graus, levando em consideração a integração abaixo da área do extensômetro.

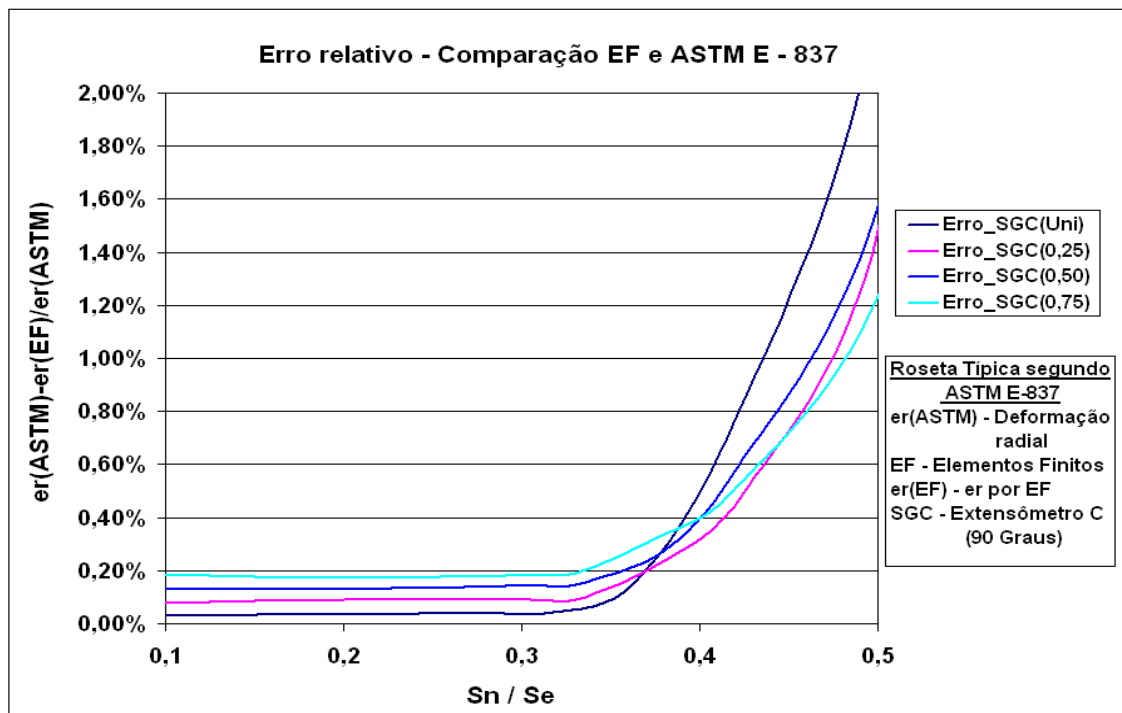


Figura 10. Erro relativo entre o modelo numérico e a equação proposta pela norma ASTM E-837 para o cálculo das deformações radiais residuais a 90 graus, levando em consideração a integração abaixo da área do extensômetro.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizou-se a metodologia de medida de tensão residual pela técnica do furo cego "Hole-Drilling" para simular o efeito de um por furo circular em uma chapa fina submetida a carregamento nominal uniaxial e biaxial até a resistência ao escoamento (S_e). No caso do carregamento nominal biaxial foram consideradas as relações entre as cargas nominais de $s_{nx}/s_{ny} = 0,25, 0,50, 0,75$ e $1,00$. Nesta metodologia utilizou-se uma roseta extensométrica tipo EA-XX-062RE-120, que contém 3 extensômetros posicionados a $0, 90$ e 225 graus. O modelo de elementos finitos foi validado através da norma ASTM-E837. A análise dos erros relativos entre o modelo teórico apresentado na norma ASTM E-837 e modelo numérico desenvolvido via elementos finitos para cada extensômetro, na região elástica, até a tensão nominal de $0,35$ da resistência ao escoamento, apresentou valores máximos de $0,32\%$, o que indica que o modelo está qualificado para a simulação de tensões residuais radiais na fase elástica.

5. REFERÊNCIAS

- 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.
- Bathe, K.J., 1996, Finite Element Procedures, Prentice-Hall.
- 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.
- Branco C.M. *et al.*, 1999, Fadiga de estruturas soldadas, Fundação Calouste Gulbenkian.
- Fernandes, J.L., 2002a, Uma Metodologia de Análise e Modelagem de Tensões Residuais, *Tese de Doutorado*, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC/RJ, 340p.

- Fernandes, J.L., Castro, J.T.P., 2002b, “Propagação de trincas por fadiga no aço API 5L X60”, *VII Simpósio Experimental de Análise de Tensões - VII COTEQ*, Salvador, 9p.
- Fernandes, J.L., Castro, J.T.P., 2002c, “Avaliação dos ensaios de queda de potencial e deformação na face traseira para o aço API 5L X60”, *VII Simpósio Experimental de Análise de Tensões - VII COTEQ*, Salvador, 7p.
- Fernandes, J.L.; Castro, J.T.P., 2003a “Verificação por elementos finitos da regra de Neuber”, *58º Congresso da Associação Brasileira de Metais*, Rio de Janeiro, 10p.
- Fernandes, J.L.; Castro, J.T.P., 2003b, “Análise elastoplástica de tensões em torno de um furo circular numa chapa submetida a carregamentos biaxial e uniaxial”, *58º Congresso da Associação Brasileira de Metais*, Rio de Janeiro, 9p.
- Fernandes, J.L.; Castro, J.T.P., 2003c, “Análise das propriedades metalúrgicas e mecânicas de um aço API 5L X60 soldado”, *58º Congresso da Associação Brasileira de Metais*, Rio de Janeiro, 9p.
- 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.
- Macherauch, E., Kloos, K.H., 1986, “Origin, measurement and evaluation of residual stresses”, *Proceeding of the International Conference on Residual Stress*, Germany, pp. 3 – 26.
- Ivanov, S.A., Monin, V.I., Teodósio, J.R., 1994a, “New methods of X-Ray tensometry”, *Proceeding of 10th International Conference on Experimental Mechanics*, Lisbon, Portugal, 18-22 July. pp. 757 – 761.
- Ivanov, S.A., 1994b, Problems in stress measurement, *Applied Rentgenography of Metals*, Moscow, 34p. (Em Russo)
- Martins, L.A.L., 1996, Avaliação do tratamento térmico de alívio de tensões com uma unidade portátil de raios-X, *Dissertação de Mestrado*, COPPE/UFRJ, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 83p.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SIMULATION OF RESIDUAL STRESS MEASUREMENT AROUND A CIRCULAR HOLE IN A PLATE SUBMITTED BIAXIAL AND UNIAXIAL LOADING

Artigo **(53030)** a ser enviado para análise - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica
CONEM 2004

Abstract: *In this work a methodology of residual stress measurement for the technique Hole-Drilling was developed to simulate the effect of a through circular hole in a thin plate submitted under nominal uniaxial and biaxial loads up to the yield strength (S_e). In the biaxial case was considered relations between the nominal components load of $\sigma_{nx}/\sigma_{ny} = 0,25, 0,50, 0,75$ and $1,00$. In this methodology was used a residual stress rosette's by type MM EA-XX-062RE-120, that have three strain-gages positioned to $0, 90$ and 225 degrees. The FE model was validated comparing its forecasts with ASTM-E837.*

Key Words: *residual stresses, Hole-Drilling Method, finite elements, numerical simulation*