

Desenvolvimento e avaliação experimental de uma nova técnica para medição de tensões residuais

RODRIGUES, L. D.^I, FREIRE, J. L.^{II}, VIEIRA, R. D.^{II}

^I Laboratório de Fotomecânica – PUC-Rio CEP: 22453-900, Rio de Janeiro, RJ.
e-mail: leodr@aluno.puc-rio.br

^{II} Laboratório de Fotomecânica – PUC-Rio CEP: 22453-900, Rio de Janeiro, RJ
e-mail: jlfreire@puc-rio.br ; rdvieira@puc-rio.br

RESUMO

Foi desenvolvida uma nova técnica de medição de tensões residuais, baseada em técnicas de seccionamento, remoção de camadas e na técnica do furo-cego. Trata-se de uma técnica destrutiva, proposta para uso em medições de tensões geradas por processos de fabricação. A técnica consiste na colagem de sensores de deformação na peça, seguida da usinagem de cortes longos próximos dos sensores. Os cortes aliviam as tensões existentes no material retirado e provocam variações nas deformações existentes em suas vizinhanças. Tais variações de deformações são medidas por extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*). Para a formulação matemática da técnica, os cortes foram tratados como elipses, o que permitiu o uso das equações de Inglis para descrever os campos de tensão em sua vizinhança. Para avaliar e validar o equacionamento foram realizadas medições com esta técnica em dois espécimes tubulares API 5L X60 e X46 UOE-SAW. Nas medições, foram avaliados parâmetros como profundidade e comprimento dos cortes, e distância dos cortes para os *strain gages*, buscando estabelecer um procedimento experimental consistente. Os resultados destas medições foram comparados aos de medições realizadas com a técnica do furo-cego, já normalizada e consolidada. Os resultados das comparações foram satisfatórios, sustentando a validade das hipóteses assumidas para a modelagem analítica e a qualidade do procedimento experimental estabelecido para a nova técnica.

Palavras chaves: Tensões Residuais, Formulações de Inglis, Furo Elíptico.

Development and experimental evaluation of a new technique for the measurement of residual tensions

ABSTRACT

It was developed a new technique for residual stress measurement, based on sectioning techniques, removing layers and on the blind-hole technique. This is a destructive technique, proposed for use on measurements of stresses generated by manufacturing processes. The technique consists in bonding strain gages in the sample, followed by the machining of long cuts next to the sensors. The cuts relieve stresses in due to the material removed and cause variations in the strain distribution existing in their vicinity. These changes in the strain fields are measured by the strain gages. For the mathematical formulation of the technique, the cuts were treated as ellipses, which allowed the use of equations described by Inglis to stress fields in the vicinity of the cuts. To evaluate and validate the equations and the proposed methodology experimental tests were applied to two tubular specimens made of steel pipes API 5L X60 and X46 UOE-SAW. Seeking to establish a consistent experimental procedure, the measurement results helped to analyze the influence of process variables such as the depth and the length of the cuts, distance of the cuts from the strain gages. Measurement results were compared against results determined with the application of the blind-hole technique, which is an already normalized and consolidated experimental technique to measure residual stresses. The results of the comparisons were satisfactory, supporting the validity of the assumptions for the analytical modeling and the quality of the experimental procedure established for the new technique.

Keywords: Residual Stresses, Inglis Formulations, Elliptical Hole.

1 INTRODUÇÃO

Tensões residuais são aquelas que estão presentes nos componentes independentemente de qualquer carregamento externo. São originadas por processos que causam plastificações não uniformes na estrutura dos componentes. Estas tensões são fatores importantes na análise de alguns tipos de falhas mecânicas, sobretudo de estruturas sob carregamentos dinâmicos, pois quando positivas, contribuem para um aumento das tensões médias dos carregamentos. Dada sua importância, várias técnicas de medição destas tensões vêm sendo desenvolvidas ao longo do tempo, desde as mais simplistas até as que envolvem difração de raios-x e de nêutrons. Informações detalhadas sobre as principais técnicas podem ser encontradas em [1].

Neste trabalho apresenta-se uma nova técnica para medição de tensões residuais, discute-se sua formulação matemática, mostram-se alguns resultados obtidos laboratorialmente, que são comparados com resultados da técnica do furo cego, uma das mais difundidas mundialmente.

1.2 Fundamentação Teórica

A técnica do furo elíptico é baseada em técnicas de seccionamento, remoção de camadas e na própria técnica do furo-cego. Trata-se de uma técnica destrutiva, proposta para uso em medições de tensões geradas por processos de fabricação. Ela consiste na usinagem de cortes longos na superfície da peça, que matematicamente são tratados como elipses. Os cortes aliviam localmente as tensões existentes no material removido e provocam variações no estado de deformações na vizinhança do corte. Tais variações nas deformações são medidas por extensômetros de resistência elétrica, colados o mais próximo possível da linha em que o corte será realizado, tal como apresentado na Figura 1.



Figura 1: Foto do experimento com a técnica do furo elíptico: cortes perpendicular e paralelo ao extensômetro.

Neste tópico objetiva-se apresentar as equações finais obtidas para a técnica e explicar sob quais condições experimentais cada uma delas deve ser utilizada para a obtenção do estado de tensões residuais do espécime. Nos tópicos posteriores serão apresentadas as considerações, procedimentos experimentais e resultados que contribuíram para a formulação geral aqui apresentada.

Para melhor entendimento das equações é importante salientar que as mesmas têm como base as formulações de Inglis [2] para um estado de tensões em torno de um furo elíptico (os cortes serão tratados como elipses muito longas).

A Figura 2 mostra um gráfico com algumas elipses e hipérbolas homofocais, sendo $\alpha_0 = \tanh^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$, onde a e b são, respectivamente, os semieixos maior e menor da elipse que representa o corte.

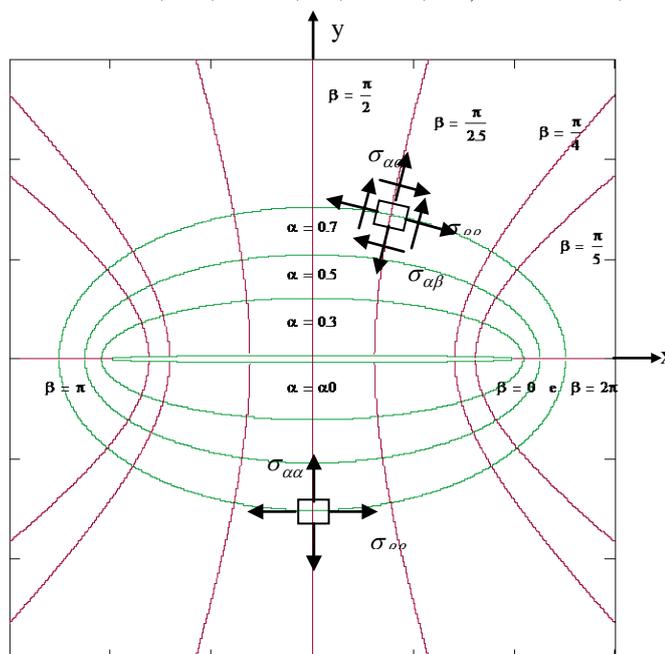


Figura 2: Variação das elipses e das hipérbolas, com as coordenadas α e β .

As formas gerais das séries infinitas propostas por Inglis para representar as tensões normais atuantes em pontos de uma placa contendo um furo elíptico, são apresentadas a seguir.

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{\left\{ \begin{aligned} & \{ (n+1)e^{-(n-1)\alpha} \cos(n+3)\beta + (n-1)e^{-(n+1)\alpha} \cos(n-3)\beta \\ & - [4e^{-(n+1)\alpha} + (n+3)e^{-(n-3)\alpha}] \cos(n+1)\beta \\ & + [4e^{-(n-1)\alpha} - (n-3)e^{-(n+3)\alpha}] \cos(n+1)\beta \} A_n \\ & + \{ ne^{-(n+1)\alpha} \cos(n+3)\beta + (n+2)e^{-(n+1)\alpha} \cos(n-1)\beta \\ & - [(n+2)e^{-(n-1)\alpha} + ne^{-(n+3)\alpha}] \cos(n+1)\beta \} B_n \end{aligned} \right\}}{[\cosh(2\alpha) - \cos(2\beta)]^2} \quad (1 a)$$

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{\left\{ \begin{aligned} & \{ (n+1)e^{-(n-1)\alpha} \cos(n+3)\beta - (n+3)e^{-(n+1)\alpha} \cos(n-3)\beta \\ & - [(n-1)e^{-(n-3)\alpha} + 4e^{-(n+1)\alpha}] \cos(n+1)\beta \\ & + [(n-1)e^{-(n-3)\alpha} + 4e^{-(n-1)\alpha}] \cos(n+1)\beta \} A_n \\ & + \{ ne^{-(n+1)\alpha} \cos(n+3)\beta + (n+2)e^{-(n+1)\alpha} \cos(n-1)\beta \\ & - [(n+2)e^{-(n-1)\alpha} + ne^{-(n+3)\alpha}] \cos(n+1)\beta \} B_n \end{aligned} \right\}}{[\cosh(2\alpha) - \cos(2\beta)]^2} \quad (1 b)$$

Nestas formulações, n pode assumir qualquer valor inteiro negativo ou positivo. O número de constantes A_n e B_n envolvidas é arbitrário e elas devem ser determinadas pelas condições de contorno dos casos avaliados. A definição dessas constantes e formulações específicas para determinação das tensões nos casos de interesse deste trabalho podem ser verificadas a seguir.

Para o caso do carregamento uniaxial e perpendicular ao maior semieixo, chega-se às equações para os valores das tensões normais atuantes em direções α e β definidas pelo furo elíptico. Por simplificação, nas equações (2) e (3), trata-se as tensões aplicadas (remotas) como sendo unitárias.

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{\left\{ \begin{aligned} &\left(-\frac{1}{16}\right)[4e^{2\alpha_y} \cos(2\beta) - 2\cos(4\beta) + (-2e^{4\alpha_y} - 4) + 4e^{2\alpha_y} \cos(2\beta)] + \left(-\frac{1}{8}\right)[-3e^{2\alpha_y} - e^{2\alpha_y} \cos(4\beta)] \\ &- (-e^{4\alpha_y} - 3)\cos(2\beta) + \left(-\frac{1}{16} - \frac{e^{2\alpha_0}}{8}\right)[2\cos(4\beta) - 4e^{-2\alpha_y} \cos(2\beta) - 4e^{-2\alpha_y} \cos(2\beta) + 2e^{-4\alpha_y} + 4] \\ &+ \left(\frac{1 + \cosh(2\alpha_0)}{4}\right)[- \cos(2\beta) + \cos(2\beta) - (e^{2\alpha_y} - e^{-2\alpha_y})] + \left(\frac{e^{4\alpha_0}}{8}\right)[e^{-2\alpha_y} \cos(4\beta) + 3e^{-2\alpha_y}] \\ &- (3 + e^{-4\alpha_y})\cos(2\beta) \end{aligned} \right\}}{[\cosh(2\alpha_y) - \cos(2\beta)]^2} \quad (2 a)$$

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{\left\{ \begin{aligned} &\left(-\frac{1}{16}\right)[4e^{2\alpha_y} \cos(2\beta) - 2e^{4\alpha_y} - 4 + 4e^{2\alpha_y} \cos(2\beta)] + \left(-\frac{1}{8}\right)[-3e^{2\alpha_y} - e^{2\alpha_y} \cos(4\beta)] \\ &- (-e^{4\alpha_y} - 3)\cos(2\beta) + \left(-\frac{1}{16} - \frac{e^{2\alpha_0}}{8}\right)[2\cos(4\beta) - (4e^{-2\alpha_y} + 4e^{-2\alpha_y})\cos(2\beta) + (4 + 2e^{-4\alpha_y})] \\ &- \left(\frac{1 + \cosh(2\alpha_0)}{4}\right)[- \cos(2\beta) + \cos(2\beta) - (e^{2\alpha_y} - e^{-2\alpha_y})] - \left(\frac{e^{4\alpha_0}}{8}\right)[e^{-2\alpha_y} \cos(4\beta) + 3e^{-2\alpha_y}] \\ &- (3 + e^{-4\alpha_y})\cos(2\beta) \end{aligned} \right\}}{[\cosh(2\alpha_y) - \cos(2\beta)]^2} \quad (2 b)$$

Para o caso do carregamento biaxial (tensões iguais), os valores das tensões são:

$$R_{\alpha\alpha} = \frac{\left\{ \begin{aligned} &\left(-\frac{1}{8}\right)[-2\cos(4\beta) - 4 - 2e^{2\alpha_y} + (4e^{2\alpha_y} + 4e^{-2\alpha_y})\cos(2\beta)] \\ &+ \left(-\frac{1}{8}\right)[2\cos(4\beta) - (4e^{2\alpha_y} + 4e^{-2\alpha_y})\cos(2\beta) + (4 + 2e^{-4\alpha_y})] \\ &+ \left(\frac{\cosh(2\alpha_0)}{2}\right)[- (e^{2\alpha_y} - e^{-2\alpha_y})] \end{aligned} \right\}}{[\cosh(\alpha_y) - \cos(2\beta)]^2} \quad (3 a)$$

$$R_{\beta\beta} = \frac{\left\{ \begin{aligned} &\left(-\frac{1}{8}\right)[4e^{2\alpha_y} \cos(2\beta) - 2\cos(4\beta) - 4 - 2e^{2\alpha_y} + 4e^{2\alpha_y} \cos(2\beta)] \\ &+ \left(-\frac{1}{8}\right)[2\cos(4\beta) - 8e^{-2\alpha_y} \cos(2\beta) + (4 + 2e^{-4\alpha_y})] \\ &+ \left(\frac{\cosh(2\alpha_0)}{2}\right)[- (e^{2\alpha_y} - e^{-2\alpha_y})] \end{aligned} \right\}}{[\cosh(\alpha_y) - \cos(2\beta)]^2} \quad (3 b)$$

As equações 2 e 3 são as de mais fácil obtenção a partir das séries infinitas das equações 1, utilizando-se as devidas condições de contorno. Usando-se superposições, estas equações são suficientes para determinação dos estados de tensão dos casos de interesse: tensões nominais e principais atuando em direções perpendiculares e paralelas ao corte, num espécime submetido a um estado biaxial de tensões (as tensões podem ser desiguais).

Para avaliar o estado de tensões gerado na região onde o extensômetro está colado (em $\beta = \pi/2$), é mais indicado trabalhar com distâncias em coordenadas cartesianas (x, y) e não elíptico-hiperbólicas (α, β), estabelecendo assim, as equações de tensão como função de y e β . Para tanto foi preciso estabelecer uma relação entre y e a coordenada α das equações de Inglis, adotando o termo α_y (eqs. 2 e 3 já adaptadas) como o representante cartesiano de α quando $\beta = \pi/2$. A obtenção da expressão desse termo é demonstrada a seguir:

Partindo da equação da elipse, fazendo $x=0$ (eixo y) e admitindo elipses homofocais, tem-se:

$$\frac{y}{\sinh(\alpha_y)} = \frac{y'}{\sinh(\alpha_y')} \tag{4}$$

Como a intenção é relacionar o furo elíptico com uma distância qualquer dele, faz-se $y' = b$ (semi-eixo menor do furo) e $\alpha_y' = \alpha_0$, assim:

$$\alpha_y = \operatorname{arcsinh}\left(\frac{y}{b} \sinh(\alpha_0)\right) \tag{5}$$

1.3 Equações Gerais Para Aplicação da Técnica

Nesta seção são apresentadas as equações a serem usadas para o cálculo das tensões axiais e perpendiculares aos extensômetros, a partir dos dados de deformação obtidos com os cortes. As formulações a seguir são válidas para cortes perpendiculares ou paralelos às tensões principais atuantes no espécime. Quando as direções principais não são conhecidas deverão ser incluídas as tensões de cisalhamento nas equações.

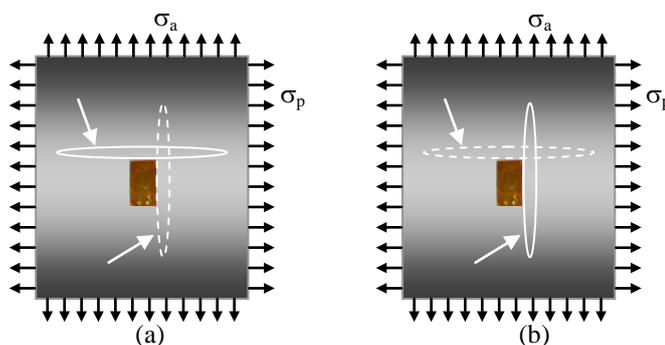


Figura 3: Placa carregada biaxialmente com primeiro corte: (a) perpendicular e (b) paralelo ao *strain gage*.

Corte passante (Figura 3a)

$$\sigma_p = -\frac{E\varepsilon_{pv}}{\nu\sigma_{\alpha EI}} \tag{6 a}$$

$$\sigma_a = \frac{E\varepsilon_a + \frac{E\varepsilon_{pv}}{\nu\sigma_{\alpha EI}}(S_{\alpha E} - \nu S_{\beta E})}{(\sigma_{\alpha E} - \nu\sigma_{\beta E})} \tag{6 b}$$

Corte passante (Figura 3b)

$$\sigma_a = \frac{E\varepsilon_a}{\sigma_{\alpha E}} \tag{7 a}$$

$$\sigma_p = \frac{E\varepsilon_{pv} + \frac{E\varepsilon_a}{\sigma_{\alpha E}}(S_{\alpha EI} - \nu S_{\beta EI})}{(\sigma_{\beta E} - \nu\sigma_{\alpha E})} \quad (7 b)$$

Corte não passante (Figura 3a)

$$\sigma_p = -\frac{E\varepsilon_{pv}}{\nu\sigma_{\alpha EI}} \quad (8 a)$$

$$\sigma_a = \frac{E\varepsilon_a + \frac{E\varepsilon_{pv}}{\nu\sigma_{\alpha EI}}(S_{\alpha E} - \nu S_{\beta E})}{\sigma_{\alpha E}} \quad (8 b)$$

Corte não passante (Figura 3b)

$$\sigma_a = \frac{E\varepsilon_a}{\sigma_{\alpha E}} \quad (9 a)$$

$$\sigma_p = \frac{E\varepsilon_{pv} + \frac{E\varepsilon_a}{\sigma_{\alpha EI}}(S_{\alpha EI} - \nu S_{\beta EI})}{-\nu\sigma_{\alpha E}} \quad (9 b)$$

onde:

- ε_a = deformação na direção axial à grade extensômetro, lida após o corte perpendicular ao extensômetro
- ε_{pv} = deformação por efeito de Poisson, lida após o corte paralelo à grade extensômetro
- E = módulo de elasticidade do material
- ν = coeficiente de Poisson do material
- σ_a = tensão atuante na direção da grade do extensômetro
- σ_p = tensão perpendicular à grade extensômetro
- $\sigma_{\alpha E}$ = coeficiente de alívio perpendicular ao corte, referente à tensão perpendicular ao corte (eq. 13a)
- $S_{\alpha E}$ = coeficiente de alívio perpendicular ao corte, referente à tensão paralela ao corte (eq. 13b)
- $\sigma_{\beta E}$ = coeficiente de alívio paralelo ao corte, referente à tensão perpendicular ao corte (eq. 15 a)
- $S_{\beta E}$ = coeficiente de alívio paralelo ao corte, referente à tensão paralela ao corte (eq. 15b)

O subscrito “I” (nas equações 6 a 8) informa que a integração para obtenção do coeficiente de alívio deve ser feita ao longo da largura do extensômetro, ficando implícito que a integração será ao longo do comprimento se não houver indicação.

Para medições de tensões residuais em peças sob carregamento biaxial (duas incógnitas) há a necessidade da realização de dois cortes (um perpendicular e um paralelo ao extensômetro), para que se tenha um sistema de equações consistente.

1.3.1 Determinação dos Coeficientes de Alívio

Inglis estudou o problema de uma placa infinita carregada, contendo um furo elíptico. Para a análise do problema das tensões calculadas a partir das deformações lidas no extensômetro, a execução deste corte é feita com o espécime tensionado (tensões residuais). Então, usando o princípio da superposição, a solução de Inglis deve ser subtraída do estado de tensões da placa sem o corte para que se obtenham os valores de deformação a serem medidos pelo extensômetro. A Figura 4 mostra o esquema dessa superposição de estados de tensões.

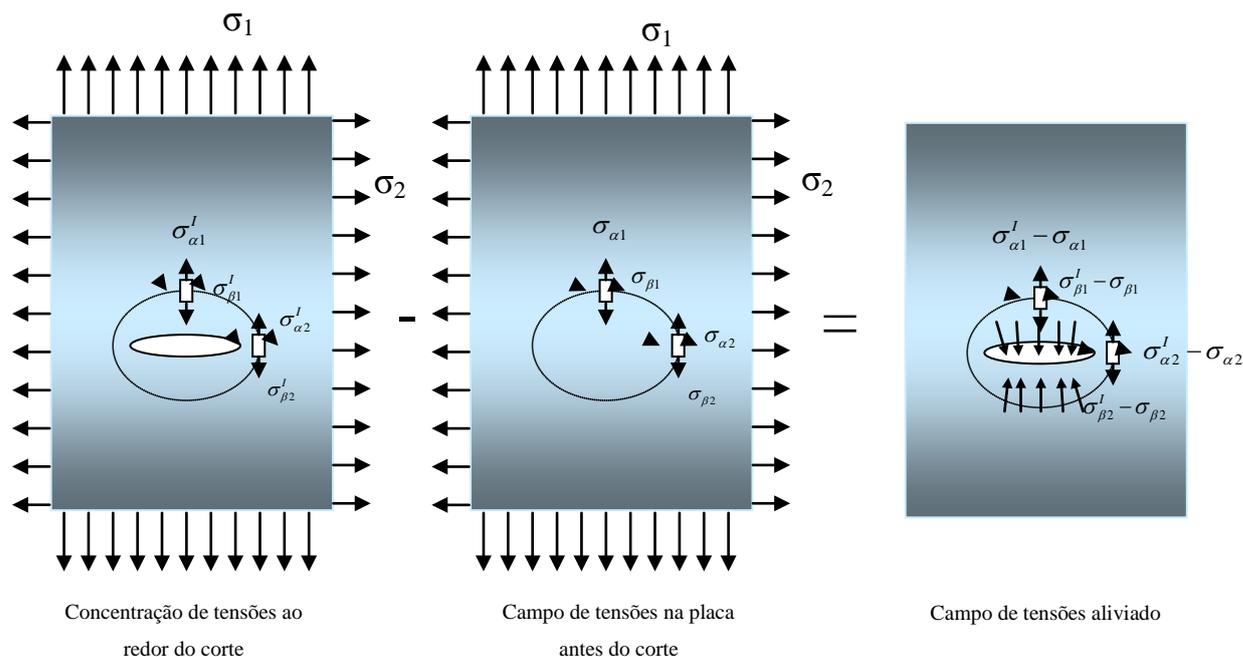


Figura 4: Princípio da superposição aplicado ao método do furo elíptico.

O estado de tensões para o caso de carregamento biaxial da placa sem furo é semelhante ao definido para a superposição do caso do furo circular. Troca-se apenas o ângulo θ (polar) pelo β (hiperbólico) e faz-se a rotação de 90° , necessária pela defasagem do ângulo do carregamento principal σ_I em relação à x para o qual os estados polar e elíptico foram deduzidos. Isto muda as condições de contorno usadas para definir as equações, assim:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \tag{10 a}$$

$$\sigma_\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \tag{10 b}$$

1.3.1.1 Carregamento Perpendicular ao Maior Semieixo do Corte

Para o carregamento perpendicular ao maior semieixo da elipse que representa o corte, as expressões gerais para os coeficientes de alívio pontuais provocados pelo corte são:

$$\sigma_{\alpha f} = \sigma_{\alpha\alpha} \sigma_1 - \left(\frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sigma_1}{2} \cos 2\beta \right) \tag{11 a}$$

$$\sigma_{\beta f} = \sigma_{\beta\beta} \sigma_1 - \left(\frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_1}{2} \cos 2\beta \right) \tag{11 b}$$

Quando $\beta = \frac{\pi}{2}$ (frente do corte), que é o caso de interesse para a análise em questão, tem-se:

$$\sigma_{\alpha f} = (\sigma_{\alpha\alpha} - 1)\sigma_1 \quad (12 \text{ a})$$

$$\sigma_{\beta f} = \sigma_{\beta\beta}\sigma_1 \quad (12 \text{ b})$$

Para o cálculo dos coeficientes de alívio sob a grade de medição do extensômetro, integram-se os coeficientes encontrados ao longo da distância perpendicular ao maior semieixo do corte. A integração não é feita na direção paralela ao maior semieixo, pois a variação das tensões nesta direção mostrou-se irrelevante nos cálculos realizados. Tem-se então que:

$$\sigma_{\alpha E} = \frac{\left(\int_{b+df}^{b+df+cg} \sigma_{\alpha f} \left(y, \frac{\pi}{2} \right) dy \right)}{cg} \quad (13 \text{ a})$$

$$\sigma_{\beta E} = \frac{\left(\int_{b+df}^{b+df+cg} \sigma_{\beta f} \left(y, \frac{\pi}{2} \right) dy \right)}{cg} \quad (13 \text{ b})$$

Onde df é a distância do meio do corte à grade de medição do extensômetro e cg é o comprimento da grade de medição. Para o caso de cortes paralelos a integração deve ser feita ao longo da largura do gage (lg), que substituirá cg nas equações.

1.3.1.2 Carregamento Paralelo ao Maior Semieixo do corte

Para o carregamento paralelo ao maior semieixo da elipse que representa o corte, as expressões gerais para os coeficientes de alívio pontuais, já para o caso de interesse ($\beta = \frac{\pi}{2}$) são:

$$S_{\alpha f} = (R_{\alpha\alpha} - \sigma_{\alpha\alpha})\sigma_2 \quad (14 \text{ a})$$

$$S_{\beta f} = (R_{\beta\beta} - \sigma_{\beta\beta} - 1)\sigma_2 \quad (14 \text{ b})$$

Integrando-se as equações 14 ao longo da largura do gage (lg), chega-se a:

$$S_{\alpha E} = \frac{\left(\int_{b+df}^{b+df+lg} S_{\alpha f} \left(y, \frac{\pi}{2} \right) dy \right)}{lg} \quad (15 \text{ a})$$

$$S_{\beta E} = \frac{\left(\int_{b+df}^{b+df+lg} S_{\beta f} \left(y, \frac{\pi}{2} \right) dy \right)}{lg} \quad (15 \text{ b})$$

1.3.3 Parâmetros de Influência nas Deformações Medidas

1.3.3.1 Ordem de Realização dos Cortes

Em medições de peças sob carregamento biaxial há a necessidade da realização de dois cortes: um perpendicular e um paralelo ao extensômetro. A ordem de realização dos cortes é importante porque o corte alivia por completo a tensão atuante na direção perpendicular a ele, tornando-a irrelevante nas deformações lidas no corte seguinte, assim como os coeficientes de alívio perpendiculares ao primeiro corte.

Primeiro corte perpendicular ao extensômetro (passante)

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \left[(\sigma_a \sigma_{\alpha E} + \sigma_p S_{\alpha E}) - \nu (\sigma_a \sigma_{\beta E} + \sigma_p S_{\beta E}) \right] \quad (16 a)$$

Segundo corte paralelo ao extensômetro (passante)

$$\varepsilon_{p\nu} = -\frac{\nu}{E} (\sigma_p \sigma_{\alpha EI}) \quad (16 b)$$

Primeiro corte paralelo ao extensômetro (passante)

$$\varepsilon_{p\nu} = \frac{1}{E} \left[(\sigma_a S_{\beta EI} + \sigma_p \sigma_{\beta EI}) - \nu (\sigma_a S_{\alpha EI} + \sigma_p \sigma_{\alpha EI}) \right] \quad (17 a)$$

Segundo corte perpendicular ao extensômetro (passante)

$$\varepsilon_a = \frac{(\sigma_a \sigma_{\alpha E})}{E} \quad (17 b)$$

1.3.3.2 Profundidade do Corte

Medições com a técnica do furo elíptico podem ser realizadas com o atravessamento ou não do espécime em sua espessura, ficando a cargo do executor interromper o avanço quando perceber a estabilização da deformação obtida de uma profundidade a outra. Para este caso, baseando-se em observações experimentais, a formulação apresentada até o momento deve ser modificada para a determinação das tensões existentes. Para cortes não passantes, eliminam-se os coeficientes de alívio transversais $\sigma_{\beta E}$ e $\sigma_{\beta EI}$, que só se manifestam quando a espessura do espécime é atravessada, como foi verificado nos experimentos, discutidos nas próximas seções.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados três tipos diferentes de experimentos. Em dois deles os cortes foram feitos com serras manuais até atravessar a espessura do espécime e no último foi utilizada uma fresadora para cortes perpendiculares e paralelos aos *strain gages* até a profundidade de estabilização das deformações lidas [3].

2.1 Materiais Utilizados

- Tubo API 5L X60, com 12(3/4) polegadas (323,25 mm) de diâmetro e espessura de 9,7 milímetros, 510 mm de comprimento, módulo de elasticidade de 207 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e limite de escoamento de 420 MPa;
- Tubo API 5L X46, com 18 polegadas de diâmetro, espessura de 6,5 milímetros, 900 mm de comprimento, módulo de elasticidade de 207 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e limite de escoamento de 314 MPa;
- Quinze extensômetros unidirecionais EA-06-I25AC-350, com resistência de 350 Ohm (Ω) e gage factor de 2,07;
- Fresa circular de 2 milímetros de espessura;
- Serras Starret RS1218 (12"/300mm-18T), 0,5 mm de espessura;

2.2 Cortes com Serra Manual: parte I

Foram colados dois extensômetros no cordão de solda do espécime na direção longitudinal, distando 93 milímetros entre si na direção longitudinal do tubo.

Este primeiro experimento teve como objetivo avaliar o comportamento das deformações aliviadas com relação à profundidade do corte e a influência do corte em extensômetros colados a uma distância relativamente grande.

2.3 Cortes com Serra Manual: parte II

Foram colados dois extensômetros no cordão de solda exatamente na mesma posição longitudinal, um do lado externo e outro do lado interno (Figura 5). Foram feitos cortes em sequência a 50, 20, 10, 5 e 1 mm de distância dos extensômetros nesta ordem, respectivamente.

Este segundo experimento objetivou: 1) avaliar a que distância do extensômetro um corte passante pode aliviar totalmente as tensões na região da área coberta pelo sensor; 2) conhecer o comportamento das deformações aliviadas pelo corte na face interna do cordão de solda.



Figura 5: Fotos dos *strain gages* (a) externo e (b) interno do experimento corte com a serra: parte I.

2.4 Cortes com Fresa

Foram colados 15 extensômetros nas direções longitudinal e circunferencial, alternadamente, ao longo da circunferência do espécime (API 5L X60-SAW) e posicionados a partir do cordão de solda. Foram feitos cortes, perpendiculares e paralelos aos extensômetros, a uma distância de 1 mm (Figura 6).

Este experimento teve como principais objetivos: (1) medir a variação das deformações lidas (até a estabilização) com a profundidade dos cortes e (2) determinar o comportamento das tensões residuais circunferenciais e longitudinais presentes ao longo de uma geratriz do espécime avaliado.



Figura 6: a) Vista completa dos equipamentos utilizados e do tubo posicionado; b) Imagem de alguns cortes e sua posição em relação aos extensômetros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os parâmetros dimensionais usados nos experimentos e os respectivos coeficientes de alívio usados no cálculo das tensões.

Tabela 1: Parâmetros dimensionais usados nos experimentos e os respectivos coeficientes de alívio.

Parâmetros	Fresa	Serra
Semieixo maior do corte (a)	50 mm	60 mm
Semieixo menor do corte (b)	1 mm	0,25 mm
Distância do meio do furo à grade de medição do extensômetro (df)	4 mm	3,25 mm
Comprimento da grade de medição do extensômetro (cg)	4 mm	4 mm
Largura da grade de medição do extensômetro (lg)	3 mm	3 mm
$\sigma_{\alpha E} = \sigma_{\alpha EI}$	≈ -1	≈ -1
$S_{\alpha E} = S_{\alpha EI}^{(1)}$	≈ 0	≈ 0
$\sigma_{\beta E}^{(1)}$	-0,758	-0,826
$\sigma_{\beta EI}^{(1)}$	-0,778	-0,842
$S_{\beta E} = S_{\beta EI}^{(1)}$	0,033	0,034

⁽¹⁾ Coeficientes calculados com as equações 13 e 14 a partir das dimensões especificadas na Tabela 1.

3.1 Cortes com a Serra: parte I

A Tabela 2 mostra as deformações lidas nos dois extensômetros, quando é realizado o primeiro corte, antes e depois de atravessar a espessura do espécime. O gráfico da Figura 7 mostra a variação das deformações com a profundidade do segundo corte realizado a 1mm do extensômetro 2 e a 94 mm do extensômetro 1. O equipamento de leitura não foi re-balanceado para o segundo corte, sendo as deformações iniciais no gráfico da Figura 6, aquelas lidas após o primeiro corte, realizado a 1 mm do extensômetro 1.

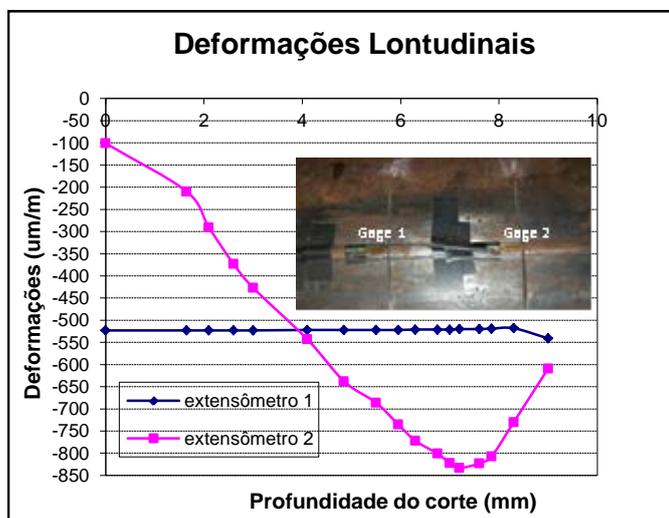


Figura 7: Gráfico da variação das deformações lidas com a profundidade do corte (2) realizado a 1mm do extensômetro 2 no tubo X46.

Tabela 2: Deformações lidas com o corte (1) a 1mm do extensômetro 1 (X46)

Condição	Extensômetro 1	Extensômetro 2
Antes de atravessar	-730	-62
Após atravessar	-523	-101

Na Tabela 2 e no gráfico da Figura 6, percebe-se uma queda brusca no valor absoluto das deformações quando o espécime tem sua espessura atravessada. A hipótese mais provável para este acontecimento é a de que há uma redistribuição de tensões na espessura à medida que o corte é aprofundado. Esta redistribuição faz com que os coeficientes de alívio paralelos ao corte, representados principalmente por $\sigma_{\beta E}$ e $\sigma_{\beta EI}$, só ajam na superfície onde está colado o extensômetro quando o espécime está prestes a ser atravessado. Estes coeficientes de alívio atingirão seus valores máximos (da Tabela 1) quando o atravessamento for completado. Esta hipótese foi usada nas formulações da técnica do furo elíptico para o caso de cortes não passantes. Ela foi validada experimentalmente pelo seguinte procedimento:

Primeiro eliminou-se os termos multiplicados por $S_{\beta E}$ e $S_{\alpha E}$ (neste caso são desprezíveis, vide Tabela 1) das equações 16:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} [(\sigma_a \sigma_{\alpha E}) - \nu(\sigma_a \sigma_{\beta E})] \quad (18)$$

Igualando-se as tensões atuantes no espécime antes e depois do atravessamento, tem-se:

$$\frac{\varepsilon_a^a}{\sigma_{\alpha E}} = \frac{\varepsilon_a^d}{[(\sigma_{\alpha E} - \nu(\sigma_{\beta E}))]} \quad (19)$$

onde ε_a^a é a deformação máxima lida antes do atravessamento, ou seja, quando $\sigma_{\beta E}$ ainda não agia na superfície e ε_a^d é a deformação lida depois do atravessamento completo.

Usando os valores da Tabela 1 e partindo dos valores de ε_a^a para os cortes um e dois que são -730 e -833 $\mu\varepsilon$, respectivamente, encontrou-se os valores para as deformações depois do atravessamento:

$$\varepsilon_a^{d1} = -549 \mu\varepsilon \quad (20)$$

$$\varepsilon_a^{d2} = -626 \mu\varepsilon \quad (21)$$

Os valores lidos no experimento após o corte foram -523 e -609 $\mu\varepsilon$, redundando em diferenças de 4,8 e 3,8%, respectivamente, que são erros aceitáveis quando se trabalha com extensometria. Assim, pode-se considerar boa a hipótese de usar os coeficientes de alívio paralelos ao corte somente quando o espécime é atravessado.

3.2 Cortes com a Serra: parte II

A Figura 8 mostra o gráfico das deformações longitudinais medidas pelos extensômetros localizados nas superfícies externa e interna do tubo, causadas por cortes sequenciais a distâncias longitudinais de 50, 20, 10, 5 e 1 mm dos extensômetros, no cordão de solda do tubo API 5L X46. As deformações são referentes aos valores lidos após o atravessamento da espessura por cada corte.

O gráfico da Figura 9 mostra o comportamento das deformações em relação às profundidades causadas por cada corte feito.

Para analisar os gráficos das Figuras 8 e 9, é importante avaliar as fotos da Figura 5. Nas fotos, pode-se perceber que, apesar do atravessamento, o comprimento do corte na face interna da solda não acompanha o da face externa. Sendo assim, os coeficientes de alívio válidos para a face externa não podem ser usados na face interna, pois esses variam com o comprimento do corte. Com os coeficientes de alívio correspondentes a uma elipse com semieixo maior $a = 10$ mm (valor aproximado), a tensão calculada para a face interna com o último valor de deformação lido no gráfico da Figura 7 é de 188 MPa, enquanto a tensão na face externa, usando-se os valores dos coeficientes de alívio da Tabela 1, é de 163 MPa. Isto indica que as tensões residuais longitudinais devem ser praticamente uniformes no cordão de solda, o que era esperado já que a solda foi realizada com passes semelhantes nas faces interna e externa, com grande aporte térmico. Os gráficos da Figura 8 ajudaram a comprovar a influência da distância sobre os coeficientes de alívio da técnica do furo elíptico. Neles foi verificado que os valores dos coeficientes de alívio transversais (representados princi-

palmente por $\sigma_{\beta E}$), que agem no sentido de alongar o extensômetro quando o corte atravessa o tubo, não são significativos quando o corte é feito a 50 mm do sensor. O seu efeito só começa a ser verificado no corte a 20 mm para a face externa. No gage da superfície interna este efeito não foi percebido. Nesta superfície, os valores dos coeficientes de alívio axiais (que têm como seu principal representante o coeficiente $\sigma_{\alpha E}$), que agem no sentido de encurtar o extensômetro, crescem progressivamente até o corte a 1 mm, juntamente com os coeficientes transversais. Na superfície externa, os valores dos coeficientes axiais variaram quando a posição do corte variou de 20 mm a 1 mm.

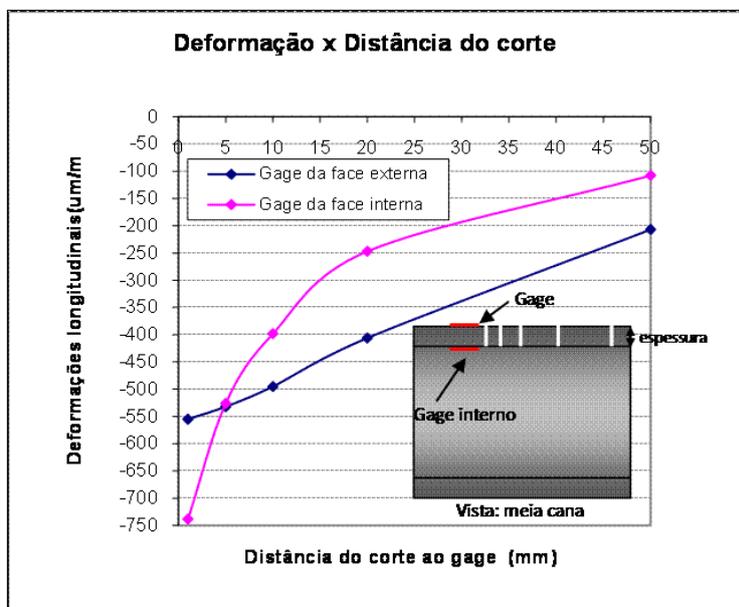


Figura 8: Gráfico das deformações medidas após o atravessamento da parede nos gages localizados nas superfícies interna e externa do tubo X46.

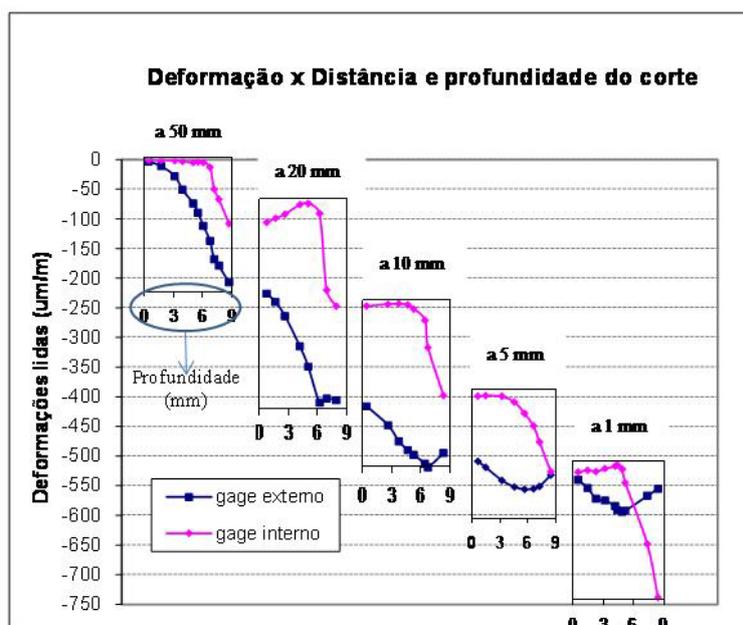


Figura 9: Comportamento das deformações medidas nos gages localizados nas superfícies externa e interna em cada corte com relação à profundidade de corte (em mm).

3.3 Comparação Entre as Técnicas do Furo Cego e do Furo Elíptico

As Figuras 10 a e b mostram os gráficos comparativos entre as tensões encontradas com a técnica do furo cego (norma ASTM E837 [4]) e as encontradas com a técnica do furo elíptico. Estas últimas foram calculadas a partir do tratamento matemático da técnica do furo elíptico para cortes não passantes feitos com a fresa, no espécime tubular UOE X60-SAW.

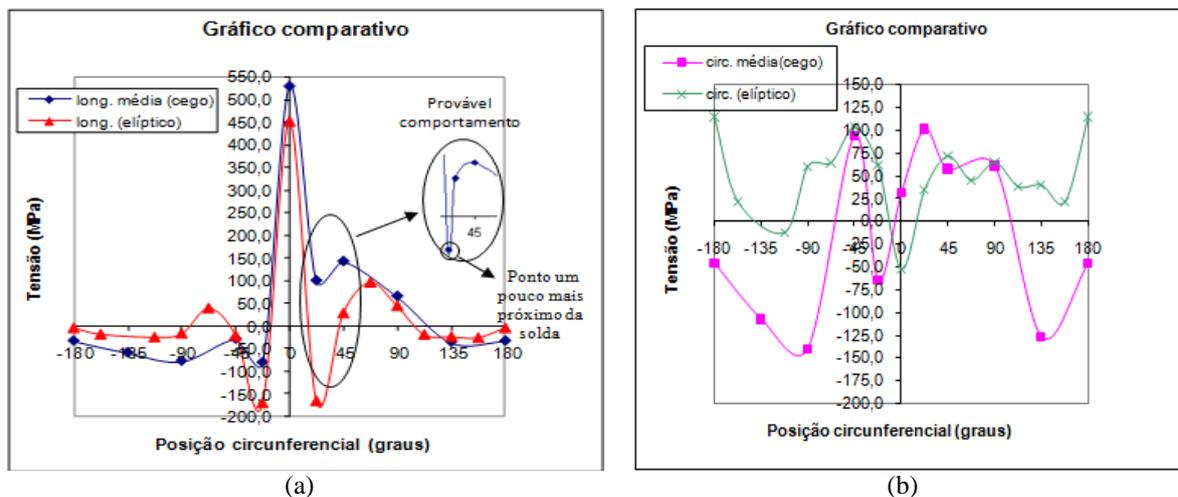


Figura 10: Comparação entre as curvas de medições com os furos cego e elíptico para o tubo X60: (a) Tensões longitudinais e (b) Tensões circunferenciais.

Sabe-se que as medições com furo cego são realizadas com uma profundidade de 2 mm (para qual o gradiente de tensões não é tão alto neste espécime). Já as medições com furo elíptico precisaram ser feitas com cortes de profundidades maiores (para este caso, 7 mm no mínimo) para que o alívio de tensões alcançasse toda a grade de medição do extensômetro. Neste caso, o valor de tensão na superfície é determinado por uma média das tensões ao longo da espessura.

O processo de dobramento das chapas para a formação de tubos no processo UOE provoca grandes variações de tensões residuais na direção circunferencial ao longo da espessura do tubo. As variações de tensão são bem mais suaves na direção longitudinal. Isso pode explicar o porquê das curvas de tensões residuais longitudinais medidas com as duas técnicas terem um comportamento similar e as curvas das tensões circunferenciais se mostraram mais divergentes.

Na Figura 10a, a divergência na posição 22,5° pode ser creditada ao fato de a deformação medida com o corte ser uma média das deformações aliviadas em toda a extensão do corte. Assim, mesmo o extensômetro e a roseta tendo sido colados a uma mesma distância do cordão de solda, o extensômetro certamente sofreu maior influência das deformações aliviadas na região de maiores tensões compressivas, na vizinhança do cordão.

4 CONCLUSÕES

- As formulações completas fornecidas são válidas para cortes passantes, mas foi feita uma adequação aos casos de cortes não passantes, que foi satisfatoriamente validada experimentalmente;
- Os resultados de tensões longitudinais que ocorrem nos tubos obtidos com a técnica do furo elíptico ficaram próximos àqueles encontrados com a técnica do furo cego. Já para a direção circunferencial, a comparação não foi satisfatória. Isto foi creditado às próprias características do processo de fabricação dos tubos. Por isso a técnica requer um melhor tratamento para medições nessa direção quando aplicadas em tubos UOE;
- Apesar das limitações apresentadas quanto à acurácia em alguns casos, a sua aplicação é bastante simples, sendo uma boa opção para obtenção de informações qualitativas de tensões residuais;
- A técnica apresentada pode ser quantitativamente mais precisa em superfícies planas e com distribuições de tensões mais uniformes.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] LU, J., *Handbook of Measurements of Residual Stress*, 2ed., v. 2, Ed. SEM, pp. 417, 2005.
- [2] INGLIS, C.E., “Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners”, Spring Meetings of the Fifty-four Session of the Institution of Naval Architects, March 14, 1913.
- [3] RODRIGUES, L.D., *Medição de tensões residuais em tubos visando a determinação de esforços em dutos enterrados*”, Dissertação M.Sc, DEM, PUC-Rio, abril 2007.
- [4] Norma ASTM E837 – 08, “Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole Drilling Strain-Gage Method”.