

MODELO ANALÍTICO DE CÁLCULO
DE TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDA CIRCUNFERENCIAL

Guilherme Victor Peixoto Donato¹ ; Joel Regueira Teodósio²

1 – PETROBRAS – Centro de Pesquisas e Desenv. Leopoldo A. Miguez de
Mello < donato@cenpes.petrobras.com.br >

2- COPPE/EE – Universidade Federal do Rio de Janeiro
< teodosio@metalmat.ufrj.br >

RESUMO

Foi desenvolvido um modelo analítico para o cálculo de tensões residuais externas e internas, em solda circunferencial de tubos. O modelo permite calcular as tensões circunferenciais ao tubo (longitudinais ao cordão de solda) e axiais (transversais ao cordão de solda). Os resultados previstos pelo modelo foram comparados com dados experimentais obtidos por outros autores, bem como com tensões residuais medidas por difratometria de raios-X. Os resultados indicam que o modelo adapta-se bem aos dados experimentais.

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	calor específico do metal depositado
E	módulo de elasticidade do material na temperatura ambiente
f	fator da tensão de escoamento para equilibrar as tensões residuais
I	corrente aplicada no passe depositado
k	coeficiente de condutividade térmica do metal depositado
L_1, L_2, L_3	dimensões limites para a distribuição de tensões
R	raio médio da tubulação
S_y	tensão de escoamento do material na temperatura ambiente
t	tempo após iniciado o depósito do passe analisado

t_c	espessura do cilindro
T	temperatura de equilíbrio após soldagem
T_n	temperatura no ponto distando “r” do centro do passe depositado
q	“input” de calor durante o processo de soldagem
v_p	velocidade de soldagem no passe
V	voltagem aplicada no passe depositado
x, y, z	coordenadas do sistema cartesiano utilizado
$y(x)$	deslocamento radial médio da tubulação
$y''(x)$	segunda derivada da função deslocamento $y(x)$,
β	fator geométrico = $[3.(1 - \nu^2) / (R^2.t_c^2)]^{1/4}$
$\kappa = \frac{E.t_c}{R^2}$	
$\lambda = \frac{\rho c_p}{2k}$	
η	eficiência da troca térmica no processo de soldagem
ν	coeficiente de Poisson
$\xi = z - v_p.t = 0$	
ρ	densidade do metal depositado
$\sigma_H(x)$	distribuição de tensões residuais em uma chapa soldada de tampo
$\sigma_\theta(x,z)$	distribuição de tensões circunferenciais na tubulação
$\sigma_a(x,z)$	distribuição de tensões axiais na tubulação
τ	temperatura necessária para alcançar a plastificação do material

1. INTRODUÇÃO

A utilização de elementos finitos para a previsão de tensões residuais em juntas soldadas depende da análise de grande quantidade de dados e a utilização intensiva de recursos computacionais, o que torna prolongado o tempo de resposta. O desenvolvimento de uma solução analítica para o cálculo de tensões residuais para uma geometria definida, possibilita a obtenção de resultados que, apesar de simples, permitem o estudo adequado de parâmetros de soldagem.

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo analítico baseado na formulação de Vaidaynathan *et al* (1973). Este autor considera que o estado final de tensões residuais é o resultado de uma configuração geométrica onde os deslocamentos e rotações, após o equilíbrio, procuram minimizar a energia elástica armazenada durante o processo de soldagem.

Na medida em que se alcançam temperaturas elevadas durante a soldagem e, apesar dos tempos de resfriamento reduzidos, o material sofre um alívio em pontos de mais altas restrições. Estas alterações geométricas ficam orientadas no sentido de minimizar a energia total do sistema de tensões atuantes. A configuração final é resultado de uma distribuição de tensões residuais conhecida, que é alterada de forma a reduzir a energia, compatibilizando deslocamentos e rotações.

O modelo proposto considera as seguintes variáveis : propriedades mecânicas e físicas dos materiais de base e metal de adição (tensão de escoamento, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, temperatura de fusão, coeficiente de condutividade térmica, calor específico,...), parâmetros de soldagem (corrente, velocidade de deposição e voltagem), distribuição de temperaturas no tubo, eficiência da troca térmica, velocidade de resfriamento, dimensões do tubo, temperatura de equilíbrio após soldagem e um campo inicial de tensões residuais auto-equilibrado.

Assume-se que apenas o primeiro e o último passes contribuem para a formação do estado final de tensões residuais.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia empregada por Vaidaynathan *et al* (1973)], utiliza uma distribuição de tensões residuais, longitudinais ao cordão de uma solda de topo, em uma chapa plana. Para uma geometria cilíndrica esta distribuição é alterada como a seguir.

1- Tensão circunferencial (longitudinal ao cordão de solda):

$$\sigma_{\theta}(x, z) = \sigma_H(x) - \frac{E \cdot y(x)}{R} + \nu \cdot \sigma_a(x, z) \quad (1)$$

2- Tensão axial (transversal ao cordão de solda):

$$\sigma_a(x, z) = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \cdot y'' \cdot z \Rightarrow y'' = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (2)$$

A equação final da energia de deformação pode ser escrita como abaixo:

$$\bar{U} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma_H(x)^2 \cdot t_c}{2 \cdot E} \cdot dx - \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_H(x) \cdot \frac{y(x) \cdot t_c}{R} \cdot dx + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E \cdot y(x)^2 \cdot t_c}{2R^2} \cdot dx + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E \cdot (y'')^2 \cdot t_c^3}{24 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot dx \quad (3)$$

Com a função deslocamento dada por.

$$y(x) = \int_1^{\infty} \frac{p(x)\beta}{2\kappa} \cdot e^{-\beta \cdot (x-1)} \cdot (\cos \beta \cdot (x-1) + \text{sen} \beta \cdot (x-1)) dx + \int_{-\infty}^1 \frac{p(x)\beta}{2\kappa} \cdot e^{-\beta \cdot (1-x)} \cdot (\cos \beta \cdot (1-x) + \text{sen} \beta \cdot (1-x)) dx \quad (4)$$

Para a obtenção do campo de tensões residuais final na estrutura, é necessária a utilização de um modelo de distribuição de temperaturas e o cálculo do valor máximo alcançado em cada ponto. O centro de geração da energia térmica, é considerado como o ponto central do cordão de solda depositado. A relação entre a temperatura máxima e a distância do ponto, escolhida para o desenvolvimento do trabalho, é dada por Rosenthal *et al* (1941):

$$T_n = \frac{\eta \cdot q \cdot e^{-\lambda \cdot vr}}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot r} \quad (5)$$

O modelo térmico baseia-se em uma função $f(T) \propto e^{-r/r}$, diferentemente do estudo original de Vaidyanathan, que relaciona a dimensão com o inverso da temperatura, ou seja $f(T) \propto 1/r$, o que altera a distribuição de tensões residuais após soldagem.

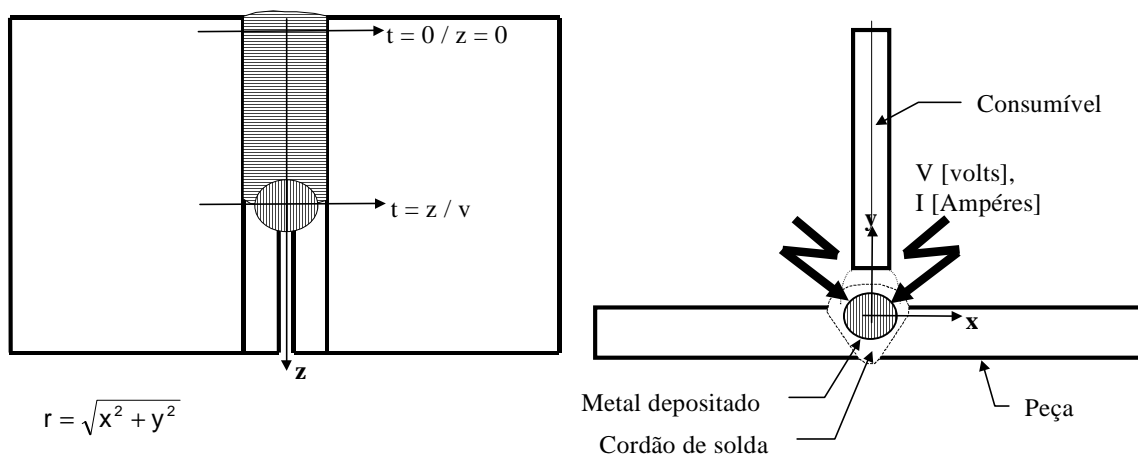


Figura 1 - Sistema de coordenadas envolvido no modelo térmico

A distribuição de tensões residuais inicial utilizada é indicada pela figura 2. Essa distribuição de tensões é simplificada, permitindo uma solução analítica sem a utilização de cálculos numéricos na integração das funções.

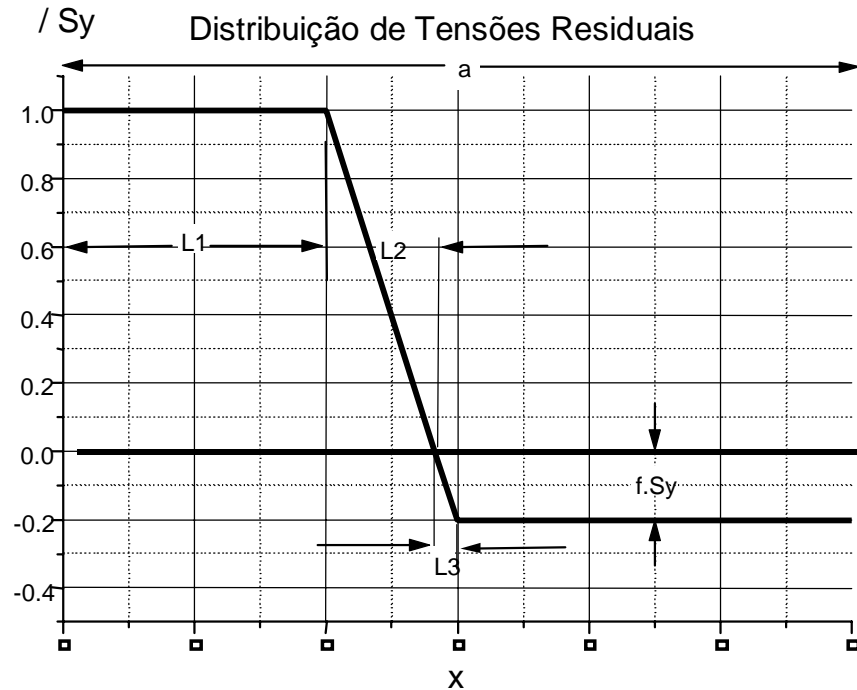


Figura 2 - Distribuição de tensões residuais equilibradas $\sigma_H(x)$ em solda de tampo

Da equação (5), obtêm-se as expressões para os limites (L_1 , L_2 e L_3) de distribuição das tensões residuais $\sigma_H(x)$.

$$(T + 2.\tau) = \frac{\eta.q.e^{-\lambda v L_1}}{2.\pi.k.L_1} \quad (6)$$

$$(T + \tau) = \frac{\eta.q.e^{-\lambda v(L_1+L_2)}}{2.\pi.k.(L_1 + L_2)} \quad (7)$$

$$(T) = \frac{\eta.q.e^{-\lambda v(L_1+L_2+L_3)}}{2.\pi.k.(L_1 + L_2 + L_3)} \quad (8)$$

Com esses limites, é possível a definição das funções que representam a curva de distribuição de tensões indicada na figura 2. É garantida a condição de equilíbrio dessa distribuição de tensões residuais, ao longo do eixo longitudinal da chapa, através da determinação do fator "f".

A função deslocamento $y(x)$, dada pela equação (4), é resultado da integração, ao longo do eixo longitudinal do tubo, em pontos discretos, aproximando-se por uma sucessão de segmentos de reta ligando os valores

calculados. Após a obtenção de $y(x)$ e suas derivadas, é possível calcular a distribuição de tensões residuais que minimizam a energia elástica do sistema.

A figura 3 compara os resultados calculados pelo modelo desenvolvido, indicando a adaptação aos resultados experimentais obtidos por Vaidyanathan *et al* (1993).

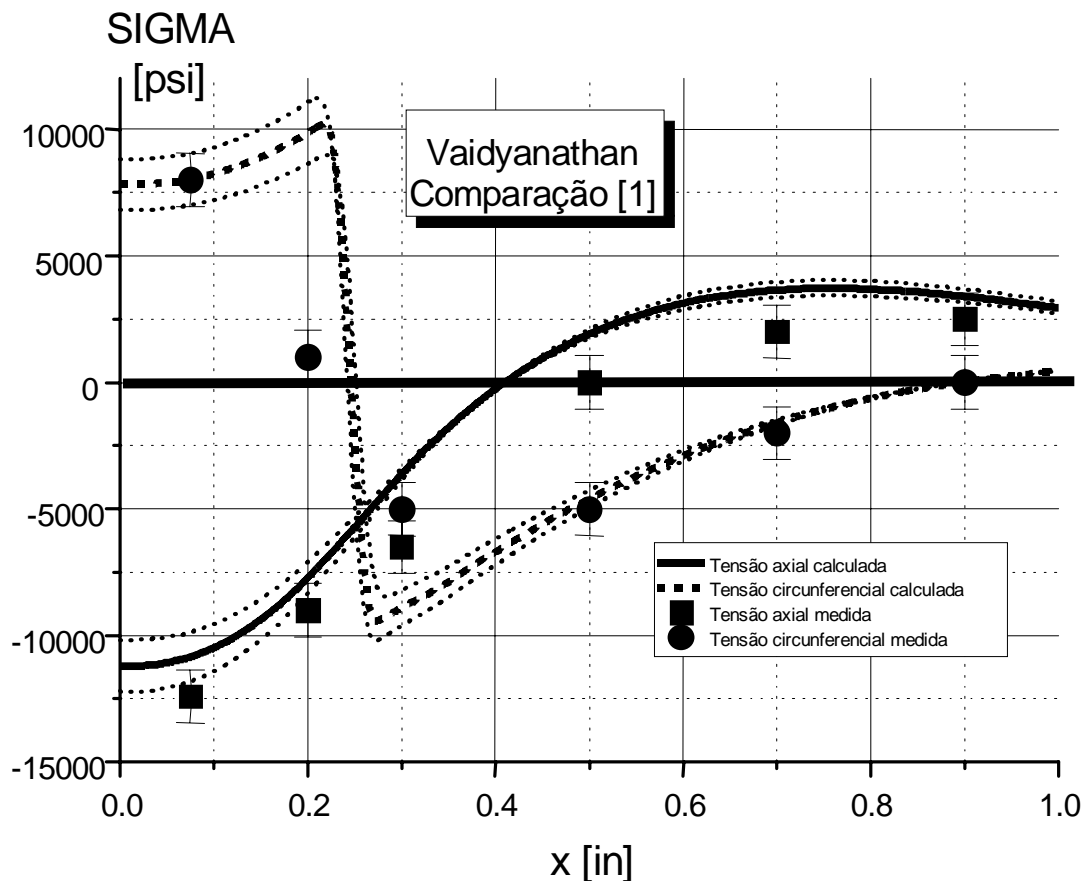


Figura 3 - Tensões axiais e circunferenciais no tubo

As figuras 4 e 5, mostram a comparação das curvas previstas pelo modelo desenvolvido, com os resultados experimentais obtidos por Fujita *et al* (1980). As figuras indicam uma boa adequação dos valores calculados, com exceção dos pontos próximos ao centro do cordão de solda. Isto se deve ao valor do escoamento do metal de solda superior ao do metal de base, que pode se alterar com a introdução de um fator de correção nos cálculos.

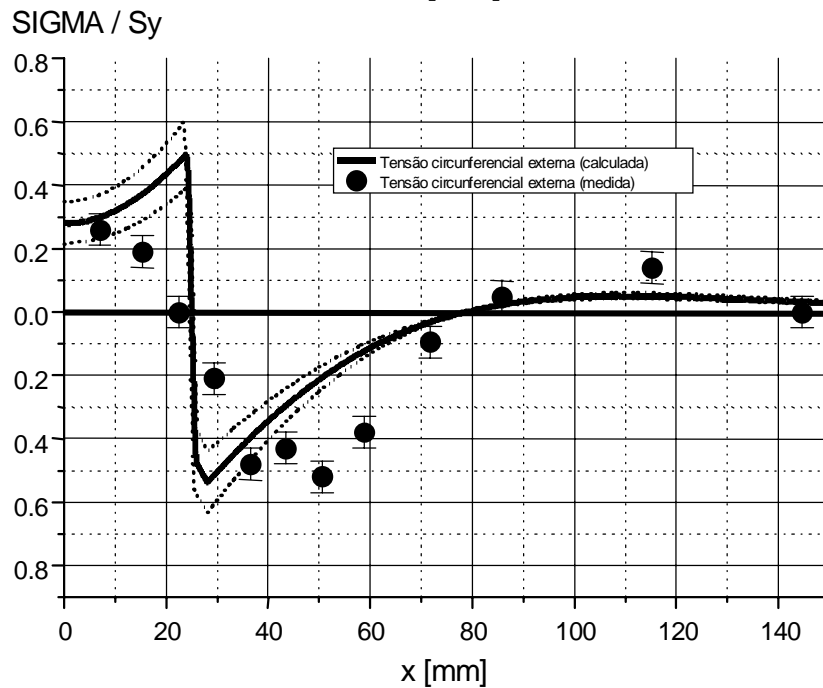
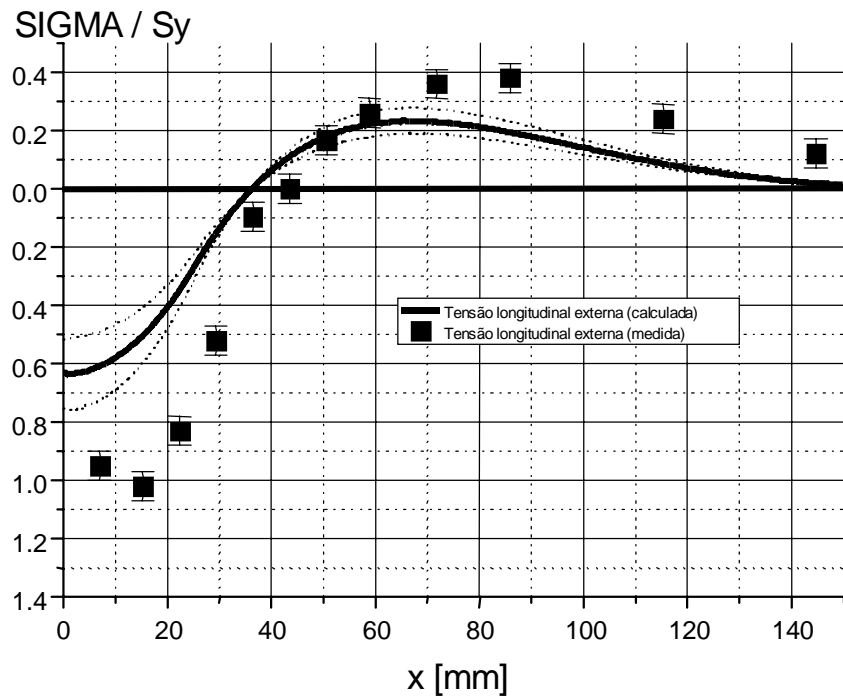


Figura 4 – Tensões residuais axiais e circunferenciais externas

A figura 6, compara as curvas previstas pelo modelo desenvolvido, com resultados experimentais, em solda circunferencial de tubo, obtidos através de difratometria de raios-X, utilizando-se o equipamento portátil descrito por Donato *et al* (1999).

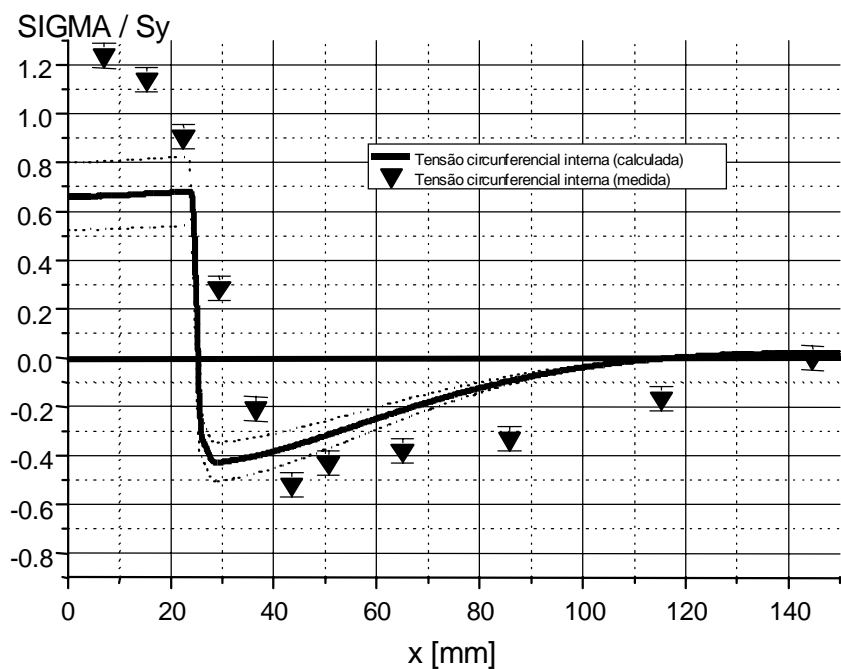
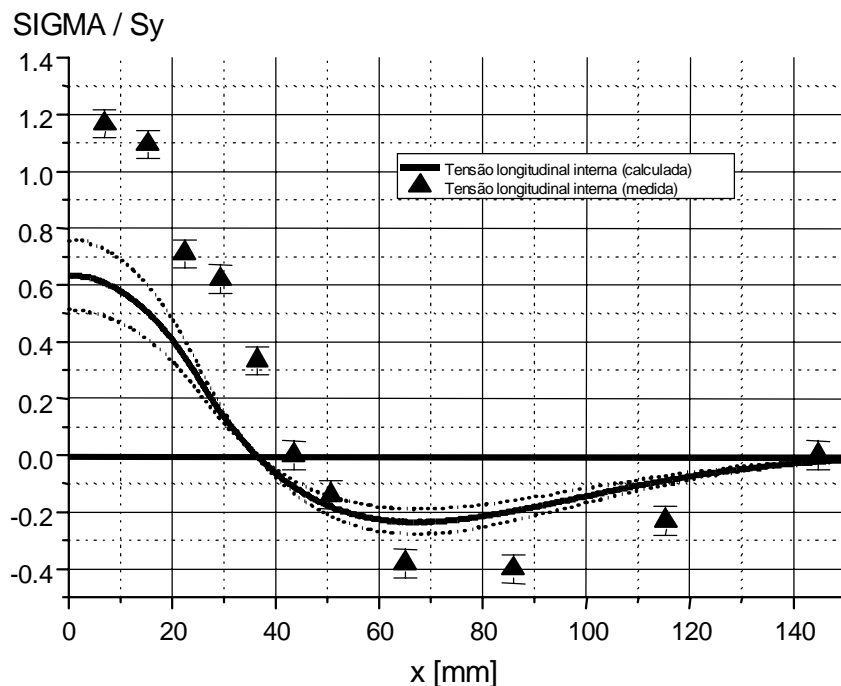


Figura 5 - Tensões residuais axiais e circunferenciais internas

O tubo é de material SA -106 Gr. B e o metal de adição foi o ER-70S3, com a utilização do processo de soldagem TIG. O tubo possui 50,8 mm de diâmetro e 5,54 mm de espessura. Nos cálculos foram utilizados os valores de escoamento do metal de solda e do metal de base. É obtida uma boa adequação entre os resultados experimentais e os calculados pelo modelo, inclusive no cordão de solda.

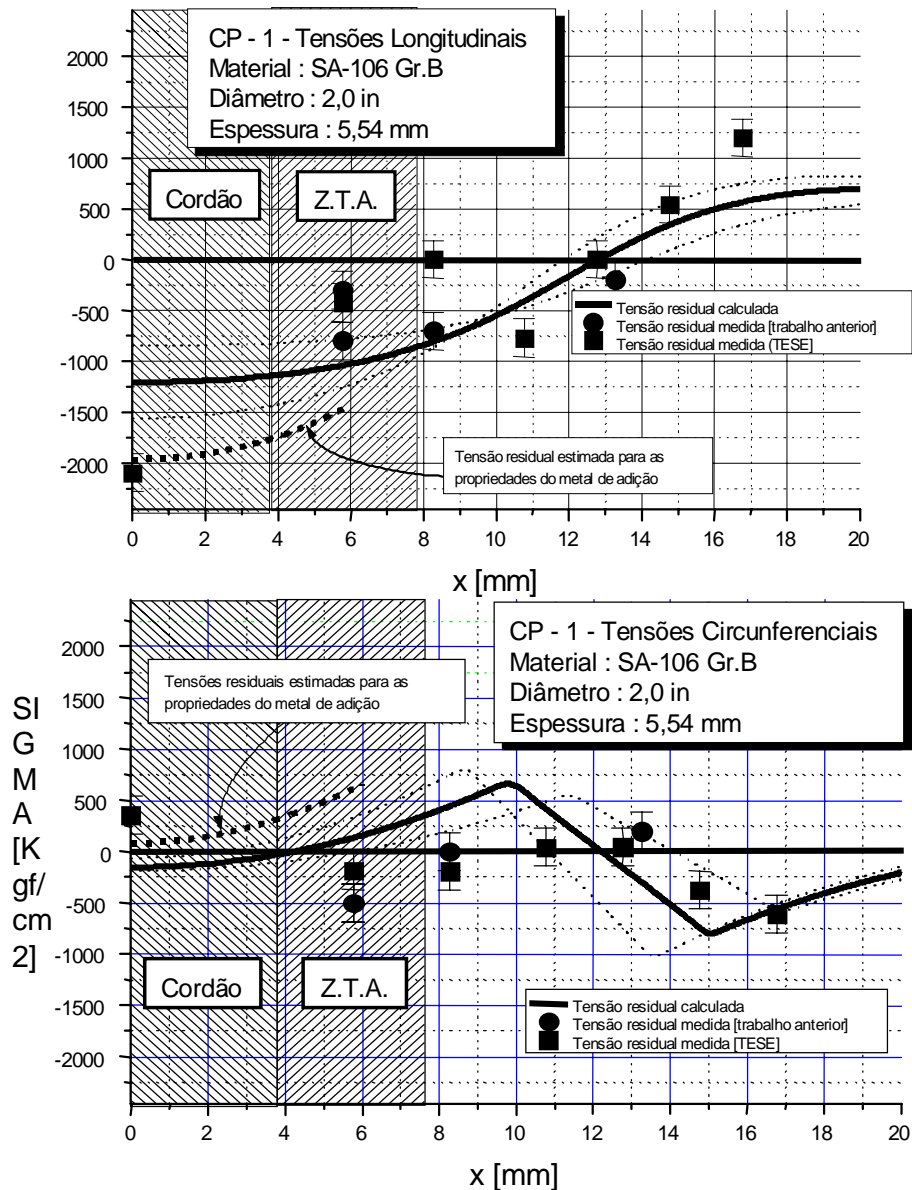


Figura 6 - Tensões Longitudinais e Circunferenciais no corpo de prova n.1

3. CONCLUSÕES

- 1 – Foi desenvolvido um modelo analítico que permite calcular com precisão, as tensões residuais internas e externas de solda circunferencial em tubo;
- 2 – Os valores calculados pelo modelo foram comparados com resultados experimentais obtidos por difração de raios-X, e com resultados experimentais obtidos por outros autores. Os valores calculados coincidem.
- 3 - Para pontos localizados no cordão de solda, é necessário utilizar o limite de escoamento do metal de solda no cálculo das tensões.

4. REFERÊNCIAS

Donato, Guilherme V. P., 1999, “Previsão de Tensões Residuais em Juntas Circunferenciais de Tubulações”, Tese de Doutorado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 195p.

Fujita Y., Nomoto T. and Hasegawa H., 1980, “Deformations and Residual Stresses in Butt-Welded Pipes and Spheres”, IIW DOc.X, pp-963-980.

Rosenthal D., 1941, “Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting”, Welding Journal Research Supplement, pp.220-234.

Vaidyanathan S., Todaro A.D., Finnie I., 1973; “Residual Stresses due to circumferential welds”, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, pp 233-237.