

AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL EM DUTO CILÍNDRICO SUBMETIDO A GRADIENTES TÉRMICOS

Eneida Tavares Viana Duarte ⁽¹⁾
Eduardo Atem de Carvalho ⁽²⁾

Resumo

É comum vasos de pressão sofrerem dano devido ao choque térmico. Trincas originadas neste processo são geralmente rasas e localizadas perto da área de concentração de tensões. Se o choque térmico ocorrer durante o início do processo, podem aparecer trincas na face externa, mas se o vaso pressurizado for subitamente despressurizado ou receber fluido frio trincas serão levadas a aparecer na face interna. Este trabalho cuida apenas da primeira situação. Existindo também uma pressão interna produzirá tensões de tração que podem ser contra-balançadas por tensões térmicas compressivas. As tensões resultantes determinarão se as trincas propagarão ou não. Tensões resultantes positivas podem atuar catastróficamente sobre vasos de pressão danificados. Este trabalho explora a situação onde o dano já ocorreu, sendo a temperatura interna maior que a externa e a trinca no lado externo do vaso e propõe controle de propagação de trincas por meio de diferença de temperatura entre as paredes do vaso. A abordagem de função de peso é usada para expressar fatores de intensidade de tensão atuantes.

Palavras-chave: Choque térmico; Vasos de pressão; Fator de intensidade de tensão.

60^o Congresso Anual da ABM – 25 a 28 de Julho de 2005 – Belo Horizonte/MG

⁽¹⁾ Doutoranda - UENF/ LAMAV / CCT – Av. Alberto Lamego, 2000 – Horto – Campos dos Goytacazes/RJ – CEP: 28015-620 – e-mail: eneida@uenf.br

⁽²⁾ Professor Associado - UENF/ LAMAV / CCT – Av. Alberto Lamego, 2000 – Horto – Campos dos Goytacazes/RJ – CEP: 28015-620 – e-mail: eatem@uenf.br

1 INTRODUÇÃO

É comum vasos de pressão sofrerem dano devido ao choque térmico. Ocorrências inesperadas ou imprevistas durante a operação pode produzir algumas formas de danos que ao longo do tempo afetarão segurança e produção [1]. Uma das formas de avaria mais perigosa é a abertura de trinca devido a choque térmico, que pode ocorrer apenas uma vez ou em ciclos [2]. Trincas originadas neste processo são geralmente rasas e localizadas perto da área de concentração de tensões [3]. Se o choque térmico ocorrer durante o início do processo, podem aparecer trincas na face externa, mas se o vaso pressurizado for subitamente despressurizado ou receber fluido relativamente frio, trincas serão levadas a aparecer na face interna [4]. Duas situações possíveis podem surgir para algumas partes que são submetidas a diferentes distribuições de temperatura, a temperatura externa é maior ou menor que a interna. Se a temperatura externa (T_e) é maior que a interna (T_i), a face interna do cilindro será submetida a tensões de tração tangencial que serão contra-balançadas por tensões compressivas do lado externo [5]. Outra situação crítica acontece quando a temperatura interna é maior que a externa e a trinca é do lado externo do vaso. Novamente a distribuição de temperatura causa uma tensão tangencial positiva. A situação contrária $T_e > T_i$, com trinca externa; $T_i > T_e$, com trinca interna) não são críticas, uma vez que as tensões tangenciais atuam fechando a trinca. Superposta a tensão térmica, deve ser considerada a pressão interna como produzindo tensões tangenciais positivas [6].

Este trabalho explora a situação onde o dano já ocorreu, sendo a temperatura interna maior que a externa e a trinca surgiu no lado externo do vaso e discute a possibilidade de controlar a propagação de trincas por meio de alteração do gradiente de temperatura entre as paredes do vaso. Para lidar com as expressões para os Fatores de Intensidade de Tensão (FIT), é usada a abordagem da função de peso [7, 8, 9].

2 FUNÇÕES DE PESO

O estado de tensões na ponta da trinca pode ser descrito quando K (Fator de Intensidade de Tensão do caso referência) e o primeiro termo de uma expansão são conhecidos, para um material linear elástico. Para materiais frágeis é suficiente que K seja conhecido, revelando uma propriedade do material quando alcança um nível crítico [10].

2.1 Casos Referência

No decorrer deste trabalho três casos referência foram tomados da literatura [11]. Eles são:

$$\frac{\sigma(x)}{\sigma} = 1 \quad (1)$$

e seus campos de distribuição de tensão constante dois fatores de intensidade de tensão adimensionais para trincas externas e internas: f_{oin} e f_{oex} .

$$\frac{\sigma(x)}{\sigma} = \ln\left(\frac{r}{R_e}\right) \quad (2)$$

onde r é o raio desejado e R_e é o raio externo.

Este tipo de distribuição de tensão logarítmica geram dois FITs, pra trincas interna e externa: f_{Irin} e f_{Irex} .

$$\frac{\sigma(x)}{\sigma} = \left(\frac{r}{R_e}\right)^{-2} \quad (3)$$

Este tipo de distribuição de tensão gera dois FITs para trincas interna e externa: f_{Im2in} e f_{Im2ex} .

3 TENSÕES TANGENCIAIS PARA UM CILINDRO

Neste estudo a principal preocupação está relacionada com a tensão tangencial, pois esta pode fazer com que uma trinca se torne instável. Um cilindro trabalhando como parte de um sistema de geração de energia pode trabalhar sob diferentes condições, a primeira onde a temperatura da parte externa é maior que a temperatura do interior e a segunda quando o oposto ocorre. Devido a natureza geométrica do cilindro, os dois casos apresentam diferentes distribuições de temperatura quando o estado permanente é alcançado. Por esta razão são usadas duas expressões diferentes para descrever a tensão tangencial. O item 3.3 apresenta o componente de tensão tangencial associado com uma pressão interna e a Fig. (1) traz a geometria cilíndrica e a origem da trinca para casos estudados.

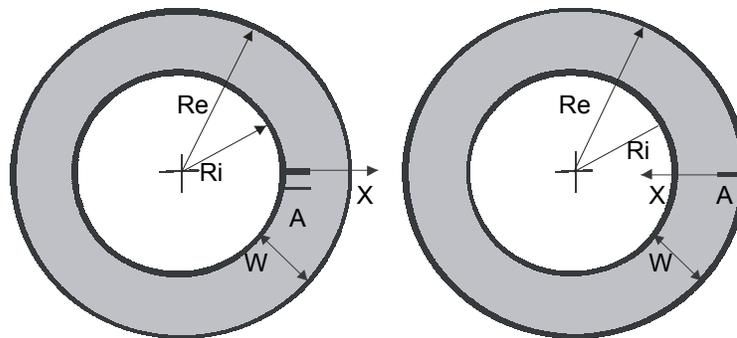


Figura 1. Características geométricas do cilindro trincado, R_e é o raio externo e R_i é o raio interno, o da esquerda representa a situação onde $T_e > T_i$ e o da direita a que $T_i > T_e$.

3.1 – $T_i > T_e$

Para o caso em que a temperatura no interior do cilindro é maior que a do lado externo, a tensão tangencial térmica é [5]:

$$\sigma_{\theta}^{Ti}(r) = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)\ln\psi} \left\{ 1 - \ln\frac{Re}{r} - \frac{\ln\psi}{\psi^2 - 1} \left[1 + \left(\frac{Re}{r}\right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

Onde E é o módulo de Young, α é o coeficiente de expansão térmica, ΔT é a diferença entre as temperaturas interna e externa e ψ é R_e/R_i (R_e é o raio externo, R_i é o raio interno)

3.2 Pressão Interna

Tensões produzidas por pressão interna são dadas por:

$$\sigma_{\theta}^p(r) = p \frac{\phi^2}{1 - \phi^2} \left[1 + \left(\frac{r}{R_e}\right)^{-2} \right] \quad (5)$$

Onde p é a pressão interna e ϕ é R_i/R_e .

4 FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA TENSÕES COMPRESSIVAS E TÉRMICAS ATUANDO EM UM CILINDRO

A determinação do FIT é obtida usando a combinação casos referência conhecidos [11].

4.1 $T_i > T_e$

Para o caso em que a temperatura no interior do cilindro é maior que a do lado externo:

4.1.1 Trinca interna

Quando $r = R_i$ a Eq.(4) torna-se:

$$K_{\Delta T}^{Ti}(r) = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)\ln\psi} \left(1 - \frac{2\psi^2}{\psi^2 - 1} \ln(\psi) \right) \sqrt{\pi a} f_T^{Ti,i} \quad (6)$$

4.1.2 Trinca externa

Quando $r = R_e$ a Eq. (4) torna-se:

$$K_{\Delta T}^{Ti,e}(r) = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)\ln\psi} \left(1 - \frac{2}{\psi^2 - 1} \ln(\psi) \right) \sqrt{\pi a} f_T^{Ti,E} \quad (7)$$

4.2 Pressão Interna

4.2.1 Trinca interna

Quando $r = R_i$, a Eq. (5) torna-se:

$$K_p^i = p \frac{1 + \phi^2}{1 - \phi^2} \sqrt{\pi a} f_p^i \quad (8)$$

4.2.2 Trinca externa

Quando $r = R_e$ a Eq. (5) torna-se:

$$K_p^e = p \frac{2\phi^2}{1 - \phi^2} \sqrt{\pi a} f_p^E \quad (9)$$

5 FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA MÚLTIPLAS TRINCAS

O FIT total, válido para uma superposição linear de tensões elástica e de pressão, é a simples soma de dois FITs independentes. Isto pode ser expresso como:

$$K_{tot} = K_p + K_{\Delta T} \quad (10)$$

Aplicando as expressões (5) a (9) para ambos os lados de (13) tem-se:

$$f_{tot} = \frac{\sigma_p f_p + \sigma_{\Delta T} f_{\Delta T}}{\sigma_{tot}} \quad (11)$$

Onde σ_{tot} é a tensão total atuando, uma superposição direta de dois termos presentes.

6 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇO A-333

No caso estudado utilizou-se propriedades materiais do aço ASTM A-333 P12. Este material é usado para peças de alta temperatura e é um ferrítico, liga sem costura. Sua composição [12] é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1. Algumas propriedades físicas do aço ASTM A-333

Propriedades	E	v	α	σ_{rup}	K_{Ic}
valor	210	0,29	12,2E-6 1°/C	415 MPa	121 Mpa(m) ^{1/2}

7 RESULTADOS

Para este estudo foi assumida uma pressão interna de 7,35 MPa (75Kgf/cm²), como apresentado nas tabelas oferecidas pelo fabricante.

7.1 FITs para o Caso Estudado ($T_i > T_e$)

7.1.1 – Para a situação de uma trinca externa única, encontrada em uma região cilíndrica ($R_e/R_i = 1,5$) onde $T_i > T_e$ e $\Delta T = 50, 100, 150, 200$ e 250 K, é encontrado:

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=50} = 1,121 - 0,542 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,417 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1,840 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 0,154 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (12)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=100} = 1,119 - 0,578 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,139 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1,470 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,202 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (13)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=150} = 1,121 - 0,642 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,299 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1,843 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,012 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (14)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=200} = 1,119 - 0,637 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,217 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1,733 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,1041 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (15)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=250} = 1,121 - 0,672 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,313 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1,910 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,012 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (16)$$

7.1.2 – Para a situação de duas trincas externas, encontradas em uma região cilíndrica ($R_e/R_i = 1,5$) onde $T_i > T_e$ e $\Delta T = 50, 100, 150, 200$ e 250 K, é encontrado:

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=50} = 1,120 - 0,490 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,380 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 0,877 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,644 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (17)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=100} = 1,121 - 0,572 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,374 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1,116 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,596 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (18)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=150} = 1,120 - 0,588 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,255 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 0,915 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,792 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (19)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=200} = 1,120 - 0,612 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,287 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 0,996 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,777 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (20)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=250} = 1,121 - 0,629 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,265 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1,236 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0,609 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (21)$$

7.1.3 – Para a situação de três trincas externas, encontradas em uma região cilíndrica ($R_e/R_i = 2,0$) onde $T_i > T_e$ e $\Delta T = 50, 100, 150, 200$ e 250 K, é encontrado:

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=50} = 1,123 - 0,629 \left(\frac{a}{W} \right) + 1,854 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 4,329 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 2,393 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (22)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=100} = 1,123 - 0,575 \left(\frac{a}{W} \right) + 1,903 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 4,304 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 2,426 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (23)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=150} = 1,123 - 0,596 \left(\frac{a}{W} \right) + 1,827 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 4,203 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 2,335 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (24)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=200} = 1,123 - 0,602 \left(\frac{a}{W} \right) + 1,818 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 4,1903 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 2,314 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (25)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=250} = 1,123 - 0,613 \left(\frac{a}{W} \right) + 1,864 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 4,306 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 2,392 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (26)$$

7.1.4 – Para a situação de quatro trincas externas, encontradas em uma região cilíndrica ($R_e/R_i = 2,0$) onde $T_i > T_e$ e $\Delta T = 50, 100, 150, 200$ e 250 K, é encontrado:

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=50} = 1,122 - 0,402\left(\frac{a}{W}\right) + 0,039\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1,461\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 0,194\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (27)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=100} = 1,122 - 0,453\left(\frac{a}{W}\right) + 0,091\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1,531\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1,157\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (28)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=150} = 1,122 - 0,467\left(\frac{a}{W}\right) + 0,076\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1,538\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1,151\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (29)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=200} = 1,122 - 0,460\left(\frac{a}{W}\right) + 0,046\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1,274\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 0,957\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (30)$$

$$f_{\text{tot-e}}^{\Delta T=250} = 1,122 - 0,473\left(\frac{a}{W}\right) + 0,015\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1,430\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1,067\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (31)$$

7.2 Tensão Total Limite Para Cilindro Trincado

7.2.1 – Para 1 trinca externa, $R_e/R_i = 1,5$

Tomando a tenacidade à fratura da tabela (1) e usando junto com as expressões (12) a (16), é possível determinar a tensão limite total. A figura (2) apresenta alguns resultados teóricos para o caso estudado. Para ΔT abaixo de 100K é seguro operar uma peça fraturada, até o limite de 0,4 do valor da tensão de referência (Tensão de ruptura). Para ΔT de 150 K somente trincas menores que 5mm são seguras para trabalho sob pressão máxima. Toda combinação de pressão e comprimento de trinca localizada do lado externo (abaixo e a direita) às curvas sólidas são seguras para uso. O limite é alcançado quando uma linha tracejada cruza a sólida em geral para o mesmo ΔT . Os pares são: vermelho sólido e azul tracejada ($\Delta T=50K$), verde sólido e magenta tracejada ($\Delta T=100K$), ciano sólido e marrom pontilhada ($\Delta T=150$), preta sólido e vermelha pontilhada ($\Delta T=200K$) e azul sólido e verde pontilhada ($\Delta T=250K$).

7.2.2 – Para 2 trincas externas, $R_e/R_i = 1,5$

Tomando a tenacidade a fratura da tabela (1) e usando junto com as expressões (17) a (21). A figura (3) apresenta alguns resultados teóricos para este caso. Para ΔT abaixo de 100K é seguro operar uma peça fraturada, até o limite de 0,37 do valor da tensão de referência (Tensão de ruptura). Para ΔT de 150 K somente trincas menores que 6 mm são seguras para trabalho sob pressão máxima. Toda combinação de pressão e comprimento de trinca localizada do lado externo (abaixo e a direita) às curvas sólidas são seguras para uso. O limite é alcançado quando uma linha tracejada cruza a sólida em geral para o mesmo ΔT . Os pares são: vermelho sólido e azul tracejada ($\Delta T=50K$), verde sólido e magenta tracejada ($\Delta T=100K$), ciano sólido e marrom pontilhada ($\Delta T=150$), preta sólido e vermelha pontilhada ($\Delta T=200K$) e azul sólido e verde pontilhada ($\Delta T=250K$).p

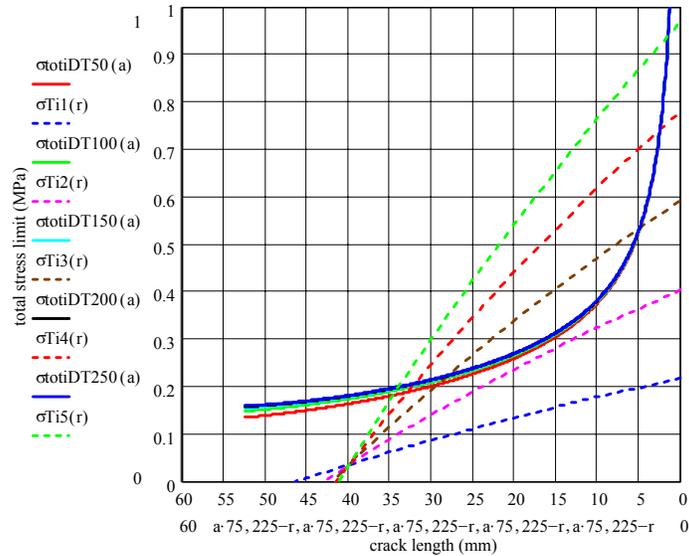


Figura 2. Tensões limites (linhas sólidas) e tensões totais controladas por ΔT . Para $T_i > T_e$, uma trinca.

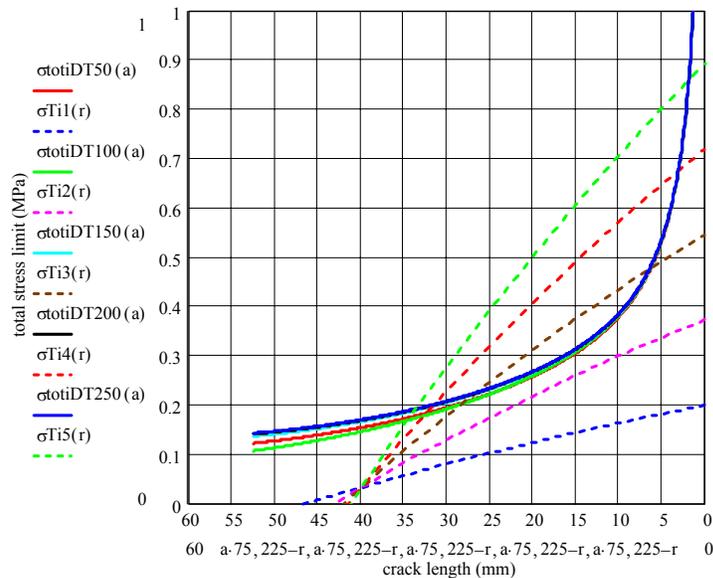


Figura 3. Tensões limites (linhas sólidas) e tensões totais controladas por ΔT . Para $T_i > T_e$, duas trincas.

7.2.3 Para 3 trincas externas, $R_e/R_i = 2,0$

Com o mesmo procedimento anterior e utilizando as expressões (22) a (26), é possível determinar a tensão limite total. A figura (4) apresenta alguns resultados teóricos para o caso estudado. Para ΔT abaixo de 100K é seguro operar uma peça fraturada, até o limite de 0,34 do valor da tensão de referência (Tensão de ruptura). Para ΔT de 150 K somente trincas menores que 7 mm são seguras para trabalho sob pressão máxima. Toda combinação de pressão e comprimento de trinca

localizada do lado externo (abaixo e a direita) às curvas sólidas são seguras para uso. O limite é alcançado quando uma linha tracejada cruza a sólida em geral para o mesmo ΔT . Os pares são: vermelho sólido e azul tracejada ($\Delta T=50K$), verde sólido e magenta tracejada ($\Delta T=100K$), ciano sólido e marrom pontilhada ($\Delta T=150$), preta sólido e vermelha pontilhada ($\Delta T=200K$) e azul sólido e verde pontilhada ($\Delta T=250K$).

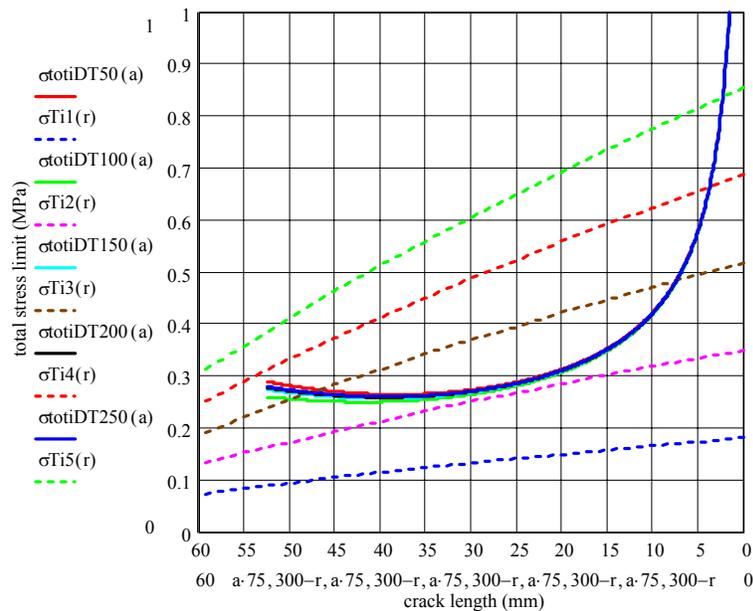


Figura 4. Tensões limites (linhas sólidas) e tensões totais controladas por ΔT . Para $T_i > T_e$, três trincas.

7.2.4 Para 4 trincas externas, $R_e/R_i=2,0$

Com o mesmo procedimento e utilizando as expressões (27) a (31), é possível determinar a tensão limite total. A figura (5) apresenta alguns resultados teóricos para o caso estudado. Para ΔT abaixo de 100K é seguro operar uma peça trincada, até o limite de 0,34 do valor da tensão de referência (Tensão de ruptura). Para ΔT de 150 K somente trincas menores que 7 mm são seguras para trabalho sob pressão máxima. Toda combinação de pressão e comprimento de trinca localizada do lado externo (abaixo e a direita) às curvas sólidas são seguras para uso. O limite é alcançado quando uma linha tracejada cruza a sólida em geral para o mesmo ΔT . Os pares são: vermelho sólido e azul tracejada ($\Delta T=50K$), verde sólido e magenta tracejada ($\Delta T=100K$), ciano sólido e marrom pontilhada ($\Delta T=150$), preta sólido e vermelha pontilhada ($\Delta T=200K$) e azul sólido e verde pontilhada ($\Delta T=250K$).

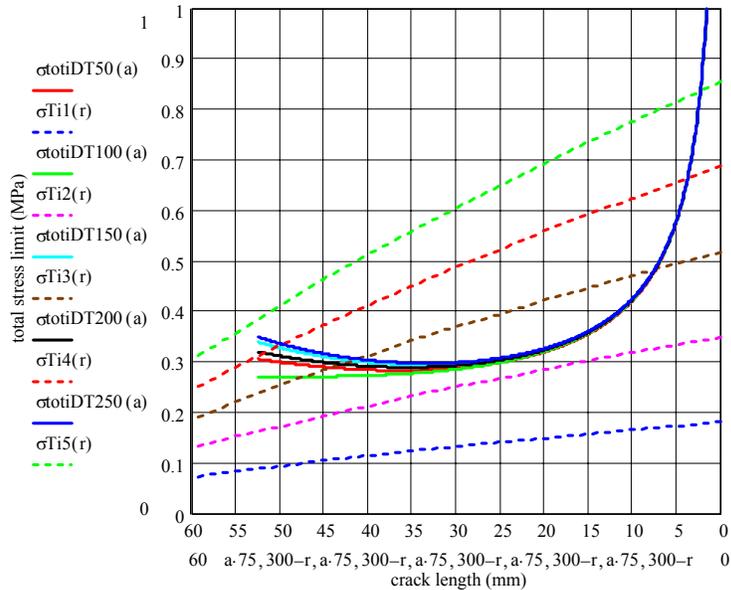


Figura 5. Tensões limites (linhas sólidas) e tensões totais controladas por ΔT . Para $T_i > T_e$, quatro trincas.

8 CONCLUSÃO

A partir de casos existentes na literatura foi possível desenvolver expressões que estabelecem uma correlação entre geometria, parâmetros de fratura e propriedades do material.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERJ, Tecnorte e Petrobrás S.A. pelo suporte dado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Megyesy, E.F.: Pressure Vessel Handbook, Pressure Vessel Handbook Pub, 12ª ed., (2001).
- 2 Surface Cracks in Hollow Cylinders Subjected to Thermal Shock” International Journal of Pressure Vessels e Piping, v.80, i.3, pp 167-178, (2003).
- 3 Kim, Y.W., Lee, H.Y. e Yoo, B.: “Numerical Evaluation of Stress Intensity Factor for Vessel and Pipe Subjected a Thermal Shock”, International Journal of Pressure Vessel and Piping, v. 58, i2, pp. 215-222 (1994).
- 4 Xu, R.X. e Wu, X.R.: “A Weight Function Approach top Stress-Intensity Factors for Half-Elliptical surface Cracks in Cylindrical Pressure Vessels Subjected to Thermal Shock”, International Journal of Pressure Vessel and Piping, v. 39, i 5, pp. 375-391 (1989).
- 5 Timosenko, S.P. e Goodier, J.N.:Theory of elasticity, International Student Edition, MacGraW-Hill, Inc (1982).
- 6 Shigley, J.E.: “Mechanical Engineering Design”, First Metric Edition, McGraw-Hill (1986).

- 7 Bueckner, H.F.: "A novel Principle for the computation of the Stress Intensity Factors, ZAMM, vol. 50, pp 529-546 (1970).
- 8 Rice, J.R. "Some remarks on elastic crack-tip stress fields", International Journal of Solids and Structures, vol.8, pp 751-758 (1972).
- 9 Anderson, T.L. "Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications", CRC press, Boca Raton, Fla. (1991).
- 10 Fett, T.: "Stress Intensity Factors and T-Stress for internally cracked circular disks under various boundary conditions", Engng Fract. Mech. 1998, Vol 68, pp1119 – 1136 (2001).
- 11 Wu, X.R.: "Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions", Pergamon Press(1991).
- 12 ASTM Handbook, v1 (1990)

Apêndice A – Funções de Peso

O método de funções de peso foi arquitetado para ser um método de determinação de Fator de Intensidade de Tensão. A análise usual para determinar o valor K é válida somente para aquelas condições de contorno particulares e se alguma das últimas mudam, um novo K deve ser determinado. Mas a solução para um conjunto de condições de contorno contém informações suficientes para determinar K para alguma outra condição de contorno atuando sobre a mesma geometria. O método por si mesmo é exato. As principais fontes de erro na determinação de tensão são a acurácia nas soluções de referência e o número de termos contidos na função de peso. Uma importante vantagem do método da função de peso é que os fatores de intensidade de tensão são obtidos através de integração minimizando possíveis erros. Esta capacidade é especialmente importante para problemas de modelagem de trinca quando um cálculo eficiente do fator de intensidade de tensão é crucial. O método de função de peso tem sido usado nas últimas décadas, gerando uma vasta literatura em análise de trinca elástica bidimensional (Wu, X.R., 1991).

Apêndice B – Cálculo do Fator de Intensidade de Tensão Adimensional

B.1 – $T_i > T_e$

B.1.1 – Trinca Interna

$$f_T^{Ti,i} = \frac{f_{oin} + f_{irin} - \frac{\ln(\psi)}{\psi^2 - 1} (f_{oin} + f_{rm2in})}{1 - \frac{2\psi^2}{\psi^2 - 1} \ln(\psi)} \quad (B.1)$$

B.1.2 – Trinca Externa

$$f_T^{Ti,i} = \frac{f_{oex} + f_{irex} - \frac{\ln(\psi)}{\psi^2 - 1} (f_{oex} + f_{rm2ex})}{1 - \frac{2}{\psi^2 - 1} \ln(\psi)} \quad (B.2)$$

B.2 – Pressão Interna

B.2.1 – Trinca Interna

$$f_p^I = \frac{\phi^2}{1 + \phi^2} (f_{oin} + f_{rm2in}) \quad (B.3)$$

B.2.2 – Trinca Externa

$$f_p^E = \frac{1}{2} (f_{oex} + f_{rm2ex}) \quad (B.4)$$

PRESSURE VESSELS

Eneida Tavares Viana Duarte⁽¹⁾
Eduardo Atem de Carvalho⁽²⁾

Abstract

It is not unusual for pressure vessels to suffer damage due to thermal shock. Cracks originated in this process are usually shallow and located nearby stress concentration area. If the thermal shock happens to occur during the start up process cracks may show at the outer face, but if the pressure vessel is suddenly depressurized or receive cold fluid, cracks are bound to show up at vessel's inner face. Internal pressure produces tensile stresses, which are counter balanced by compressive thermal stresses. The resulting stresses will determine if the cracks will propagate or not. Positive stresses may act catastrophically over damaged pressure vessels. This work explores the described situation and proposes controlling crack propagation by means of altering temperature difference between vessel's walls. Weight functions approach is used to expresses acting stress intensity factors.

Key-words: Thermal Shock, Pressure vessels, Stress intensity factor.