

GEOMETRIA E DISTRIBUIÇÃO DO ENTALHE NA INSTABILIDADE PLÁSTICA EM VASOS DE PRESSÃO CILINDRICO DE PAREDE FINA SUJEITO A PRESSÃO HIDROSTÁTICA INTERNA¹

Antonio de Pádua Lima Filho²
Tathiane Viudes dos Santos³

Resumo

Um parâmetro crítico para medir o desempenho de estruturas de vasos de pressão de parede fina cilíndrico sujeito ao carregamento estático ou dinâmico, é o tamanho e distribuição dos defeitos principalmente aqueles situados perpendicularmente a tensão circunferencial. Este artigo discute o efeito de diversos comprimentos de trincas únicas e múltiplas sobre a resistência mecânica de estruturas em casca cilíndrica (latas de alumínio 3004 de 66,5mm de diâmetro e espessura de 0,12mm aproximadamente) submetidas à pressão hidrostática interna até a falha catastrófica. Estas trincas foram posicionadas na superfície central dessas estruturas. As trincas únicas têm comprimento de 4, 8 e 12mm. As trincas múltiplas têm comprimento de 4mm equidistante de 3mm. Todas trincas têm profundidade de 0,05mm. Os resultados obtidos mostraram que os entalhes únicos diminuíram a resistência dos vasos de pressão e praticamente não alterou a partir do comprimento de 8mm. A resistência do vaso de pressão para entalhes múltiplos manteve-se constante e praticamente idêntica para o entalhe único de 4mm. Isto é um indicativo que a distância entre eles não foi suficiente para agrupar e formar um único entalhe. O valor médio da tenacidade a fratura obtida foi de $25 \text{ MPam}^{1/2}$ para comprimentos da trinca de 8 e 12mm, e bem próximo para as ligas de alumínio tratadas termicamente para uso aeronáutico. O valor de K_{IC} calculado para a trinca de 4mm foi muito elevado e assim a expressão do fator de intensidade de tensão pertinente não pode ser aplicada neste caso.

Palavras-chave: Vaso de pressão cilíndrico; Estrutura em casca; Pressão hidrostática interna; Tenacidade à fratura.

NOTCH GEOMETRY AND DISTRIBUTION FOR PLASTIC INSTABILITY IN TIN WALL CYLINDRICAL PRESSURE VESSELS UNDER INTERNAL HYDROSTATIC PRESSURE

Abstract

A critical parameter in measuring the performance of tin wall cylindrical pressure vessel structures under static and dynamic loading, is flaw size and distribution, particularly that located perpendicularly to the hoop stress. This paper shows the effect of single and multiple cracks on the mechanical strength of cylindrical shell structures (aluminium beverage can 3004 of approximately 66.5mm in diameter and 0.12mm in thickness) submitted to an internal hydrostatic pressure that is increased until catastrophic failure. These cracks were introduced on the external central surface of these structures. The single cracks were 4, 8 and 12mm in length. The multiple cracks were 4mm in length and spaced at an equidistance of 3mm. All cracks were 0.05mm in depth. The results showed that single cracks up to 8mm in length decreased the strength of the pressure vessel, with little further change for cracks longer than 8mm. The strength of the pressure vessel for multiple cracks remained constant and practically identical to a single crack of 4mm. This is an indication that the distance between them was wide enough to avoid a cluster and the consequent formation of a single crack. The average value for fracture toughness achieved (K_{IC}) was $25 \text{ MPam}^{1/2}$ for crack sizes of 8 and 12mm, and very close to that of heat-treated aluminium alloys for aeronautical use. The calculated K_{IC} value for a crack of 4mm was too high to apply a pertinent stress intensity factor equation.

Key words: Cylindrical pressure vessel; Shell structure; Internal hydrostatic pressure; Fracture toughness.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² UNESP-Campus de Ilha Solteira – Depto. de Engenharia Mecânica – Eng. Metalúrgico pela EEIMVR – UFF; Mestre em Ciência pelo ITA; PhD pela University of Sheffield – Inglaterra.

³ UNESP – Campus de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Mecânica.

INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolver estruturas em cascas empregadas no armazenamento de derivados de petróleo sujeito ao carregamento hidrostático interno e prever a tensão circunferencial crítica relacionada à distribuição e geometria de defeitos localizados na superfície da estrutura, são importantes para estimar a vida útil dessa estrutura e assim evitar a falha catastrófica. Neste trabalho, é feita uma breve revisão bibliográfica sobre o emprego de estruturas em casca. Os modos de abertura de trinca, que levam a falha catastrófica usualmente descritos na literatura, são mostrados. Entalhes únicos e múltiplos são estudados para o Modo I de abertura da trinca. Material e métodos mostram a forma de usinar os entalhes na superfície da estrutura em casca (latas de alumínio de espessura aproximadamente de 0,12mm) e sua distribuição ao longo do corpo cilíndrico. Um aparato experimental para o teste hidrostático dessa estrutura é mostrado. A seguir uma discussão de resultado considerando o tamanho crítico e distribuição das trincas é feita, seguida de conclusão. Agradecimentos, referências bibliográficas, *abstract* e *key-words* completam este trabalho.

É objetivo desse trabalho, analisar o efeito do comprimento e distribuição de trincas superficiais na estrutura de vaso de pressão de parede fina (estrutura em casca) sujeito a pressão hidrostática interna, medir a pressão de falha, calcular a tensão principal circunferencial (σ_1) e o valor de K_{IC} . Os entalhes para o caso em estudo, estão perpendiculares a tensão σ_1 a qual é a responsável pela abertura da trinca no Modo I e assim é a responsável pela falha catastrófica da estrutura. Esta abordagem da mecânica da fratura está relacionada basicamente a considerações de concentração de tensão sobre a geometria dos defeitos confeccionados sobre a estrutura em estudo.

Mackerle⁽¹⁾ faz uma análise do emprego de elementos finitos aplicados a vários tópicos relacionados a vasos de pressão e tubos. Dentre os diversos tópicos, a maior quantidade de artigos publicados (172) entre 1996 a 1998 sobre o assunto, é sobre análise de deflexão e tensão, dinâmica e estática, linear e não linear. Os problemas relacionados à mecânica da fratura e fadiga são o segundo tópico mais pesquisado aplicando elementos finitos e outros tipos de análise (148 artigos entre 1996 a 1998).

A lista de artigos relacionados por Mackerle⁽¹⁾ sobre esse assunto inclui: problemas mecânicos da fratura dinâmica e estática não linear e linear, iniciação da trinca, abertura de trinca, extensão da trinca; determinação do tamanho da trinca; desvio da trinca; trincas múltiplas; trincas internas e superficiais; teste de tenacidade à fratura; fatores de intensidade de tensão; tensões residuais; trincas em solda; fratura antes do vazamento; predição de falha e etc... Mackerle⁽¹⁾ relata diversas aplicações de vasos e tubos de pressão em que essa abordagem é feita: tubos e vasos de pressão para reator nuclear, conexões de tubos, oleodutos submarinos e terrestres, tubulação de gás, vasos de pressão, cilindros, trocadores de calor, etc. Os materiais utilizados nessas estruturas são: aço ao carbono; aço inoxidável; aço de baixa liga; Zircaloy; polímeros; compósitos e cerâmicos.

Dentre os assuntos listados acima, este trabalho está relacionado com a abertura da trinca, trincas múltiplas; fatores de intensidade de tensão e trincas superficiais. O vaso de pressão em estudo é uma estrutura em casca cilíndrica (latas de alumínio 3004 de 66,5mm de diâmetro e 0,12mm de espessura). Então, a revisão bibliográfica abaixo aborda brevemente estes tópicos.

Lima-Filho *et al.*⁽²⁾ faz uma análise da falha das latas de alumínio 3004 sem entalhe. Através de equilíbrio de forças e aplicando o critério de escoamento de Tresca, obteve a pressão máxima ($p_{m\acute{a}x}$) e a tensão de falha $\sigma_1 = \sigma_t$ (tensão normal máxima de abertura da trinca Modo I), da seguinte forma:

$$p_{m\acute{a}x} = t_o \sigma_t e^{-n} / (\sqrt{3})^n r_o \cong p_{m\acute{a}x} = \frac{t_o \sigma_t}{r_o}, \quad (1)$$

onde n é o coeficiente de encruamento e aproximadamente igual a zero, uma vez que a deformação total no teste de tração não ultrapassou a 0,007 (Lima-Filho *et al.*⁽²⁾); σ_t resistência a tração da parede da lata; e t_o e r_o representam a espessura e o raio inicial da lata de alumínio respectivamente.

A Figura 1 mostra esquematicamente os modos de deformação para uma trinca os quais têm sido padronizados até hoje na literatura. Modo I, modo de abertura da trinca, refere-se à tensão de tração aplicada na direção y normal às faces da trinca. Esse é o modo usual para o teste de tenacidade à fratura, e um valor crítico de intensidade de tensões determinada para esse modo é designado por K_{IC} . Este é um critério de falha que prediz que a trinca de tamanho crítico se propagará quando um estado de tensão atuante em sua extremidade atingir algum valor crítico.

Evidentemente, as tensões na extremidade da trinca para levar a uma falha catastrófica são dependentes do material, isto é se o material tem ou não a capacidade de redistribuir o estado de tensão na ponta da trinca e assim minimizar a magnitude de tensão, por exemplo, através do movimento de discordâncias. Assim, K_{IC} é uma propriedade do material e é referida como a tenacidade à fratura do material.

Além da qualidade do material, o fator de intensidade de tensão estará sujeito a combinação de carregamento externo, configuração estrutural e geometria da trinca. Então, informações relacionadas sobre as propriedades dos materiais, análise de tensão (baseada no equilíbrio de forças), e caracterização precisa de defeitos através de técnicas de inspeção não destrutiva são importantes para uma análise quantitativa da mecânica da fratura.

Dessa forma, para uma configuração de carregamento e do valor de K_{IC} é possível calcular a tensão permissível máxima ou o tamanho do defeito que resultará na falha catastrófica de uma estrutura. Os valores de K_{IC} são determinados experimentalmente (ASTM E399-70T) para diversos materiais.

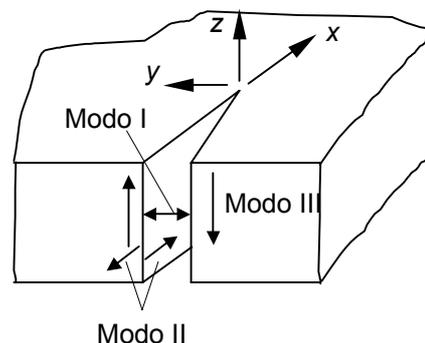


Figura 1. Modelos de deformação das trincas.⁽³⁾

O Modo II de deformação da trinca é raro. Entretanto, este tipo de carregamento poderia representar um movimento de uma discordância tipo aresta, considerando a trinca uma linha de discordância. Da mesma forma, o Modo III poderia representar um movimento de uma discordância tipo espiral. Por outro lado, o Modo III é a operação de processo de corte, por exemplo, matriz para corte e perfuração

progressivos (fabricação de *blanks* para estampagem ou cunhagem, arruela de parafusos), corte por tesoura, rasgamento de um pedaço de papel, abertura de uma lata de bebida, etc...⁽⁴⁾

O Modo I de carregamento é a situação mais importante, onde existem dois casos extremos. O primeiro com um corpo de prova do tipo placa fina (estrutura em casca-assunto deste trabalho) ocorre um estado plano de tensões ($\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_3 = 0$), enquanto que corpos de prova espessos têm uma condição de estado plano de deformações ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2, \varepsilon_3 = 0$; e $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), onde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as tensões principais e $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e ε_3 são as deformações principais.

A análise de trincas superficiais e perpendiculares à tensão máxima de tração (Modo I) numa estrutura cilíndrica está detalhada em diversos livros que tratam sobre este assunto. Por exemplo, Dieter⁽³⁾ mostra uma representação gráfica para este caso (Figura 2). Os dados importantes para o uso desse gráfico são os valores para “a”, “2c” e “Q” que são respectivamente a profundidade, o comprimento da trinca e um parâmetro de forma da trinca. A variação no valor de Q para a relação entre a tensão aplicada e a de escoamento (σ/σ_o) é o resultado de uma correção da zona plástica para o escoamento plástico na vizinhança da ponta da trinca e essencialmente permite a determinação do tamanho efetivo da trinca. A área de escoamento plástico é considerada uma porção da trinca.

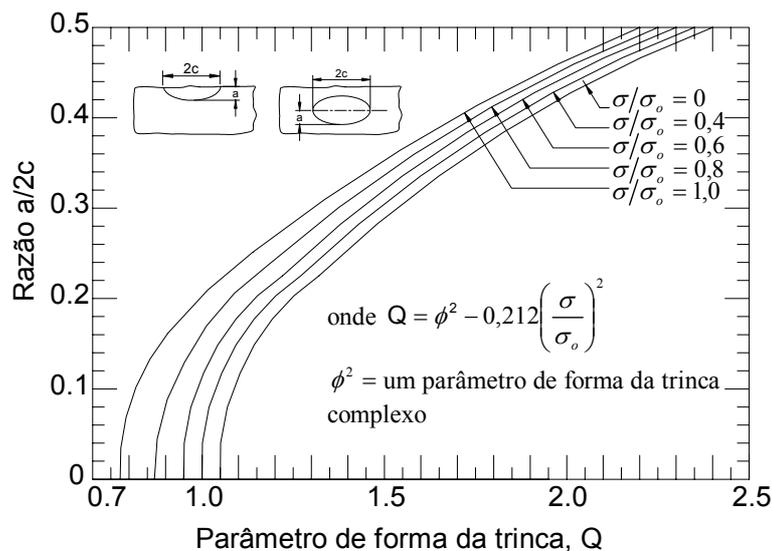


Figura 2. Curvas de parâmetro de forma da trinca para trincas elípticas superficiais e internas.⁽³⁾

Pela incorporação do parâmetro do fator de forma da trinca Q na expressão de intensidade de tensão apropriada (Equação 2 abaixo) para uma estrutura com trinca superficial, pode-se avaliar a influência da forma “Q” e tamanho da trinca “a” no comportamento de fratura. Para um valor maior da relação a/Q mais severo é a configuração de uma trinca particular.⁽⁵⁾

$$K_I^2 = 1,21\pi\sigma^2(a/Q) \quad (2)$$

Clark (5) relata os diferentes tipos de trincas simples posicionadas na superfície e no interior da estrutura para obter o mesmo efeito do comportamento de fratura, ou seja, a mesma tensão nominal para causar a falha de um dado material na presença desses defeitos (Figura 3). Nessa figura, observa-se que defeitos rasos e longos são mais severos do que defeitos curtos e profundos, e defeitos internos são menos severos do que os defeitos superficiais.

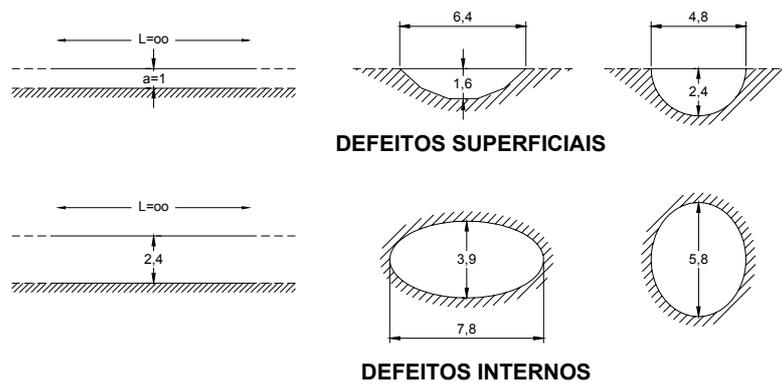


Figura 3. Geometria de trinca para efeito de tamanho de trinca equivalentes (trinca única), adaptado de Clark.⁽⁵⁾

Os conceitos da mecânica da fratura podem também ser usados para avaliar a severidade de configurações de defeitos múltiplos. A essência da técnica é avaliar a ampliação da intensidade de tensão entre defeitos causada pela interação das trinca. A partir do conhecimento dos efeitos da amplificação da intensidade de tensão, é possível determinar se as trinca adjacentes crescerão juntas de modo que elas devem ser consideradas como uma única trinca grande, ou se cada defeito pode ser analisado individualmente. A ampliação da intensidade de tensão entre trinca adjacentes depende primeiramente do tamanho da trinca e da sua distância de separação.⁽⁵⁾ Arranjo linear de diversas trinca produz uma maior amplificação da intensidade de tensão do que dois defeitos adjacentes de mesma relação distância e comprimento.⁽⁵⁾

A Figura 4 representa uma ilustração esquemática do tamanho da trinca e espaçamento de dois defeitos internos necessários para produzir um efeito de tamanho de trinca equivalente como uma trinca circular única, uma unidade de diâmetro ($D=1$). Note que quando as trinca em estudo são pequenas e próximas, elas devem ser avaliadas na base de um defeito único de uma geometria diferente (neste caso um defeito elíptico).

MATERIAL E MÉTODOS

Um aparato experimental foi construído para ensaiar estruturas em casca cilíndricas entalhadas submetidas à pressão hidrostática interna para estudar os conceitos da mecânica da fratura brevemente acima apresentados, Figura 5. Este é constituído por uma bomba manual de óleo de capacidade de 10000psi que injeta óleo hidráulico na temperatura ambiente, dentro das latas de alumínio entalhadas até a ruptura final. A pressão de falha é mostrada no manômetro Zurich de capacidade de 500psi.

Entalhes únicos com profundidade de 0,05mm e comprimento 4mm; 8mm; e 12mm foram feitos longitudinalmente a partir do centro das latas de alumínio 3004 de 66,5mm de diâmetro externo e 0,12mm de espessura aproximadamente. A parede da lata em estudo tem uma resistência a tração de 292MPa e a deformação na fratura não ultrapassa 0,007, Lima-Filho *et al.*⁽²⁾

Os entalhes foram feitos com uma ferramenta giratória a qual foi acionada pela máquina de fresa universal numa precisão de deslocamento horizontal de milésimo de milímetro, Figura 6a. Entalhes múltiplos de mesma profundidade e de comprimento de 4mm equidistantes de 3mm foram também feitos na estrutura para efeito de comparação, Figura 6b.

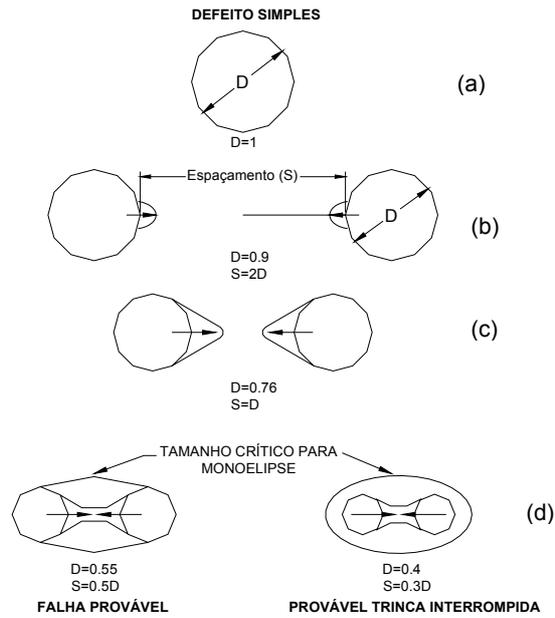


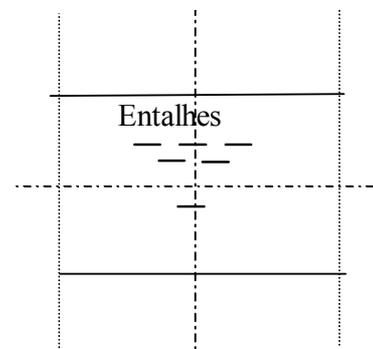
Figura 4. Geometria de defeito para efeitos de tamanho de trincas equivalente (interação de duas trincas internas).⁽⁵⁾



Figura 5. Aparato experimental para ensaio de vasos de pressão cilíndrico sujeito à pressão hidrostática interna.



(a)



(b)

Figura 6. Entalhe único sendo feito na estrutura em casca (a); Diagrama esquemático mostrando a distribuição dos entalhes único e múltiplo (b).

RESULTADO

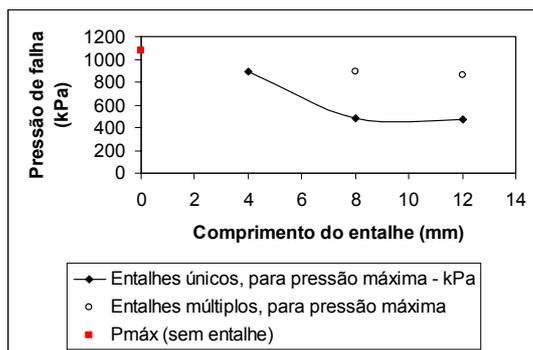
A Figura 7 mostra a ruptura do vaso de pressão com entalhes únicos e múltiplos. Praticamente não houve variação em relação à forma de falha que sempre ocorreu longitudinalmente ao vaso de pressão. Isto é explicado porque a tensão circunferencial é duas vezes superior a tensão longitudinal ($\sigma_1 = 2\sigma_2$) responsável pela abertura da trinca Modo I.



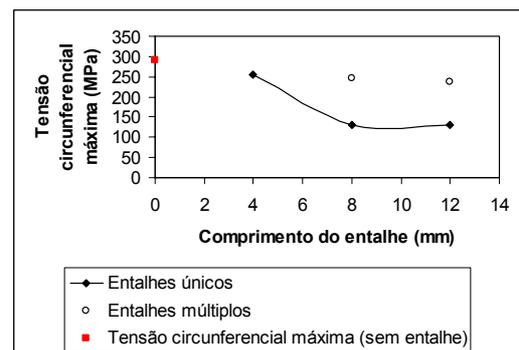
Figura 7. Perfil de fratura do vaso de pressão com trinca única (primeira lata à esquerda) e múltiplo (a lata do meio e a da direita com duas e três trincas adjacentes respectivamente).

A pressão hidrostática interna ($p_{m\acute{a}x}$) e a tensão circunferencial máxima ($\sigma_{1m\acute{a}x}$) obtida da Equação 1 do vaso de pressão em estudo sem entalhe são respectivamente 1074kPa e 292MPa, Lima-Filho *et al.*(2)

As Figura 8 (a) e (b) comparam os valores da pressão máxima e tensão circunferencial máxima calculada de acordo com Tresca para estruturas cilíndricas com entalhes único e múltiplo. A partir de entalhes duplos, como descrito acima, tanto a pressão hidrostática quanto a tensão circunferencial máxima tende a um valor constante acima dos entalhes únicos. A partir do comprimento do entalhe único de 8mm não ocorre mudança sensível nas tensões de falha da estrutura.



(a)



(b)

Figura 8. Perfil da pressão máxima ($p_{m\acute{a}x}$) (a); e da tensão circunferencial máxima ($\sigma_{1m\acute{a}x} = \sigma$) para entalhes únicos e múltiplos (b).

DISCUSSÃO

A Equação 1 calcula a maior tensão (tensão circunferencial) para o vaso de pressão de parede fina sem defeito superficial, isto explica a forma de falha das latas como mostrada na Figura 7 sob pressão hidrostática interna, como já mencionado na seção anterior. Para as estruturas em casca que apresentam trincas superficiais longitudinais a pressão de falha e a tensão circunferencial (tensão de projeto $\sigma_1 = \sigma$) naturalmente vão diminuindo com o aumento do comprimento da trinca. Isto está de acordo com a Equação 2 da mecânica da fratura.

Na literatura pesquisada (*ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1990*) não foi encontrado o valor de K_{IC} referente a condição do material das latas de alumínio 3004 para análise da mecânica da fratura neste trabalho. Entretanto, Equação 2 é uma expressão de intensidade de tensão a qual relaciona a tensão aplicada, propriedades do material (K_{IC}) e tamanho de trinca para a análise da estrutura em estudo com trincas superficiais. Figura 8 acima apresenta os dados necessários para dar continuidade a esta investigação.

Considerando $K_I = K_{IC}$ na Equação 2, obtém-se a seguinte expressão para K_{IC} :

$$K_{IC} = \frac{1,21\pi\sigma^2 a_{cr}}{Q} \quad (3)$$

Pela substituição dos termos da Equação 3 e considerando a superfície da trinca semi-elíptica como orientada na Figura 6, o valor de K_{IC} pode ser calculado (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de K_{IC} calculado pela Equação 3.

Comprimento da trinca 2c, mm.	a/2c (10^{-3})	σ/σ_o	Q	K_{IC} ($MPam^{1/2}$)
4	12,5	0,9	0,15	91
8	6,3	0,4	0,95	23
12	4,2	0,4	0,95	28

Como a estrutura cilíndrica em casca (latas de alumínio 3004 em estudo) não se deforma uniformemente como demonstrado por Lima-Filho *et al.* (2), trincas de comprimento menores de 4mm acabam sendo envolvida por um campo de tensão de compressão longitudinal (Figura 9a) o qual as protegem criando uma forma elíptica com seu eixo focal paralelo a tensão máxima (σ_1); e a Equação 3 não se aplica neste caso, vide Figura 2. Isto explica o alto valor para K_{IC} obtido para trincas de 4mm, similar ao do aço Maraging, Dieter (3). Por outro lado, se a expansão da trinca toma a forma da Figura 9b, o valor de K_{IC} para este material está bem próximo dos valores obtidos para as ligas de alumínio (por exemplo, 2024-T3 e 7075-T6 com valores de K_{IC} igual a 26 e 24 $MPam^{1/2}$ respectivamente⁽³⁾), e assim a Equação 3 pode ser usada para estimar o valor da tenacidade a fratura deste material para o ensaio proposto.

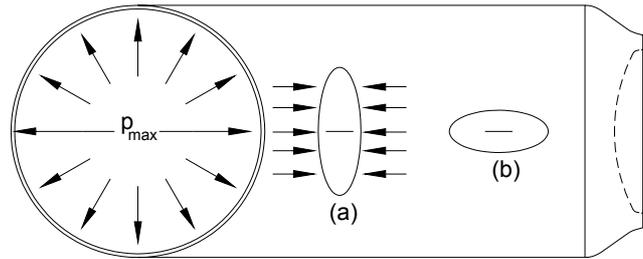


Figura 9. Efeito da concentração de tensão de acordo com o tamanho da trinca na estrutura em casca cilíndrica. O material redistribui a tensão pela deformação de compressão longitudinal criando um escudo ondulado (ruga) para trinca menor de 4mm (a); e acima de 8 mm este campo de tensão não é tão intenso e a trinca está livre para tomar o efeito tipo elipse longitudinal (b).

A Figura 8 mostra que os entalhes múltiplos não se agruparam para formar um único entalhe com espaçamento entre eles de 3 mm. Isto mostra que a intensidade de tensão entre eles não excedeu o valor de K_{IC} do material (Tabela 1). Assim, conclui-se que os defeitos múltiplos como dispostos não se agruparão para formar um defeito único, sofrendo provável perturbação como mostrado na Figura 4b e c. De fato, eles comportaram como um defeito único de comprimento de 4mm como anteriormente discutido.

CONCLUSÃO

O valor de K_{IC} para trincas menores de 4mm não pode ser estimado pela Equação 3 devido ao escudo ondulado formado pela tensão de compressão contra a raiz da trinca. Assim, uma expressão de intensidade de tensão adequada a qual descreve a relação entre esses fatores para essa estrutura em estudo deve ser investigada.

A intensidade de tensão associada entre as trincas adjacentes (entalhes múltiplos) não excedeu a tenacidade à fratura do material (K_{IC}) calculado para trinca única acima de 8mm de comprimento. Assim, pode-se concluir que estes entalhes não somaram para formar uma só trinca. A partir daí, deve-se estudar qual seria a distância mínima entre os defeitos múltiplos para se agruparem e atingir um tamanho crítico para causar a falha da estrutura a uma tensão menor em relação aos entalhes únicos de comprimento de 4mm.

Obviamente, a discussão precedente da caracterização do defeito é muito simplificada. Raramente os defeitos reais existem na forma geométrica simples como ilustrada acima. Entretanto, os conceitos da mecânica da fratura associados com a avaliação da caracterização dos defeitos foram empregados e revelaram ser de valia como uma base para fazer julgamentos em engenharia que utilizam este tipo de estrutura.

Agradecimento

Ao Prof. Del Rio pelas fotografias e filmagens digitais. Aos técnicos da Oficina Mecânica do DEM, Sr. Darcy pelo apoio durante a confecção dos entalhes. A Sr.^a Érika do DEM que gentilmente desenhou as figuras usadas neste trabalho. Ao Sr. Marcelo (empresa ACRÉVEA Prod. de Borracha) pelos anéis de borracha utilizados neste trabalho. Ao meu amigo Niel pela revisão do *abstract*.

REFERÊNCIAS

- 1 MACKERLE, J. Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping an addendum (1996-1998). **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 76, p. 461-485. 1999.
- 2 LIMA-FILHO A.d.P., HERNANDES, T.B., BARRETO JUNIOR, E., DEL RIO VIEIRA, E. Estudo da instabilidade plástica em vaso de pressão cilíndrico de parede fina e bobinagem dessas estruturas por fibras metálicas e carbono em matriz epóxi para ensaio hidrostático. Submetido ao **61º Congresso Anual da ABM**. 2006.
- 3 DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**: SI Metric Edition. London. McGraw-Hill, 1988.
- 4 KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**. Third Edition. Addison-Wesley, 1997.
- 5 CLARK JR., W.G. Fracture Mechanics and nondestructive testing of brittle materials. **Journal of Engineering for Industry**, p. 291-297, February 1972.