

APLICAÇÃO DA MECÂNICA DA FRATURA À ANÁLISE DE TUBULAÇÕES NUCLEARES

Julio Ricardo Barreto Cruz
IPEN / COPESP
Carlos Tasso Eira de Aquino
COPESP
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242
Cidade Universitária - São Paulo, SP

RESUMO

Uma das mais importantes aplicações da Mecânica da Fratura na indústria nuclear é a tecnologia de LBB ("Leak-Before-Break"). O presente trabalho discute a aplicação dessa tecnologia à análise de tubulações. Primeiramente, é introduzido o conceito de LBB, apontando-se as principais áreas de atuação da Mecânica da Fratura dentro desta tecnologia. Em seguida, é feita uma apresentação geral da metodologia de LBB, discutindo-se com mais detalhe a etapa de verificação da estabilidade de uma trinca postulada para projeto. Dois métodos de análise de estabilidade são apresentados: diagrama DPFAD e análise J-T.

INTRODUÇÃO

Por exigência dos órgãos reguladores da atividade nuclear, desde 1973 os critérios de projeto para tubulações de alta energia (temperatura $> 93^{\circ}\text{C}$ e/ou pressão $> 1,9\text{ MPa}$) baseiam-se na hipótese de ocorrência de uma ruptura súbita de tubulação (DEGB - "Double-Ended Guillotine Break"). A proteção da central nuclear contra os efeitos dinâmicos de um DEGB hipotético requer a utilização de dispositivos tais como "pipe whip restraints" (para restringir o chicoteamento da tubulação) e "jet impingement shields" (barreiras contra jatos de fluido). A instalação de tais dispositivos por si só tem consequências negativas em relação à segurança, por causa da redução de acesso para inspeções em serviço e aumento da exposição de pessoas à radiação por ocasião das inspeções em serviço.

Na última década, várias avaliações experimentais e analíticas mostraram que a probabilidade de ocorrência de um DEGB na maioria das tubulações nucleares de alta energia é extremamente baixa. Como essas tubulações são fabricadas com aços inoxidáveis ou ferríticos de alta tenacidade e são resistentes ao crescimento instável de defeitos, uma trinca na tubulação deve causar um vazamento numa quantidade considerável antes que possa ocorrer um crescimento da mesma que leve a uma ruptura catastrófica da tubulação. Este é o conceito de LBB [1, 2]. Portanto, se uma análise conservadora mostrar que esse vazamento pode ser detectado e reparado antes que uma ruptura súbita aconteça, os órgãos reguladores dispensam a postulação de um DEGB hipotético e a consideração dos seus efeitos dinâmicos. Como consequência, os dispositivos de proteção mencionados no parágrafo anterior podem ser removidos, trazendo um benefício imediato em termos de segurança e economia.

A Mecânica da Fratura tem 3 aplicações distintas na tecnologia de LBB [3]:

- Previsão de crescimento da trinca (taxa e morfologia)
- Cálculo do deslocamento de abertura da trinca através da espessura da tubulação (de modo a se avaliar a taxa de vazamento)
- Análise de estabilidade da trinca

O trabalho em questão concentra-se na apresentação e discussão de 2 métodos de análise de estabilidade de trincas, o DPFAD e o método J-T.

VISÃO GERAL DA METODOLOGIA DE LBB

São apresentadas a seguir as etapas necessárias para a implantação da metodologia de LBB a tubulações de plantas nucleares [1,2,4]. O primeiro passo é uma triagem ("screening") entre as tubulações

candidatas à aplicação de LBB, com a eliminação daquelas sujeitas a condições que dificultam a avaliação precisa de falhas e carregamentos, tais como:

- tubulações submetidas a cargas excessivas ou incomuns ou sujeitas a mecanismos de degradação de difícil quantificação (golpe de ariete, corrosão, erosão, "creep", fratura frágil, envelhecimento térmico e fadiga), que não tenham sido considerados por ocasião de seu projeto.
- tubulações sujeitas a degradação ou falha por causas indiretas (incêndios, misseis, falhas de equipamentos, sistemas e componentes nas suas proximidades).

Uma vez selecionadas as linhas passíveis de aplicação da metodologia de LBB, passa-se a uma fase de coleta de dados necessários à análise de Mecânica da Fratura, tais como as propriedades do material constituinte da tubulação e das soldas nela existentes (com seu tipo e localização bem definidos), os carregamentos considerados no projeto e a capacidade de detecção de vazamentos específica da central nuclear em estudo.

O terceiro passo consiste na determinação do tamanho do defeito associado a uma taxa de vazamento detectável, LSC ("Leakage Size Crack"). Para tal deve-se identificar na tubulação (tanto para o metal base quanto para as soldas) o local com a combinação mais desfavorável de tensões e propriedades materiais. A escolha deste local é função da tensão máxima obtida considerando-se as condições de operação normal em combinação com as condições de carregamento sísmico. O valor da tensão de operação normal nesta posição é então utilizado na determinação do LSC. Aplicando-se os conceitos da MFEP (Mecânica da Fratura Elasto-Plástica) para determinação da área de abertura da trinca e a Mecânica dos Fluidos para cálculo de vazão através dessa trinca, é possível definir uma curva que relaciona a taxa de vazamento com diferentes tamanhos de trinca. A partir daí, e conhecendo-se a capacidade do sistema de monitoração de vazamentos da planta em questão, determina-se o LSC. Como existem incertezas nessa análise, o NUREG 1061 [5] estabelece que uma margem de 10 na detecção do vazamento deve ser utilizada, de modo a se obter um certo conservadorismo.

O passo final é, uma vez definido o comprimento de trinca capaz de produzir um vazamento que possa ser detectado pelo sistema de monitoração da planta, verificar se há possibilidade de ocorrer propagação instável da mesma, de modo a provocar a ruptura súbita e total do tubo (DEGB). Neste cálculo são considerados os valores de tensão devidos à operação normal da planta mais aqueles oriundos da aplicação de carregamento sísmico SSE ("Safe Shutdown Earthquake").

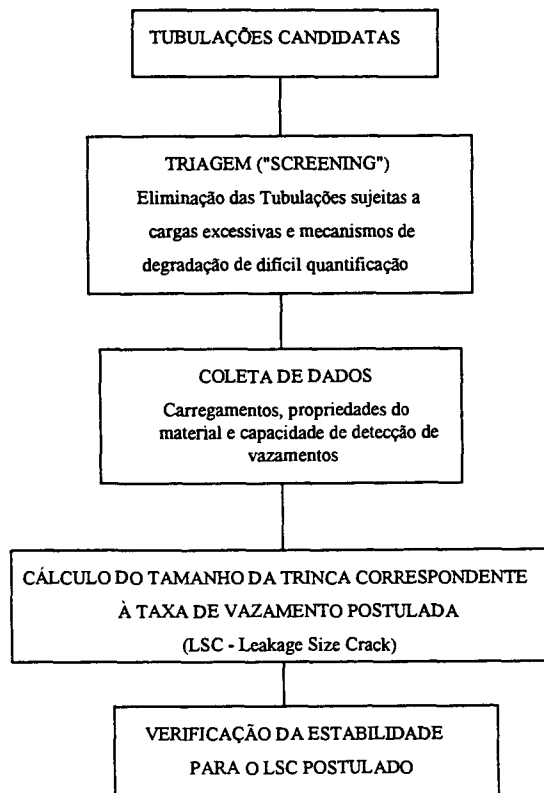


Figura 1 - Fluxograma de uma análise de LBB em tubulações nucleares

Esta etapa, denominada análise de estabilidade da trinca é baseada ou no método modificado da carga limite, que envolve conceitos de colapso plástico da seção sendo analisada, ou na MFEP, aquele que for o mais apropriado. Utilizando-se a MFEP, duas metodologias são disponíveis para a verificação da estabilidade: o método J-T (Integral-J, módulo de rasgamento T) e o método DPFAD ("Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram"). Esses dois métodos serão descritos em detalhe a seguir.

A figura 1 consolida em forma gráfica os diversos passos de uma análise típica de LBB.

DPFAD ("DEFORMATION PLASTICITY FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM")

O diagrama mostrado na figura 2 consiste de uma curva DPFAD e de um conjunto de pontos para avaliação. No referido diagrama, a ordenada K_r é o fator de intensidade de tensões elástico normalizado pela força motriz da trinca, enquanto a abscissa S_r é a tensão aplicada normalizada pela tensão de referência (uma medida do limite plástico da estrutura trincada). Para uma dada resistência do material e uma certa configuração de trinca, a teoria prevê uma relação entre a força motriz da trinca e a plasticidade que, quando plotada, fornece uma curva limite, a curva DPFAD, que separa as regiões de estabilidade e instabilidade da trinca.

A verificação de estabilidade é feita plotando-se pontos de avaliação ("assessment points") no diagrama (ver figura 2). As ordenadas dos pontos de avaliação são valores do fator de intensidade elástico normalizados pela tenacidade à fratura e as abscissas são valores de tensão aplicada normalizados pela tensão de referência. Os pontos obtidos formam uma curva apelidada de "candy cane", devido ao seu formato característico. Pontos acima da curva DPFAD indicam instabilidade. A determinação da carga no ponto de instabilidade é facilitada pela variação linear dos valores da ordenada e da abscissa com o carregamento.

Os procedimentos para geração da curva DPFAD, obtenção dos pontos de avaliação e previsão das cargas de iniciação e de instabilidade da trinca são detalhados a seguir [4,6].

Para obtenção das ordenadas da citada curva, K_r , trabalha-se com valores da integral J, que pode ser descrita em termos da soma das parcelas elástica J_1^e e plástica J^p , conforme mostrado na equação (1):

$$J = J_1^e + J^p(a, p, P, M, \alpha, n) \quad (1)$$

onde a é o tamanho corrente da trinca $a_0 + \Delta a$, P é a força axial, M é o momento fletor e p , a pressão. As constantes de encruamento do material, que descrevem a curva tensão-deformação real são α e n . A parte elástica de J é uma função de P , M e p , da seguinte forma:

$$J_1^e = [K_1(a_e, P, R/t)]^2 / E' + [K_1(a_e, M, R/t)]^2 / E' + [K_1(a_e, p, R/t)]^2 / E' \quad (2)$$

onde K_1 é o fator de intensidade de tensão, a_e é o comprimento efetivo da trinca, que inclui uma correção plástica baseada em P , M e p , R é o raio médio do tubo e t o valor da espessura do mesmo. O valor de E' é igual a E , módulo de Young do material, para o caso de tensão plana, enquanto que para deformação plana, assume o valor igual a $E/(1-\nu^2)$. A ordenada K_r da curva DPFAD é obtida normalizando-se o valor de J , obtido a partir da equação (1), pelo de J_1^e da equação (2), conforme mostrado a seguir:

$$K_r = \left(\frac{J_1^e}{J} \right)^{0.5} \quad (3)$$

Desenvolvendo-se a equação acima, chega-se a uma expressão para K_r como função de S_r , a abscissa da curva DPFAD, definida por:

$$S_r = \frac{\sigma(a)}{\sigma_L(a)} \quad (4)$$

onde σ é a tensão arbitrária e σ_L é a tensão de referência, que é uma medida do limite plástico da estrutura trincada. Os valores de σ e σ_L são: (1) a tensão axial, para trincas circunferenciais sujeitas à tração pura; (2) a tensão de flexão para trincas circunferenciais sob flexão pura; (3) a tensão circunferencial ("hoop stress") para trincas axiais em cilindros pressurizados. Para trincas circunferenciais sujeitas a carregamentos axiais e de flexão combinados, σ é a tensão na direção axial.

Para gerar a curva DPFAD, varia-se S_r de zero até um valor máximo de (σ_u / σ_o) , onde σ_u é a tensão de ruptura à tração e σ_o a tensão de escoamento. Este limite é responsável pelo trecho vertical da curva DPFAD, conforme mostrado no canto inferior direito da figura 2.

K_r e S_r , obtidos nas equações (3) e (4), definem uma curva que é função da geometria inicial da trinca, da configuração estrutural e da curva tensão-deformação real do material de interesse. Esta curva DPFAD, em termos de (K_r, S_r) é independente da magnitude da carga aplicada, e é única para a estrutura trincada em consideração.

Para se determinar a carga de instabilidade da estrutura trincada, pontos de avaliação devem ser plotados no diagrama DPFAD. Esses pontos de avaliação são denotados por (K_r', S_r') para diferenciá-los das coordenadas (K_r, S_r) da curva DPFAD. Para crescimento estável da trinca, K_r' e S_r' são definidos pelas equações (5) e (6) a seguir:

$$K_r' = \left[\frac{J_I^c(a_o + \Delta a)}{J_R(\Delta a)} \right]^{0.5} \quad (5)$$

$$S_r' = \frac{N}{N_o(a_o + \Delta a)} \quad (6)$$

onde J_I^c , J_R e N_o são todas funções do crescimento da trinca; a_o é o tamanho inicial da trinca, Δa a extensão da trinca e J_R , o J do material para uma determinada extensão de trinca Δa . A carga de referência N_o é uma função do tamanho corrente da trinca ($a_o + \Delta a$). Para trincas axiais, N é a pressão aplicada, enquanto que para trincas circunferenciais sujeitas à flexão é o momento aplicado. Para trincas circunferenciais tanto submetidas a carregamento axial puro como para aquelas sujeitas a esforços combinados axiais e de flexão, N assume o valor da força axial aplicada. Uma curva típica definida pelos pontos de avaliação é incluída na figura 2.

No instante em que a trinca começa a crescer, $J = J_{Ic}$ e as equações (3) e (4) definem o limite entre nenhum crescimento e crescimento estável da trinca. No estágio em que existe crescimento estável da trinca, $J = J_R$ e, portanto:

$$K_r' = K_r \text{ e } S_r' = S_r$$

A curva definida pelas equações (3) e (4) torna-se a trajetória real de crescimento estável de trinca no plano (K_r, S_r) . Se $J > J_R$, ocorre instabilidade e a trajetória de crescimento de trinca vai para fora da região limitada pela curva DPFAD.

Uma vez gerada a curva DPFAD e definidos os pontos de avaliação, as margens para as cargas de iniciação e de instabilidade podem ser determinadas. Essa tarefa é facilitada pela relação linear existente entre os valores de abscissa (S_r) e ordenada (K_r) com o carregamento. Uma linha de carregamento, mostrada na figura 2, é traçada a partir da origem dos eixos coordenados, passando por um ponto de avaliação apropriado e cruzando a curva DPFAD. Para a iniciação, o ponto de avaliação apropriado é determinado para $J = J_{Ic}$. Para a instabilidade, tal ponto é aquele para o qual a tangente à curva de avaliação é paralela à tangente à curva DPFAD.

As margens são baseadas nas distâncias definidas entre esses pontos e a curva DPFAD. A figura 2 mostra um exemplo onde a margem de instabilidade é definida pela razão b/a . Quando este quociente é maior que 1 (pontos internos da região determinada pela curva DPFAD) a trinca é estável. Quando a razão é igual a um, uma trinca de tamanho crítico existe. Finalmente, quando a razão é menor que 1, a situação é de instabilidade.

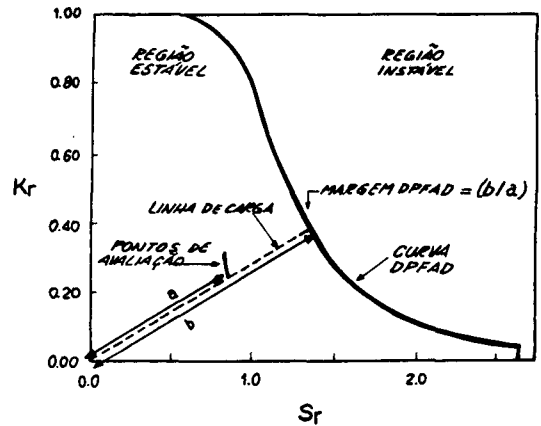


Figura 2 - Regiões de crescimento estável e instável de trinca no diagrama DPFAD

ANÁLISE J-T

Este procedimento envolve a plotagem de duas curvas no espaço J-T, onde J é a integral J e T o módulo de rasgamento ("Tearing Modulus"). A primeira delas é a curva J-T de resistência do material e a outra é uma curva de J aplicado versus T , para o comprimento inicial da trinca, como uma função do carregamento atuante. O ponto de intersecção entre essas duas curvas no espaço J-T corresponde ao ponto de instabilidade e permite a obtenção do valor de J na instabilidade, J_{inst} (ver figura 3). A carga de instabilidade associada é então determinada a partir de uma curva de J versus o carregamento, conforme mostrado na figura 4. A seguir é apresentado em mais detalhe o método de análise J-T [6].

A derivada da curva de resistência à fratura do material J_R , quando multiplicada pelo módulo de elasticidade E e dividida pela tensão "flow stress" elevada ao quadrado, define o módulo de rasgamento do material, que é uma função da extensão da trinca Δa , conforme mostrado a seguir:

$$T_{material} = \frac{E}{\sigma_f^2} \cdot \frac{dJ_R}{da} \quad (7)$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2} \quad (8)$$

Esta curva pode ser plotada no espaço J-T, definindo a curva de resistência do material.

Utilizando a equação (1), o J aplicado pode ser calculado como uma função do carregamento e, então, diferenciado numericamente para obter o T aplicado. Se o crescimento de trinca for desprezado, ao se plotar esta curva no espaço J-T ela se tornará uma linha reta, que poderá ser definida conectando-se a origem a um único ponto no espaço J-T. Para determinar esta linha de carregamento, calcula-se J duas vezes, primeiramente para o comprimento inicial da trinca e, em seguida, considerando-se uma pequena extensão da trinca (por exemplo 0.001 polegadas) para determinar Δa e ΔJ . Desta forma, o ponto A da curva 3 pode ser calculado a partir da expressão:

$$T_{\text{aplicado}} = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{\Delta J}{\Delta a} \quad (9)$$

A curva J-T aplicada é a linha que parte da origem, passa por A e intercepta a curva J-T do material. Este ponto de intersecção fornece o valor de J instável (J_{inst}) e o comprimento de trinca instável.

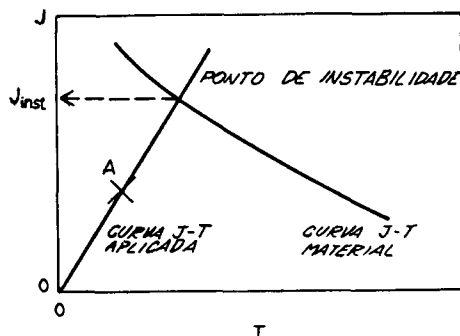


Figura 3 - Determinação do ponto de instabilidade da trinca pelo método J-T

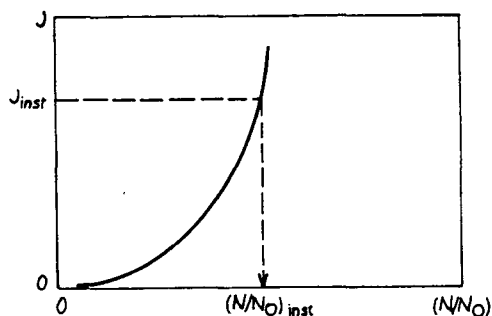


Figura 4 - Determinação da carga de instabilidade pelo método J-T

Uma vez determinado o valor de J_{inst} , a carga de instabilidade associada pode ser obtida a partir da curva de J versus carga normalizada. Este procedimento é mostrado nas figuras 3 e 4.

A carga de instabilidade N_{inst} é calculada a partir do valor de $(N/N_0)_{\text{inst}}$ da figura 4, de acordo com a equação (10) mostrada a seguir, para levar em conta o crescimento da trinca.

$$N_{\text{inst}} = (N/N_0)_{\text{inst}} \cdot N_0 (a_0 + \Delta a) \quad (10)$$

É importante esclarecer que Δa é obtido da curva J_R para $J = J_{\text{inst}}$. A carga de iniciação da trinca é determinada de forma semelhante, tomando-se $J = J_{\text{ic}}$.

CONCLUSÃO

No trabalho em questão foi feita uma breve apresentação das várias etapas envolvidas na metodologia de LBB, concentrando-se nos métodos de análise de estabilidade de trinca baseados na Mecânica da Fratura Elasto Plástica (MFEP). Foram descritos os métodos J-T e DPFAD, detalhando-se os procedimentos para o traçado das curvas necessárias e para a determinação das cargas de início de propagação e de instabilidade da trinca.

Apesar de não terem sido apresentados exemplos ilustrativos, de acordo com a ref.[4], os dois métodos fornecem aproximadamente os mesmos resultados para uma determinada análise, com similar grau de esforço dispendido. Fica portanto a critério do engenheiro a escolha do método a ser usado em uma análise de LBB, em função de sua maior familiaridade com um ou outro procedimento.

REFERÊNCIAS

- [1] B.F. Beaudoin, D.F. Quiñones e T.C. Hardin, **Leak-Before-Break Application in US Light Water Reactor Balance-of-Plant Piping**, Int. J. Press. Ves. & Piping 43 (1990) pp. 67-83.
- [2] EPRI, NSAC/114, **Applying Leak-Before-Break to High Energy Piping**, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Novembro 1987.
- [3] EPRI, NP-5792-SR, Revision 1, **Primer: Fracture Mechanics in the Nuclear Power Industry**, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Maio 1991.
- [4] Notas de aula do curso **A Specialized Course in Leak-Before-Break (LBB) for Piping and Pressure Vessels**, apresentado pela Robert L. Cloud and Associates, na USP, Julho de 1992.
- [5] NRC, NUREG 1061 volume 3, **Evaluation of Potential for Pipe Breaks**, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Março de 1984.
- [6] EPRI, NP-2431, **Research Project 1237-2, Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects**, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Junho 1982.

ABSTRACT

LBB (Leak-Before-Break) is one of the most important applications of Fracture Mechanics in the nuclear industry. This paper discusses its usage to piping analysis, introducing LBB concept and pointing out the main aspects of Fracture Mechanics related to this technology. Furthermore, a general presentation of LBB methodology is included, focusing its attention on 2 methods of crack stability assessment, named DPFAD and J-T analysis.