



8º SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE
TUBULAÇÕES E VASOS DE PRESSÃO
E
2º SIMPÓSIO LATINO AMERICANO
SOBRE TUBULAÇÕES E VASOS DE PRESSÃO

IPEN-DOE
5776

ABCM

Gramado, RS, Brasil
25 a 28 de setembro de 1994

CTVP

AVALIAÇÃO DA INSTABILIDADE DE TRINCAS PARA APLICAÇÃO DOS
CONCEITOS DE VAZAMENTO-ANTES-DA-RUPTURA EM TUBULAÇÕES

Miguel Mattar Neto

José Eduardo A. Maneschy

Petrus Gorgônio B. da Nóbrega

COPESP - IPEN-CNEN/SP

COPESP - FURNAS

COPESP - EMGEPRON

COPESP - Coordenadoria para Projetos Especiais
Av. Prof. Lineu Prestes 2242
Cidade Universitária
São Paulo - SP 05508-900

SUMÁRIO

A avaliação da instabilidade, dentro do conceito de Vazamento-Antes-da-Ruptura ("Leak-Before-Break" - LBB), é uma metodologia comumente usada para verificar a integridade de tubulações em centrais nucleares. Se o material possui alta ductilidade, a avaliação da instabilidade pode ser realizada usando métodos simplificados, tais como o método da carga limite, carga limite modificada, e tensão de fluxo localizada. Este trabalho apresenta uma síntese das formulações destas metodologias simplificadas, e uma comparação entre tamanhos críticos de trinca obtidos experimentalmente, disponíveis na literatura, com os calculados por elas. São indicadas também, para comparação, as curvas relacionando tensão atuante com tamanho crítico de trinca, obtidos com estes métodos.

SUMMARY

Instability evaluation, like Leak-Before-Break (LBB) concept, is an approach commonly used to verify the integrity of piping in nuclear power plants all over the world. If the material has enough ductility, the instability evaluation can be performed using the Limit Load, Modified Limit Load, or Local Flow Stress methods. This paper presents a summary of those methodologies and a comparison between the critical crack size lengths obtained by the formulations and experimental data. Moreover, their curves showing the relationship between the stress and the circumferential crack length are presented for comparison.

1. Introdução

O critério vazamento-antes-da-ruptura ("Leak-Before-Break" - LBB) pode ser empregado para eliminar a ruptura tipo guilhotina, postulada em tubulações de centrais nucleares de potência. Se aplicados com êxito, os critérios de LBB permitem a retirada dos suportes previstos para evitar os efeitos de chicoteamento de tubulações de alta-energia, os "pipe-whip restraints".

A remoção, ou não instalação, de tais suportes é bastante desejável porque aumentando o espaço disponível, permite a redução do tempo de exposição dos trabalhadores destas centrais nucleares, reduzindo, ainda, os custos de construção e manutenção.

A avaliação da estabilidade de trinças nos sistemas de tubulações é uma etapa essencial para a aplicação dos conceitos de LBB em sistemas nucleares de alta energia (temperatura e pressão acima de 70 °C e 20 bar, respectivamente).

Pode-se empregar diferentes abordagens a fim de se verificar a possibilidade de propagação instável de defeitos, por exemplo, a mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP), os métodos da carga limite e os da tensão de fluxo localizada.

No campo da MFEP existem duas metodologias: diagrama de avaliação de falha por deformação plástica ("Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram" - DPFAD) e análise J-T. Para usá-las, entretanto, dois aspectos necessitam ser avaliados. Primeiro, suas formulações não são simples; segundo, é necessário conhecer as propriedades mecânicas associadas à fratura dos materiais nas temperaturas de operação. Estas propriedades não estão facilmente disponíveis na literatura, podendo ser obtidas por testes ou, caso possível, por consulta a banco de dados da indústria [1].

Nos casos em que o material tem alta ductilidade e o escoamento de toda a seção transversal do tubo ocorre antes do crescimento da trinca, podem ser empregados o método da carga limite e o da tensão de fluxo localizada. Nestes casos, as formulações são mais simples, e a caracterização da instabilidade é baseada apenas nas propriedades dos ensaios de tração simples, disponíveis amplamente na literatura, por exemplo na norma ASME [2].

Estas metodologias mais simples têm sido empregadas para a aplicação dos conceitos de LBB em centrais nucleares de potência. Na Alemanha, a empresa SIEMENS/KWU utiliza os métodos da carga limite ("Limit Load" - LL) e da tensão de fluxo localizada ("Local Flow Stress" - LFS) [3] e [4], enquanto que nos Estados Unidos o método da carga limite modificada ("Modified Limit Load" - MLL) é aplicado [5].

Neste trabalho admite-se que os materiais tenham ductilidade suficiente para permitir a aplicação das metodologias mais simples acima mencionadas. Apresentar-se-ão avaliações da instabilidade de trinças passantes circunferenciais, visando obter os gráficos (curvas) que relacionam as dimensões dessas trinças com as tensões atuantes no tubo. Serão feitas, ainda, algumas considerações após a comparação dos resultados analíticos com resultados experimentais disponíveis na literatura [6].

2. Descrição das Metodologias Empregadas

A metodologia da carga limite (LL), apresentada em [3], [4] e [6] é empregada para avaliação da instabilidade de trinca circunferencial passante em um tubo. Ela parte da hipótese de que há formação de uma zona plástica na ponta da trinca, e o carregamento externo produz um aumento desta zona plástica até o nível da formação de uma rótula plástica na seção transversal.

Este método possui ainda uma variação, denominada método da carga limite modificada (MLL), exposta em [5], alterando a formulação original para que sejam levados em conta os efeitos da localização do defeito (metal base, tipo da solda) e o modo de combinação dos carregamentos.

A metodologia da tensão de fluxo localizada (LFS), apresentada em [3] e [4], prevê que o crescimento estável de uma trinca circunferencial passante em um tubo ocorre quando a tensão efetiva no ponto se torna igual a um valor de tensão denominado "tensão de fluxo".

De uma forma geral estas metodologias podem ser resumidas na seguinte expressão:

$$k_1 \sigma_{axial} + k_2 \sigma_{flexão1} + k_3 \sigma_{flexão2} \leq k_4 \sigma_f$$

onde:

σ_{axial} é a tensão axial causada pela pressão interna e pelos carregamentos externos

$\sigma_{flexão1}$ é a tensão de flexão causada pelas cargas axiais e assimetria do eixo neutro na seção trincada;

$\sigma_{flexão2}$ é a tensão de flexão causada pelo carregamento externo M_{ext} ;

σ_f é a tensão de fluxo;

k_1, k_2, k_3 são fatores que dependem da geometria da trinca e do modo de falha, e que variam conforme o método;

k_4 é um fator de segurança que se quer empregar para majorar a tensão de fluxo;

A partir das formulações destes três métodos (LFS, MLL e LL), foram elaborados pequenos programas computacionais para gerar curvas limites que relacionam tensão atuante com comprimento de trinca passante circunferencial crítico. Este comprimento é dado por $2\theta R$, de acordo com ilustração de um tubo trincado feita na figura 1.

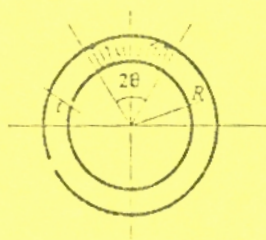


Figura 1. Tubo trincado circunferencialmente

3. Resultados

Para que se pudesse avaliar os resultados obtidos com as metodologias de cálculo mencionadas (LFS, MLL e LL) foram utilizados os resultados experimentais apresentados em [6]. As propriedades materiais e geométricas dos tubos estão apresentadas na tabela 1. σ_y é a tensão de escoamento e σ_r é a tensão de ruptura do material escolhido, aço austenítico SA TP 304. O carregamento aplicado consiste apenas de um momento fletor (flexão pura).

Tabela 1. Propriedades geométricas e materiais e carregamento aplicado

| DN (in) | D _o (mm) | t (mm) | σ_y (MPa) | σ_r (MPa) | Momento (kNm) |
|---------|---------------------|--------|------------------|------------------|---------------|
| 2 | 60.3 | 6.0 | 251 | 603 | 3,386 |
| 4 | 114.5 | 8.9 | 266 | 622 | 17,35 |
| 16 | 406.4 | 26.1 | 316 | 640 | 786,35 |

De acordo com [7], tubulações com diâmetro nominal menor que 6 in. não são qualificadas para aplicação dos conceitos de LBB. Contudo, as configurações listadas na tabela 1 foram testadas no Electric Power Research Institute/USA (EPRI), sendo utilizadas aqui para comparação dos resultados analíticos e experimentais.

Os experimentos, documentados em [6], mostram a resistência de tubulações trincadas sujeitas à flexão pura. A referência apresenta comprimentos de trinca críticos e momentos fletores que podem causar a falha. Estes momentos são 3,38 kNm, 17,34 kNm e 786,03 kNm para os tubos de diâmetro nominal 2 in., 4 in. e 16 in., respectivamente.

A tabela 2 apresenta os valores de comprimento de trinca experimentais e os determinados pelas diversas metodologias de cálculo.

Tabela 2. Comprimentos críticos de trinca, mm, experimentais e analíticos

| DN (in) | NUREG 1061 (experimental) | LFS | MLL | LL |
|---------|------------------------------|-------|-----|-----|
| 2 | 63 | 26.2 | 50 | 55 |
| 4 | 122.7 | 66.7 | 113 | 120 |
| 16 | 442.3 | 205.5 | 375 | 397 |

Deve-se mencionar que utilizou-se uma tensão de fluxo de valor $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_r)/2$.

Nas figuras 2 a 4 são apresentadas as curvas limites relacionando as tensões e os comprimentos de trinca passantes circunferencial para as três formulações analíticas, considerando os tubos submetidos ao carregamento de flexão pura indicados na tabela 1.

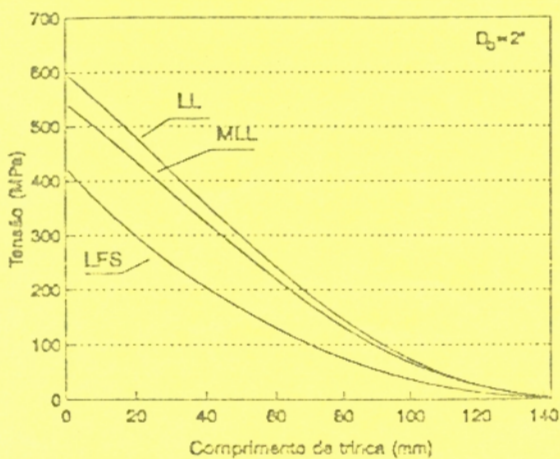


Figura 2. Curvas limite para tubos 2 in.

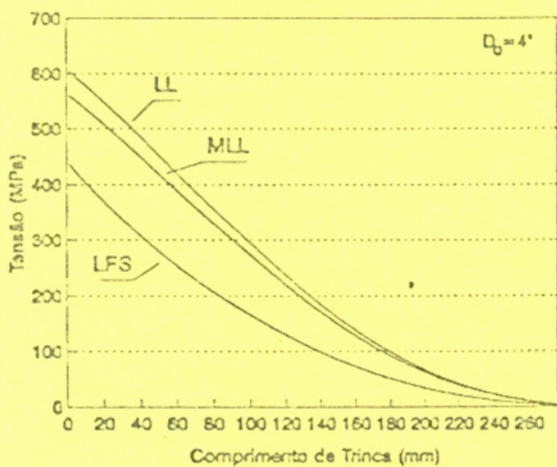


Figura 3. Curvas limite para tubos 4 in.

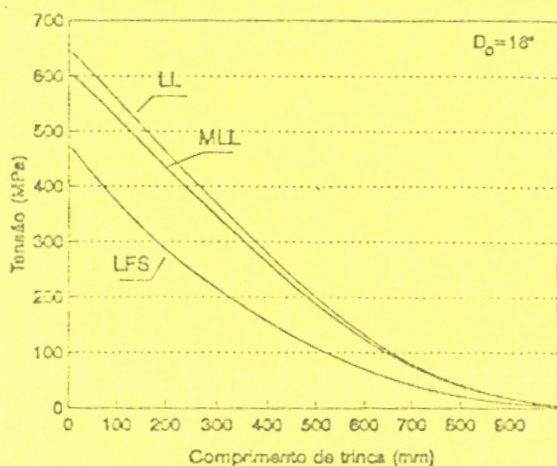


Figura 4. Curvas limite para tubos 16 in.

4. Conclusões e Comentários

A tabela 2 mostra que as três formulações conduzem a comprimentos de trinca críticos menores que os valores experimentais. A formulação LFS fornece valores mais conservadores que os métodos MLL e LL, as quais indicam resultados similares. Este comportamento pode ser observado através das figuras 2 a 4.

Isto pode ser explicado fundamentalmente pelo motivo do conceito LFS admitir a falha ocorrendo com a plastificação localizada em um ponto da seção transversal, enquanto que nos conceitos MLL e LL a falha é precedida pela plastificação generalizada da seção transversal.

Podem ocorrer diferenças, também, em função dos tipos de tensão atuantes que são considerados em cada formulação. Por exemplo, na geração da curva baseada no MLL, a contribuição das tensões de flexão causadas pelo momento externo é desprezada.

Apesar da pequena quantidade de resultados experimentais disponíveis para a comparação, pode-se dizer que as metodologias são aceitáveis às avaliações da instabilidade de tubos trincados. Considerando o tamanho crítico da trinca, os três métodos apontam resultados a favor da segurança, isto é, os valores calculados foram menores que os experimentais.

Deve-se mencionar que o conservadorismo da avaliação pode ser controlado pelo valor de σ_f usado. A referência [4] recomenda, por exemplo, que na metodologia LFS a tensão de fluxo deva ser $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u) / 2$, no caso de tubos austeníticos; e $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u) / 2.4$ (sendo $\sigma_f \geq \sigma_y$), no caso de tubos de aço ferrítico. Para o método LL, $\sigma_f = \sigma_y$, para todos os materiais.

Vale lembrar que a metodologia MLL é aplicável apenas a tubos de aço austenítico.

Pode-se afirmar que este trabalho é uma ampliação da referência [8] pois, em relação a ela, foi adicionado o método da carga limite - LL nas comparações, apresentada uma formulação sintetizada dos métodos utilizados, e incluído uma discussão sobre os limites admissíveis a serem adotados.

REFERÊNCIAS

- [1] Hiser, A. L. ; Callahan, G. M. *User's Guide to the NRC's Piping Fracture Mechanics Data Base (PIFRAC)*. US-NRC (Nuclear Regulatory Commission), Washington, D.C., U.S.A. março / 1987. NUREG/CR-4894.
- [2] ASME. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*. American Society of Mechanical Engineers, Nova Iorque, NY, U.S.A., 1992.
- [3] Roos, E. ; Herter, K. H. ; Julisch, P. ; Bartholomé, G. ; Senski, G. *Assessment of Large Scale Pipe Tests by Fracture Mechanics Approximation Procedures with Regard to Leak-Before-Break*. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 112, p. 183-195, 1989.
- [4] Bartholomé, G. ; Wellein, R. ; Senskin, G. *LBB - Analysis: Verification of Fracture Mechanics Approaches by Component Testing*. 12th SMiRT Proceedings, Vol. G, paper GF08/2, p. 393-398, Stuttgart, Alemanha, 1993.
- [5] US-NRC. *Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants - LWR Edition, Section 3.6.3 , Leak Before Break Evaluation Procedures*. Federal Register, Vol.52, No. 167, p. 32626 - 32633, 28 / agosto / 1987.
- [6] US-NRC. *Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee - Evaluation of Potential for Pipe Break*. US-NRC, Washington, D C., U.S.A., novembro / 1984. NUREG 1061, Vol. 3.
- [7] NSAC. *Applying Leak-Before-Break to High-Energy Piping* EPRI, Palo Alto, CA, U.S.A, novembro / 1987. Report NSAC 114
- [8] Mattar Neto, M. ; DeAquino, C. T. E. ; Maneschy, J. E. ; Nóbrega, P. G. B. *Instability Evaluation in Austenitic Piping Systems Using Two-Different Approaches*. The 1994 ASME Pressure Vessels and Piping Conference Proceedings, Vol. 280, Minneapolis, MN, U.S.A., junho / 1994.