ISSN: 2594-6153

A Mecânica da Fratura Elasto Plástica Aplicada à Falha de Gasoduto

Jose Jefferson Morais de Oliveira, Willy Ank de Morais

Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos – SP, Brasil

E-mail: jjmoliveira@petrobras.com.br

Resumo: Neste presente trabalho estão apresentados a aplicação de alguns conceitos da MFEP (*mecânica da fratura elasto-plástica*), pelo uso da integral J e do CTOD (δ), em um caso de falha real ocorrido em um gasoduto através de nucleação de trincas de corrosão sob tensão. Neste caso, empregou-se *sigma-flow*/fator de Folias para descrever o provável comportamento da trinca durante a falha do duto.

Palavras-chave: mecânica de fratura, regime elasto plástico, trinca de corrosão sob tensão.

The Mechanics of Fracture Applied to Gas Pipeline Failure

Abstract: This paper presents the application of some concepts of MFEP (elasto plastic fracture mechanics), using the integral J and CTOD (δ), in a case of real failure occurred in a pipeline through stress corrosion cracking. In this case, sigma-flow/Folias factor was used to describe the probable crack behavior during duct failure.

Keywords: fracture mechanics, elastoplastic regime, stress corrosion cracking.

Introdução

A falha estrutural de um duto ocorre no instante em que se tem início o vazamento do líquido ou gás sendo neste contido, em função da presença de uma descontinuidade, ou trinca, na parede do mesmo. Essa descontinuidade é representada por um rasgo, fissura ou trinca associada a mecanismos degradativos ou eventualmente avarias acidentais. Sempre que alguma descontinuidade é constatada, a integridade do duto dever ser propriamente avaliada [1].

No presente trabalho, conceitos de mecânica da fratura elasto plástica (MFEP) serão aplicados ao estudo de uma falha real num gasoduto, que ocorreu no regime elasto-plástico. Este tipo de falha é muito comum à maioria das estruturas de aços estruturais [2], e para dutos de petróleo, são decorrentes de danos provocados por terceiros, processo de corrosão, falhas de projeto e/ou operação incorreta [3].

Objetivo

Aplicar os conceitos da mecânica da fratura elasto-plástica numa situação de falha mecânica real, a fim de introduzir o estudo de análise de falhas em dutos de petróleo associados a grandes deformações plásticas.

Material e Métodos

Partindo-se de informações disponíveis na investigação da falha de um gasoduto, foram determinados dois parâmetros empregado pela MFEP: o CTOD (δ) e a Integral J. Posteriormente, serão empregados resultados reais da energia Charpy e de ensaios de tração

em correlações empíricas com o fator de intensidade de tensões (K_{IC}). Assim será possível verificar, indiretamente, os valores de Integral J que é matematicamente relacionado ao K_{IC}.

De acordo com um relatório de análise de falha [4], sabe-se que determinado duto, empregado no escoamento de gás natural entre uma estação e uma refinaria de petróleo, falhou por fratura dúctil, conforme ilustrado na Figura 1.a. Esta fratura foi atribuída à nucleação de trincas longitudinais de corrosão sob tensão por efeito do solo (*Stress Corrosion Cracking/Near-Neutral pH*). O comprimento da trinca passante foi obtido a partir de sua fractografia, conforme indicado pela Figura 1.b. A Tabela 1 apresenta os dados do duto falhado e na Tabela 2 os resultados de ensaios de tenacidade Charpy realizados em amostras do aço do duto falhado.



(*a*) (*b*)

Figura 1. Falha de um gasoduto por colapso elasto-plástico: (a) aspecto geral final e (b) determinação da extensão da trinca pela fractografia.

Tabela 1. Características Principais do Duto

Norma de Projeto	ASME B31.8	Temperatura de Operação	Ambiente
Ano de construção	1988	Ano de Início de Operação	1989
Pressão de Operação(1)	62,0 kgf/cm²	Pressão do TH(2)	97,0 kgf/cm²
Pressão de Projeto	74,0 kgf/cm²	Especificação do Material	API 5L X65
Diâmetro Nominal	22”	Espessura Nominal	6,35 mm

1) Pressão de operação na região da falha;
2) Pressão de teste hidrostático na região da falha, após a construção do duto.

Tabela 2. Resultados de Energia de Impacto Charpy em Amostras do Aço do Duto Falhado

Temperatura de Ensaio	CP 1 (J)	CP 2 (J)	CP 3 (J)	Média (J)	API SPEC 5L [5]
0° C	142	136	146	142	27 J avg.
Ambiente	158	136	148	148	-

Valores relatos são os valores já corrigidos para corpos de prova 10 x 10 mm.

De acordo com a mecânica da fratura, na condição de tensão plana e grandes quantidades de deformações plásticas, a Integral J (determinada em função do fator de Folias ‘M’), juntamente com o CTOD (abertura da ponta da trinca), podem ser consideradas como abordagens adequadas para a análise de falhas mecânicas no regime elasto-plástico [6]. Estes parâmetros podem ser calculados através das seguintes equações [7, 8]:

$$J = \frac{8.c.\sigma_f^{\,2}}{\pi E}\, ln\left(\sec\left|\frac{M\pi\sigma_h}{2\sigma_f}\right|\right) \quad (1)$$

$$CTOD = \delta = \frac{J}{S_{LE}} \quad (2)$$

Onde o fator de Folias M é dado por [7]:

$$M = [1 + 1{,}2987\lambda^2 - 0.026905\lambda^4 + 5{,}3549x10^{-4}\lambda^6]^{0{,}5} \quad (3)$$

E para os demais termos: *c* corresponde ao semi comprimento da trinca; σ_f a tensão *sigma-flow* do material (S_{LE} + 69); σ_h a tensão circunferencial no duto (pR/t); E = 207 GPa; S_{LE} = 448 MPa (para o aço API 5L X65) e $\lambda = c/(Rt)^{0,5}$.

Uma vez que *c* = 105 mm, R = 273,05 mm (raio médio) e t = 6,35 mm, têm-se que λ = 2,52. E da equação 3, obtêm-se para o fator de Folias: M = 2,88. Aplicando-se estes valores nas equações 1 e 2, chegam-se os seguintes resultados: J = 144,3 MPa.mm e δ = 0,32 mm.

A energia medida no ensaio Charpy pode ser relacionada com a tenacidade do material, através de equações que procuram estabelecer esta relação. Por exemplo [2, 9]:

$$K'_{IC} = \left[12(C_V)^{\frac{1}{2}} - 20\right].(^{25}/_{B})^{1/4} + 20 \quad (4)$$

$$K''_{IC} = 14{,}6\sqrt{C_V} \quad (5)$$

Onde C_V = 148 J (do ensaio Charpy) e B = t = 6,35 mm. Portanto, K'_{IC} = 193,2 MPa.$(m)^{0,5}$ e K''_{IC} = 177,6 MPa.$(m)^{0,5}$.

Os resultados obtidos acima, para K'_{IC} e K''_{IC}, são valores aproximados para a tenacidade à fratura do material, no estado plano de tensão, calculados a partir de uma propriedade medida em ensaio (Charpy). Pode-se determinar o valor da Integral J, através da seguinte equação [8]:

$$J_{IC} = \frac{(K_{IC})^2}{E} \quad (6)$$

Calculando, tem-se que: J'_{IC} = 0,180 N.m e J''_{IC} = 0,152 N.m. Ou ainda, ajustando-se as unidades: J'_{IC} = 180 N.mm e J''_{IC} = 152 N.mm.

Para determinação do comportamento da trinca passante, foi comparado a relação σ_f /M (*sigma-flow*/fator de Folias), com σ_h (tensão de *hoop*), para diferentes semi comprimento de trincas (2c/2). Os valores obtidos serão apresentados em forma gráfica no próximo tópico.

Resultados

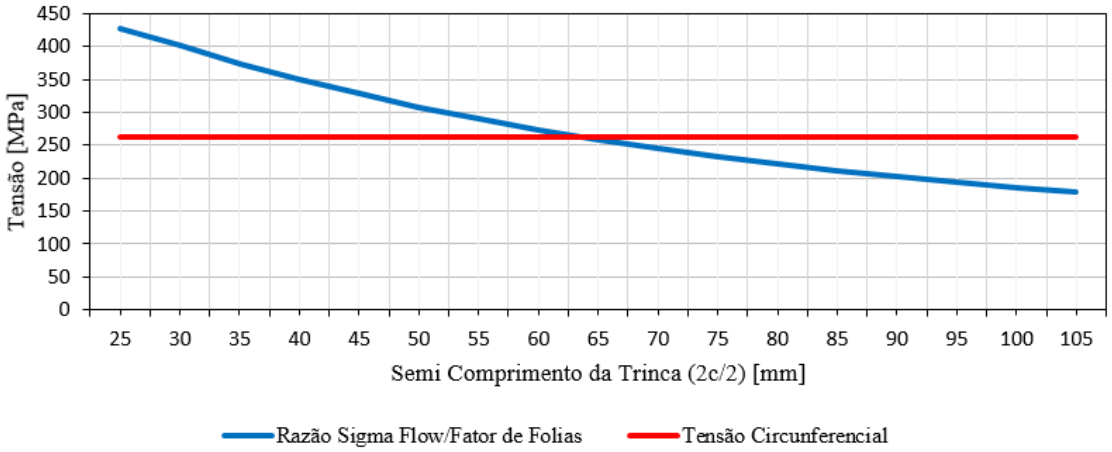
Na Tabela 3 e no Gráfico 1, encontra-se os resultados obtidos para os parâmetros calculados da mecânica da fratura e para a relação *sigma-flow*/fator de Folias, respectivamente:

Tabela 3. Resultados

Integral J	CTOD	Charpy	J'_{IC}	J''_{IC}
144,3 MPa.mm	0,32 mm	148 N.m	180 MPa.mm	152 MPa.mm

Nota: os valores para J'_{IC} e J''_{IC} foram obtidos através das equações 4 e 5 e do valor médio do ensaio *Charpy*.

Gráfico 1. Tensões *Sigma-Flow* e Circunferencial



Discussão

A energia obtida no ensaio Charpy para o material do duto, convertida em valores de Integral J, resultou em magnitudes superiores ao que foi calculado pela equação 1 (5,3% e 24,7%, respectivamente). Evidenciando, assim, que o material possuía sua tenacidade à fratura dentro do que era esperado. Observando-se o Gráfico 1, tem-se que a relação σ_f/M é maior que σ_h para um semi comprimento de trinca $c \leq 63$ mm (ou seja, $2c \leq 126$ mm). Portanto, espera-se que, para trincas passantes até este valor, não ocorreriam falhas abruptas na tubulação. Por outro lado, para $c > 63$ mm, a trinca assume um comportamento instável, levando o duto a uma falha abrupta em regime elasto plástico. Na iminência da propagação da trinca, a abertura na ponta da trinca seria de 0,32 mm, o que corresponde a ~5% da espessura nominal do duto.

Durante a rápida propagação da trinca, ocorre uma taxa crescente de despressurização do mesmo, seguida de imediata redução na tensão circunferencial local e, em função da tenacidade do material, a propagação da trinca foi limitada a 6 (seis) metros de extensão, cessando-se com o rasgamento do material por cisalhamento à 45º do eixo longitudinal do duto, como tipicamente ocorre para fratura dúctil em dutos e ilustrado pela Figura 2.

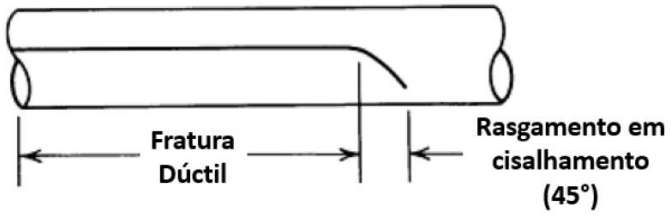


Figura 2. Representação esquemática para fratura dúctil no gasoduto

Conclusões

A abordagem proposta pela mecânica da fratura elasto-plástica atestou a falha do gasoduto considerado por fratura dúctil, associado à grandes deformações plásticas. O emprego do conceito da Integral J e do CTOD permitiu, ainda, apresentar uma provável descrição para o comportamento da trinca inicial de corrosão sob tensão que, depois de alcançar um comprimento crítico, evoluiu de forma abrupta e dúctil.

Referências Bibliográficas

1. Freire JLF (2009). Engenharia de Dutos. ABCM – Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Rio de Janeiro, p. 15.1-15.3;
2. Donato GVP e Hippert Jr E (2014). Apostila de Mecânica da Fratura: Conceitos Teóricos. Petrobras. Rio de Janeiro, p. 87-120, 158-164;
3. Muhlbauer, WK (2004). Pipeline Risk Management Manual: Ideas, Techniques, and Resources. 3ª Edição. Elsevier, p. 1/4, 3/43-3/44, 4/61-4/63, 5/91-5/93, 6/117-6/118;
4. Petrobras (2016). Análise de Falha do Gasoduto Gaspal I – CT TMEC nº 003/20016. Cenpes. Rio de Janeiro (*material não publicado*);
5. American Petroleum Institute (1987). API Specification 5L – Specification for Line Pipe. API Publishing Services. 35th Edition. Washington, DC;
6. Dowling, NE (2018). Comportamento Mecânico dos Materiais: Análises de Engenharia Aplicadas a Deformação, Fratura e Fadiga. Tradução e Revisão Técnica: Willy Ank de Morais. Elsevier. 4ª Ed. Rio de Janeiro, p. 391-396;
7. Zahoor A (1990). Ductile Fracture Handbook – Applications to: Power Plants; Offshore Structures; Petrochemical Plants; Transportations Systems. EPRI NP-6301-D, V2. RP-1757-69. Palo Alto, p.6.2.1-6.2.2;
8. Pastoukhov VA e Voorwald HJ (1995). Introdução a Mecânica da Integridade Estrutural. Editora UNESP. São Paulo, p. 77-94;
9. Freire JLF (2010). Notas de Aula da Disciplina: Avaliação da Integridade e Reabilitação de Dutos. PUC-Rio. Rio de Janeiro (*material não publicado*).