



Avaliação Probabilística Da Integridade Estrutural De Um Tubo Sob Pressão Por Meio Do Método R6

Patrick de Oliveira Batista da Costa¹, Ignacio Iturrioz²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) / Departamento de Engenharia Civil (PPGEC)
patrick.costa@ufrgs.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) / Departamento de Engenharia Mecânica (PROMEC)
ignacio.iturrioz@ufrgs.br

Resumo

A preservação da integridade estrutural assume um papel importante na segurança e do desempenho de estruturas sujeitas a diversos mecanismos de dano, incluindo fadiga, corrosão sob tensão e corrosão por fadiga. Contudo, em razão da complexidade inerente às incertezas envolvidas, é necessário adotar uma abordagem probabilística. Nesse sentido, o estudo emprega o método de simulação de Monte Carlo com amostragem adaptativa no âmbito do método R6 para estimar a probabilidade de falha em seis cenários distintos, levando em consideração diferentes distribuições e correlações entre variáveis. A análise realizada indica que o índice de confiabilidade estrutural (β), não demonstra sensibilidade significativa à inclusão ou exclusão da correlação entre variáveis. A probabilidade de falha varia de forma sutil com a consideração da correlação. Dessa forma, o artigo ressalta a relevância da aplicação da abordagem probabilística na avaliação de integridade estrutural, destacando a necessidade de considerar as incertezas e distribuições das variáveis aleatórias para uma análise mais precisa da segurança em estruturas com algum mecanismo de dano.

Palavras-chave

Mecânica da Fratura; Confiabilidade; Integridade Estrutural; FAD.

Introdução

A integridade estrutural de tubos que apresentam trincas originadas por diversos mecanismos de dano, como fadiga, corrosão sob tensão e corrosão por fadiga, pode ser avaliada por meio da aplicação de metodologias da mecânica da fratura. Os procedimentos contemporâneos para a avaliação da integridade estrutural incorporam abordagens da mecânica da fratura, a exemplo do Diagrama de Avaliação de Falha (FAD).

No entanto, na prática, é inevitável que ocorram incertezas. Isso se deve, em parte, à ampla dispersão dos valores de tenacidade à fratura na região de transição dúctil-frágil. Logo, não é apropriado considerar a tenacidade à fratura como uma constante material de valor único. Além disso, outras fontes de incerteza também são introduzidas nas análises de fratura. Uma estrutura pode conter variabilidades relacionadas ao tamanho, orientação e localização das trincas. Eventos extraordinários, tais como furacões, acidentes, sismos e ventos extremos, podem ocasionar tensões que excedem substancialmente os níveis de projeto previamente estabelecidos.

É importante ressaltar que a maioria das análises conduzidas na mecânica da fratura é de natureza determinística, ou seja, um único valor de tenacidade à fratura é empregado para estimar a tensão de falha ou o tamanho crítico da trinca. Em virtude da complexidade inerente a esses aspectos, torna-se necessário adotar uma abordagem probabilística no tratamento da análise de fratura, em contrapartida ao enfoque determinístico (ANDERSON, 2017).



Procedimentos metodológicos

Confiabilidade estrutural

A confiabilidade estrutural, de acordo com Beck (2019), representa uma medida do grau de confiança na qual uma estrutura atende aos requisitos técnicos de projeto, incluindo sua função, capacidade resistente e equilíbrio, ao longo de uma vida de projeto especificada, desde que as condições operacionais e de projeto sejam respeitadas.

Para calcular a probabilidade de falha da estrutura ou do sistema estrutural, é comum formular uma ou mais funções de estado limite (FEL), associadas para uma única falha ou múltiplas falhas, geralmente no estado limite último. No entanto, a determinação da probabilidade de falha pode ocorrer de maneira indireta, dependendo do método escolhido. Métodos de transformação, como AFOSM (*Advanced First Order Second Moment*), FORM (*First Reliability Method*) e SORM (*Second Reliability Method*), calculam o índice de confiabilidade (β), que é o complemento da probabilidade de falha, sendo esta obtida de forma indireta. Por outro lado, o método de simulação de Monte Carlo calcula diretamente a probabilidade de falha (P_f). No entanto, esse método pode ser computacionalmente custoso, dependendo da complexidade do problema e do nível de confiabilidade desejado.

Como alternativa para reduzir o custo computacional, diferentes técnicas podem ser adotadas. Destas, destacam-se os modelos substitutos (*surrogate models*) e as técnicas de amostragem inteligente, como a Amostragem por Importância, o Hipercubo Latino e a Amostragem Adaptativa. Neste trabalho, utiliza-se a técnica de Amostragem Adaptativa, conforme apresentada por Melchers (1990), como método de amostragem inteligente na simulação de Monte Carlo.

Mecânica da fratura

As normas e códigos baseiam-se tradicionalmente na filosofia de comparar a tensão solicitante (demanda) com a tensão de escoamento do material (capacidade) por exemplo, e assim obter um fator de segurança. Se existe um defeito (e.g., trinca) em razão da singularidade e pelo paradoxo de Inglis a avaliação do componente deve ser analisada por outro parâmetro (Z , Z_c) ao invés da tensão, e este parâmetro é introduzido pela Mecânica da Fratura. Diferentes candidatos são apresentados por diferentes autores conforme a tabela seguinte:

Tabela 1 – Candidatos a Z e Z_c .

Autores	Ano	Parâmetros	Critério
Griffith	1920	G, G_c	Global
Irwin	1952	K, K_c	Local
Wells	1961	COD (δ)	Local
Rice	1968	Integral J	Global

Em geral, os parâmetros fractomecânicos de critério global dependem da energia acumulada em todo o corpo e nesse caso a integral J acaba sendo uma generalização do parâmetro de Griffith pois é aplicável também a mecânica da fratura elástica não linear e em materiais plásticos nos quais as descargas apresentadas nos ensaios experimentais podem ser desprezadas. Em contrapartida os parâmetros de critério local dependem do estado tensional da região de vizinhança da ponta da trinca. A caracterização do δ ou COD (*crack opening displacement*) em ensaios experimentais não é uma tarefa trivial e os parâmetros de Irwin são bem difundidos. De toda forma, todos os parâmetros fractomecânicos podem ser correlacionados.

Do ponto de vista da confiabilidade estrutural a FEL é estabelecida associando a demanda com a capacidade. A aplicação da abordagem probabilística por meio da confiabilidade estrutural e a formulação da FEL na mecânica da fratura é apresentada após a exemplificação de um problema simples da resistência dos materiais. O exemplo da resistência dos materiais é exibido na Figura 1 e a formulação de sua FEL é apresentada nas equações a seguir:

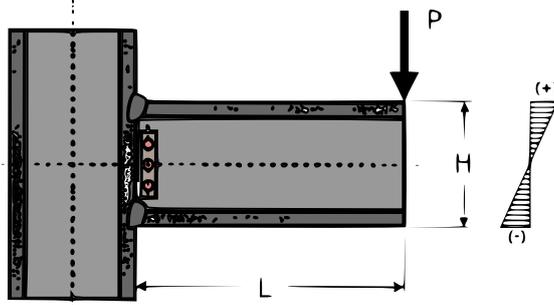


Figura 1 – Exemplo – Resistência dos Materiais.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot P \cdot L}{(B \cdot H^2)}$$

$$g(x) = \sigma_y - \sigma_{m\acute{a}x}$$

Em que: M é o momento atuante na viga; W o módulo de resistência; P a carga concentrada atuante; L o comprimento da viga; H a altura da viga; B a largura da viga; σ_y se refere a tensão de escoamento (capacidade); $\sigma_{m\acute{a}x}$ a tensão máxima atuante (demanda); e $g(x)$ a FEL para este problema.

Aplicando o mesmo procedimento no exemplo anterior, porém com uma trinca inicial de tamanho “a” (Figura 2), a formulação da FEL por meio da mecânica da fratura utilizando o parâmetro fractomecânico local de Irwin adotado como exemplo é apresentado nas equações subsequentes.

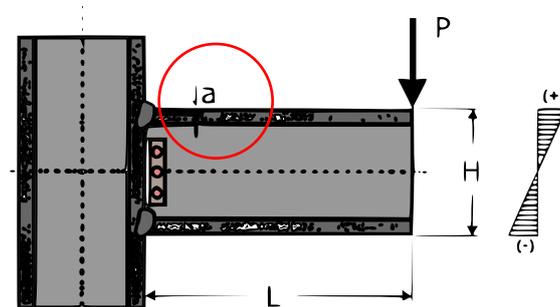


Figura 2 – Exemplo – Mecânica da Fratura.

$$K_I = Y \cdot \sigma_{m\acute{a}x} \sqrt{\pi a}$$

$$K_I = 1.12 \cdot \frac{6 \cdot P \cdot L}{(B \cdot H^2)} \sqrt{\pi a}$$



$$g(x) = K_C - K_I$$

Em que: Y é uma constante que considera a relação entre a forma da fissura, distribuição de carga e geometria; K_C se refere a tenacidade à fratura (capacidade); K_I a força motriz (demanda); e $g(x)$ a FEL para este problema.

Desta forma a probabilidade de falha (Pf) na mecânica da fratura pode ser obtida associando a tenacidade à fratura (capacidade) com a força motriz (demanda) conforme é ilustrada na Figura 3.

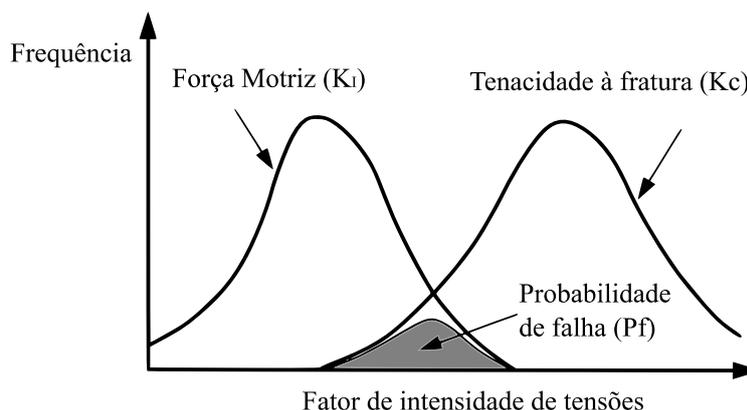


Figura 3 – Obtenção da Pf na mecânica da fratura.

Diagrama de avaliação de falha (FAD)

Os Diagramas de Avaliação de Falha têm uma ampla aplicação em procedimentos destinados à avaliação da integridade estrutural no qual por meio de dois parâmetros é possível medir em um único método o comportamento de fratura frágil e colapso plástico, geralmente sendo abordados sob uma perspectiva determinística. A forma de avaliar o impacto de danos, como trincas, através de coordenadas em um gráfico com valores normalizados, em que a posição dentro da curva indica a região de segurança ou região que não há propagação subcrítica/instável da trinca, tem mostrado grande utilidade na prática. A primeira versão do FAD foi desenvolvida em 1976 por Harrison *et al.* e foi posteriormente incorporada a um procedimento de avaliação de risco adotado pelo setor de energia elétrica do Reino Unido. Esse procedimento ficou conhecido como método R6, cuja representação (Figura 4) e formulações são apresentadas a seguir.

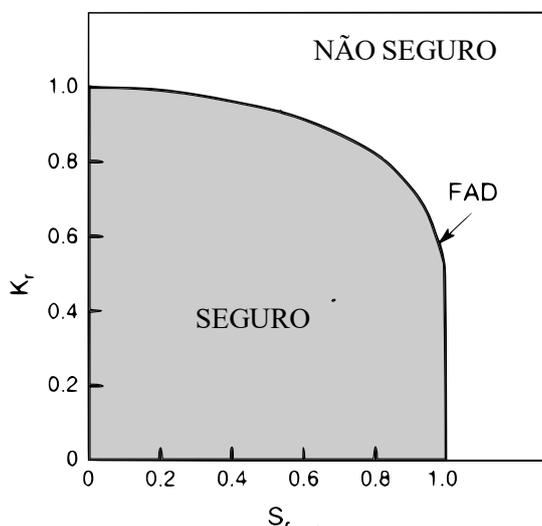


Figura 4 – Método R6.

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi S_r}{2} \right) \right]^{-1/2}$$

A expressão anterior representa a aplicação da formulação analítica de Burdekin e Stone (1966) no contexto do método R6, derivado da equação desenvolvida por Dugdale (1960). Esse modelo é fundamentado em três hipóteses fundamentais: (i) configuração geométrica definida (placa retangular com trinca central); (ii) comportamento do material elastoplástico perfeito; e (iii) condição de estado plano de tensões. No entanto, a primeira hipótese pode ser relaxada de modo a permitir uma aplicação independente da geometria, sendo realizada através do cálculo do quociente a seguir:

$$K_r = \frac{K_I}{K_C}$$

Em que: K_r é um parâmetro normalizado que indica o comportamento à fratura; K_I e K_C são parâmetros fractomecânicos definidos anteriormente. Ao contrário da segunda hipótese, a terceira hipótese de Dugdale pode ser relaxada substituindo a tensão de escoamento σ_e pela tensão de colapso σ_c , como indicado na seguinte equação:

$$S_r = \frac{\sigma_0}{\sigma_c}$$

Em que: S_r é um parâmetro normalizado que indica o comportamento de colapso plástico e σ_0 a tensão na região onde se encontra a trinca se a mesma não existisse.

O método R6 tem sido aplicado de forma mais refinada em outros procedimentos de avaliação de risco. O Instituto de Normas Britânicas (BSI) publicou a norma 7910:2013, enquanto a União Europeia conduziu um programa de pesquisa cooperativa que culminou na publicação do documento FITNET (*FITness-for-service NETwork*). Nos Estados Unidos, o Instituto Americano de Petróleo (API) e a Associação Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) publicaram o API 579-1/ASME FFS-1, que, em seu nível 2 de análise, avalia os danos utilizando o método FAD. O aprimoramento do método R6 tem como objetivo fornecer informações adicionais, dependendo da complexidade do problema. Isso inclui considerações sobre o tipo de tensão (primária, secundária, residual) e a possibilidade de incorporar o endurecimento do aço, representado pela substituição do parâmetro S_r pelo conceito L_r , conforme ilustrado na Figura 5 a seguir.

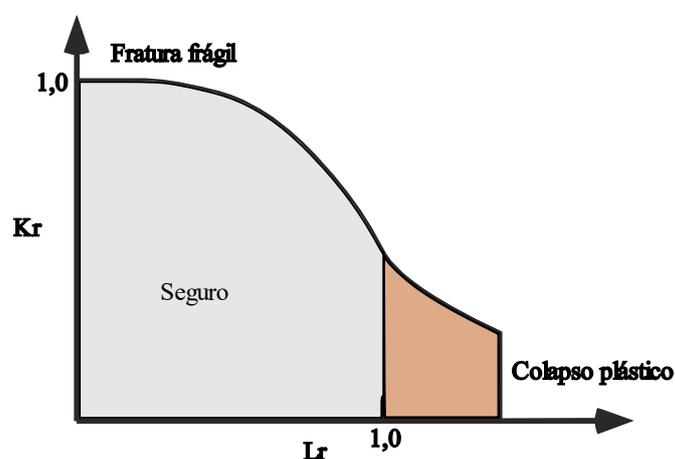


Figura 5 – Método R6 aprimorado.

Embora o método R6 tenha sido amplamente aplicado em suas diversas formas de maneira determinística, o propósito deste artigo é explorar sua aplicação de forma probabilística. A formulação analítica de Burdekin e Stone é desenvolvida para servir como a FEL, permitindo a obtenção da probabilidade de falha por meio do método R6. A Figura 6 ilustra como a probabilidade de falha pode ser obtida utilizando algum método de simulação (e.g. Monte Carlo).

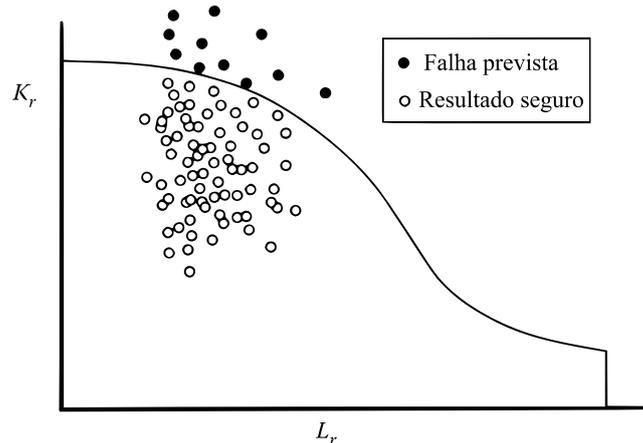


Figura 6 – Abordagem probabilística do método R6.

Resultados

O estudo conduz uma análise probabilística utilizando a curva R6 de um modelo de tubo com uma trinca semicircular superficial externa, submetido a uma pressão interna, conforme ilustrado na Figura 7. Os dados determinísticos e probabilísticos estão disponibilizados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

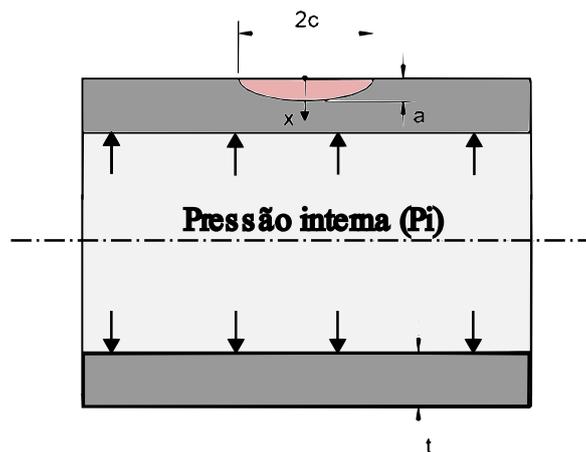


Figura 7 – Modelo analisado: tubo sob pressão interna.

Tabela 2 – Dados determinísticos do modelo.

Parâmetros	Sigla	Valores	Unidades
Pressão Interna	Pi	18,50	MPa
Espessura	t	11,00	mm
Diâmetro externo	D	406,40	mm
Constante	Y	1,12	-
Comprimento da trinca	2c	6,00	mm



Tabela 3 – Dados probabilísticos do modelo.

Parâmetros	Sigla	Média (μ)	Coeficiente de Variação (CV)
Tenacidade à fratura	K_C	120 MPa \sqrt{m}	0,25
Largura da trinca	a	3 mm	0,3
Tensão de escoamento do aço	σ_y	420 MPa	0,07
Tensão última do aço	σ_u	540 MPa	0,04

No presente estudo, são analisados seis cenários distintos que abrangem diferentes distribuições e a existência ou não de correlações entre variáveis, conforme detalhado na Tabela 4. Além disso, para a avaliação da probabilidade de falha, utiliza-se o método de simulação de Monte Carlo com amostragem adaptativa, o qual é programado na linguagem Python 3. São realizadas um total de 10^6 simulações, com 100 ciclos considerados para cada uma delas. A função de estado limite (FEL) a ser avaliada é formulada na equação a seguir:

$$g_{FAD}(X) = f_{FAD} - K_r$$

No que se refere às variáveis aleatórias, de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo Comitê Conjunto de Segurança Estrutural (JCSS, 2001), é observada uma correlação de 0,75 entre a tensão de escoamento e a tensão última em ensaios realizados em um mesmo tipo de aço. O presente trabalho, no entanto, não abordou a possibilidade de correlação entre outras variáveis aleatórias. Quanto ao modelo de distribuição da tenacidade à fratura, diversos pesquisadores têm debatido a questão, e o modelo de distribuição de valores extremos tipo III de mínimo, também conhecido como modelo Weibull de mínimo, tem sido apontado como o mais representativo.

Diferentemente dos modelos de distribuição normal e lognormal, que podem ser caracterizados apenas pela média e pelo desvio-padrão, o modelo Weibull requer a inclusão de um parâmetro adicional, conhecido como parâmetro de forma. Para esta pesquisa, o valor desse parâmetro foi estabelecido como 1,0. No entanto, é importante ressaltar que o valor deste parâmetro também é objeto de discussão, pois influencia a forma da distribuição.

Tabela 4 – Cenários a serem avaliados.

Cenários	Distribuição				Correlação: σ_y e σ_u
	K_C	a	σ_y	σ_u	
01	Normal	Normal	Normal	Normal	-
02	Normal	Normal	Normal	Normal	0,75
03	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	-
04	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	0,75
05	Weibull	Lognormal	Lognormal	Lognormal	-
06	Weibull	Lognormal	Lognormal	Lognormal	0,75

Os resultados em termos de probabilidade de falha (Pf) e índice de confiabilidade (β) associado a Pf são apresentados e comparados na Tabela 5 e Figura 8 para cada um dos cenários. O critério de convergência é avaliado em termos da covariância da Pf.

Tabela 5 – Resultados dos cenários apresentados.

Cenários	Probabilidade de falha (Pf)	Índice de Confiabilidade (β)	CoV Pf
01	2,121 E-03	2,86	0,01
02	2,137 E-03	2,86	0,01
03	4,630 E -05	3,91	0,02
04	4,710 E -05	3,91	0,04
05	2,664 E-03	2,79	0,02
06	2,688 E-03	2,78	0,00

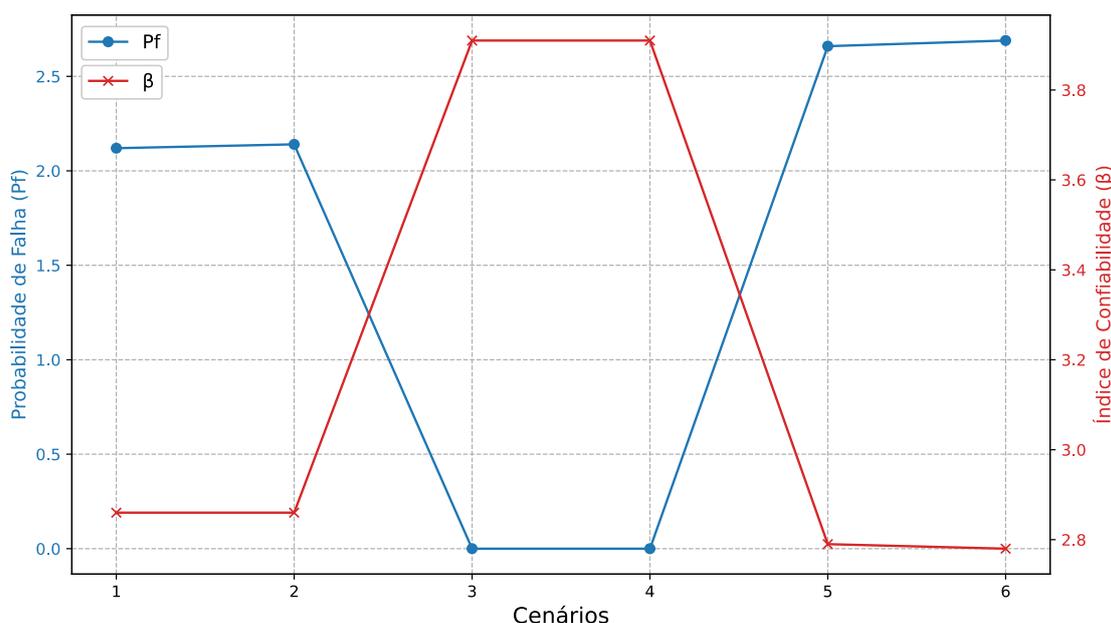


Figura 8 – Comparação entre os cenários - resultados.

Ao comparar os resultados dos cenários da Tabela 5 e Figura 8, é possível observar que aqueles que levam em conta a distribuição lognormal (cenários 03 e 04) demonstram a menor probabilidade de falha, enquanto os cenários 05 e 06, nos quais o modelo de distribuição de Weibull foi aplicado, resultaram na maior probabilidade de falha, indicando um menor nível de confiabilidade. De maneira geral, observa-se que a inclusão ou exclusão da correlação entre as variáveis não afetou o índice de confiabilidade, o que permite concluir que o parâmetro β não é sensível à consideração ou não dessa correlação entre as variáveis analisadas. Por outro lado, a probabilidade de falha foi ligeiramente alterada, sendo mais elevada nos cenários nos quais a correlação entre as variáveis foi considerada, embora de forma pouco significativa.

Considerações finais

O presente estudo se concentrou na abordagem probabilística da mecânica da fratura, utilizando o método R6 aplicado a um tubo sujeito a pressão interna. A seguir, destaca-se as principais conclusões desta pesquisa:

- ✓ A curva R6 se mostrou um método simples para a determinação da probabilidade de falha;
- ✓ A escolha da distribuição a ser considerada pode exercer influência significativa na probabilidade de falha;
- ✓ A inclusão da correlação entre as variáveis teve um impacto sutil na probabilidade de falha;



- ✓ A utilização da distribuição de Weibull para representar a tenacidade à fratura resultou na maior probabilidade de falha;
- ✓ O método de simulação de Monte Carlo adaptativo demonstrou robustez, uma vez que permitiu a obtenção direta da probabilidade de falha com custo computacional relativamente baixo;
- ✓ É importante observar que o índice de confiabilidade (β) não se revelou como o indicador mais adequado para a probabilidade de falha, uma vez que para um mesmo valor de β , as probabilidades de falha foram diferentes.

Referências

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2007.
- ANDERSON, Ted L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC press, 2017.
- BECK, André T. Confiabilidade e segurança das estruturas. Elsevier Brasil, 2019.
- BRANCO, Carlos Moura; FERNANDES, António Augusto; CASTRO, Paulo Manuel Salgado Tavares. Fadiga de estruturas soldadas. Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTE, BSI. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, BS7910:2013 + A1:2015, 2013.
- BURDEKIN, F.M. e STONE, D.E.W. The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding materials. Journal of Strain Analysis, 1, 1966, 144–153.
- DUGDALE, Donald S. Yielding of steel sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 8, n. 2, p. 100-104, 1960.
- FITNET: European Fitness-for-Service Network. G1RT-CT-2001-05071, <http://www.eurofitnet.org>
- GDOUTOS, E. E. Fracture mechanics: an introduction. Springer Nature, 2020.
- HARRISON, R. P.; LOOSEMORE, K.; MILNE, I. Assessment of the integrity of structures containing defects, CEGB Report R/H/R6. Central Electricity Generating Board (CEGB), 1976.
- JANSSEN, Michael; ZUIDEMA, Jan; WANHILL, Russell. Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC Press, 2004.
- JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY, JCSS. Probabilistic model code. Joint Committee on Structural Safety, v. 601, 2001.
- MELCHERS, RE1065679. Search-based importance sampling. Structural safety, v. 9, n. 2, p. 117-128, 1990.