

Análise da Confiabilidade de Oleodutos Corroídos Utilizando o Método de Monte Carlo

Roberto M. F. Squarcio

Universidade Federal do Paraná - PPGMNE/CESEC
81531-990, Caixa Postal 19081, Centro Politécnico, Curitiba, PR
E-mail: roberto_squarcio@yahoo.com.br

Anselmo Chaves Neto

Universidade Federal do Paraná - PPGMNE/DEST
81531-990, Caixa Postal 19081, Centro Politécnico, Curitiba, PR
E-mail: anselmo@ufpr.br

Resumo: *O objetivo deste trabalho é estimar a probabilidade de falha e conseqüentemente o índice de confiabilidade de um oleoduto, submetido à corrosão localizada, utilizando o método de Monte Carlo. Também é feita uma comparação entre os resultados obtidos nesta simulação e os obtidos por Vanhazebrouck et al. e Ahammed et al., que utilizaram o método FORM. As variáveis aleatórias são as características da corrosão e do material do oleoduto, que tem distribuições de probabilidade normal e log-normal. Para aplicar o método de Monte Carlo foi implementado um programa em ambiente Matlab.*

1. Introdução

Em dados referentes ao ano de 2007 a Petrobrás, empresa que detém a exploração e comercialização do petróleo no Brasil, obteve lucro líquido de R\$ 21.512 milhões pela produção diária de 1.918 mil barris por dia e, com 23.142 km de dutos distribuídos pelo território brasileiro. Em 2005, foram transportados 640 milhões m³/dia de petróleo, derivados e álcool e 33 milhões de m³/dia de gás. A receita operacional líquida obtida pelas operações de armazenamento e transporte dutoviário aumentou 56% em relação a 2004, totalizando R\$ 2,212 bilhões.

A corrosão é um dos grandes problemas causadores de falhas nas redes e quando se constata a perda de resistência mecânica deve-se decidir se o duto pode continuar operando normalmente, se é necessário reduzir a pressão de operação, ou ainda se deve ser feito algum reparo. Corrosão é a deterioração e a perda de um material devido a um ataque químico e as condições que favorecem a corrosão envolvem tanto alterações químicas como eletrônicas. A taxa de crescimento do defeito de corrosão em seu estado estacionário pode ser dada por:

$$R_d = \frac{\Delta d}{\Delta T} \Rightarrow d = d_0 + R_d \cdot (T - T_0) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$R_a = \frac{\Delta a}{\Delta T} \Rightarrow a = a_0 + R_a \cdot (T - T_0) \quad (\text{Eq. 2})$$

onde, R_d é a taxa de corrosão em seu estado estacionário na direção da profundidade do defeito ou taxa de corrosão radial; e R_a é a taxa de corrosão em seu estado estacionário na direção do comprimento do defeito, ou taxa de corrosão longitudinal; Δd é a diferença entre duas medidas de profundidade do defeito; Δa é diferença entre duas medidas de comprimento do defeito e ΔT é a diferença tempo entre duas destas medidas. Os valores de R_d e R_a são utilizados para estimar a profundidade do defeito (d) e o comprimento do defeito (a) em qualquer tempo no futuro.

Para que o duto continue operando de forma segura é necessário se fazer a manutenção preventiva tomando como diretrizes as Normas, ASME B31G, RSTRENG 0,85dL, RPA e BS-7910, "Effective Area" e DNV RP-F101. Também são utilizados métodos de elementos finitos, testes experimentais e análise por Confiabilidade Estrutural.

2. Métodos Analíticos Semi-Empíricos

O método B31G da ASME (1991), apesar de ser o mais utilizado, é também, o que apresenta resultados mais conservadores na avaliação de dutos, podendo ser anti-econômico e, ainda, avalia dutos submetidos apenas à pressão interna. Foi posteriormente alterado por Kiefner e Vieth (1989) com a implementação do método 085dL, menos conservativo, mas ainda assim, com pressões máximas recomendadas abaixo das pressões de falha e apresentando resultados contra a segurança para defeitos longos e profundos. Por esta razão, o mesmo foi modificado por Benjamin (2003) para criar o RPA ou 085dL modificado. Através de diversos ensaios experimentais e análises numéricas surge o DNV RP-F101, que além da pressão interna, admite tensões de compressão longitudinais, e apresenta resultados mais realísticos que os demais.

A nomenclatura utilizada no decorrer deste trabalho é a seguinte: D , diâmetro externo do duto; L , comprimento do duto; t , espessura da parede do duto; a , comprimento da corrosão; c , largura da corrosão; d , profundidade da corrosão; σ_{flow} , tensão de fluência no material do duto; σ_{rup} , tensão de ruptura do material do duto; σ_y , tensão de escoamento do material do duto; σ_u , tensão de última do material do duto; σ_{circ} , tensão circunferencial do duto; α , fator empírico; f_r , fator de redução; A , área longitudinal de perda de metal devido à corrosão; A_0 , área longitudinal do duto sem corrosão; M , fator de dilatação de Folias (adimensional); P , pressão interna atuante no duto; P_f , pressão interna atuante no duto para ruptura do material.

A equação básica NG-18 *Surface Flaw Equation* é expressa por:

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \cdot f_r \quad (\text{Eq. 3})$$

A tensão circunferencial do duto é dada por, $\sigma_{circ} = P \left(\frac{D}{2t} \right)$ e, no estado limite, $\sigma_{circ} = \sigma_{rup}$. Portanto, nesta situação particular considera-se que a pressão P é a pressão de falha (P_f). A pressão de falha é dada por:

$$P_f = \frac{2\sigma_{rup}t}{D} = \sigma_{flow} \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - \alpha \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \alpha \left(\frac{d}{t} \right) M^{-1}} \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

2.1 Método B31G

Este método considera as seguintes variáveis:

- i. Pressão de falha para defeitos curtos ($L \leq \sqrt{20.D.t}$ e $\alpha = 2/3$), que tem por expressão:

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \left(\frac{2t}{D} \right) \left[\frac{1 - \left(\frac{2}{3} \right) \frac{A}{A_0}}{1 - \left(\frac{2}{3} \right) \frac{A}{A_0} M^{-1}} \right], \text{ onde } M = \sqrt{1 + 0,8 \left(\frac{L^2}{D.t} \right)} \quad (\text{Eq. 5})$$

- ii. Pressão de falha para defeitos longos ($L > \sqrt{20.D.t}$, $\alpha = 1$ e $M \rightarrow \infty$), cuja expressão é:

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \left(\frac{2t}{D} \right) \left(1 - \frac{d}{t} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

2.2 Método 085dL ou B31G Modificado

Neste caso, para defeitos curtos considera-se $a \leq \sqrt{50Dt}$ e o fator de Folias

$$M = \sqrt{1 + 0,6275 \frac{a^2}{Dt} + 0,003375 \left(\frac{a^2}{Dt} \right)^2}, \text{ assim como, para defeitos longos considera-se}$$

$$a > \sqrt{50Dt} \text{ temos, } M = 3,3 + 0,032a^2(Dt)^{-1}.$$

A pressão de falha para este método é determinada pela seguinte expressão:

$$P_f = (\sigma_{esc} + 68,95MPa) \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - 0,85 \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - 0,85 \left(\frac{d}{t} \right) M^{-1}} \right] \quad (\text{Eq. 7})$$

2.3 Método “Effective Area”

A pressão de falha para cada defeito de comprimento efetivo L é determinada por:

$$P_{rup} = (\sigma_{esc} + 69MPa) \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - \left(\frac{A_{efetiva}}{A_0} \right)}{1 - \left(\frac{A_{efetiva}}{A_0} \right) M^{-1}} \right] \quad (\text{Eq. 8})$$

onde $A_{efetiva}$ é a área efetiva corroída do defeito, $L_{efetivo}$ é o comprimento efetivo do defeito e A_0 é a área original do defeito.

2.4 Método RPA ou 085dL Modificado

Para $a \leq \sqrt{20Dt}$ (defeitos curtos), a formulação é idêntica a do método 085dL ou B31G Modificado, para defeitos curtos e para $a > \sqrt{20Dt}$ (defeitos longos),

$$M = 2,1 + 0,07 \frac{a^2}{Dt}, \text{ sendo,}$$

$$P = (\sigma_y + 68,95MPa) \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - \alpha \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \alpha \left(\frac{d}{t} \right) M^{-1}} \right] \quad (\text{Eq. 9})$$

2.5 Método PCORRC ou Battelle

Esse método apresenta a seguinte formulação, para defeitos curtos ou longos:

$$P_f = \frac{\sigma_u 2t}{D} \left[1 - \left(\frac{d}{t} \right) M \right] \text{ e } M = 1,0 - \exp \left[-0,157 a^2 \left(t - \frac{d}{2} \right)^{-1} \right] \quad (\text{Eq. 10})$$

3. Métodos Experimentais

Choi (2003) realizou uma série de ensaios experimentais em dutos fabricados com aço tipo X65, para vários modelos, de mesmo material variando suas geometrias e num total de 30 tipos de corrosões de formato semi-elíptico. Variaram-se três diferentes parâmetros: R/t , d/t e a/Rt . Os valores de R/t adotados foram 21,3 e 30, considerando-se as reais dimensões do gasoduto. Os valores de d/t foram definidos como 0,4, 0,6 e 0,8. Cinco valores de a/Rt , variando de 0,5 até 6. Aplicando análise de regressão nos resultados propõe-se uma solução de carga limite como uma função de R/t , d/t e a/Rt como a seguir:

Para defeito curto, onde $\frac{a}{\sqrt{Rt}} < 6$,

$$P_f = 0,9 \frac{2t}{D} \sigma_u \left[C_2 \left(\frac{a}{\sqrt{Rt}} \right)^2 + C_1 \left(\frac{a}{\sqrt{Rt}} \right) + C_0 \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\text{onde, } C_2 = 0,1163 \left(\frac{d}{t} \right)^2 - 0,1053 \left(\frac{d}{t} \right) + 0,0292, \quad C_1 = -0,6913 \left(\frac{d}{t} \right)^2 - 0,4548 \left(\frac{d}{t} \right) - 0,1447,$$

$$C_0 = 0,06 \left(\frac{d}{t} \right)^2 - 0,1035 \left(\frac{d}{t} \right) + 1,0$$

Para defeito longo, onde $\frac{a}{\sqrt{Rt}} \geq 6$,

$$P_f = \frac{2t}{D} \sigma_u \left[C_1 \left(\frac{a}{\sqrt{Rt}} \right) + C_0 \right] \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\text{onde, } C_1 = 0,0071 \left(\frac{d}{t} \right) - 0,0126 \text{ e } C_0 = -0,9847 \left(\frac{d}{t} \right) + 1,1101$$

4. Confiabilidade Estrutural

Análise da confiabilidade é um procedimento que estima um índice de confiabilidade para a estrutura, β , a probabilidade da estrutura falhar e, também, medidas de sensibilidade que fornecem a importância de cada variável. As técnicas utilizadas para essa avaliação são: o método Monte Carlo e os métodos do tipo FORM e SORM. Em relação ao método de Monte Carlo, embora seja de fácil implementação e absolutamente geral, o grande número de simulações pode exigir um tempo de processamento elevado. Isso tem sido resolvido através de técnicas de redução de variância.

Seja \underline{X} o vetor aleatório composto pelas variáveis de projeto, que definem e caracterizam o comportamento e a segurança da estrutura. Sendo $g(\underline{X})$ a função que define a superfície de falha e a equação de estado limite é $g(\underline{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$. Esta equação estabelece a fronteira entre a região de segurança $g(\underline{X}) > 0$ e a região de ruptura $g(\underline{X}) < 0$.

Considerando uma situação simples, com distribuições de probabilidade Gaussianas, e a função de falha é $g(\underline{X}) = X_1 - X_2$, onde a variável aleatória X_1 corresponde a resistência R e X_2 a sollicitação S , tem-se que $m = S - R$ é a margem de segurança. Assim, o índice de

confiabilidade é dado por $\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$, onde μ_z e σ_z são os parâmetros da margem de segurança no espaço Gaussiano reduzido (Normal Padrão) e a probabilidade de falha pode ser expressa por, $p_f = \Phi(-\beta)$. O cálculo exato da probabilidade de falha pode ser obtido através da integração múltipla sobre todas as variáveis básicas:

$$\Pr_f = P[g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0] = \iint \dots \int_{g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0} f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (\text{Eq. 13})$$

onde $f_X(x)$ é a função densidade de probabilidade conjunta para o vetor \underline{X} , de dimensão n , das variáveis básicas e (x_1, x_2, \dots, x_n) .

4.1 Método FORM

Considere que a função de estado limite relaciona de maneira não linear as variáveis aleatórias X_i e a resposta Z , pode, também, ser não normal. Nestes casos, a forma usual de obter a média e variância de $g(\underline{X})$ consiste em ajustar uma função aproximada no ponto mais representativo do problema em análise. Essa aproximação pode ser efetuada considerando os termos de primeira ordem do desenvolvimento de $g(\underline{X})$ em série de Taylor, no ponto mais representativo do problema em análise, X^* :

$$Z \cong g(X^*) + \frac{\partial g}{\partial X} \Big|_{X^*} (X - X^*) \quad (\text{Eq. 14})$$

A transformação de *Hasofer-Lind*, das variáveis aleatórias em variáveis normais reduzidas e independentes é essencial para a resolução do problema. Esta transformação consiste na translação dos valores médios de X_i para a origem e na utilização dos desvios padrão das variáveis como unidades dos eixos respectivos. É possível relacionar o índice de confiabilidade, β , com as coordenadas do ponto de dimensionamento, $Y_i^* = -\alpha_i \beta$, conforme Figura 1, o que demonstra que β corresponde à mínima distância da origem à superfície limite, e α_i pode ser interpretado como a sensibilidade de cada uma das variáveis.

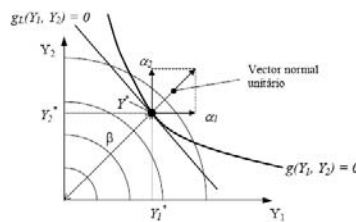


Figura 1 – Interpretação geométrica da sensibilidade de $g(\underline{X})$

4.2 Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo é um método de amostragem artificial utilizado na solução de experimentos aleatórios onde se tem conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas. Segundo Mahadevan (1997), no domínio da confiabilidade estrutural, esta técnica tem sido utilizada, também, como forma de validação dos métodos analíticos FORM / SORM. Para obter a estimativa da probabilidade de falha associada a um estado limite definido por uma função, $g(\underline{X})$, a simulação pelo método de Monte Carlo consiste na aplicação da seguinte metodologia:

- i. geração de valores para as variáveis de entrada conforme suas funções de distribuição;
- ii. verificação da eventual ocorrência de violação do estado limite; repetição de i) e ii) N vezes e contagem do número de experiências em que o limite é ultrapassado, $N[g(\underline{X}) \leq 0]$;
- iii. estimativa da probabilidade de falha média,

Para a geração dos valores das variáveis básicas, recorre-se a um algoritmo computacional, de geração de sequências de números pseudo-aleatórios. Assim, verifica-se para cada uma das variáveis, a cada passo, $\bar{Pr}_f = P[g(x) \leq 0] = \lim_{N_T \rightarrow \infty} \frac{N[g(\underline{X}) \leq 0]}{N_T}$.

As informações prévias sobre o problema considerado, fornecidas por métodos semi-empíricos permitiram a aplicação de técnicas de *simulação pura* associadas a *amostragem por importância*. Neste trabalho o uso destas técnicas reduziu o tempo de processamento necessário em 85%. Para uma mesma variância o número de simulações reduziu de 10^7 para 10^3 .

A função de estado limite considerada foi dada pela formulação do método 085dL ou B31G modificado, onde,

$$g(\underline{X}) = (\sigma_{esc} + 68,95MPa) \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \left(\frac{d}{t}\right)M^{-1}} \right] - P_a \quad (\text{Eq. 15})$$

Na geração de números pseudo-aleatórios usamos o método da congruência multiplicativo, proposto por Lehmer e a sequência de Faure.

O programa desenvolvido em *C* e *MATLab*, foi dividido em subrotinas para obtenção das informações relevantes:

Subrotina 1 - Geração de números pseudo-aleatórios por técnica de simulação pura para verificar a pressão de falha, a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade.

Subrotina 2 - Geração de números pseudo-aleatórios por técnicas de amostragem para verificar a pressão de falha, a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade.

Subrotina 3 - Obter a importância das variáveis através da correlação e comparar com os dados obtidos pelo método FORM.

Subrotina 4 - Teste de hipóteses para avaliar os dados obtidos por Monte Carlo e FORM.

5. Resultados

Todas as variáveis analisadas apresentaram distribuição do tipo Gaussiano, com exceção da tensão de escoamento do aço X52, no qual a distribuição lognormal foi encontrada como a melhor aproximação. Os valores do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha obtidos neste trabalho são comparados com aqueles apresentados por Ahammed (1998) e por Vanhazebrouck (2008), conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação de p_f e β obtidos pelos Métodos de Monte Carlo e FORM.

Tempo (anos)		10	20	30	40	50	60
Índice de Confiabilidade	Ahammed	Nd	5,442	3,777	2,226	0,973	Nd
	Vanhazebrouck	6,851	5,4419	3,7771	2,2256	0,97305	0,97305
	Squarcio	6,63	5,142	3,698	2,065	0,9778	0,0965
Probabilidade de Falha	Ahammed	Nd	$2,64 \times 10^{-08}$	$7,95 \times 10^{-05}$	0,013	0,1653	Nd
	Vanhazebrouck	$3,6666 \times 10^{-12}$	$2,6359 \times 10^{-08}$	$7,9327 \times 10^{-05}$	0,013022	0,16526	0,49475
	Squarcio	$3,7 \times 10^{-12}$	$3,0 \times 10^{-8}$	$7,36 \times 10^{-05}$	0,0165	0,1390	0,5118

A Figura 2 mostra dos dados tabelados acima para o Método de Monte Carlo.

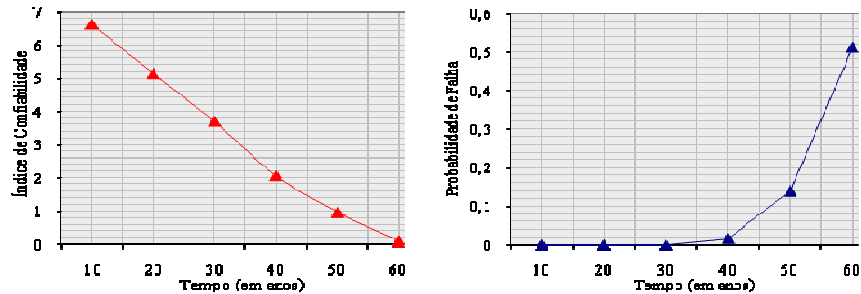


Figura 2 - Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Falha

6. Conclusão

Este trabalho comparou métodos analíticos de confiabilidade estrutural com o método Monte Carlo, em dutos com defeitos causados por corrosão. A aplicação do método Monte Carlo considerou 1000 simulações, o que permite calcular o índice de confiabilidade β e a probabilidade de falha p_f . O estudo levou em consideração as incertezas do problema, tais como, a geometria da corrosão e as características do oleoduto.

Observou-se que o índice de confiabilidade β diminui e a probabilidade de falha aumenta com o aumento do tempo de exposição, o que é esperado já que se trata de um defeito de corrosão ativa. Também se pode verificar a consistência do método Monte Carlo. Assim, foi feita a comparação entre os métodos Monte Carlo e o FORM, em termos dos números obtidos neste trabalho e os obtidos por Ahammed (1998) e por Vanhazebrouck (2008).

Algumas sugestões para trabalhos futuros são expostas a seguir:

- i. Aplicação do método para oleodutos com geometria específica ou modelagem de dutos corroídos reforçados ou ainda dutos submetidos a carregamentos combinados.
- ii. Aplicação do método no planejamento de inspeção e de manutenção de oleodutos com possibilidade de desenvolvimento de novos *softwares* para modelar o defeito.
- iii. Aplicação do método em problemas como confiabilidade em articulações mecânicas, vida útil de ferramentas de corte, vigas, pontes e barragens.
- iv. Aplicação do método para caracterizar as funções de probabilidade e coeficientes de variação das variáveis aleatórias envolvidas na análise.

REFERENCIAS

1. Ahammed, M., Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the Presence of Active Corrosion Defects, (Int. J. Pres. Ves. Piping, v.75), pp. 321-329, 1998.
2. Boaretto Antônio Camilo Guimarães, “Avaliação Simplificada da Capacidade de Carga de Dutos Corroídos”, Dissertação (Mestrado), PPGMNE-UFPR, 2005.
3. Cabral, H., “Desenvolvimento de ferramentas computacionais na modelagem e análise automática de defeitos de corrosão em dutos”, Dissertação (Mestrado), CTG-UFPE, 2007.
4. Choi, J. B.; Goo, B. K.; Kim, J.C.; et al., Development of Limit Load Solutions for Corroded Gas Pipelines, (Int. J. Pres. Ves. Piping, v.80), p.121-128, 2003.
5. Mahadevan, S. - “Monte Carlo Simulation”, *Reliability-based Mechanical Design*, Ed. Thomas A. Cruse, Vanderbilt University, pp. 130-146, 1997
6. Sagrilo, L.V.S., “Análise de confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM”, Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.
7. Vanhazebrouck Vicente Marconcin, “Análise de Dutos Corroídos por Meio de Método de Confiabilidade Estrutural”, Dissertação (Mestrado), PPGEM-PUCPR, 2008.
8. Ang, A.H.S., Tang, W.H., “Probability Concepts in Engineering Planning and Design”, John Wiley & Sons, Canadá, 1930.
9. Ditlevsen, O., Madsen, H., “Structural Reliability Methods”, J. Wiley, England, 1996.
10. Bickel, J. P., Doksum, K., “Mathematical Statistics”, Holden-Day, S. Francisco, 1977.