

Análise de segurança de dutos com defeitos de corrosão via método form

Safety assessment of pipelines subject to corrosion via form

Renata Siqueira Amaral

Departamento de Engenharia Civil – UFOP.
resamaral@yahoo.com.br

Geraldo Rossoni Sisquini

Departamento de Engenharia Mecânica – UFES.
sisquini@bol.com.br

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Departamento de Engenharia Civil – UFOP.
marcilio@em.ufop.br

Resumo

Um dos principais motivos de falhas de dutos é a corrosão. Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a avaliação da pressão interna de falha para dutos corroídos. Entre os métodos analíticos semiempíricos, destacam-se ASME B31G, B31G modificado e RPA. A maioria desses métodos é de natureza determinística, não considerando, portanto, nenhuma incerteza nas variáveis envolvidas, além de considerar apenas configurações de defeitos simplificadas. Foi utilizada a teoria da confiabilidade estrutural, aplicando-se o método FORM (First Order Reliability Method), para se estimar a probabilidade de falha de dutos que apresentam defeitos de corrosão. Foram considerados como variáveis aleatórias, vários parâmetros do duto e da geometria do defeito, tais como diâmetro e espessura do duto, tensão de escoamento do material do duto, comprimento e profundidade do defeito e a pressão do fluido. Foi apresentado um exemplo, utilizando-se todos os métodos, demonstrando a viabilidade desse procedimento. A taxa de corrosão radial foi parâmetro mais importante, para a falha do duto, no longo prazo.

Palavra-chave: Dutos com corrosão, avaliação de segurança, FORM.

Abstract

One of the main reasons for the failures of pipelines is corrosion. Several methods have been developed for assessing the internal pressure of failure in corroded pipes. Among the semi-empirical analytical methods, ASME B31G, modified B31G and RPA stand out. These methods are deterministic in nature and therefore, do not consider uncertainty in the variables involved and consider only simplified configurations for defects. The First Order Reliability Method (FORM) was used to assess the probability of failure of a pipeline subject to corrosion defects. Multiple parameters of the pipeline and the defect's geometry: such as, diameter and thickness of the pipe's ultimate stress, drainage of the duct material, defect length and depth, and fluid pressure were considered as random variables. One example using all of the methods was given to demonstrate the feasibility of this procedure. Radial corrosion rate was the most significant contributor to the pipeline failure in the long term.

Keywords: Corroded pipelines, safety assessment, FORM.

1. Introdução

Um dos motivos para a falha de um duto é a corrosão. O estado dos dutos, quanto aos defeitos de perda de espessura, por corrosão, pode ser bastante variado. Existem dutos com poucos pontos de corrosão e outros com dezenas de milhares, inclusive com diversos graus de corrosão. Essa diversidade, nas condições do duto e no que diz respeito ao risco que ele representa para o meio ambiente, faz com que a avaliação da

segurança, quanto a esse tipo de defeito, seja da maior importância.

Vários métodos analíticos semiempíricos, tais como ASME B31G, ASME B31G modificado e RPA, foram desenvolvidos, para a avaliação da pressão interna de falha, para dutos com defeitos de corrosão com orientação longitudinal, sendo o método B31G o mais utilizado e aceito. Nesse trabalho, são analisados dutos com de-

feitos de corrosão, tendo-se, como objetivo, estimar a probabilidade de falha e identificar as variáveis aleatórias que apresentam maior importância para a falha desses dutos. Esse estudo foi conduzido em ambiente MATLAB, utilizando-se a teoria da confiabilidade estrutural, tendo sido aplicado o método First Order Reliability Method (FORM) (Amaral, 2011 e Barbosa et al., 2005).

2. Métodos analíticos semiempíricos

Esses métodos são baseados em equações da Mecânica da Fratura, em ensaios experimentais até a ruptura

dos dutos e em simulações de elementos finitos. Cada método possui uma formulação para determinar a pressão

de falha de dutos com defeitos de corrosão.

A equação básica é expressa por:

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \cdot f_r \quad (1)$$

onde σ_{rup} é a tensão de ruptura, σ_{flow} é a tensão de escoamento média do material e f_r é o fator de redução.

A tensão circunferencial do duto é dada por $\sigma_{circ} = P(D/2t)$ e, no estado limite, $\sigma_{circ} = \sigma_{rup}$. Nessa situação particular,

considera-se que a pressão P é a pressão de falha (P_f). A pressão de falha é dada por:

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

onde P_f é a pressão interna atuante no duto, para ruptura do material, t é a espes-

sura da parede do duto, D é o diâmetro externo do duto, α é o fator empírico, d é a

profundidade de corrosão e M é o fator de dilatação de Folias (adimensional).

Método ASME B31G

O método ASME B31G definiu que a área de um defeito de corrosão considerado como curto assume uma forma de parábola, ou seja, $\alpha = 2/3$, enquanto

que, em defeitos longos, a área perdida assume a forma retangular, portanto α é igual ao valor da unidade, sendo aplicável para $0,1 \leq (d/t) \leq 0,8$. Esse método

considera as seguintes variáveis:

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

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_0}\right)}{1 - \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_0}\right) \cdot M^{-1}} \right] \quad (3)$$

$$M = \sqrt{1 + 0,8 \left(\frac{a^2}{D \cdot t}\right)} \quad (4)$$

onde σ_{esc} é a tensão de escoamento do material do duto, A é a área longitudinal de perda de metal devido à corrosão, A_0 é

a área longitudinal do duto sem corrosão e a é o comprimento do defeito.

($a \geq \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$ e $\alpha = 1$ e $M \rightarrow \infty$), que tem, por expressão:

2) Pressão de falha para defeitos longos

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \cdot \left(1 - \frac{d}{t}\right) \quad (5)$$

Método B31G Modificado ou 085dL

Essa versão modificada do método ASME B31G foi proposta por Kiefner e Vierth (1990). Esse méto-

do é, também, conhecido como Rstreng/0,85 dL, sendo aplicável para $0,2 \leq (d/t) \leq 0,8$.

1) Para defeitos curtos ($a \leq \sqrt{50 \cdot D \cdot t}$), o fator de Folias é dado por:

$$M = \sqrt{\left[1 + 0,6275 \cdot \left(\frac{a^2}{D \cdot t}\right) + 0,00375 \cdot \left(\frac{a^2}{D \cdot t}\right)^2\right]} \quad (6)$$

onde a é o comprimento de corrosão. 2) Para defeitos longos ($a \geq \sqrt{50 \cdot D \cdot t}$), o fator de Folias é dado por:

$$M = 3,3 + 0,032 \cdot a^2 \cdot (D \cdot t)^{-1} \quad (7)$$

Para esse método, a pressão de falha é determinada por:

$$P_f = (\sigma_{esc} + 68,95) \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \cdot \left[\frac{1 - 0,85 \cdot \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - 0,85 \cdot \left(\frac{d}{t}\right) \cdot M^{-1}} \right] \quad (8)$$

Método RPA ou 085dL Modificado

Para defeitos curtos ($a \leq \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$), a formulação é igual ao método B31G modificado ou, 085dL, e, para defeitos longos ($a \geq \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$), o fator de Folias é dado por $M = 2,1 + 0,07 \cdot a^2 \cdot (D \cdot t)^{-1}$, sendo

$$P_f = (\sigma_{esc} + 68,95) \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \cdot \left[\frac{1 - \alpha \cdot \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \alpha \cdot \left(\frac{d}{t}\right) \cdot M^{-1}} \right] \quad (9)$$

onde σ_{esc} é a tensão de escoamento do material do duto.

Método DNV RP – F101

Esse método considera o defeito como retangular, portanto o fator $\alpha = 1$, sendo que o valor da tensão média de escoamento do material é igual à resistência à tração do material, $\sigma_{flow} = \sigma_{rup} = \sigma_u$.

$$P_f = \frac{\sigma_u \cdot 2 \cdot t}{D - t} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \left(\frac{d}{t}\right) \cdot M^{-1}} \right] \quad (10)$$

$$M = \left[1 + 0,31 \cdot \left(\frac{a^2}{D \cdot t}\right)\right]^{1/2} \quad (11)$$

Método PCORRC ou Battelle

Nesse método, a pressão de falha e o fator de Folias são dados por:

$$P_f = \frac{\sigma_u \cdot 2 \cdot t}{D} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{t}\right) \cdot M\right] \quad (12)$$

$$M = 1 - \exp \left[-0,157 \cdot \frac{a}{\sqrt{D \cdot \left(t - \frac{d}{2}\right)}} \right] \quad (13)$$

3. Método de confiabilidade de primeira ordem (FORM)

O principal objetivo da confiabilidade estrutural é a avaliação da segurança das estruturas ou a probabilidade de que a estrutura não falhe em atender aos objetivos para os quais ela foi projetada durante a sua vida útil. Os principais métodos utilizados, para esse objetivo, são os chamados métodos analíticos e os métodos baseados na simulação de Monte

Carlo. Nesse trabalho, é utilizado o método analítico FORM.

A idéia principal do Método FORM é que, para uma função de falha linear e no espaço reduzido das variáveis normais padrão estaticamente independentes, a confiabilidade pode ser facilmente obtida através da distância da função até a origem. Segundo

Der Kiureghian e Liu (1986) as variáveis aleatórias U , cujas distribuições são quaisquer e podem ser dependentes entre si ou não, são transformadas em variáveis V normais padrão estaticamente independentes. A função de falha $G(U)$ é escrita em função das variáveis V como $g(V)$. Além disso, a superfície de falha $g(V)=0$ é aproximada por uma

superfície linear no ponto com a menor distância até a origem, identificado por

V^* , onde V^* é o ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas. Com isso,

a probabilidade de falha pode ser calculada como:

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{14}$$

onde β é a distância do ponto V^* até à origem e é calculado como

$$\beta = |V^*| \tag{15}$$

Tem-se, ainda, que $V^* = -\alpha\beta$

$$g(V) = \beta + \sum \alpha_i \cdot v_i \tag{16}$$

onde α é o vetor normal à superfície de falha, no ponto do projeto.

4. Resultados e discussões

Para demonstrar a utilização e a aplicabilidade dos métodos apresentados anteriormente, um duto típico com defeito de corrosão foi analisado. Como exemplo da aplicação do método FORM foi considerado o exemplo adotado por Ahammed (1998), reproduzido por Torres (2007) e Vanhazebrouck (2008), em seus trabalhos.

Considera-se o exemplo de um duto para o qual inspeções regulares foram realizadas em intervalos pré-especificados. A última inspeção foi realizada para um duto com 10 anos e os valores correspondentes ao comprimento do defeito inicial e a taxa de corrosão radial foram medidos e calculados nesse tempo. Estas e outras variáveis aleatórias consideradas

nessa análise são apresentadas na Tabela 1, juntamente com seus tipos de distribuição e valores estatísticos.

Para a taxa de corrosão, na direção da profundidade ou radial (R_d), e, para a taxa de corrosão, na direção do comprimento do defeito ou longitudinal (R_a), são apresentadas as equações abaixo:

$$R_d = \Delta d / \Delta T \tag{17}$$

$$R_a = \Delta a / \Delta T \tag{18}$$

onde Δd é a diferença entre duas medidas de profundidade do defeito, Δa é a diferença entre duas medidas de comprimento

do defeito e ΔT é a diferença de tempo entre duas medidas.

comprimento do defeito ao longo do tempo é definida como sendo linear:

A variação da profundidade e do

$$d = d_0 + R_d \cdot (T - T_0) \tag{19}$$

$$a = a_0 + R_a \cdot (T - T_0) \tag{20}$$

onde d_0 é o valor da profundidade do defeito no tempo T_0 e a_0 é o valor do comprimento do defeito no tempo T_0 .

o índice de confiabilidade, a probabilidade de falha e os fatores de importância. Na Figura 1, são apresentados os valores do índice de confiabilidade e, na Figura 2, são apresentados os valores da probabilidade de falha, para o exemplo apresentado anteriormente, tendo sido adotada a metodologia proposta por Ahammed.

Como se pode perceber na Figura 1, o índice de confiabilidade vai diminuir

Como se pode perceber na Figura 1, o índice de confiabilidade vai diminuir

Variável	Descrição	Função Densidade de Probabilidade	Média	Coefficiente de Variação	Desvio Padrão
d_0	Profundidade do defeito inicial	Normal	3 mm	0,1	0,3
D	Diâmetro do duto	Normal	600 mm	0,03	18
a_0	Comprimento do defeito inicial	Normal	200 mm	0,05	10
P_a	Pressão interna	Normal	5 MPa	0,1	0,5
σ_{esc}	Tensão de escoamento do material do duto	Lognormal	423 MPa	0,067	28,341
t	Espessura da parede do duto	Normal	10 mm	0,05	0,5
R_d	Taxa de corrosão radial	Normal	0,10 mm/ano	0,2	0,02
R_a	Taxa de corrosão longitudinal	Normal	0,10 mm/ano	0,2	0,02

Tabela 1
Variáveis aleatórias e parâmetros de distribuição - Ahammed (1998).

nuindo com o passar do tempo de forma quase linear, mas a probabilidade de falha apresenta um comportamento não-linear. Este é o comportamento esperado, podendo ser atribuído ao aumento da área do defeito com o aumento do tempo de exposição, resultando em uma redução da capacidade resistente do duto, ou seja, no aumento da probabilidade de falha. Com esse gráfico,

é possível planejar inspeções, determinar a vida do duto, fazer reparos ou substituir o duto com defeito. Esse gráfico pode ser usado para determinar a vida remanescente do duto. Por exemplo, considerando um valor aceitável típico para o índice de confiabilidade igual a 3, pode-se verificar que vida remanescente desse duto seria de $(35 - 10)$ anos, ou seja, 25 anos.

A probabilidade de falha foi determinada para vários períodos de exposição. Para o tempo de exposição de 10 anos a probabilidade de falha é de $3,6 \times 10^{-12}$, para 20 anos, é de $2,6 \times 10^{-8}$, para o tempo de 30 anos, é de $7,9 \times 10^{-5}$, para 40 anos, tem-se 0,013, para o tempo de 50 anos, 0,165 e, para o tempo de exposição de 60 anos, a probabilidade de falha é de 0,495.

Figura 1
Gráfico do índice de confiabilidade versus o período de exposição.

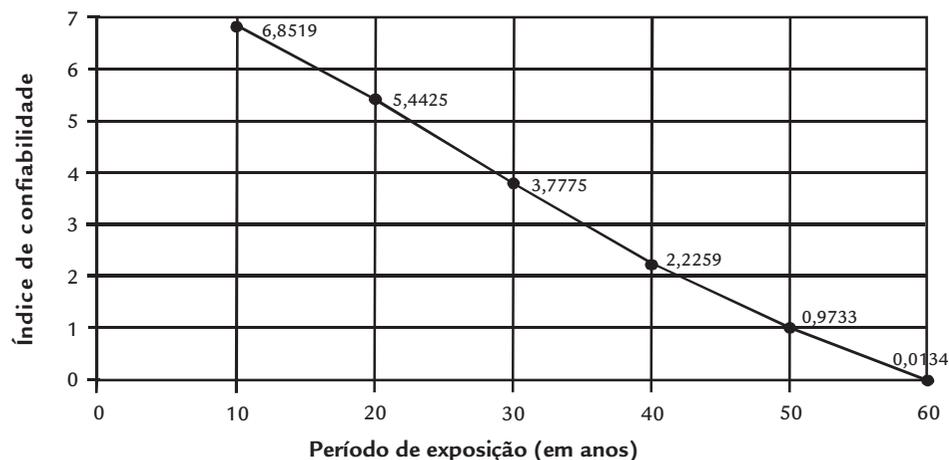
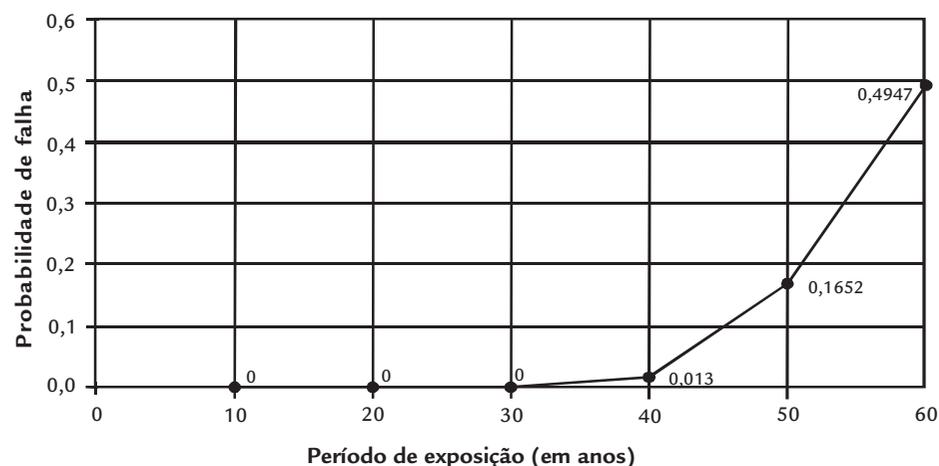


Figura 2
Gráfico da probabilidade de falha versus o período de exposição.



Cálculo da importância relativa das variáveis

Outra análise é feita através do cálculo das medidas de sensibilidade, como o cálculo dos fatores de importância, que indicam qual é a importância relativa de cada variável, no valor final da probabilidade de falha. A Tabela 2 mostra a contribuição de cada uma das variáveis aleatórias, para o cálculo do índice de confiabilidade, para diferentes tempos de exposição.

Pode-se notar, na Tabela 2, que as variáveis diâmetro do duto (D), com-

primário inicial do defeito (a_0) e a taxa de corrosão longitudinal (R_a) possuem contribuição baixa para todo o período de exposição. Em vista dessa contribuição baixa, pode-se dizer que não haveria diferença significativa para os resultados globais, se estas variáveis forem tratadas como determinísticas. A contribuição de algumas variáveis, como, por exemplo, a profundidade do defeito, a pressão interna e a espessura da parede do duto torna-se elevadas em períodos de baixa

exposição, mas diminui gradualmente com o aumento do tempo de exposição. Isso implica que essas variáveis são muito importantes, em períodos de baixa exposição, mas sua importância diminui com o aumento do tempo de exposição. No entanto, a taxa de corrosão radial tem contribuição baixa em períodos de baixa exposição e a contribuição aumenta, rapidamente, com o período de maior exposição. Isto a torna uma variável importante, em períodos de alta exposição.

Comparação entre os métodos semiempíricos

Utilizando a formulação apresentada para o cálculo da pressão de falha, será feita uma comparação entre os mé-

todos semiempíricos. Com o método FORM, pode ser feito o cálculo do índice de confiabilidade, para cada mé-

do. O aumento do defeito, ao longo do tempo, é dado por uma aproximação linear e serão utilizados os parâmetros

Variável	Descrição	T=20 anos	T=30 anos	T=40 anos	T=50 anos
d_o	Profundidade do defeito inicial	0,1402	0,1321	0,1068	0,0815
D	Diâmetro do duto	0,0162	0,0088	0,0049	0,0030
a_o	Comprimento do defeito inicial	0,004	0,0037	0,0028	0,0021
P_a	Pressão interna	0,1653	0,1125	0,0741	0,0504
σ_{esc}	Tensão de escoamento do material do duto	0,0795	0,0466	0,0275	0,0174
t	Espessura da parede do duto	0,5326	0,4614	0,3568	0,2663
R_d	Taxa de corrosão radial	0,0623	0,2348	0,4271	0,5794
R_a	Taxa de corrosão longitudinal	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

apresentados por Ahammed (1998), que representam um defeito curto. A diferença é que, em alguns métodos, utiliza-

Defeitos Curtos ($a \leq \sqrt{20.D.t}$)

Para a comparação dos métodos, para defeitos curtos, são utilizado os dados da Tabela 1, considerando a tensão última do material do duto, para o aço de classe X52 de 513 MPa. Na Figura 3, estão apresentados os índices de confia-

se a tensão última do material, como os métodos DNV e o PCORRC. Utiliza-se a tensão última do material do duto (σ_u),

bilidade, para os métodos com defeitos curtos.

Como as expressões para defeitos curtos é a mesma para o método B31G modificado e o método RPA, os resultados são os mesmos. Pode-se verificar a

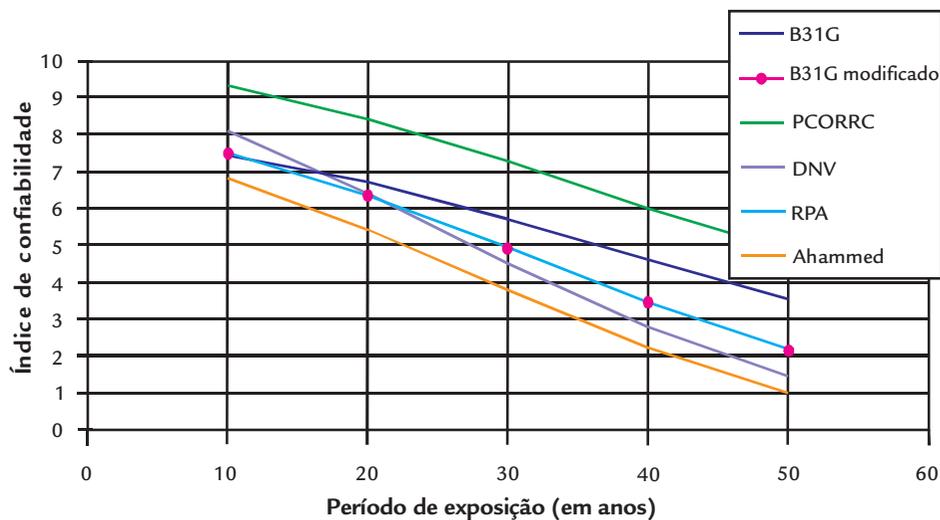


Tabela 2

Cálculo do fator de importância de cada uma das variáveis dependendo do tempo de exposição.

para o aço de classe X52 de 513 MPa. Em seguida, será realizada uma análise para defeitos longos.

variação do índice de confiabilidade entre os métodos semiempíricos, para defeitos curtos. Pode-se observar a influência de incertezas na análise de confiabilidade, que possui um maior impacto em alguns métodos, como o DNV.

Defeitos Longos ($a \geq \sqrt{50.D.t}$)

Para realizar a análise comparativa entre os métodos, para defeitos longos, serão utilizados os mesmo dados utilizados para defeitos curtos, porém o com-

primento inicial do defeito (a_o) é de 550 mm e a taxa de corrosão longitudinal (R_a) é de 2 mm/ano. O valor adotado, para o comprimento inicial do defeito,

atende a condição de defeito longo, para todos os métodos analisados. Os resultados obtidos, para o índice de confiabilidade, estão apresentados na Figura 4.

5. Conclusões

Esse trabalho tem, como objetivo, o estudo da segurança de dutos metálicos com defeitos de corrosão. É apresentada uma metodologia probabilística, para a estimativa da vida remanescente de um duto, na presença de defeitos de corrosão. As variáveis que influenciam a confiabilidade são tratadas como variáveis aleatórias e são representadas por distribui-

ções de probabilidade. Essa metodologia permite, também, o cálculo do índice de confiabilidade e a probabilidade de falha. A aplicabilidade da metodologia é demonstrada em exemplos com a análise de um duto.

Verificou-se, com o estudo, que o índice de confiabilidade do duto diminuiu com o maior período de exposição,

o que é esperado já que se trata de um defeito de corrosão ativa. Porém isso é de grande importância, pois pode auxiliar na determinação e no planejamento de inspeções e reparos no duto com defeito.

A taxa de corrosão radial pode tornar-se a mais importante para a falha do duto em longo prazo, embora a sua contribuição, em curto prazo, possa não

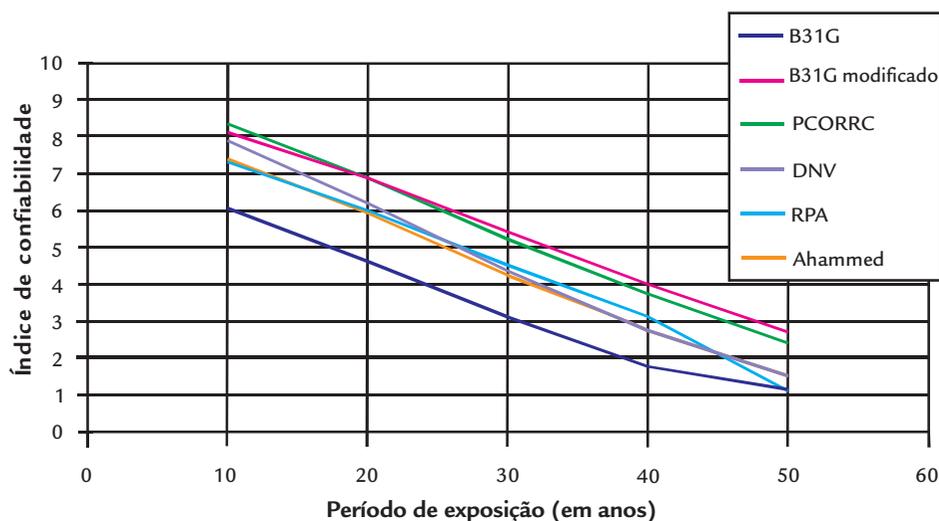


Figura 4
Índice de confiabilidade versus o período de exposição, para os métodos semiempíricos, para defeitos longos.

ser tão significativa. Já a taxa de corrosão longitudinal continua a ser insignificante para todos os valores do período

de exposição. Através da análise do fator de importância, foi possível identificar as variáveis aleatórias que apresentam

maior importância e menor influência na caracterização de falha do duto.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior),

CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pes-

quisa do Estado de Minas Gerais).

7. Referências bibliográficas

- AHAMMED, M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects. *Int. J. Pres. Ves. Piping*, v. 75, p. 321-329, 1998.
- AMARAL, R. S. *Análise de segurança de dutos com defeitos de corrosão*. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, 2011. (Dissertação de Mestrado).
- ASME, Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines. A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping, the American Society of Mechanical Engineers, New York, 1991.
- BARBOSA, A. H., FREITAS, M. S. R., NEVES, F. A. Confiabilidade estrutural utilizando o método de Monte Carlo e redes neurais. *REM - Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 58, n. 3, p. 247-255, 2005.
- KIEFNER, J. F., VIETH, P.H. New method corrects criterion for evaluating corroded pipe. *Oil and Gas Journal*, v. 88, p. 56-59, 1990.
- DER KIUREGHIAN, A., LIU, P. L. Structural reliability under incomplete probability Information. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, v. 112, p. 85-104, 1986.
- TORRES, J. V. S., AFONSO, S. M. B., VAZ, L. E. Metodologia probabilística para estudar dutos na presença de defeitos de corrosão. RIO PIPELINE CONFERENCE E EXPOSITION. *Anais...* 2007.
- VANHAZEBROUK, V. M. *Análise de dutos corroídos por meio de método de confiabilidade estrutural*. PUC-PR, 2008. (Dissertação de Mestrado).

Artigo recebido em 05 de outubro de 2011. Aprovado em 23 de agosto de 2012.