

4

Dano em dutos causados por corrosão

Análises baseadas em métodos de confiabilidade estrutural são amplamente aceitas e de grande ajuda para o gerenciamento e a avaliação da integridade de dutos, especialmente, de defeitos causados por corrosão e que são detectados e medidos através de ferramentas de inspeção em linha (*PIG* instrumentado) [59,60].

4.1

Funções de estados limites

Estados limites em dutos devem ser classificados em três categorias [20]:

- *Estado limite último catastrófico ou de ruptura (Ultimate Limit State - ULS)*: perda de contenção do duto por grandes vazamentos, por ruptura devido à falha em defeitos, por impacto causado por equipamentos externos, ou por falha causada pela flexão excessiva. Também pode ser incluído nesta categoria falhas por vazamentos catastróficos causados por flambagem local, ou global, ou colapso da secção.
- *Estado limite de vazamento (Leak Limit State - LLS)*: vazamento de pequenos defeitos que levem a perda de contenção do duto (p. ex. vazamentos que ocorrem em defeitos com furos que têm diâmetro menor que 10 mm).
- *Estado limite de operacionalidade (Serviceability Limit State - SLS)*: perda do serviço para o qual foi projetado, mas sem perda de contenção. Aqui podem ser incluídos os danos por plastificação, ovalização, amassamento e deformação plástica excessiva. Também podem ser flambagem local, ou global, sempre e/ou quando se demonstrar que o dano não levará a perda de contenção.

Uma função de estado limite é uma expressão matemática, a qual pode assumir valores negativos se o estado limite é excedido. Neste caso, tem-se uma falha. Ou pode se ter valores positivos, caso o estado limite não seja excedido e mantenha bom desempenho da estrutura.

A função de estado deve estar definida com os parâmetros que descrevem a *capacidade* e a *demand*a da estrutura, ou a carga L que atua na estrutura e a resistência R dela. Segundo, como foi definido no capítulo 2, uma função de estado limite é dada por:

$$g(x) = m = \text{capacidade} - \text{demand}a = R - L \quad (4.1)$$

As equações de estado limite são usadas para calcular a probabilidade de uma estrutura exceder o estado limite de acordo com:

$$POF = P[g(x) \leq 0] = P[m \leq 0] \quad (4.2)$$

Logo, para a análise de confiabilidade estrutural de dutos corroídos, uma função limite de falha pode ser definida como a probabilidade da carga no duto (p. ex. pode ser considerada a pressão interna expressa pela pressão operação P_{op}) exceder a resistência ou a capacidade do duto (que para o caso é a pressão de falha P_f devido ao defeito de corrosão).

O cálculo da pressão de falha P_f , depende de várias variáveis, dentro das quais se destacam as dimensões do defeito por corrosão. Defeitos de corrosão são detectados e medidos pelo *PIG* instrumentado. O relatório do *PIG* instrumentado contém basicamente a profundidade do defeito, o comprimento do defeito, a largura do defeito e a posição do defeito.

4.1.1

Medição dos defeitos de corrosão

Toda medição está sujeita a incerteza. No caso dos *PIGs* não é diferente, portanto, é importante o conhecimento dos erros de medição e a exatidão na determinação das dimensões dos defeitos, para se fazerem análises de confiabilidade adequadas.

Na inspeção de dutos para detectar e medir defeitos originados pela corrosão existem basicamente dois tipos de *PIGs*, que são classificados de acordo com a tecnologia usada para a medição do defeito, estes são: o *PIG* de fuga do campo magnético (*MFL*) e o *PIG* ultrassônico.

PIG de Fuga do Campo Magnético (Magnetic-Flux Leakage, MFL)

O *PIG* magnético usa o magnetismo para detectar mudanças na espessura de parede do duto, t . O *PIG* magnético fornece medições relativas da profundidade do defeito, que são expressas em porcentagem da espessura da parede do duto e dadas para um nível de confiança especificado, que indica a quantidade, ou porcentagem de medições que se encontram dentro da exatidão do *PIG* [59].

Na figura 4.1 ilustra-se a distribuição normal das medições de uma ferramenta que tem exatidão de $\pm 10\%$ de t , com nível de confiança de 80 %.

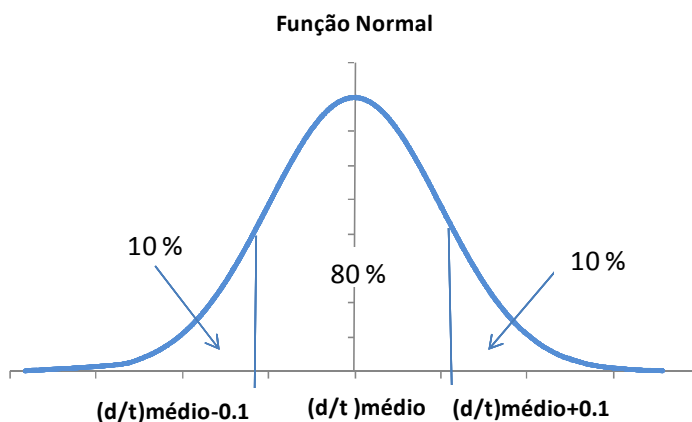


Figura 4.1 – Distribuição das medições de um *PIG* com exatidão de $\pm 10\%$ de t , com nível de confiança de 80 %.

A área que corresponde a 80% da curva normal encontra-se limitada pela incerteza de $\pm 10\%$ de t em torno do valor médio de d/t . Os limites $(d/t)_{\text{médio}} \pm 0.1$, correspondem a um número de desvios padrões ao redor de $(d/t)_{\text{medido}}$ (valor médio esperado para o valor medido) e que, neste caso é 1.28. Este número é calculado usando a equação (4.3) e o desvio padrão é obtido com a equação (4.4).

$$n_s = - {}^{-1}\left(\frac{1-NC}{2}\right) \quad (4.3)$$

$$s_{[d/t]} = \frac{\text{incerteza}}{n_s} \quad (4.4)$$

Onde, n_s é o número de desvios padrões, ${}^{-1}(\cdot)$ é a distribuição normal padrão inversa, NC é o nível de confiança, por exemplo, para 80% é 0.8.

PIG Ultrassônico (Ultrasonic PIG – UT)

Este tipo de ferramenta de inspeção usa ultra-som para detectar o defeitos. A técnica de pulso-eco é usada para medir a espessura remanescente da parede do duto. As medições obtidas são absolutas, logo, a espessura remanescente da parede do duto t_r , e a exatidão de ferramenta são dadas diretamente, por exemplo, exatidão de ± 1 mm para o nível de confiança de 90 % [59].

4.1.2

Detecção dos defeitos de corrosão

Na inspeção de dutos não é sempre garantido que todos os defeitos presentes sejam detectados e, portanto, existe a probabilidade de alguns defeitos não serem reportados.

A probabilidade de detecção, POD , de um determinado defeito é expressa em função do tamanho do defeito (a). As curvas de POD medem o desempenho da técnica de inspeção e podem ser definidas, de modo geral, por uma função exponencial [3, 22, 23], tal como apresentado nas figuras 4.2 e 4.3, assim:

$$POD = f(a, q) \quad (4.5)$$

A *POD* da figura 4.2 é um exemplo típico da curva de detecção de um *PIG* magnético (*MFL*) [22,60]. O valor de *POD* esta em função da profundidade do defeito (d/t).

A *POD* da figura 4.3 é uma curva de detecção da técnica de inspeção por partículas magnéticas (*MPI*), técnica comumente usada em estruturas marinhas [61]. O valor de *POD* esta em função da profundidade da trinca (a).

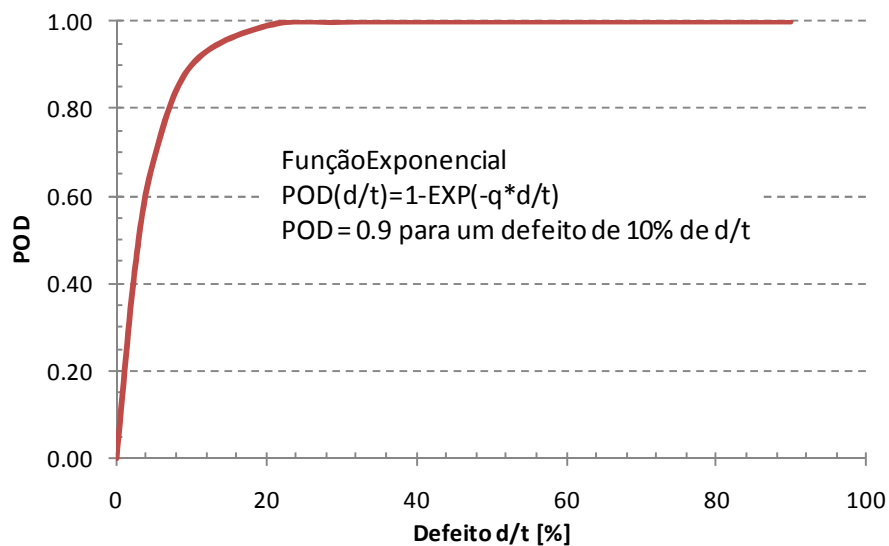


Figura 4.2 – Curva de *POD* para um *PIG* Magnético (*MFL*).

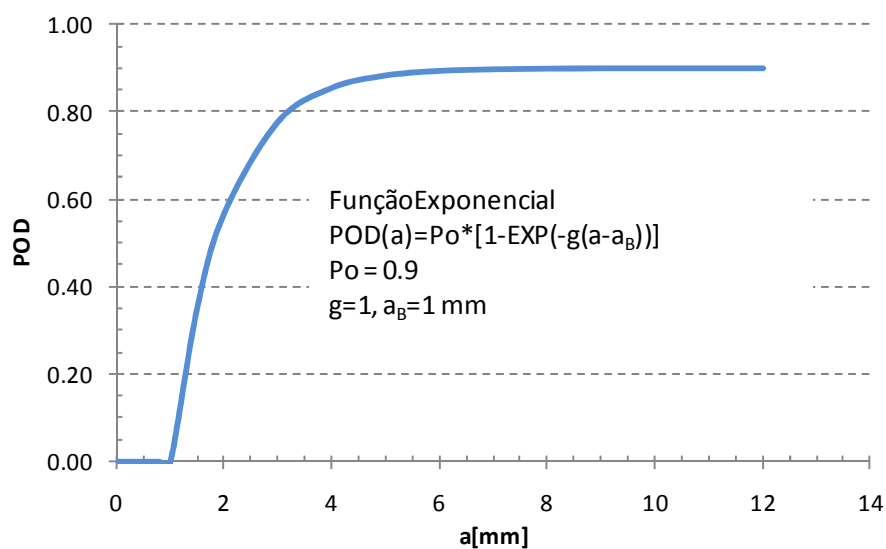


Figura 4.3 – Curva de *POD* para técnica de inspeção por partículas magnéticas (*MPI*) em baixo d'água.

4.2

Falha de um duto corroído

Um defeito de corrosão com profundidade, d , em um duto, pode provocar uma falha por vazamento, caso o defeito penetre toda a espessura de parede, t , a uma pressão de operação, Pop , baixa, ou pode provocar uma ruptura devido à espessura de parede remanescente no local do defeito sofrer colapso plástico.

O evento de ruptura pode ser dividido em dois eventos, em função do comportamento do comprimento L_d do defeito, durante a ruptura. Se, no decorrer desta, o crescimento de L_d é estável a falha será dada por um grande vazamento, mas se L é instável, a falha será uma ruptura propriamente dita [60].

Conforme o exposto acima, é possível identificar três funções de estado limite que levam à falha de um duto ante a presença de um defeito por corrosão, as quais são [20]:

- *Função do estado limite para vazamento (g_v)*: ocorre quando a profundidade d do defeito por corrosão excede a espessura de parede t do duto. Esta falha ocorre para defeitos curtos que não provocam ruptura devido à pressão interna.

- *Função do estado limite para grandes vazamentos (g_{gv})*: ocorre quando se tem ruptura *controlada*, devido à pressão interna ser maior que a pressão de falha causada pelo defeito. O tipo de falha resultante é o de um grande vazamento do fluido contido no duto. Neste estado limite o valor de L_d não deve exceder a um tamanho crítico do comprimento do defeito L_c [31].

- *Função do estado limite para ruptura (g_r)*: ocorre quando houver ruptura devido à pressão interna ser maior que a pressão de falha causada pelo defeito. O tipo de falha resultante é, então, o de um grande vazamento do fluido contido no duto. Neste estado limite o tamanho de L_d é maior que L_c e seu crescimento é instável, portanto, a falha será uma ruptura propriamente dita.

Segundo as definições dos estados limites, o modo de falha será basicamente ditado pela profundidade d e o comprimento L_d do defeito. A figura 4.4, apresenta um gráfico ilustrativo dos estados limites em função de d e L_d .

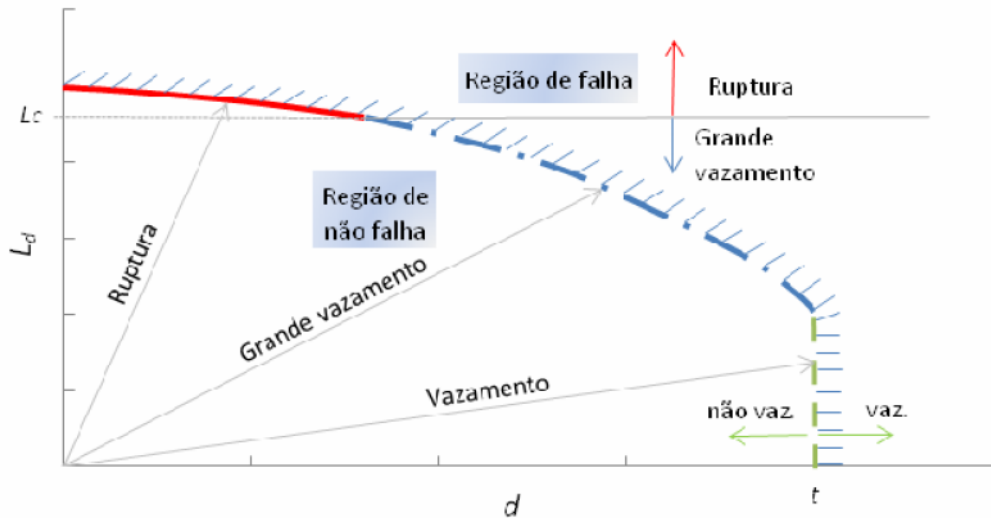


Figura 4.4 – Estados limites para dutos com defeitos de corrosão.

4.2.1

Modelos de pressão de falha para dutos corroídos

A integridade de um duto corroído é avaliada através da pressão de falha que ocorre no local do defeito de corrosão, a qual é determinada a partir de estimativas teóricas. A seguir são descritos alguns modelos para o cálculo da pressão de falha de um duto com defeitos de corrosão simples, figura 4.5 (só são fornecidos à profundidade do defeito, d , e o comprimento do defeito, L_d).

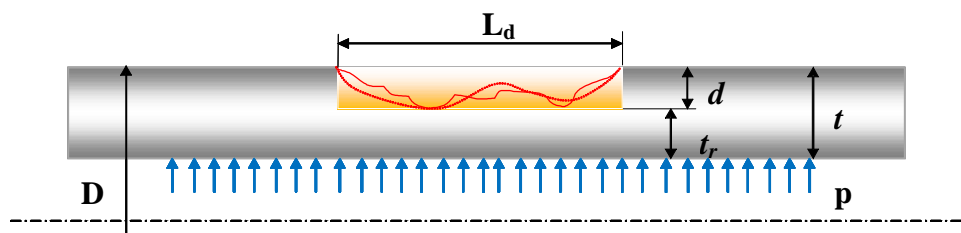


Figura 4.5 – Geometria de um defeito de corrosão.

Para todos os modelos as variáveis consideradas são: o limite de resistência ao escoamento mínimo especificado, $SMYS$, a resistência ao escoamento do

material, σ_y , o limite de resistência a tração mínimo especificado, $SMUS$, a resistência a tração do material, σ_u , o diâmetro do duto, D , a espessura de parede do duto, t e o fator de Folias, M (o qual foi calculado a partir de conceitos da mecânica da fratura).

Método do ASME B31G

Este método do código ASME B31G [24], é o mais usado na avaliação estrutural de dutos corroídos que só se encontram submetidos à pressão interna [25,26]. O cálculo da pressão de falha é definido por:

$$P_f = 1.11\sigma_y \frac{2t}{D} \left(\frac{1 - \frac{2}{3} \frac{d}{t}}{1 - \frac{2}{3} \frac{d}{t} M^{-1}} \right) \quad \text{se } A < 4 \quad (4.5)$$

$$P_f = 1.11\sigma_y \frac{2t}{D} \left(1 - \frac{d}{t} \right) \quad \text{se } A \geq 4 \quad (4.6)$$

$$A = 0.893 \frac{L}{\sqrt{Dt}} \quad (4.7)$$

$$M = \sqrt{1 + 0.893 \frac{L^2}{Dt}} \quad (4.8)$$

No código $\sigma_y = SMYS$.

Método B31G Modificado

É também conhecido como de método de Arco & Kiefner [25,26]. O cálculo da pressão de falha é feito conforme as seguintes equações:

$$P_f = 1.11(\sigma_y + 68.95) \frac{2t}{D} \left(\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{t} M^{-1}} \right) \quad \text{se } A < 4 \quad (4.9)$$

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \frac{L^4}{(Dt)^2}} \quad \text{se} \quad \frac{L^2}{Dt} \leq 50 \quad (4.10)$$

$$M = 0.032 \frac{L^2}{Dt} + 3.3 \quad \text{se} \quad \frac{L^2}{Dt} > 50 \quad (4.11)$$

No caso de não se conhecer σ_y , pode-se usar *SMYS*.

Método DNV RP-F101

Este método faz parte da norma *DNV RECOMMENDED PRACTICE RP-F101 Corroded Pipelines* (1999). [27]. A pressão de falha é definida por:

$$P_f = \sigma_u \frac{2t}{(D-t)} \left(\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} M^{-1}} \right) \quad (4.12)^1$$

$$M = \sqrt{1 + 0.31 \frac{L^2}{Dt}} \quad (4.13)$$

No caso de não se conhecer σ_u , pode-se usar *SMUS*.

Outros métodos podem ser encontrados na literatura, por exemplo, Battelle e Shell-92 [25,26].

4.2.2

Probabilidade de falha para dutos corroídos

A probabilidade de falha de um duto com defeito de corrosão é calculada a partir de seus estados limites, conceitos estes definidos em 3.2.

¹ A revisão de 2004 apresenta um fator de 1.05; $P_{f,2004} = 1.05 P_{f,1999}$, resultante da comparação com testes de laboratório em dutos que continham defeitos de corrosão de forma retangular.

Probabilidade de Falha por Ruptura

A probabilidade de falha por ruptura é definida como a probabilidade da pressão de operação P_{op} do duto exceder a pressão de falha P_f . A função de estado limite g_r também pode ser expressa como dependente do tempo T , devido à existência da taxa de crescimento do defeito de corrosão. A função de estado limite para ruptura é definida como:

$$g(x, T)_r = P_f(x, T) - P_{op}(x, T) \quad (4.14)$$

$$g(x, T)_r = g[\sigma_f, D, t, d(T), L_d(T), r_d, r_L, P_{op}] \quad (4.15)$$

A equação (4.15) é a função limite representada na forma de um vetor com as variáveis do problema; onde: r_d e r_L são as taxas de corrosão para d e L_d , σ_f é conhecida como resistência ao escoamento continuado e é uma função de σ_y ou σ_u , segundo o modelo de pressão de falha usado.

A *POF* por ruptura para defeitos por corrosão é definida por:

$$POF_r = P[g(x, T)_r \leq 0] \quad (4.16)$$

Probabilidade de Falha por vazamento

O estado limite para vazamento é usado para descrever se a profundidade do defeito $d(T)$ excede a espessura de parede do duto t (pode ser assumido como um valor crítico 80% da espessura de parede do duto, d_C , usando a filosofia do *ASME B31G* que diz que defeitos acima de este valor devem ser reparados). A função de estado limite é definida como:

$$g(x, T)_v = d_C - d(T) \quad d_C = 0.8t \quad (4.17)$$

E a *POF* por vazamento para defeitos por corrosão é calculada por:

$$POF_v = P[g(x,T)_v \leq 0] \quad (4.18)$$

Probabilidade de Falha por grandes vazamentos

Para definir se a falha por ruptura do duto levou a um grande vazamento, ou foi uma ruptura propriamente dita, o valor de L_d é comparado com um valor de L_c . Caso L_d seja menor que L_c , a ruptura será dada por um grande vazamento. Do contrario será uma ruptura propriamente dita. Para isto, é necessário definir o valor de L_c , apresentado a seguir.

Segundo Shannon (1974) [28], o limite entre vazamento e a ruptura é definido pelo fator de Folias. Existem vários modelos na literatura [60], mas segundo Miller (1987) [29,30], o valor de (4.19) é o que apresenta melhores resultados. Este fator de Folias também tem sido usado por Hopkins [46]:

$$\frac{1.15\sigma_y}{\sigma_h} = M_c = \sqrt{1 + 0.52 \frac{L_c^2}{Dt}} \quad (4.19)$$

Rearranjando a equação (4.19) tem-se o valor de L_c :

$$L_c = \sqrt{\frac{Dt}{0.52} \left(\frac{1.15\sigma_y}{\sigma_h} \right)^2 - 1} \quad (4.20)$$

Em (4.20) σ_h é o valor da tensão circunferencial, definida por:

$$\sigma_h = \frac{P_{op} D}{2t} \quad (4.21)$$

E o estado limite é:

$$g(x,T)_{gv} = L_c - L_d(T) \quad (4.22)$$

Segundo a figura 4.4 e as definições de estado limite, a probabilidade de o duto falhar é dada pelas contribuições dos estados limites de ruptura e pequenos vazamentos (g_r e g_v). O estado limite $g(x,T)_{gv}$ só funciona como uma função indicadora para estabelecer se a falha por ruptura levou a um grande vazamento ou foi uma ruptura com crescimento de L_d instável, se:

$$POF_{gv} = P\left[g(x,T)_{gv} \leq 0\right] \quad \text{Grande vazamento} \quad (4.23)$$

$$POF_{gv} = P\left[g(x,T)_{gv} > 0\right] \quad \text{Ruptura} \quad (4.24)$$

Onde o valor maior de probabilidade define o tipo de falha.

Probabilidade de Falha Total

A POF total para os eventos de ruptura e vazamento é definida usando o conceito de união de probabilidades ou sistemas em série, assim:

$$POF_T = P\left[\bigcup_{k=1}^2 (g_k \leq -\beta_k)\right]_T = \Phi(-\beta_r) + \Phi(-\beta_l) - \Phi_2(-\beta_r, -\beta_l, \rho_{rl}) \quad (4.25)$$

As definições para (4.25), foram dadas no capítulo 2. Se é considerado que os eventos são independentes, $\rho_{rv}=0$, a POF_T passa a ser definida por:

$$POF_T = 1 - (1 - POF_r)(1 - POF_v) \quad (4.26)$$

A seguir será apresentado um estudo de caso para o cálculo da confiabilidade estrutural de um duto corroído. O duto AA é composto de tubos API 5L X52. A tabela 4.1 apresenta as variáveis consideradas para a análise do problema, indicando o valor médio, desvio padrão, distribuição e coeficiente de variação [62].

Tabela 4.1 Variáveis do duto AA API 5L X52

Variáveis			Média		Desvio		Distribuição	CoV %
D	406.4	mm	406.4	mm	0.41	mm	<i>Normal</i>	0.1
t	12.7	mm	12.7	mm	0.13	mm	<i>Normal</i>	1.0
σ_y	359	MPa	410.7	MPa	32.86	MPa	<i>Lognormal</i>	8.0
σ_u	455	MPa	512.3	MPa	22.90	MPa	<i>Lognormal</i>	8.0
Pop	17.28	MPa	17.28	MPa	1.2	MPa	<i>Gumbel</i>	7.0

Tabela 4.2 Dados do defeito

d/t [%]	L_d [mm]	L_C [mm]
28.0	287	138

Tabela 4.3 Dados da inspeção (PIG MFL 80% de confiança)

Variáveis	Desvio ² [mm]
$d \pm 10\%$ de t	0.93
$L \pm 20.32$ mm	15.86

A probabilidade de falha para o exemplo acima foi calculada usando o novo algoritmo *FORM* proposto por LOW e TANG, usando-se a linguagem *VBA for EXCEL* para o desenvolvimento de esta metodologia.

A probabilidade de falha por ruptura foi calculada usando o modelo da *DNV RP F-101* de 1999. Foi feita também uma análise de sensibilidade para determinar quais são as variáveis que tem mais influência na confiabilidade estrutural do duto.

A figura 4.6 mostra a planilha do programa *EXCEL* com os dados de entrada e os resultados obtidos. A tabela 4.4, apresenta os resultados mais destacados da análise, que são as probabilidades por ruptura e vazamento, a probabilidade total e o coeficiente de correlação entre ruptura e vazamento. A

² Os valores do desvio padrão foram calculados usando as equações (4.3) e (4.4).

probabilidade total foi calculada por duas vias diferentes, uma considerando que não existe correlação e outra que existe correlação entre as falhas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	Cada distribuição tem associados parâmetros característicos que a definem. Ex: A distribuição normal tem 2 parâmetros, a média (Para1) e o desvio padrão (Para2), para a dist. de Weibull $1 - \exp(-x/Fa1)^{1/Para2}$		CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE DUTOS POR CORROSÃO DNV													Vetor unitário ao ponto de falha (x^*)
1			$gr = Pf \cdot Pop$													Ponto de projeto ou ponto mais provável de falha
2																
3			Para1	Para2	Para3	Para4	x_i^*	n_i	$g(x)$	β	POF	σ_i				
4	Dam [mm]	Normal	406.4	0.41			406.40743	0.0181339	9E-10	3.1579	7.95E-04	0.006				
5	t [mm]	Normal	12.7	0.13			12.659576	-0.3109524				-0.098				
6	Su [Mpa]	Lognormal	512.33	40.99			452.60335	-1.511809				-0.479				
7	Pop [Mpa]	Valor Extremo	17.23	1.2			20.708514	2.1994504				0.693				
8	d [mm]	Normal		0.93			5.1369096	1.6333437				0.527				
9	L [mm]	Normal	237	15.86			239.7082	0.1707568				0.054				
10		Normal														
11		Lognormal														
12		Valor Extremo														
13		Uniforme														
14		Exponencial														
15		Gamma														
16		Weibull														
17		Triangular														
	$gl = dc - d = 0.8t - d$															
14	Variável	Distribuição	Para1	Para2	Para3	Para4	x_i^*	n_i	$g(x)$	β	POF	σ_i				
15	t [mm]	Normal	12.7	0.13	0	0	12.588567	-0.7602529	-1.0E-08	7.0208	1.10E-12	-0.111				
16	d [mm]	Normal	3.59	0.93	0	0	10.078854	6.9772621				0.994				
17																

Figura 4.6 – Planilha EXCEL para o cálculo da probabilidade de falha.

Tabela 4.4 Resultados das análises de POF

POF_r	POF_l	POF_T (eq. 4.26)	r_l	POF_T (eq. 4.25)	Erro %
7.95E-4	1.10E-12	7.9463E-4	0.53	7.9455E-4	0.00996

Dos resultados obtidos pode se ver que a POF_T é praticamente igual quando considerado a correlação, ou não correlação entre os estados limites, o erro é insignificante, mas existe, e poderá ter uma influência maior no caso do duto ter vários defeitos com a propagação dos erros devido à expansão da equação (4.26).

Nas figuras 4.7 e 4.8 são apresentadas as análises de sensibilidade feitas através do cálculo do fator de importância I_i . Nos gráficos pode ser observada a contribuição de cada variável na determinação da probabilidade de falha do duto.

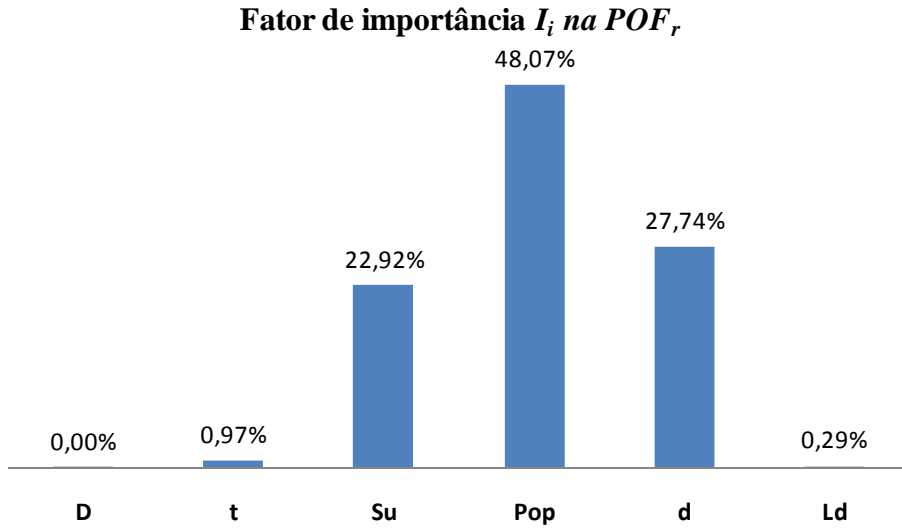


Figura 4.7 – Fator de importância de cada variável na POF por ruptura.

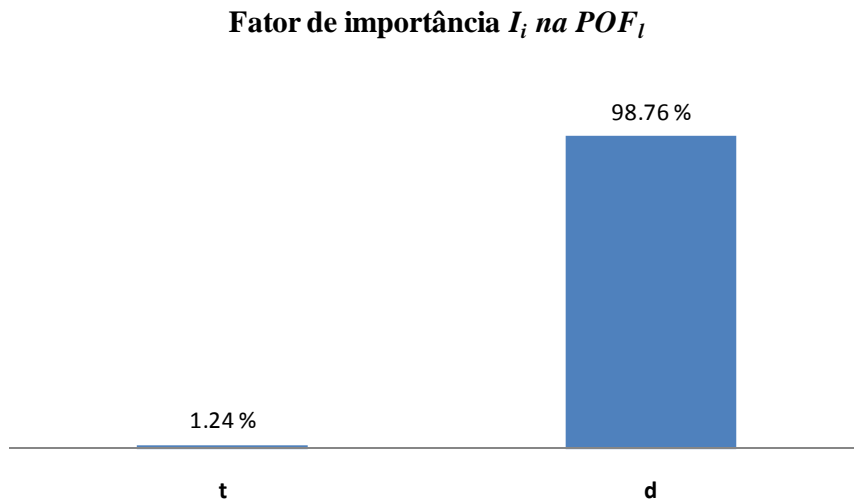


Figura 4.8 – Fator de importância de cada variável na POF por vazamento.

De acordo com as figuras 4.7 e 4.8, as variáveis de diâmetro (D), espessura de parede (t) e comprimento do defeito (L_d), poderiam ser consideradas como determinísticas e são as que menos aportam na POF do duto.

Quando um duto possui vários defeitos de corrosão as equações (4.25) e (4.26) podem ser expandidas para calcular a POF total:

$$POF_{Tn} = \bigcup_{i=1}^n POF_{Ti} = 1 - \Phi_n(\beta_T, \mathbf{R}) \quad (4.27)$$

onde $\Phi_n(\beta_T, \mathbf{R})$ pode ser calculada usando o método *I-PCM*, β_T é um vetor com os índices de confiabilidade total β_{Ti} de cada defeito e \mathbf{R} é a matriz com os coeficientes de correlação entre os defeitos. O valor de β_{Ti} é calculado, assim:

$$\beta_{Ti} = -\Phi^{-1}(POF_{Ti}) \quad (4.28)$$

Para a equação (4.26), a expansão para vários defeitos é:

$$POF_{Tn} = 1 - (1 - POF_{T1})(1 - POF_{T2}) \dots (1 - POF_{Tn}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - POF_{Ti}) \quad (4.29)$$

Para estudar a diferença dos dois cálculos é considerado que o duto tem 20 defeitos por corrosão iguais ao do exemplo anterior. Os resultados foram os seguintes:

Tabela 4.5 Resultados das análises de POF com vários defeitos

POF_T (eq. 4.29)	POF_T (eq. 4.27)	Erro %
1.58E-2	9.90E-3	59.33

O cálculo usando a consideração dos eventos serem independentes, tende a sobreestimar a *POF*. Se por um lado as análises são mais conservativas, por outro é possível condenar uma estrutura ou equipamento quando se trabalha com *POFs* alvos ou admissíveis.

4.3

Modelagem da corrosão

A degradação devido à corrosão é um ponto importante na avaliação da confiabilidade estrutural de dutos, vasos de pressão e componentes de vários sistemas de processos em geral. O processo de corrosão é complexo e pode ser

abordado desde o ponto de vista fenomenológico da corrosão, ou ser estudado só pelas características geométricas dos defeitos de corrosão [31].

4.3.1

Modelagem fenomenológica da taxa de corrosão

Quando uma modelagem fenomenológica é feita nos processos de corrosão, rara vez e em poucas exceções a taxa corrosão é definida como constante, ao invés disso, ela é modelada por uma lei que descreve a perda por corrosão em função do tempo [12,31,54].

A figura 4.9, apresenta o modo pela qual a perda por corrosão pode ser modelada por uma lei em função do tempo.

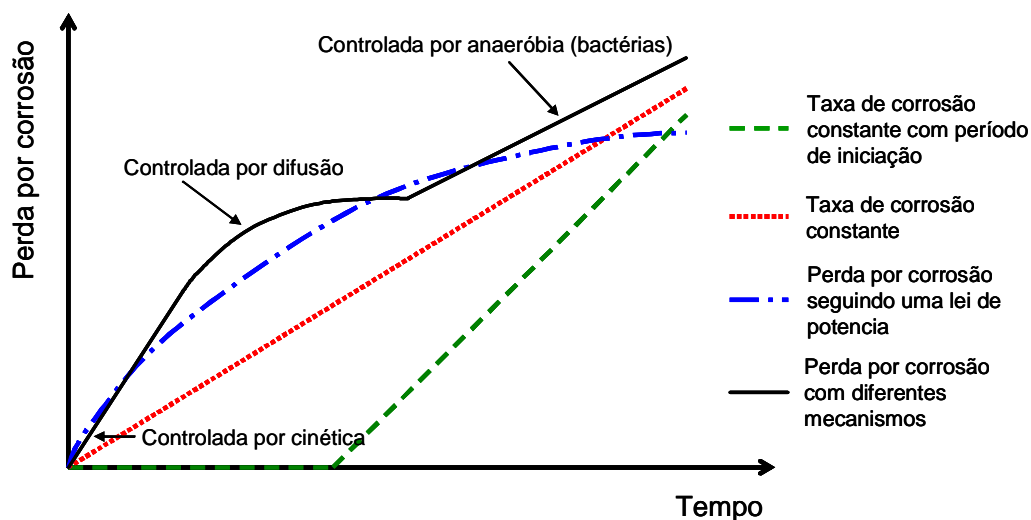


Figura 4.9 – Modelos mais comuns que descrevem a perda por corrosão.

Na literatura científica uma lei de potência, equação (4.30) geralmente serve para descrever a perda por corrosão em função do tempo $d(x, T)$. Esta lei é baseada em fundamentos teóricos, seja se o processo é controlado pela cinética da corrosão ou por processo de difusão [31,63].

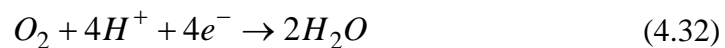
$$d(x, T) = kT^\epsilon \quad (4.30)$$

Onde, k é o fator de proporcionalidade e ε é o expoente de corrosão.

O processo cinético significa que a corrosão esta sendo controlada pela reação anódica:



Já os processos de difusão dependem da reação catódica, isto é, da redução do oxigênio presente no ambiente que está em contato com o metal:



De acordo com (4.32), a taxa de corrosão dependerá da quantidade de oxigênio que está em contato como o metal para a reação catódica, mas à medida que são gerados os produtos de corrosão esta quantidade será diminuída. Portanto, a difusão do oxigênio, através dos produtos de corrosão, deverá ser levada em conta. Lembrando que as variáveis que compõem os modelos de corrosão têm incertezas, estas devem ser incluídas nas análises de confiabilidade estrutural.

Corrosão interna por CO₂ em Dutos

O modelo mais comumente aceito na indústria de dutos é a corrosão interna por CO₂ [32]. O modelo foi proposto por DeWaard e Milliams [33-35] e a taxa de corrosão é predita em função da temperatura de operação T_{op} , da pressão de operação P_{op} do duto e da pressão parcial do CO₂ P_{CO_2} presente no fluido. O cálculo da taxa de corrosão por CO₂, r_{CO_2} , em mm/ano pode ser definida assim:

$$r_{CO_2} = \frac{1}{\frac{1}{r_r} + \frac{1}{r_m}} \quad (4.33)$$

Onde: r_r é a taxa de reação e r_m é a taxa de transferência de massa e são definidas a seguir:

$$\log(r_r) = 4.93 - \frac{1119}{T_{op} + 273} + 0.58 \log(P_{CO_2}) \quad (4.34)$$

A temperatura de operação T_{op} deve estar em $^{\circ}C$. A pressão parcial do CO_2 , P_{CO_2} em *bar*, e esta é calculada por:

$$P_{CO_2} = n_{CO_2} P_{op} \quad (4.35)$$

Em (4.35), a pressão de operação do duto, P_{op} , deve estar em *bar* e n_{CO_2} é a fração de CO_2 na fase gás que está presente no fluido.

A taxa de transferência de massa r_m é calculada por:

$$r_m = 2.45 \frac{V_f^{0.8}}{D^{0.2}} P_{CO_2} \quad (4.36)$$

em (4.36), V_f é a velocidade do fluido em *m/s* e D é o diâmetro do duto em *m*.

Uma versão simplificada do modelo de corrosão por CO_2 é dada por CRIS [36], este modelo não contempla a velocidade do fluido e nem o diâmetro do duto, em outras palavras, não considera a taxa de transferência de massa. O modelo é definido por:

$$\log(r_{CO_2}) = 5.8 - \frac{1710}{\theta_{op} + 273} + 0.67 \log \left[n_{CO_2} P_{op} 10^{P_{op} \left(0.0031 - \frac{1.4}{\theta_{op} + 273} \right)} \right] \quad (4.37)$$

O crescimento da profundidade do defeito de corrosão por CO_2 é calculada segundo:

$$d(x, T) = r_{CO_2} T \quad (4.38)$$

Para corrosão externa, ou corrosão devido ao solo onde o duto está enterrado, as reações eletroquímicas, que controlam o processo de corrosão, são mais difíceis de serem explicitadas. A origem disto é a complexidade das condições do solo [37].

4.3.2

Extrapolação da taxa de corrosão usando só a geometria do defeito

Inicialmente as taxas de corrosão para dutos são extrapoladas, a partir dos dados fornecidos pelas ferramentas de inspeção em linha, e podem ser definidas como:

$$r_d = \frac{\Delta d}{\Delta T} \quad (4.39)$$

Onde, Δd é a diferença entre duas medições de profundidade de espessura e ΔT é o tempo correspondente entre as duas inspeções. Logo, uma aproximação linear da mudança das dimensões do defeito é dada por:

$$d(T) = d + r_d(T - T_0) \quad (4.40)$$

$$L_d(T) = L_d + r_L(T - T_0) \quad (4.41)$$

Em (4.40) e (4.41), r_d e r_L são as taxas de corrosão, para d e L_d respectivamente, T_0 é a data da última inspeção e $(T - T_0)$ é tempo transcorrido.

Em casos onde o valor r_L não seja conhecido, uma aproximação baseada na r_d pode ser feita assim [32]:

$$L_d(T) = L_d \left(1 + \frac{r_d}{d} (T - T_0) \right) \quad (4.42)$$

Dutos corroídos, geralmente apresentam numerosos defeitos de corrosão, e, a partir deles, pode ser calculada uma taxa de corrosão para cada um. Devido à aleatoriedade do processo de corrosão, os pontos dos relatórios podem não ser os mesmos numa inspeção seguinte. Além disso, alguns pontos podem unir-se o que tornaria difícil à formação de pares para o cálculo da taxa de corrosão.

Uma taxa de corrosão global é menos complexa, mas é necessário encontrar uma função de probabilidade que represente o fenômeno de corrosão e a partir dali encontrar a taxa de corrosão mais provável do duto, ou trecho do duto [38-41].

As distribuições de valor extremo são geralmente usadas onde os fenômenos que causam falhas dependem de valores críticos, como é o caso dos processos corrosivos. Sendo assim, convém ajustarem-se os dados a uma distribuição de valor extremo máximo tipo I (Gumbel), no caso em que as taxas de corrosão de cada ponto, r_d , ou as profundidades do defeito, d , serem usadas. Caso sejam utilizadas as espessuras remanescentes, t_r , deve empregar-se a distribuição de valor mínimo tipo I [38-41].

As distribuições acumuladas de valor extremo máximo e mínimo de tipo I têm a seguinte forma:

$$F(r_d \text{ ou } d) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{(r_d \text{ ou } d) - \psi}{\delta} \right) \right] \quad (4.43)$$

$$F(t_r) = 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{t_r - \psi}{\delta} \right) \right] \quad (4.44)$$

Onde, ψ é o parâmetro de localização que indica o valor mais provável de r_d , d ou t_r , δ é o parâmetro de escala que representa a dispersão de r_d , d ou t_r ao redor do parâmetro de localização.

Portanto, a determinação da taxa de corrosão é resumida ao cálculo do parâmetro de localização e o parâmetro de escala representa a dispersão da taxa de corrosão [40,41,64-67] (ver Apêndice A para o procedimento de cálculo). Como a taxa de corrosão é extrapolada para diferentes trechos do duto de uma mesma amostra de dados, uma correção é feita nos parâmetros de localização da distribuição para incluir o “efeito tamanho”, assim um novo valor para ψ é dado por [40, 64-66]:

$$\psi^* = \psi + \delta \ln(T_N) \quad (4.45)$$

$$T_N = \frac{L_{duto}}{l_{dados}} = \frac{\text{comprimento total do duto}}{\text{comprimento do duto com os dados usados}} \quad (4.46)$$

O valor de T_N também é conhecido como taxa de retorno (ver Apêndice A).

4.3.3

Aplicação da modelagem da taxa de corrosão na confiabilidade estrutural

As inspeções são o melhor meio para a monitoração da corrosão e a redução do risco de falha das estruturas a partir do seu controle [68]. Bons modelos de corrosão podem ajudar na determinação de ótimos planos de inspeção. Tais planos de inspeção podem ser determinados usando o teorema de Bayes, dado que o mesmo atualiza as incertezas originadas pelos modelos de corrosão, usando os resultados da inspeção e permite introduzir o conceito de efetividade da inspeção. A figura 4.10 faz uma descrição deste conceito.

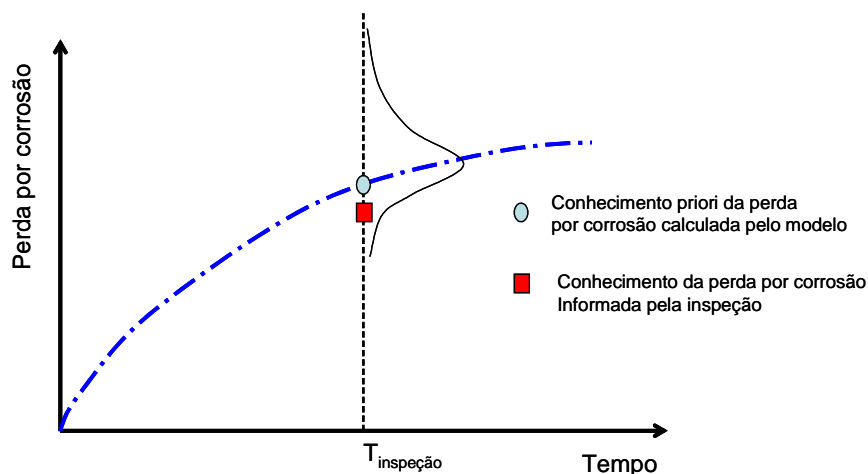


Figura 4.10 – Modelo de perda por corrosão.

A seguir é apresentado um exemplo para um caso simples, onde é assumido que um duto de baixa pressão de operação tem uma falha por vazamento quando a perda por corrosão é maior que a espessura do duto. A equação de estado limite para este caso é dada por:

$$g_F = t - d(x, T) \quad (4.47)$$

Onde, a espessura $t = N(12, 0.5) \text{ mm}$ é considerada como uma variável normal. A perda por corrosão $d(x, T)$ segue uma lei com taxa de corrosão constante:

$$d(x, T) = d_i + rT \quad (4.48)$$

Onde, r é a taxa de corrosão a qual é uma variável determinística igual a 0.5 mm/ano e $d_i = N(2, 0.5) \text{ mm}$ é o defeito inicial detectado.

Através do método *FORM* é calculada a $POF(g_F \leq 0)$ para um período de 20 anos. Valores de POF menores que $3.19\text{E-}14$ ($\beta = -7.5$) foram considerados iguais a $3.19\text{E-}14$. A tabela 4.6 apresenta os resultados da análise.

Tabela 4.6 Resultados das análises de POF

Anos	β	POF
0	7.5	3.19E-14
.	.	.
11	6.4	9.83E-11
12	5.7	7.71E-09
13	4.9	3.72E-07
14	4.2	1.10E-05
15	3.5	2.03E-04
16	2.8	2.34E-03
17	2.1	0.02
18	1.4	0.08

19	0.7	0.24
20	0.0	0.50

Se uma inspeção é feita, a probabilidade de falha do duto pode ser atualizada usando os valores da perda por corrosão d_I obtidos da inspeção. O evento de inspeção pode ser descrito através da seguinte função limite:

$$g_I = d_I - d(x, T) \quad (4.49)$$

Onde, d_I é distribuída por uma função normal com parâmetros de $\mu_d = 7.5$ mm e $\sigma_d = 0.25$ mm.

Esta inspeção foi feita no ano 14, ano no qual a *POF* ainda é menor que uma *POF* admissível de 1E-04.

As probabilidades de falha admissíveis podem ser extraídas de diferentes fontes, p. ex. da DNV RP-F101 [27], a qual define diferentes probabilidades de falha admissíveis para o estado limite último (ULS) segundo a classe de segurança (tabela 4.7).

Tabela 4.7 – *POF* admissível ULS segundo a DNV RP F-101 [27]

SEGURANÇA	<i>POF</i> ADMISSÍVEL
Alta	$< 10^{-5}$
Normal	$< 10^{-4}$
Baixa	$< 10^{-3}$

Os dutos de gás e óleo podem ser classificados numa categoria normal, isto é, quando é possível antecipar que não haverá presença de atividade humana nos locais próximos. Para o exemplo aqui apresentado assumiu-se o valor de *POF* admissível como 1E-04, considerando que o vazamento leva a perda de contenção do duto (estado limite último)

Através do método *FORM* é calculada a $POF(g_I \geq 0)$ para o ano 14.

Tabela 4.8 - $POF(g_I \geq 0)$ para o ano 14

Ano	I	POF
14	2.7	3.65E-03

A atualização da POF é definida por:

$$P(EF/EI) = \frac{P(g_F \leq 0 \cap g_I \geq 0)}{P(g_I \geq 0)} = \frac{P(t - d(T) \leq 0 \cap d_I - d(T) \geq 0)}{P(d_I - d(T) \geq 0)} \quad (4.50)$$

É importante ressaltar aqui que foi considerado que no evento de inspeção tem-se uma falha, quando a perda por corrosão é maior que a determinada pelo modelo de corrosão.

A solução de $P(t - d(T) \leq 0 \cap d_I - d(T) \geq 0)$ é obtida através do método PCM . A seguir são apresentados os cálculos passo a passo do método:

$$P(EF/EI) = \frac{P(g_F \cap g_I)}{P(g_I)} = \frac{\Phi(\mathbf{c}, \rho_{FI})}{\Phi(-\beta_I)}$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} -\beta_I \\ -\beta_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.68 \\ -4.2 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_I = \begin{bmatrix} \alpha_t \\ \alpha_{d(T)} \\ \alpha_{d_I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.894 \\ 0.447 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_F = \begin{bmatrix} \alpha_t \\ \alpha_{d(T)} \\ \alpha_{d_I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.707 \\ 0.707 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\rho_{FI} = \alpha_I^T \alpha_F = -0.6324$$

$$\Phi(\mathbf{c}, \rho_{FI}) = \prod_{k=1}^m \Phi(c_{k|(k-1)}) = \Phi(c_{F|I}) \Phi(c_I) = \Phi(c_{F|I}) \Phi(-\beta_I) \quad (m=2)$$

$$c_{F|I} = \left(\frac{c_F - \mu_{F|I}}{\sigma_{F|I}} \right)$$

$$c_F = -\beta_F$$

$$\mu_{F|I} = -\rho_{FI} A_I$$

$$A_I = \frac{\phi(c_I)}{\Phi(c_I)} = \frac{\phi(-\beta_I)}{\Phi(-\beta_I)} = 2.99$$

$$\mu_{F|I} = 1.89$$

$$\sigma_{F|I} = (1 - \rho_{FI}^2 B_I)^{1/2}$$

$$B_I = A_I (c_I + A_I) = A_I (-\beta_I + A_I) = 0.918$$

$$\sigma_{F|I} = 0.795$$

$$c_{F|I} = \left(\frac{-4.2 - 1.89}{0.795} \right) = -7.1$$

$$\Phi(c_{F|I}) = \Phi(-7.71) = 6.22E-15$$

$$P(EF/EI) = \frac{P(g_F \cap g_I)}{P(g_I)} = \frac{\Phi(\mathbf{c}, \rho_{FI})}{\Phi(-\beta_I)} = \frac{\Phi(c_{F|I}) \Phi(-\beta_I)}{\Phi(-\beta_I)} = 6.22E-15$$

As atualizações da *POF*, a partir do ano 14 são feitas de forma análoga. Da inspeção também é obtida uma nova taxa de corrosão, que para o caso é igual a 0.4 mm/ano ($\frac{d_{(x,14)} - d_i}{T} = \frac{7.5 - 2}{14} = 0.4$). A seguir é apresentado o gráfico da

análise feita (valores de POF menores a $3.19E-14$ ($\sigma = -7.5$) foram considerados iguais a $3.19E-14$).

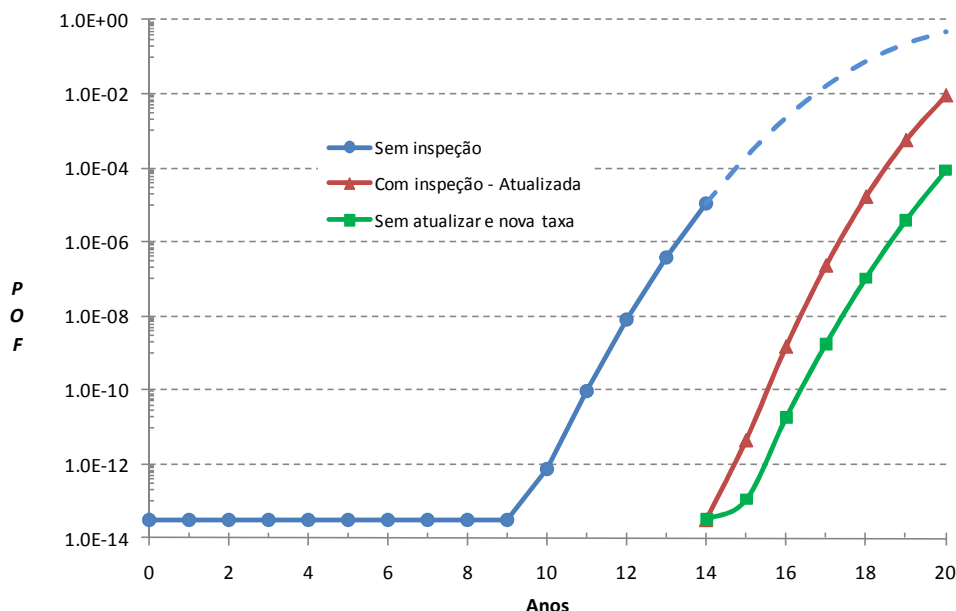


Figura 4.11 – Cálculo da POF seguindo um modelo de corrosão com atualização (inspeção) e sem atualização

Pode ser observado na figura 4.11, que existem três curvas de POF , a curva chamada de *sem inspeção*, a qual é a evolução da POF no tempo do defeito inicial, a curva chamada de *sem atualizar e nova taxa*, a qual prevê a POF só com a nova taxa de corrosão determinada com os dados da inspeção, mas sem fazer nenhuma inferência com a POF inicial, e a curva chamada de *com inspeção – atualizada*, a qual faz à atualização usando todas as informações.

A curva atualizada é mais conservativa. Enquanto esta prevê a próxima inspeção para o ano 18, a curva sem atualizar estima o ano 20.

A seguir é apresentado um exemplo, mostrando a influência do modelo de corrosão. Para este exemplo, usou-se o modelo de corrosão por CO_2 definido na equação (4.37). Os resultados foram comparados com os do exemplo acima apresentado (taxa de corrosão constante). As variáveis usadas no problema são descritas na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Variáveis

Variável	Média	Desvio Padrão	Distribuição
t	12 [mm]	0.5	Normal
d_i	2 [mm]	0.5	Normal
d_l	6 [mm]	0.5	Normal
$Top + 273$	303 [°K]	3	Normal
Pop	50 [bar]	5	Normal
nCO_2	0.01	-	Determinística
$rCO_2 = 0.80$ [mm/ano] ³			

A seguir é feita análise usando o modelo de corrosão por CO₂. Através do método *FORM* é calculada a $POF(g_F \leq 0 = t - d(x, T) \leq 0)$ para um período de 20 anos. Valores de *POF* menores que 3.19E-14 (= -7.5) foram considerados iguais a 3.19E-14. A tabela 4.10 apresenta os resultados da análise.

Tabela 4.10 Resultados das análises de *POF*

Anos	<i>POF</i>
0	3.19E-14
2	3.19E-14
4	3.19E-14
5	2.82E-10
6	2.98E-07
7	3.89E-05
8	0.001179
10	0.065086
11	0.194566
12	6.05E-01
14	0.782714
16	9.54E-01
18	0.993304

³ Este valor corresponde à taxa de corrosão por CO₂ da equação (4.37) e seu valor aqui apresentado foi calculado usando os valores médios das variáveis *Top* e *Pop*, mas durante a análise probabilística seu valor muda conforme as distribuições estáticas definidas para elas.

20	0.99925
----	---------

Segundo a tabela 4.10 e a figura 4.12, a inspeção foi feita no ano 7, ano no qual a POF ainda é menor que uma POF admissível de $1E-04$. Durante a inspeção o defeito detectado, d_I é igual a 6 mm. Já o defeito esperado para a taxa de corrosão por CO_2 é igual a $d(x,T) = d_i + r_{CO_2}T = 2 + 0.8(7) = 7.6 \text{ mm}$

Através do método $FORM$ é calculada a $POF(g_I \geq 0 = d_I - d(x,T) \geq 0)$ para o ano 7.

Tabela 4.11 - $POF(g_I \geq 0)$ para o ano 7

Ano	POF
7	$1.14E-02$

A atualização da POF é definida pela equação (4.50) e é usado o método PCM para esta solução.

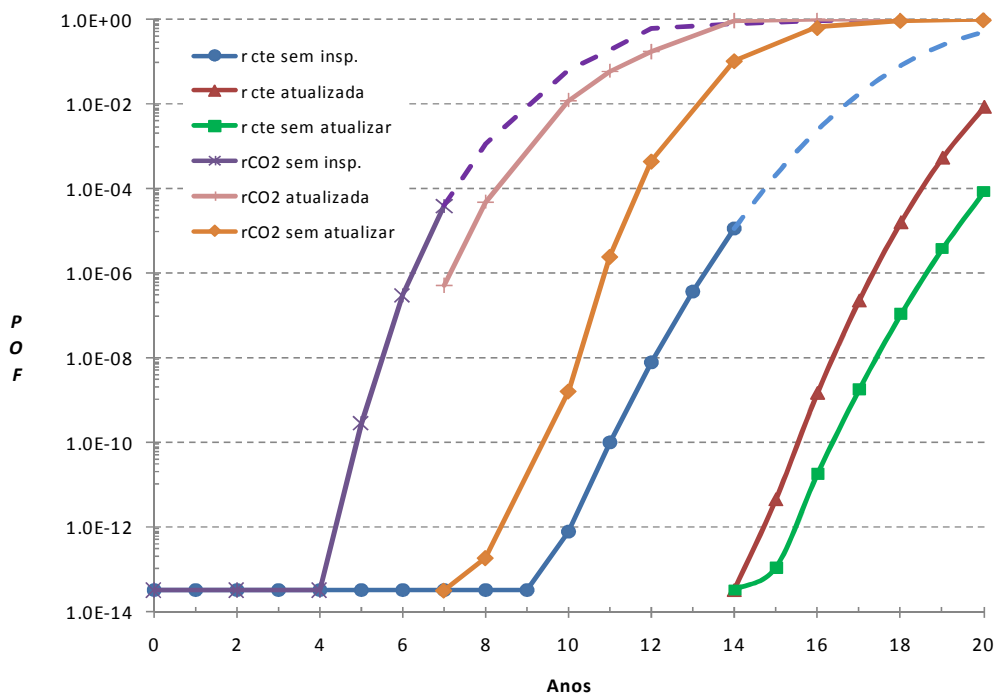


Figura 4.12 – Influência do modelo de corrosão no cálculo da POF

Na figura 4.12, pode ser observado uma grande influência na *POF* segundo o modelo de corrosão usado. Com o modelo de corrosão por CO_2 o tempo da primeira inspeção cai de o ano 14 para o ano 7, já segunda inspeção a diferença é ainda maior de o ano 18 para o 8.

O exemplo anterior deixa ver como a escolha de um bom modelo de corrosão pode ser útil para a determinação de planos de inspeção quantitativos baseados em conceitos de confiabilidade estrutural. Os programas de inspeção podem ser calculados usando um intervalo de tempo constante entre inspeções ou usando uma probabilidade de falha admissível. Para as duas formas anteriores, a *POF* deve ser atualizada de acordo com o exemplo apresentado.

4.4

Atualização segundo o método de inspeção usado

Por meio das inspeções os defeitos em uma estrutura podem ser detectados e dimensionados, mas os métodos de inspeção, ou ferramentas de inspeção possuem incertezas. A existência, ou não, de um defeito pode ser bem modelada pela curva de probabilidade de detecção (*POD*) do método, ou a ferramenta de inspeção usada.

Quando uma estrutura esta sujeita a um processo de degradação, tanto pelo crescimento de uma trinca, como por um defeito de corrosão, uma das formas de manter a estrutura segura é controlar o processo de degradação por meio de inspeções.

A seguir é apresentado um exemplo, que foge ao escopo deste capítulo, mas o procedimento pode também ser aplicado na área de dutos. Considera-se que uma chapa de aço, com uma espessura t_{ch} igual a 40 mm, (t_{ch} é considerada determinística), pode conter uma trinca com profundidade, a_0 , onde o defeito pertence a uma distribuição exponencial com média igual a 1 mm. Para efeitos do exemplo é assumido que o crescimento da trinca devido aos ciclos de tensão pode ser descrito conforme ao seguinte modelo [13]:

$$a(N) = a_0 \exp(C\pi\sigma^2 N) \quad (4.51)$$

Onde: C é o parâmetro do material da lei de Paris e é igual a $5E-10$, esta variável é definida como determinística, σ é a gama de tensões definida como uma distribuição normal com média igual a 30 MPa e desvio padrão igual a 5 MPa , e N é o número de ciclos por ano, igual a $1E5$ e é uma variável determinística.

Na figura 4.13 é apresentado o crescimento da trinca esperada conforme ao modelo da equação (4.51).

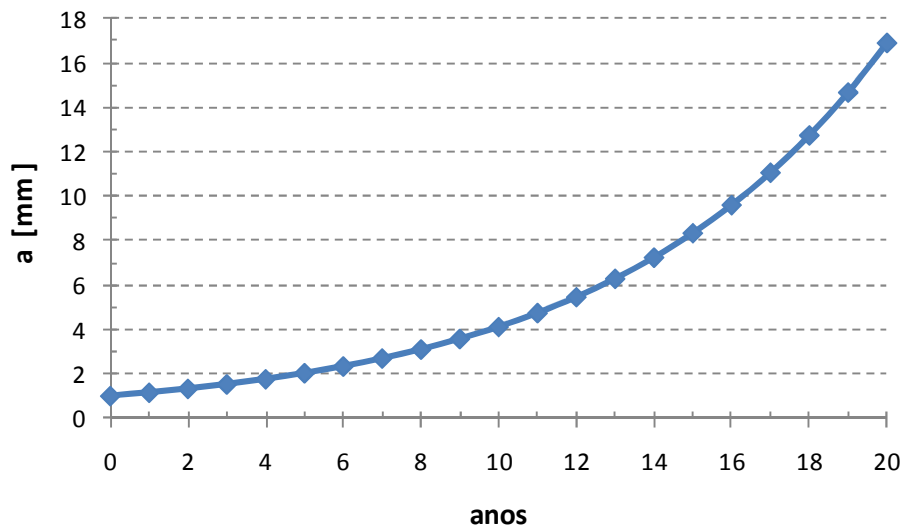


Figura 4.13 – Crescimento da trinca na chapa

No caso da chapa conter uma trinca, a sua falha ocorrerá quando o tamanho da trinca seja igual à espessura da chapa. Desse modo, o seguinte estado limite para falha é definido:

$$g_F = t_{ch} - a(N) \quad (4.52)$$

Onde probabilidade de falha do tamanho da trinca esperada ser maior que a espessura da chapa é definida por:

$$POF_F = P(g_F \leq 0) \quad (4.53)$$

O resultado de uma inspeção pode ser escrito como um estado limite em função da trinca esperada $a(N)$ e a mínima trinca detectável da ferramenta de inspeção a_I . Se durante a inspeção nenhuma trinca foi detectada, o estado limite pode ser definido como:

$$g_I = a(N) - a_I \quad (4.54)$$

E a probabilidade de falha para o estado limite dado pela inspeção é expressa como:

$$POF_I = P(g_I \leq 0) \quad (4.55)$$

Este caso pode ser interpretado como o cálculo da probabilidade do tamanho da trinca esperada ser menor à dimensão da trinca mínima detectável da ferramenta de inspeção. A importância deste estado limite pode ser vista em que ele contempla tanto lei de crescimento do defeito como a efetividade da inspeção usada para detectá-lo.

Na figura 4.14, pode se visualizar que a probabilidade de falha da chapa (curva sem inspeção) é ainda menor ($2.45E-5$) que uma probabilidade admissível assumida de $1E-04$ até o ano 6 e portanto confiável. Segundo isto, uma inspeção deverá ser feita neste ano.

No exemplo assumiu-se que durante a inspeção do ano 6 não foi detectada nenhuma trinca. E a curva *POD* da ferramenta de inspeção usada é modelada por uma curva exponencial com média igual a 1 mm . O estado limite para o evento de inspeção é definido pela equação (4.54) e a probabilidade calculada com a equação (4.55), e é igual a $3.19E-14$.

A probabilidade de falha da chapa dada a inspeção pode se atualizada usando o teorema de Bayes:

$$P(EF / EI = g_F \leq 0 / g_I \leq 0) = \frac{P(g_F \leq 0 \cap g_I \leq 0)}{P(g_I \leq 0)} \quad (4.56)$$

O resultado desta atualização pode ser observado na figura 4.14 (curva da primeira inspeção), onde pode ser visto que a *POF* da chapa diminui devido à informação obtida pela inspeção.

A curva da primeira inspeção mostra que a chapa é confiável para uma *POF* admissível de 1E-04 até o ano 10. Portanto, uma segunda inspeção poderia ser feita neste ano. Considerando que a inspeção foi feita e que nenhuma trinca foi detectada, a atualização da *POF* da chapa é calculada usando a informação atual e a da primeira inspeção. O resultado é apresentado na figura 4.14 como a curva da segunda inspeção. Os resultados de atualização para várias inspeções são calculados segundo:

$$P(EF / EI_1 \cap EI_2 \dots \cap EI_k) = \frac{P(EF \cap EI_1 \cap EI_2 \dots \cap EI_k)}{P(EI_1 \cap EI_2 \dots \cap EI_k)} \quad (4.57)$$

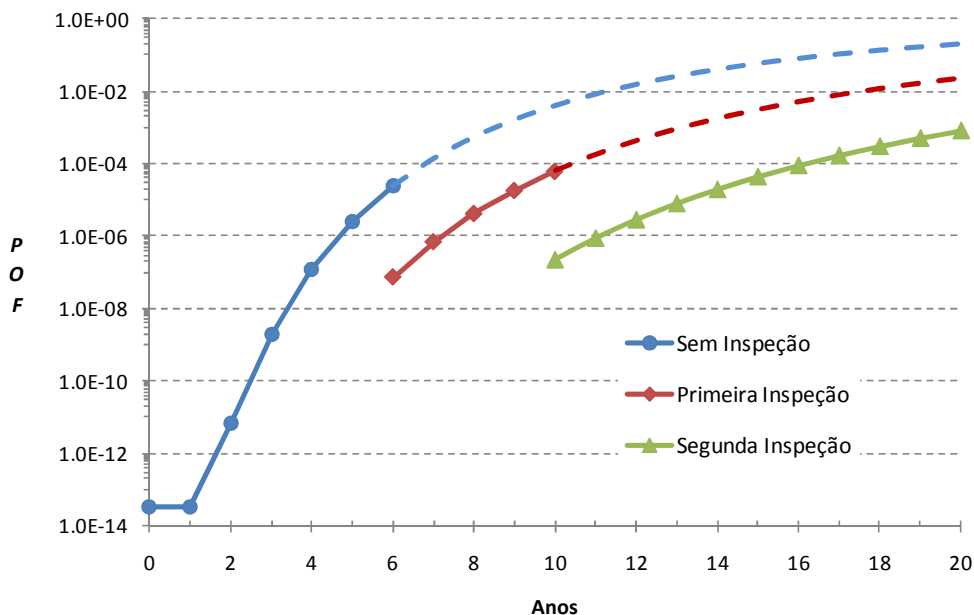


Figura 4.14 – Atualização da *POF*

Para a solução do problema anterior foram usados os métodos *FORM* e *PCM*.

Tal como pode ser observado na figura acima, a chapa de aço ainda é confiável e na medida em que mais inspeções sejam feitas a *POF* será atualizada usando a equação (4.57) até atingir o valor admissível.

Com o exemplo anterior mostrou-se como a utilização dos conceitos de confiabilidade estrutural podem ser usados na geração de planos genéricos de inspeção, considerando múltiplas variáveis do problema, assim como informações obtidas hoje e no passado.