

MANUTENÇÃO DE TUBULAÇÕES DE ÓLEO E GÁS BASEADA NA CONFIABILIDADE CALCULADA DE DADOS OBTIDOS DE PIG INSTRUMENTADO

*Frederico Carlos Maciel Thom¹
Geraldo Rossoni Sisquini²*

Resumo

Este trabalho trata da interpretação dos dados coletados na inspeção on line de tubulações utilizando o Vazamento de Fluxo Magnético (Magnetic Flux Leakage), que é uma ferramenta de Ensaio Não Destrutivo (END), para caracterizar as atuais condições das tubulações vulneráveis à perda de metal por corrosão. Uma análise probabilística é apresentada para estimar a confiabilidade de uma tubulação devido a estas condições, incorporando o impacto de atividades planejadas de inspeção e reparo durante a vida útil. A idéia é aplicada para determinar o intervalo de inspeção e a estratégia de reparo que satisfaz a confiabilidade requerida. Para processar os dados da probabilidade de falha antes e após a manutenção, uma aproximação prática é desenvolvida e validada por resultados obtidos pelo método de Monte Carlo que é comparado com resultados obtido pelo método gerado pela combinação da Amostragem do Hiper cubo Latino com a Amostragem Estratificada.

Palavras-chave: Confiabilidade; Manutenção; Vazamento de fluxo magnético.

60º Congresso Anual Internacional da ABM - 25 a 28 de Julho de 2005 – Minas Centro – Belo Horizonte - MG - Brasil.

¹M.Sc., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) - UFES.

²D.Sc., Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) - UFES. Membro da ABM.

INTRODUÇÃO

Este trabalho trata da interpretação da inspeção na tubulação através de dados coletados pela ferramenta MFL (*Magnetic Flux Leakage*) para caracterizar a atual condição da perda de metal por corrosão. A avaliação da existência da corrosão não é uma tarefa simples, já que normalmente as tubulações estão carregadas de óleo ou de gás, e são inacessíveis para a inspeção direta, principalmente as tubulações enterradas. Nestas condições, o MFL é muito usado para realizar inspeções nas tubulações em serviço a fim de coletar informações a respeito dos defeitos de corrosão. Além disso, o trabalho apresenta o modelo para estimar a confiabilidade da tubulação, incorporando o impacto da inspeção e das atividades planejadas de reparo visando aumento de vida útil. O objetivo principal é calcular a confiabilidade e a vida útil esperada das tubulações existentes vulneráveis à corrosão. O trabalho também desenvolve critérios baseados na confiabilidade para determinar o intervalo de inspeção ótimo e a estratégia de reparo que mantenha uma adequada confiabilidade para a vida em serviço da tubulação.

PROBABILIDADE DE FALHA DEVIDO À PERDA METÁLICA POR CORROSÃO

A seção da tubulação com defeito depende da proporção de metal perdida pela ação da corrosão, em comparação com a seção original. Um modelo analítico foi desenvolvido por Kiefner et al. (1973) para estimar a pressão de falha, Q , de uma tubulação sob corrosão, que é dada por:

$$Q = \frac{2\sigma_f \omega}{D_0} \left[\frac{1 - A/A_0}{1 - A/(MA_0)} \right] = \frac{2,3\sigma_y \omega}{D_0} \left[\frac{1 - h/\omega}{1 - h/(M\omega)} \right] \quad (1)$$

onde $A = hl$ é a área do corte transversal da perda de metal na região corroída projetada no eixo longitudinal da tubulação, $A_0 = \omega l$ é a área original do corte transversal da região corroída, M é o fator de Folias que considera as saliências antes da falha do tubo, σ_f é a tensão de fluxo geralmente definida como uma função da tensão de escoamento (σ_y), ω é a espessura da parede da tubulação e D_0 é o diâmetro do tubo. Neste trabalho vamos assumir que $\sigma_f = 1,15\sigma_y$. O fator de Folias, M , é definido como:

$$M = \sqrt{1 + 0,6275 \frac{l^2}{D_0 \omega} - 0,003375 \frac{l^4}{D_0^2 \omega^2}}, \quad \text{para } \frac{l^2}{D_0 \omega} \leq 50, \quad (2a)$$

$$M = 0,032 \frac{l^2}{D_0 \omega} + 3,3, \quad \text{para } \frac{l^2}{D_0 \omega} > 50. \quad (2b)$$

Por causa do crescimento das dimensões h e l do defeito com o tempo, a resistência remanescente dada pela equação (1) continua a deteriorar. Para prever esta resistência após um tempo t , uma estimativa da taxa de crescimento da corrosão é requerida. Para fins de simplificação, vamos usar

um modelo linear para o crescimento da corrosão, onde as dimensões do defeito no tempo t podem ser estimadas como:

$$h(t)=h(0)+r_d t \qquad l(t)=l(0)+r_l t \qquad (3)$$

onde r_d e r_l são as taxas de corrosão para a profundidade e o comprimento do defeito, respectivamente.

ESTIMAÇÃO DA PROBABILIDADE DE FALHA

Dimensões do defeito, pressão de operação, taxa de crescimento da corrosão, tensão produzida e as propriedades geométricas da seção da tubulação são tratadas como variáveis aleatórias para levar em conta as incertezas associadas (PANDEY, 1997). A extensão da corrosão na tubulação é, entretanto, uma função de variáveis aleatórias não lineares dependentes do tempo. A falha se localiza num local onde a resistência da tubulação cai abaixo da pressão de operação do sistema, p_0 . Deste modo, a probabilidade de falha, $P_{f|d}(t)$, de um dado defeito num intervalo de tempo 0 a t pode ser estimada como:

$$P_{f|d}(t)=P[Q(t)-p_0 \leq 0] \qquad (4)$$

Observe-se que p_0 é modelado como uma variável aleatória independente do tempo porque a pressão de operação é regulada por dispositivos de controle de pressão. Isto é usual para definir a probabilidade de falha no final da extensão do duto. Assumindo que os defeitos de corrosão ocorrem aleatoriamente ao longo do comprimento da tubulação, e que a falha de qualquer defeito é independente dos outros defeitos na tubulação, a probabilidade de falha por km de comprimento da tubulação pode ser obtido como:

$$P_f(t)=1-[1-P_{f|d}(t)]^{nd} \qquad (5)$$

onde nd é a média do número de defeitos por km de comprimento da tubulação. Em essência, 1 km de comprimento da seção da tubulação é modelado como um sistema em série com uma determinada quantidade de elementos críticos de modo que a falha de algum elemento (isto é, defeito) soma-se a falha de todo o sistema.

MODELANDO A INSPEÇÃO E O REPARO DE DEFEITOS

Os dados de inspeção podem ser usados para caracterizar as condições da tubulação em torno da média do número de defeitos por km e as distribuições de probabilidade da profundidade e do comprimento dos defeitos de corrosão. Deve-se levar em consideração que defeitos curtos e pouco profundos podem escapar da detecção durante o escaneamento magnético contínuo da seção da tubulação. Existem dois fatores envolvidos na definição da precisão da inspeção, isto é, a probabilidade de detecção e o erro de medição. A probabilidade de detecção modela a habilidade de detecção da imperfeição

pelas ferramentas MFL, sendo geralmente uma função do incremento da profundidade de defeito e definida como uma função exponencial dada por:

$$P_{D|H}(h)=1-e^{-qh} \quad (6)$$

onde q é uma constante que descreve a resolução da ferramenta de inspeção. Enquanto que as limitações na precisão do tamanho do defeito medido por uma ferramenta MFL são modeladas pela adição de uma medida de erro sistemático para o atual tamanho, que são dados por:

$$h_m=h+e_h \quad l_m=l+e_l \quad (7)$$

onde h_m e l_m são a profundidade e o comprimento medidos, respectivamente; e_h e e_l denotam os erros sistemáticos associados com as medidas de h e l , os quais podem ser estimados pelo fabricante do equipamento MFL ou baseados em dados de comparação obtidos de tubulações desenterradas.

Depois da inspeção, os dados coletados são processados para indicar os defeitos que são críticos para a integridade da tubulação. O critério de reparo (k) é geralmente baseado no fator de segurança em relação à pressão de falha, definido como a razão da pressão de ruptura calculada pela equação (1) e pela máxima pressão de operação permissível (*Maximum Allowable Operating Pressure* – MAOP) da tubulação (PANDEY, 1997). Se o fator de segurança para um dado defeito é baixo, o defeito é considerado crítico e necessita ser reparado ou retirado da tubulação. Matematicamente, o critério de reparo pode ser obtido como:

$$Q_m \leq k \cdot p_m \quad (8)$$

onde k é o fator de segurança de pressão de falha ($1,25 \leq k \leq 1,5$), p_m é o MAOP e Q_m é a pressão de falha nominal, calculada pela equação (1) usando-se a tensão mínima especificada, σ_{ymin} , os valores nominais de D_0 e ω , e as dimensões de comprimento e profundidade do defeito medidos ao invés das dimensões reais. É comum adotar um valor de k igual a 1,25, pois este valor assegura o mesmo nível de integridade como estabelecido através do teste hidrostático na tubulação.

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES E PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO

Os resultados possíveis, dentro do tempo de inspeção, estão expostos na forma de árvore de eventos como mostra a Figura 1, que por sua vez será melhor entendido através das Figuras 4 e 5 e seus resultados numéricos. É assumido em qualquer tempo de inspeção T_i , que alguns defeitos escapam da detecção devido à imperfeição do método de inspeção. A equação (8) define o reparo do defeito em função da criticidade. O reparo é assumido como perfeito e os defeitos reparados não irão causar falhas. A probabilidade de falha depois da inspeção depende principalmente dos defeitos não detectados e detectados, mas não reparados, já que continuam a crescer com o tempo. O processo de inspeção e de reparo mostrado na árvore de eventos de manutenção pode ser

modelado em termos de seis eventos aleatórios descritos a seguir (PANDEY, 1997).

A falha provocada pelo defeito de corrosão durante um intervalo de 0 a t é um evento denominado de $M(t)$, dado por:

$$M(t) : [Q(t) - p_0 \leq 0], \quad (9)$$

enquanto que a sobrevivência do defeito no tempo t é denominada por $S(t)$:

$$S(t) : [Q(t) - p_0 > 0]. \quad (10)$$

O evento de detecção do defeito, $D(t)$, acontece quando a profundidade do defeito $h(t)$ é maior ou igual a profundidade detectável h_a , que representa a resolução da inspeção, sendo dado por:

$$D(t) : [h_a - h(t) \leq 0], \quad (11)$$

e o evento de não detecção, $ND(t)$, complementar ao evento de detecção, é:

$$ND(t) : [h_a - h(t) > 0]. \quad (12)$$

O reparo de um defeito selecionado aleatoriamente é denominado por $R(t)$:

$$R(t) : [Q_m - k \cdot p_m \leq 0], \quad (13)$$

sendo o evento de não reparo, $NR(t)$, definido como:

$$NR(t) : [Q_m - k \cdot p_m > 0]. \quad (14)$$

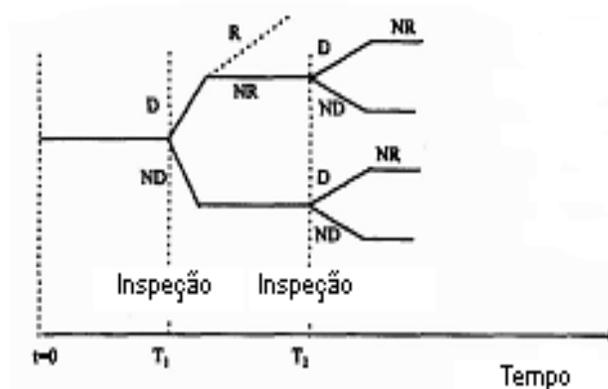


Figura 1. Árvore de eventos de manutenção (Eventos: D = detectado, ND = não detectado, R = reparado e NR = não reparado). Fonte: PANDEY, 1997.

O planejamento de manutenção envolve decisões com respeito ao tempo de futuras inspeções e extensão de reparo. A decisão básica é fazer a estimativa da confiabilidade incorporando o impacto das atividades de planejamento de inspeção e do reparo na vida útil da tubulação. Vamos admitir que as

distribuições da profundidade e do comprimento de todos os defeitos da população são conhecidas a princípio entre o intervalo de tempo $0 < t \leq T_L$, onde T_L é o tempo de vida em serviço remanescente. É assumido que a tubulação está operando satisfatoriamente em $t = 0$ e uma inspeção é planejada em $t = T_1$. Um modelo probabilístico é desenvolvido para prever a probabilidade de falha da tubulação para este período.

A probabilidade de falha antes de T_1 e condicionada à sobrevivência em $t = 0$, podendo ser estimada como:

$$P_f(t) = \frac{P[S(0) \cap M(t)]}{P[S(0)]} \quad (0 < t \leq T_1) \quad (15)$$

Devido ao reparo de alguns dos defeitos detectados, a probabilidade de falha será alterada para:

$$P_f(t) = P_f(T_1) + \Delta P_f(t) = P_f(T_1) + \Delta P_{f1}(t) + \Delta P_{f2}(t) \quad (T_1 < t \leq T_L), \quad (16)$$

onde $\Delta P_f(t)$ é a probabilidade de falha após o reparo, a qual tem duas componentes: $\Delta P_{f1}(t)$ e $\Delta P_{f2}(t)$ correspondente aos defeitos não detectados e detectados mas não reparados, respectivamente, os quais são dados por:

$$\Delta P_{f1}(t) = \frac{P[S(0) \cap S(T_1) \cap ND(T_1) \cap M(t)]}{P[S(0)]}, \quad (T_1 < t \leq T_L) \quad (17)$$

$$\Delta P_{f2}(t) = \frac{P[S(0) \cap S(T_1) \cap D(T_1) \cap NR(T_1) \cap M(t)]}{P[S(0)]}. \quad (T_1 < t \leq T_L) \quad (18)$$

Caso a inspeção seja repetida a diferentes intervalos, T_2, T_3, \dots, T_k , as mesmas expressões para $P_f(t)$ podem ser escritas numa forma expandida pela construção de uma árvore de eventos, semelhante aos das figuras 1, 4 e 5.

SIMULAÇÃO

O procedimento de simulação pode ser entendido esquematicamente através das Figuras 1, 4 e 5, para o caso onde todos os defeitos da população são conhecidos. A primeira etapa é simular as variáveis básicas do problema (dimensões de defeitos, taxa de crescimento de corrosão, incertezas de inspeção e propriedades dos materiais) por meio de suas respectivas distribuições de probabilidade utilizando o método de Monte Carlo e, como comparação, a amostragem composta, que é uma combinação da amostragem hipercubo latino (LHS) com a amostragem estratificada (AE) (THOM, 2003).

Exemplos Ilustrativos

1. Decisões de Manutenção Baseadas na População de Defeitos Globais

Este exemplo ilustra o planejamento da manutenção baseada em confiabilidade dada pelo conhecimento prévio do número médio de defeitos e

as distribuições de profundidade e comprimento dos defeitos. Vamos considerar uma tubulação com 914 mm de diâmetro externo, 8,74 mm de espessura de parede e feita em aço API 5L X60. A máxima pressão de operação aceitável é de 5,7 MPa. As distribuições de probabilidade de todos os parâmetros de entrada estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

Nº	Parâmetros	Simbologia	Unidade	Média	Desvio padrão	Tipo de Distribuição
1	Tensão de escoamento	σ_{ymin}	MPa	461	16,13	Normal
2	Espessura da parede do duto	ω	mm	8,74	0,087	Normal
3	Diâmetro do duto	D_0	mm	914	0	Fixo
4	Pressão de operação	MAOP	MPa	5,7	0	Fixo
5	Profundidade do defeito	h	mm	1,7	0,765	Lognormal
6	Comprimento do defeito	l	mm	110	44	Lognormal
7	Profundidade detectável do defeito	h_a	mm	0,76	0,76	Exponencial
8	Erro na medição da profundidade	e_h	mm	0	0,68	Normal
9	Erro na medição do comprimento	e_l	mm	15	27	Normal
10	Taxa de crescimento na profundidade	r_d	mm/ano	0,1	0	Fixo
11	Taxa de crescimento no comprimento	r_l	mm/ano	5	0	Fixo

Fonte: PANDEY, 1997.

É planejado que de tempos em tempos, a tubulação será inspecionada usando a ferramenta de alta resolução MFL. A ferramenta de inspeção tem 99% de probabilidade de detectar uma profundidade de defeito de 40% da espessura da parede do tubo, a qual implica uma profundidade média detectável ($1/q$) de 0,76 mm. Os defeitos com uma pressão de falha, Q_m , menor que 1,3 MAOP serão reparados. A densidade média de defeitos é assumida como sendo 1 defeito para cada km de tubulação. Os resultados numéricos obtidos por procedimentos baseados em simulação estão plotados na Figura 2, para uma inspeção nos dutos em 10 anos (considerando uma vida útil de 25 anos), e na figura 3, para duas inspeções nos dutos, uma em 10 anos e outra em 20 anos (considerando uma vida útil de 30 anos). Mais detalhes sobre as simulações usadas estão descritas na referência THOM (2003). As Figuras 2 e 3 mostram que a inspeção sempre provoca uma descontinuidade (perturbação) nos gráficos, pois há uma queda na taxa de falha devido aos defeitos reparados.

2. Otimização da Inspeção

Se somente uma inspeção pode ser feita durante 25 anos de vida útil, o método de Monte Carlo ou um dos outros métodos desenvolvidos em THOM (2003) pode ser utilizado para determinar o tempo de inspeção ótima e o critério de reparo que minimiza a probabilidade de falha total durante a vida útil da tubulação; neste exemplo, vamos usar o método de Monte Carlo. Como ilustração, o tempo de inspeção foi variado entre 1 e 20 anos e a probabilidade de falha foi calculada para um critério de reparo pré-fixado, definido pelo fator k . Os resultados numéricos são mostrados na Figura 6 para 3 diferentes critérios de reparo. Isto confirma que uma inspeção após 7 anos com critério de reparo de 1,4 MAOP minimizará a probabilidade de falha da tubulação para 10^{-2} por km ao final de 25 anos. Esta análise pode ser usada para satisfazer uma meta de confiabilidade.

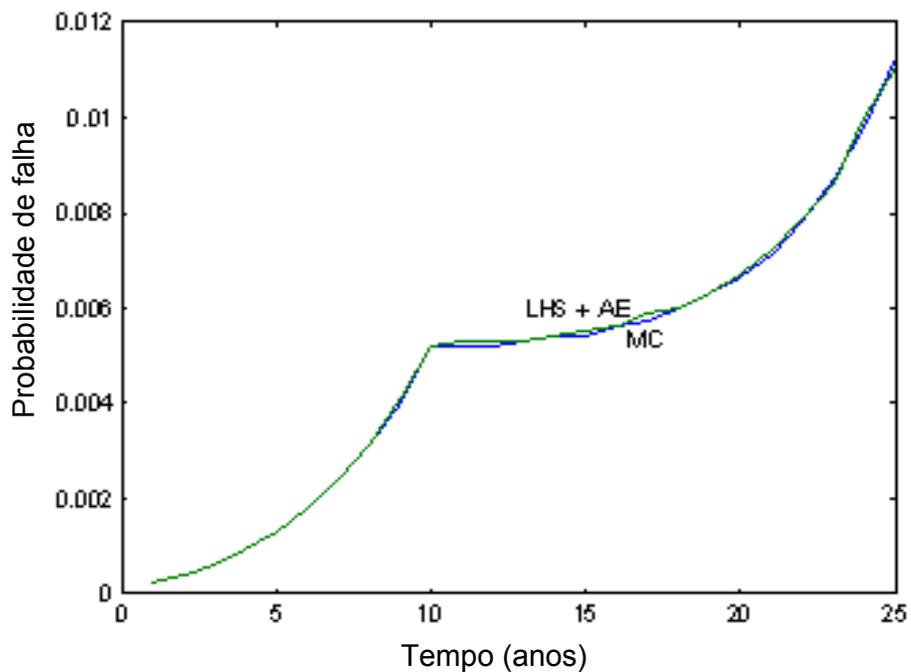


Figura 2. Obtenção da probabilidade de falha utilizando o método de Monte Carlo (MC) e amostragem composta (LHS + AE), para uma inspeção feita com 10 anos.

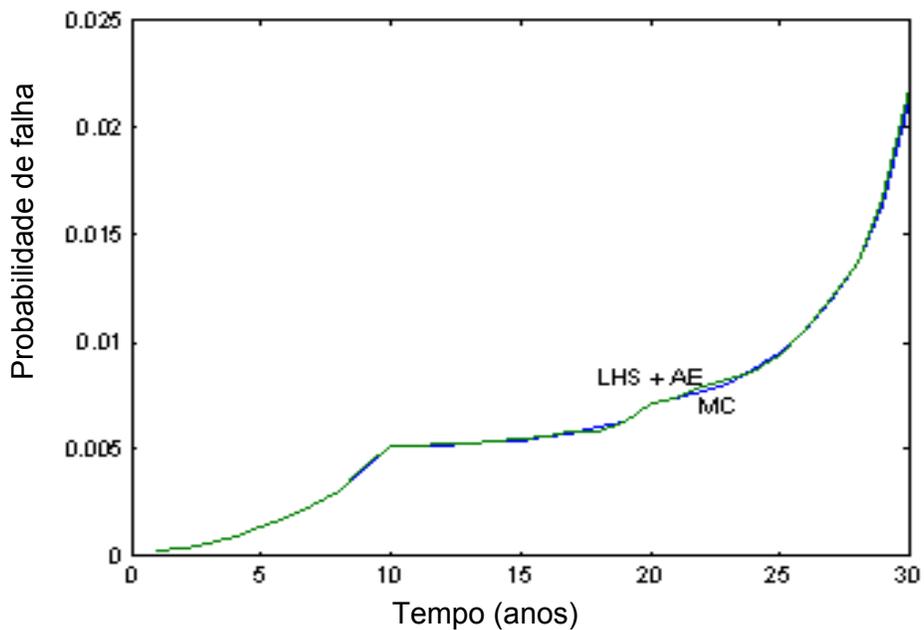


Figura 3. Obtenção da probabilidade de falha utilizando os métodos de Monte Carlo (MC) e amostragem composta (LHS + AE), para uma inspeção feita com 10 anos e outra com 20 anos.

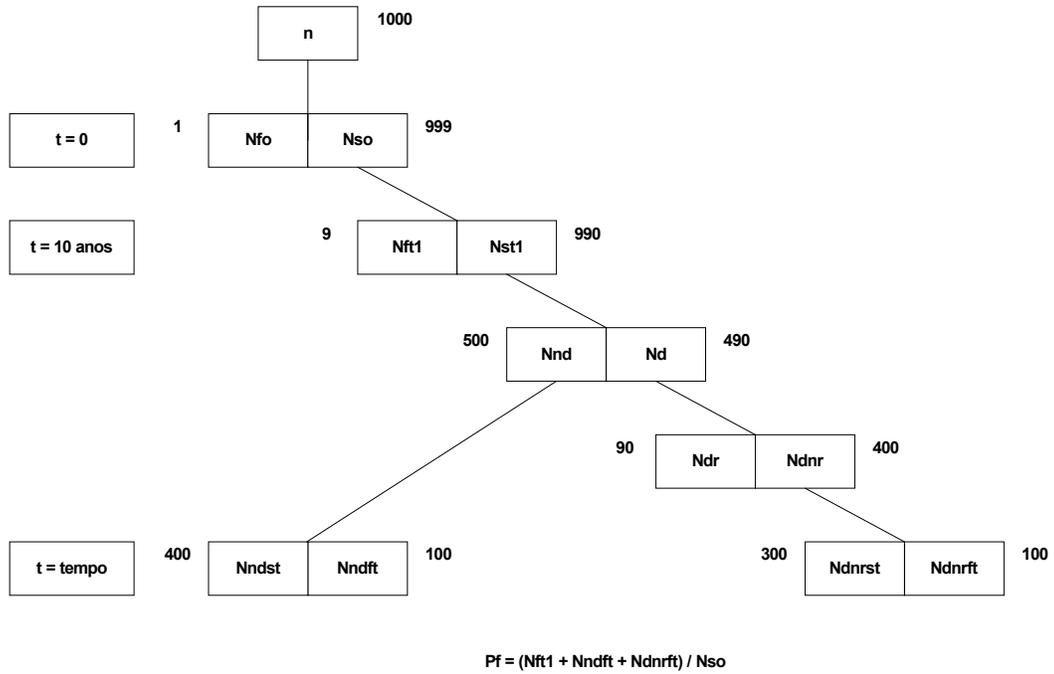


Figura 4. Fluxograma de rotina computacional considerando uma inspeção com 10 anos. Observação: os números que aparecem ao lado de cada bloco representam os resultados de uma simulação com $n = 1000$.

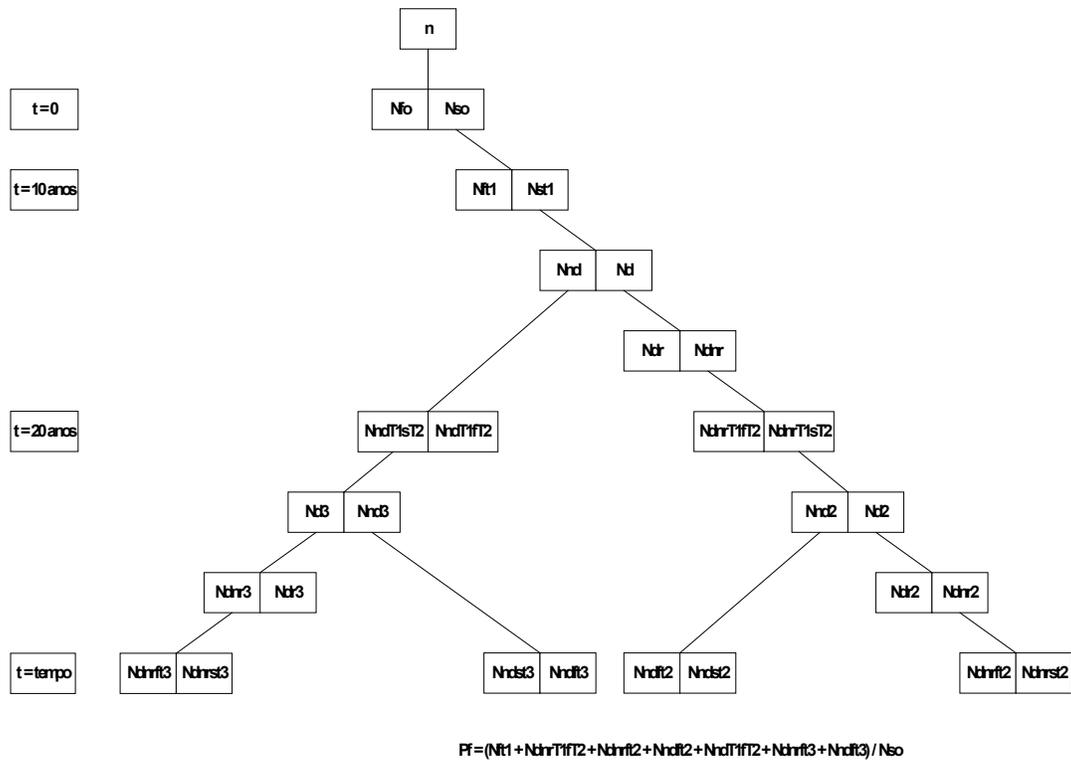


Figura 5. Fluxograma de rotina computacional considerando uma inspeção com 10 anos e outra com 20 anos.

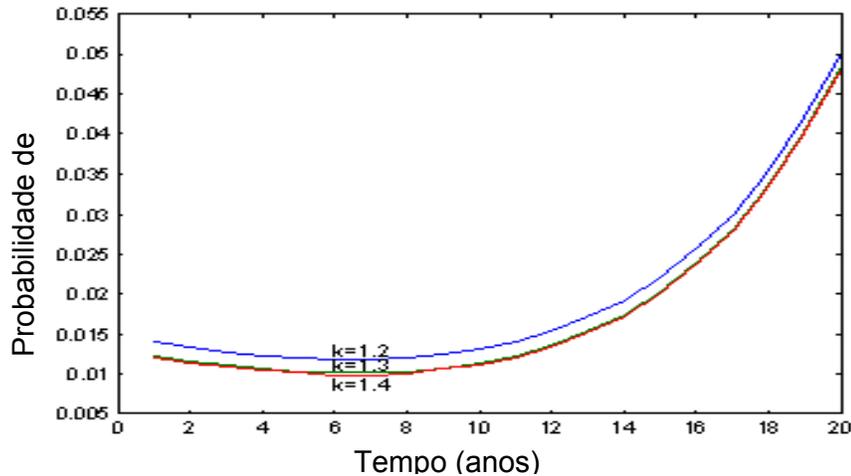


Figura 6. Otimização do tempo de inspeção variando o critério de reparo (considerando $k = 1,2; 1,3$ e $1,4$).

CONCLUSÕES

Este trabalho mostra que é possível criar modelos probabilísticos para o planejamento da manutenção, baseada na confiabilidade de manutenção que relaciona a probabilidade de falha devido a corrosão com a vida útil dentro de critérios de inspeção e reparo previamente definidos, utilizando a ferramenta MFL, muito popular em inspeções de tubulações enterradas. Além disso, mostra que podemos otimizar o momento em que se deve realizar uma inspeção para uma determinada vida útil restante. O propósito deste trabalho é criar uma ferramenta de tomada de decisão baseada na estimativa da vida útil de uma tubulação, durante o tempo de uso da mesma, que permite a determinação da curva de probabilidade de falha ao longo do tempo, utilizando dados de entrada obtidos por monitoração através do *pig* instrumentado, com intervalos de inspeção pré-definidos pelos resultados da monitoração. A implementação desta ferramenta combinada com uma inspeção adequada e uma avaliação de confiabilidade nos permite: impedir as falhas, a perda do produto e casualidades; evitar reparos caros e desnecessários; diminuir o custo de manutenção; otimizar o momento em que se deve realizar uma inspeção para uma determinada vida útil restante.

Referências Bibliográficas

- 1 KIEFNER, J.F.; MAXEY, W.A.; EIBER, R.J.; DUFFY, A.R. **Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders. Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing.** ASTM STP 536, p. 461-481, 1973.
- 2 PANDEY, M.D. **Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines.** NDT&E International. Great Britain, v. 31, p. 349-358, 1997.
- 3 THOM, F. C. M. **Cálculo da Confiabilidade de Tubulações de óleo e Gás Baseado em Amostragem por Hipercubo Latino e Estratificada,** Tese M.Sc., UFES, Espírito Santo, Novembro 2003.

MAINTENANCE OF OIL AND GAS PIPELINES BASED ON RELIABILITY CALCULATED FROM DATA OBTAINED BY PIG MONITORING SYSTEM

*Frederico Carlos Maciel Thom¹
Geraldo Rossoni Sisquini²*

Abstract

This work deals with the interpretation of the collected data in the inspection on line of pipelines using the Magnetic Flux Leakage (MFL), that is a tool of Non Destructive Testing (NDT), to characterize the current conditions of the vulnerable pipelines in the loss of metal for corrosion. A probabilistic analysis is presented to estimate the reliability of a pipeline due to these conditions, incorporating the impact of planned activities of inspection and repair during the useful life. The idea is applied to determine the interval of inspection and the strategy of repair that satisfies the reliability required. To process the data of the failure probability before and after the maintenance, a practical approach is developed and validated for results has gotten by Monte Carlo method that is compared with results has gotten by the method generated through the combination of latin hypercube sampling with the stratified sampling.

Key-words: Reliability; Maintenance; Magnetic flux leakage.