

GERENCIAMENTO DA MANUTENÇÃO DE TUBULAÇÕES DE ÓLEO E GÁS USANDO O CÁLCULO DA CONFIABILIDADE BASEADO NOS DADOS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS DE CORROSÃO OBTIDOS PELO VAZAMENTO DE FLUXO MAGNÉTICO (MFL)

Frederico Carlos Maciel Thom^a, Geraldo Rossoni Sisquini^b, Marcílio Sousa da Rocha Freitas^c

^a M.Sc., Engenheiro de Equipamentos da Petrobras (ENGENHARIA/IETEG/IECA/PSUTGSUL), Av. Nossa Sr^a dos Navegantes, 451/sala 1510, Enseada do Suá - Vitória (ES) - Brasil, frederico.thom@petrobras.com.br

^b D.Sc., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - Vitória (ES) - Brasil, sisquini@npd.ufes.br

^c D.Sc., Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROPEC) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG) - Brasil, marcilio@em.ufop.br

Palavras-chave: Tubulações, Defeitos de Corrosão, Vazamento de Fluxo Magnético, Confiabilidade, Manutenção.

Resumo. O propósito deste trabalho é criar uma ferramenta de tomada de decisão baseada na estimação da vida útil de uma tubulação, 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. 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; aperfeiçoar o momento em que se deve realizar uma inspeção para uma determinada vida útil restante. A caracterização das atuais condições das tubulações vulneráveis à perda de metal por corrosão é realizada através da inspeção on line utilizando o vazamento de fluxo magnético (Magnetic Flux Leakage - MFL), que é uma ferramenta de Ensaio Não Destrutivo (END). Uma análise probabilística é apresentada para estimar a confiabilidade devido a estas condições, incorporando o impacto de atividades planejadas de inspeção e reparo durante a vida útil. Para processar os dados da probabilidade de falha antes e após a manutenção, uma aproximação prática e computacional é desenvolvida e validada por resultados obtidos pelo método de Monte Carlo que é comparado com resultados obtidos pelo método gerado através da combinação da amostragem do hipercubo latino com a amostragem estratificada.

1. INTRODUÇÃO

A ação de corrosão em dutos terrestres e marítimos incrementa problemas. Consequentemente, operadores de dutos usam inspeção por pigs inteligentes para detectar o tamanho da corrosão. Os dados de inspeção podem ser combinados com a probabilidade de falha, para determinar o efeito da corrosão na integridade imediata e futura da tubulação. Basicamente, o método utilizado para estimar a vida de um duto sob corrosão emprega determinação da relação entre a vida útil que ainda resta, a taxa de corrosão, a pressão de operação, entre outras, e, conseqüentemente, a identificação da corrosão, o reparo, a troca ou não do duto e a listagem de serviços de intervenção necessários.

A habilidade em se determinar exatamente às taxas de crescimento da corrosão é um parâmetro essencial da entrada em toda a estratégia eficaz da gerência da corrosão, porque permite que os operadores possam melhor definir e planejar futuras readaptações na planta e regimes de operação.

Historicamente, as taxas de crescimento da corrosão são estimadas comparando os tamanhos de uma amostra pequena dos defeitos em inspeções de funcionamentos sucessivos ou usando equações para estimar taxas nos dutos de óleo e gás. Entretanto, *softwares* têm sido desenvolvidos, para identificar, por meio de uma comparação direta dos sinais de inspeção sucessivas:

i) As características internas e/ou externas da corrosão que cresceram entre as operações da inspeção;

ii) A posição de locais novos da corrosão interna e/ou externa a serem identificados;

iii) As taxas de crescimento representativas da corrosão a serem determinadas.

Consequentemente, alguns locais da corrosão que cresceram entre duas inspeções e novos locais podem ser identificados, o que permite a estimação da taxa de corrosão. Estas informações podem então ser utilizadas para identificar onde as medidas corretivas são requeridas (Ex.: aumento na inibição à corrosão, melhorias no sistema de proteção catódica, etc.) e para identificar a localização da corrosão que precisa de reparo, o tempo de reparo e, além disso, determinar o melhor intervalo para a reinspeção e funcionamento seguro do duto.

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.

2. VAZAMENTO DE FLUXO MAGNÉTICO (MFL)

O vazamento de fluxo magnético (*Magnetic Flux Leakage* - MFL) é o método mais antigo e mais comum utilizado em linhas de tubulação para encontrar regiões com perda de metal em dutos de transmissão de petróleo e gás. O MFL pode detectar com segurança a perda de metal por corrosão e até em alguns casos encontrar falhas geométricas ou metalúrgicas.

O MFL funciona como um ímã. Um ímã tem dois pólos, norte e sul. Os pólos empregam forças de atração de campo magnético na peça de aço e no pólo oposto. Como na Figura 1, as linhas de fluxo são utilizadas para mostrar o sentido e a direção da força de campo magnético. Quando o ímã é colocado próximo à parede do tubo, mais de uma linha de fluxo passa através da parede. Isto é, a parede do tubo é o caminho de preferência para o fluxo, conforme mostrado na Figura 2. As linhas de campo magnético que não atravessam a parede do tubo são dispersas no fluido. A Figura 3 demonstra que o vazamento de fluxo magnético na região de perda de metal é causado por uma diminuição na espessura da parede.

Um sensor posicionado no interior (lado do ímã) da tubulação é tipicamente usado para medir o campo magnético adjacente à parede do duto. Na região de perda metálica, o sensor capta o incremento da densidade de fluxo magnético ou do campo magnético. Desta maneira uma ferramenta MFL detecta a anomalia que é causada pelo vazamento de fluxo magnético.

A dimensão do campo vazante depende da parede radial, do comprimento axial, da largura circunferencial, da forma da anomalia, bem como das propriedades magnéticas do material. Para caracterizar a anomalia, a extensão do campo vazante deve ser analisada. As ferramentas MFL aplicam o princípio de vazamento de fluxo (CLAYTON, 1999). Um sistema de magnetização aplica um campo magnético ao longo do comprimento da tubulação à medida que a ferramenta se move através da linha. Os defeitos corrompem este campo aplicado, produzindo o vazamento de fluxo. Os sensores medem o vazamento de fluxo e o sistema registra e armazena essas informações. No final, as medições são analisadas para estimar o defeito geométrico e a severidade. A Figura 4 ilustra o fluxo de processo do MFL.

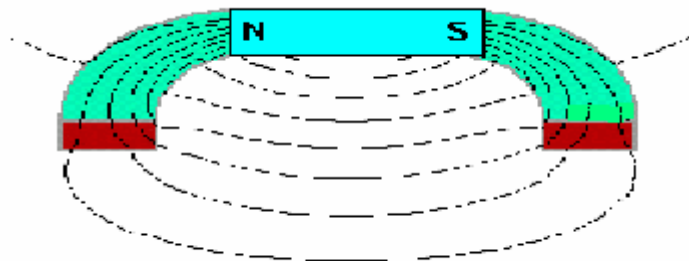


Figura 1: Fluxo de campo magnético.

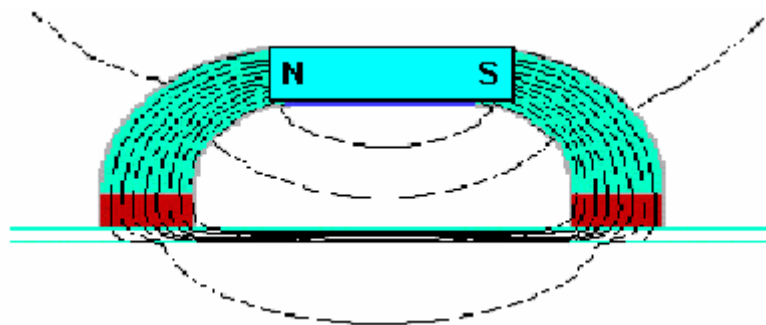


Figura 2: Fluxo de campo magnético em contato com a parede do duto.

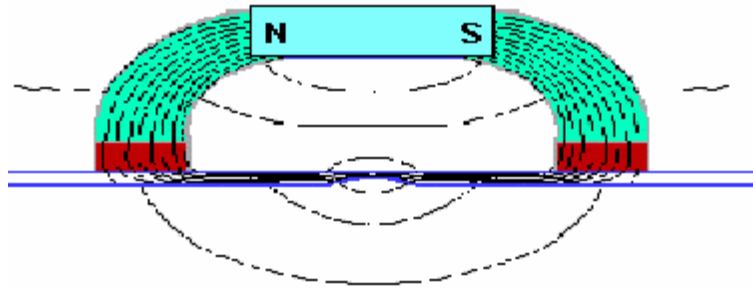


Figura 3: Fluxo de campo magnético em contato com um defeito na parede do duto.

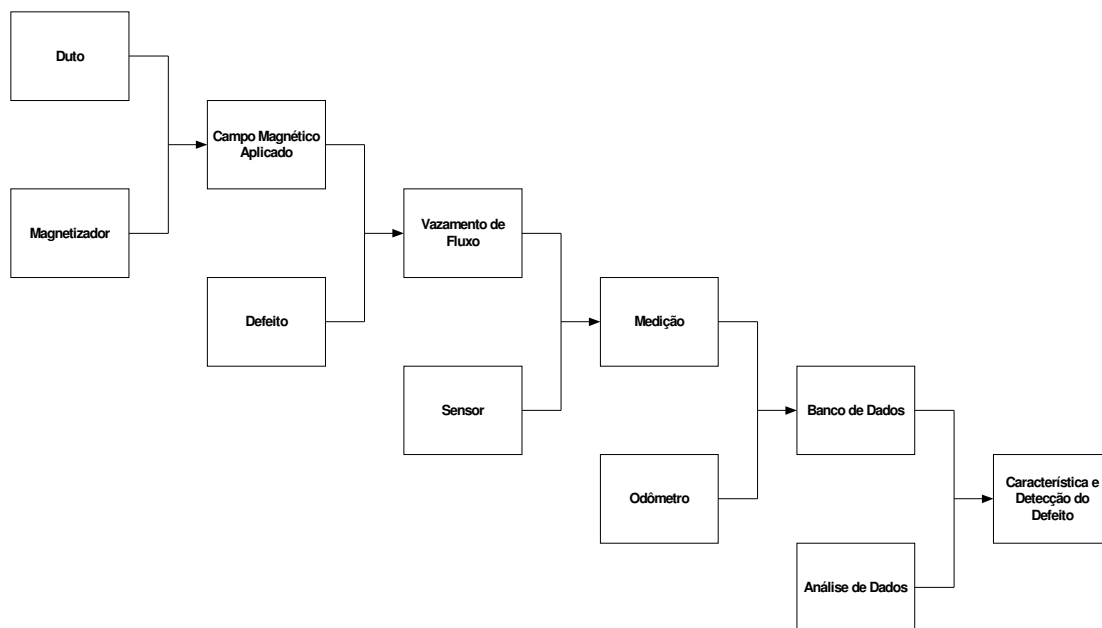


Figura 4: Fluxo de processo do MFL.

2.1 Objetivos da Inspeção

As inspeções MFL são tipicamente usadas para detectar, localizar e caracterizar perda de metal e outras anomalias em tubulações de transmissão de petróleo e gás. Existem muitos tipos de defeitos e nem todas as anomalias podem ser detectadas ou caracterizadas pelo MFL.

O MFL é mais usado para detectar a extensão da perda metálica. A severidade da região da perda de metal é uma função da sua geometria, geometria da tubulação e propriedades mecânicas. Critérios normativos, como o ASME B31G, RSTRENG, SHELL92, PCORRC, DNV RP-F101 e outros (Caleyó et al., 2002; Cosham et al., 2007), têm sido desenvolvidos para estimar a pressão de falha na região de perda metálica. O conhecimento dos critérios de falha é importante para a detecção e caracterização da acurácia requerida para a ferramenta.

A detecção e a caracterização requeridas podem ser baseadas nas condições de conservação da tubulação, manutenção feita pelo operador e estratégia de reparo. A confiabilidade na detecção é sempre necessária, particularmente para defeitos que ameaçam a integridade da tubulação.

As dimensões requeridas do defeito são o comprimento e a profundidade, que podem ser vistas na Figura 5. A determinação da correta localização dos defeitos é necessária para

auxiliar na decisão do reparo. Isto inclusive é influenciado também pelo aspecto da solda circunferencial da tubulação, pela mudança na espessura da parede do tubo e por válvulas e derivações.

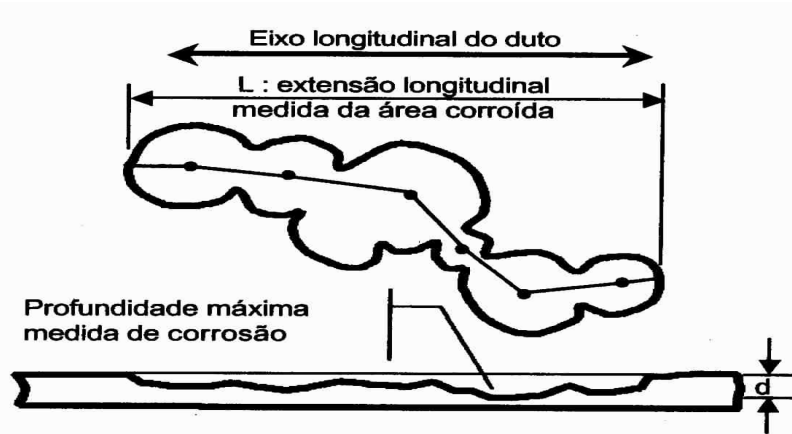


Figura 5: Convenção para estabelecimento do comprimento L de um defeito de corrosão de geometria irregular.
Fonte: Norma ASME B31G.

3. A METODOLOGIA DA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA

As distribuições das taxas de crescimento da corrosão obtidas em *software*, por comparação, podem então ser utilizadas em uma análise da confiabilidade para estimar a probabilidade da falha com o tempo. O desenvolvimento de uma metodologia de avaliação probabilística para os dutos corroídos envolve os seguintes estágios (DAWSON *et alli*, 2000):

- (1) Definição do modelo da falha (e subsequentemente da função de estado limite), nos termos dos parâmetros da entrada. Alguns ou todos os parâmetros da entrada podem ser representados por distribuições estatísticas;
- (2) Na base da informação disponível, definição das distribuições estatísticas dos parâmetros de entrada (propriedades do material, taxa de corrosão, etc...);
- (3) Estimação da probabilidade de falha devido a defeitos individuais da corrosão com o tempo;
- (4) Estimação da probabilidade total da falha (provocada pela corrosão) no duto com o tempo.

3.1. Método de Monte Carlo

Métodos de confiabilidade estrutural resultam na combinação da aplicação da teoria das probabilidades para o tratamento das incertezas (cargas, dimensões, características mecânicas do material) que podem afetar o desempenho da estrutura, associados a métodos de análise estrutural.

Há muito tempo, a simulação de Monte Carlo é extensamente usada nos projetos de modernas estruturas de engenharia. Devido à complexidade dos modelos de cálculo e ao fato de que cada código de cálculo normalmente tem diversas variáveis aleatórias de entrada, pode durar várias horas uma única simulação, limitando dessa forma o número de simulações.

Várias técnicas podem ser usadas para resolver problemas de confiabilidade estrutural. Algumas técnicas de simulação são apresentadas como um possível modo de solucionar esses problemas.

Na análise de confiabilidade estrutural esta técnica consiste em gerar a partir da função conjunta de densidade de probabilidades das variáveis randômicas f_u , um número n_{si} de

amostras independentes U_i . Para cada uma destas amostras, a função de estado limite $G(U)$ é avaliada, se $G(U) \leq 0$ uma falha é contada. Uma aproximação para a probabilidade de falha é dada por (Fishman, 1996):

$$p_f = \int_F fu(U) du = \int_{-\infty}^{\infty} I\{G(U) \leq 0\} fu(U) du, \quad (1)$$

$$E[I\{G(U) \leq 0\}] = \lim_{nsi \rightarrow \infty} \frac{1}{nsi} \sum_{i=1}^{nsi} I\{G(U) \leq 0\}, \quad (2)$$

onde $I\{G(U) \leq 0\}$ é 1 para $G(U) \leq 0$ e 0 para $G(U) > 0$.

Um estimador de \hat{p}_f é definido como (Karamchandani, 1987):

$$\hat{p}_f = \frac{1}{nsi} \sum_{i=1}^{nsi} I\{G(U) \leq 0\}, \quad (3)$$

onde a média e a variância deste estimador são dadas por:

$$E\left[\hat{p}_f\right] = pf, \quad (4)$$

$$Var\left[\hat{p}_f\right] = \frac{pf(1-pf)}{nsi} \cong \frac{pf}{nsi}. \quad (5)$$

Embora esta técnica seja bastante simples e apresente medidas de confiança em relação à probabilidade que se está avaliando, ela apresenta várias dificuldades para ser usada. Uma delas é a quantidade de avaliações da função de estado limite $G(U)$. Como já foi visto antes, a probabilidade de falha em problemas estruturais é baixa e tendo-se, por exemplo, um valor de 10^{-3} e querendo-se um coeficiente de variação no estimador de 10%, o número de análises necessárias é da ordem de 10^5 .

Da forma como foi apresentado o método de Monte Carlo, ele é definido por alguns autores como o método da força bruta (Liu e Der Kiureghian, 1989). Entretanto, vários esquemas derivados deste método foram desenvolvidos para tentar diminuir o número de análises necessárias, tais como, amostragem estratificada (*stratified sampling*) e amostragem hipercubo latino (*latin hypercube sampling*). O método de Monte Carlo por ser uma ferramenta genérica é muitas vezes usado para a aferição de outros métodos, como é o caso deste trabalho.

3.2. Método de Hipercubo Latino

As técnicas da amostragem aleatória e a simulação por Monte Carlo são técnicas muito poderosas e úteis para análises probabilísticas. Entretanto, em alguns casos, o tempo necessário para executar o programa computacional em questão é muito longo e, dependendo do número de simulações, pode ser impraticável. A amostragem de hipercubo latino (*Latin Hypercube Sampling* - LHS) faz corridas de simulação tornando o método de Monte Carlo menos atraente para muitos pesquisadores, exatamente porque reduz a variância do valor esperado da probabilidade de falha (pf), tornando-a mais útil para o cálculo de baixos valores de probabilidade de falha ($<10^{-5}$).

A técnica de hipercubo latino produz um esquema de amostragem restringida em vez de uma amostragem aleatória direta de acordo com o método de Monte Carlo. Tradicionalmente,

números aleatórios são gerados aleatoriamente entre 0 e 1. Estes números aleatórios são usados para gerar variáveis de acordo com a função de distribuição prescrita de cada variável. Na amostragem do hipercubo latino (*Latin Hypercube Sampling - LHS*), a região entre 0 e 1 é dividida uniformemente em ni intervalos não sobrepostos para cada variável aleatória; onde ni é a quantidade de números aleatórios que precisam ser gerados para cada variável aleatória. Os ni intervalos não sobrepostos são selecionados de modo que tenham a mesma probabilidade de ocorrência. Então, ni diferentes valores em ni intervalos não sobrepostos são aleatoriamente selecionados para cada variável aleatória, isto é, um valor por intervalo é gerado. Isto pode ser realizado inicialmente gerando-se ni números aleatórios dentro da faixa $[0,1]$. Estes valores representam a posição de porcentagem de cada valor gerado de uma variável dentro de um intervalo. Entretanto, estes valores são linearmente transformados em intervalos não sobrepostos para cada variável aleatória através do uso da seguinte equação:

$$u_i = \frac{u}{ni} + \left(\frac{i-1}{ni} \right), \quad \text{onde } i = 1, 2, \dots, ni, \quad (6)$$

sendo, u é um número aleatório na faixa $[0,1]$ e u_i é o número aleatório no i -ésimo intervalo. Da Eq. (1), observa-se que existe somente um valor gerado que é selecionado aleatoriamente dentro de cada intervalo para cada variável aleatória. Isto é devido a seguinte relação:

$$\frac{(i-1)}{ni} < \frac{1}{ni}, \quad (7)$$

onde $(i-1)/ni$ e i/ni são os parâmetros do i -ésimo intervalo. Portanto, ni valores de x_1 (a primeira variável aleatória) são emparelhados de uma maneira aleatória (combinação igualmente provável) com os valores ni de x_2 (a segunda variável aleatória). Estes ni valores emparelhados de (x_1, x_2) são combinados de uma maneira aleatória com os ni valores de x_3 (a terceira variável aleatória) para formar o primeiro conjunto (x_1, x_2, x_3) e assim por diante, até o $(k-2)$ étimo conjunto $(x_1, x_2, \dots, x_{n-2}, x_{n-1}, x_n)$, onde k é o número de variáveis aleatórias. Assim, uma matriz $ni \times k$ é formada. A possível correlação estatística entre colunas da matriz pode ter uma influência notável nos resultados de simulação. Isso naturalmente afeta o erro sistemático e a variância do estimador.

Para ser mais específico, vamos assumir que precisamos simular valores de uma função y qualquer descrita como:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (8)$$

onde $f(\)$ é uma função determinística e x_i ($i = 1, 2, \dots, k$) são variáveis aleatórias de entrada. As etapas básicas do hipercubo latino são as seguintes:

1. Divisão do intervalo de cada x_i em ni intervalos. A divisão deve ser feita de modo que a probabilidade de um valor de x_i ocorrendo em cada intervalo é $1/ni$;
2. Para cada variável x_i e cada de seus ni intervalos, seleciona-se aleatoriamente um valor representativo para o intervalo. Em aplicações práticas, se o número de intervalos é grande, o valor médio de cada intervalo pode ser utilizado ao invés de executarmos a amostragem aleatória;
3. pós as etapas 1 e 2, existirão ni valores representativos para cada variável aleatória k . Há ni^k combinações possíveis para esses valores representativos. O objetivo da amostragem hipercubo latino é selecionar ni combinações de forma que cada valor representativo apareça uma única vez em ni combinações;

4. Para obtermos a primeira combinação, selecionamos aleatoriamente um dos valores representativos para cada das k variáveis aleatórias de entrada. Para obtermos a segunda combinação, selecionamos aleatoriamente um dos $n_i - 1$ valores representativos restantes de cada variável aleatória. Para obtermos a terceira combinação, selecionamos aleatoriamente um dos $n_i - 2$ valores representativos restantes de cada variável aleatória. Continuamos esse processo de seleção até que tenhamos n_i combinações de valores das variáveis aleatórias de entrada;
5. Avaliamos a Eq. (8) para cada uma das n_i combinações das variáveis de entrada geradas anteriormente. Isto produzirá n_i valores da função, que serão denominados como y_i ($i = 1, 2, \dots, n_i$).

3.3. A Amostragem Estratificada (AE)

A idéia básica da amostragem estratificada (*stratified sampling*) é dividir o espaço de amostra de uma variável aleatória dominante, por exemplo, a profundidade inicial de uma trinca (a_0) de um vaso de pressão, em m sub-regiões mutuamente excludentes. O número pré-determinado de simulações em cada sub-região é proporcional a sua contribuição para a probabilidade total de falha. Dentro de cada sub-região, os tamanhos de trinca individuais são selecionados ainda de acordo com a função densidade de probabilidade de a_0 . A probabilidade de uma profundidade de trinca encontrar-se dentro da i -ésima sub-região, q_i , é determinada pela integração numérica quando a função densidade de probabilidade de a_0 e a faixa da i -ésima sub-região são conhecidos.

A simulação por Monte Carlo é usada para calcular a probabilidade de falha (pf) na i -ésima sub-região da profundidade da trinca inicial (a_0) como:

$$P_f^i = \frac{M_i}{N_i} q_i \quad (9)$$

onde q_i é a probabilidade de uma trinca inicial tendo uma profundidade dentro dos limites da i -ésima sub-região, N_i é o número de amostras ou simulações na i -ésima sub-região e M_i é o número de amostras ou simulações na i -ésima sub-região que geraram falha.

A probabilidade de falha total é então:

$$P_f^{\text{total}} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{M_i}{N_i} \right) q_i \quad (10)$$

O número total de simulações n é dado por:

$$n = \sum_{i=1}^m N_i \quad (11)$$

onde m é o número total de sub-regiões.

As referências citadas neste texto sobre a técnica de amostragem estratificada não fornecem uma explicação teórica a respeito de como matematicamente dividir em intervalos as sub-regiões da variável aleatória dominante. Em Hocevar *et alli* (1983) é citado que "...o espaço amostral é estratificado através da simples escolha de uma partição nos parâmetros espaciais de entrada...". Assim, para fins de simplificação, vamos considerar, q_i e N_i constantes em cada i -ésima sub-região. Desta forma, as Equações (8) e (9) são dadas por:

$$P_f^i = \frac{q_i}{N_i} M_i \quad (12)$$

$$P_f^{\text{total}} = \frac{q_i}{N_i} \sum_{i=1}^m M_i. \quad (13)$$

3.4. Combinação da Amostragem Estratificada com a Amostragem por Hipercubo Latino

Embora a amostragem por hipercubo latino (LHS) tenha vantagens na estimativa do valor esperado da probabilidade de falha com um número relativamente menor de simulações, em relação ao método de Monte Carlo, a redução na variância da probabilidade estimada de falha ainda pode ser melhorada (Ayyub e Lai, 1989). Como a amostragem estratificada (*stratified sampling*) pode também reduzir a variância da probabilidade de falha estimada tal como o método do hipercubo latino, surgiu a idéia básica da amostragem combinada (LHS + *stratified sampling*). De acordo com a amostragem estratificada, o espaço amostral de uma variável aleatória dominante (por exemplo, a profundidade inicial de uma trinca (a_0), o limite de escoamento (σ_y) ou qualquer outra variável da Mecânica da Fratura), é dividido em m sub-regiões mutuamente excludentes e o número de simulação em cada sub-região é proporcional a sua contribuição para a probabilidade de falha total. Então, o valor da probabilidade de falha (pf) é estimado de cada sub-região da variável aleatória dominante, com a aplicação da simulação de LHS, nas variáveis aleatórias restantes. Vale lembrar que tanto o LHS como a amostragem estratificada (AE) são aprimoramentos do método de Monte Carlo.

4. METODOLOGIA

4.1. 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:

$$Q = \frac{2\sigma_f \omega}{D_0} \left[\frac{1 - A/A_0}{1 - A/(MA_0)} \right] = \frac{2,3\sigma_y \omega}{D_0} \left[\frac{1 - h/\omega}{1 - h/(M\omega)} \right], \quad (14)$$

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:

$$M = \sqrt{1 + 0,6275 \frac{l^2}{D_0 \omega} - 0,003375 \frac{l^4}{D_0^2 \omega^2}}, \quad \text{para } \frac{l^2}{D_0 \omega} \leq 50 \quad (15a)$$

$$M = 0,032 \frac{l^2}{D_0 \omega} + 3,3, \quad \text{para } \frac{l^2}{D_0 \omega} > 50. \quad (15b)$$

Por causa do crescimento das dimensões h e l do defeito com o tempo, a resistência remanescente dada pela Equação (14) 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:

$$h(t)=h(0)+r_d t \quad l(t)=l(0)+r_l t, \quad (16)$$

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

4.2. 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:

$$P_{f|d}(t)=P[Q(t)-p_0 \leq 0]. \quad (17)$$

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:

$$P_f(t)=1-[1-P_{f|d}(t)]^{nd}, \quad (18)$$

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.

4.3. 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:

$$P_{D|H}(h)=1-e^{-qh}, \quad (19)$$

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:

$$h_m = h + e_h, \quad l_m = l + e_l, \quad (20)$$

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 (14) 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:

$$Q_m \leq k \cdot p_m, \quad (21)$$

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 (9) 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 são 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.

$$Q_m = \frac{2,3\sigma_{ymin}\omega}{D_0} \left[\frac{1-h_m/\omega}{1-h_m/(M\omega)} \right] \quad (22)$$

4.4. 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 9, que por sua vez será melhor entendido através das Figuras 10 e 11 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 (21) 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:

$$M(t): [Q(t) - p_0 \leq 0], \quad (23)$$

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

$$S(t): [Q(t) - p_0 > 0]. \quad (24)$$

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:

$$D(t): [ha-h(t)\leq 0], \quad (25)$$

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

$$ND(t): [ha-h(t)>0]. \quad (26)$$

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

$$R(t): [Q_m - k \cdot p_m \leq 0], \quad (27)$$

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

$$NR(t): [Q_m - k \cdot p_m > 0]. \quad (28)$$

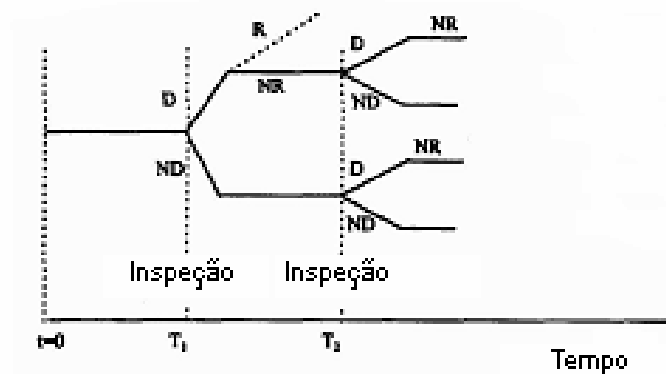


Figura 6: Árvore de eventos de manutenção (Eventos: D = detectado, ND = não detectado, R = reparado e NR = não reparado). Fonte: PANDEY, 1997.

O planeamento 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 planeamento 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 $t = 0$, pode ser estimada como:

$$P_f(t) = \frac{P[S(0) \cap M(t)]}{P[S(0)]}. \quad (0 < t \leq T_1) \quad (29)$$

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

$$P_f(t) = P_f(T_1) + \Delta P_f(t) = P_f(T_1) + \Delta P_{f1}(t) + \Delta P_{f2}(t) \quad (T_1 < t \leq T_L), \quad (30)$$

onde $\Delta P_{f1}(t)$ 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:

$$\Delta P_{f1}(t) = \frac{P[S(0) \cap S(T_1) \cap ND(T_1) \cap M(t)]}{P[S(0)]}, \quad (T_1 < t \leq T_L) \quad (31)$$

$$\Delta P_{f2}(t) = \frac{P[S(0) \cap S(T_1) \cap D(T_1) \cap NR(T_1) \cap M(t)]}{P[S(0)]}. \quad (T_1 < t \leq T_L) \quad (32)$$

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 6, 7 e 8.

4.5. Simulação

O procedimento de simulação pode ser entendido esquematicamente através das Figuras 6, 7 e 8, 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).

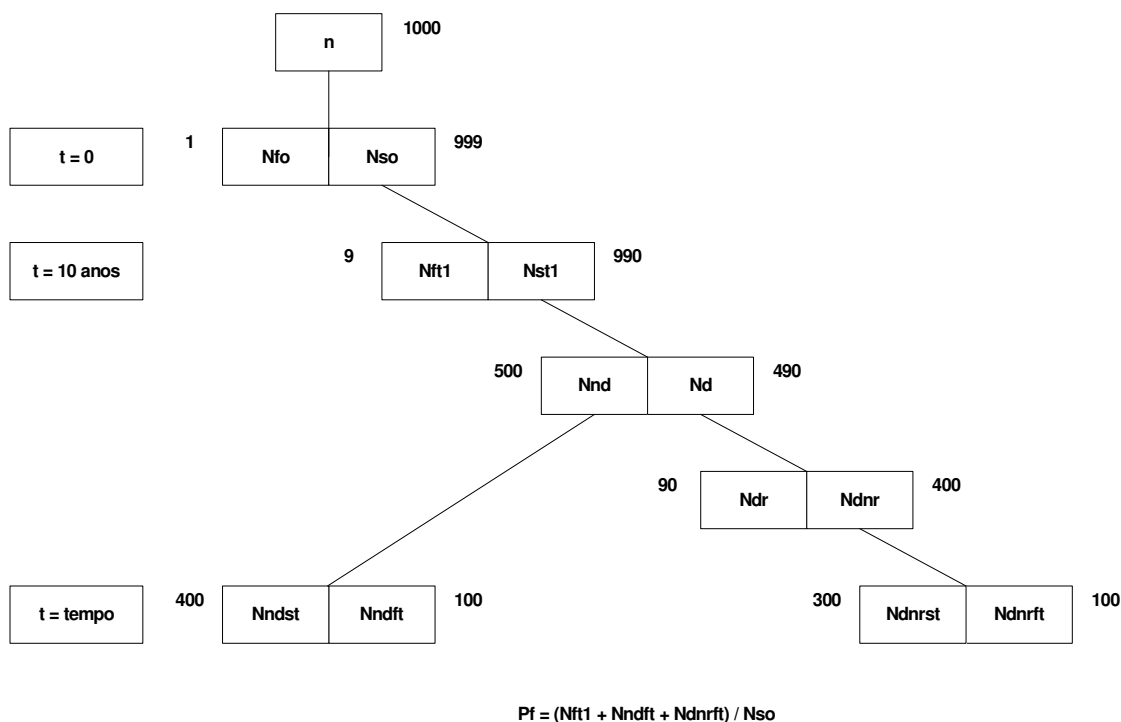


Figura 7: Fluxograma de rotina computacional considerando uma inspeção com 10 anos. Observação: os números que aparecem ao lado de cada bloco representam os resultados de uma simulação com $n = 1000$.

4.6. Exemplos Ilustrativos

4.6.1. 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 III.

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.

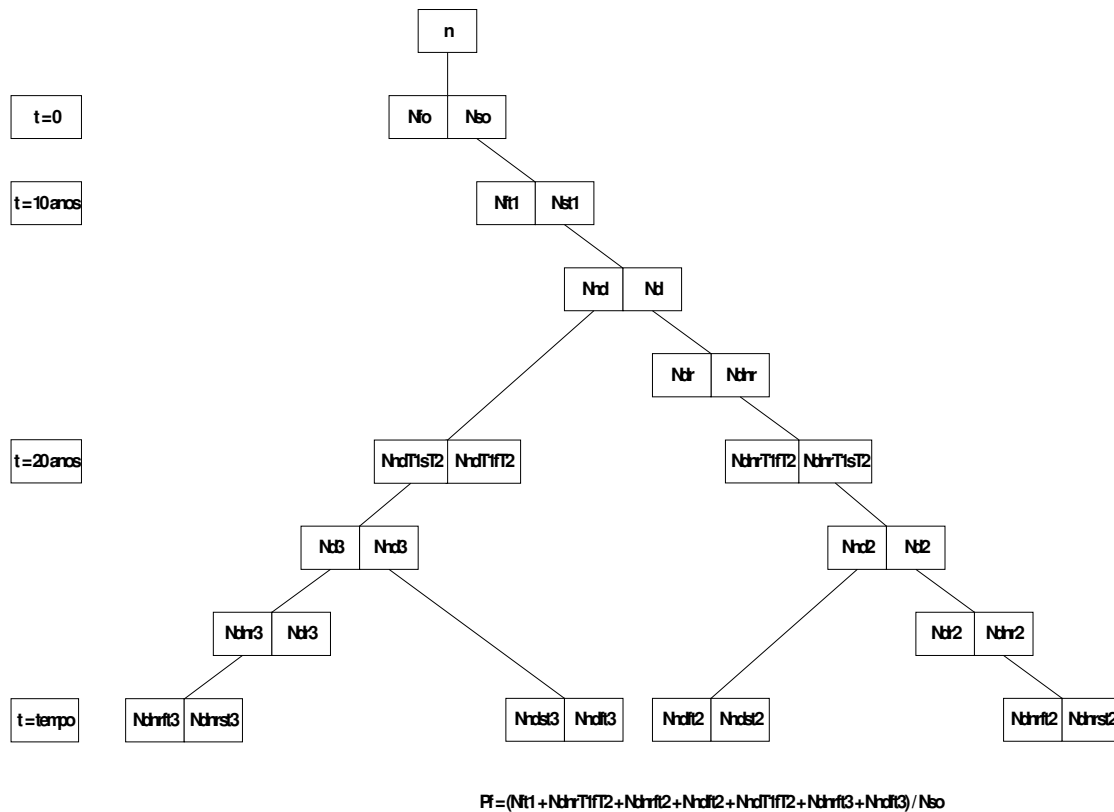


Figura 8: Fluxograma de rotina computacional considerando uma inspeção com 10 anos e outra com 20 anos.

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 9, para uma inspeção nos dutos em 10 anos (considerando uma vida útil de 25 anos), e na Figura 10, 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) e Sisquini et al. (2008). As Figuras 9 e 10 mostram que a inspeção sempre provoca uma descontinuidade (perturbação) nos gráficos, pois há uma queda na taxa de falha devido aos defeitos reparados.

4.6.2. 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.

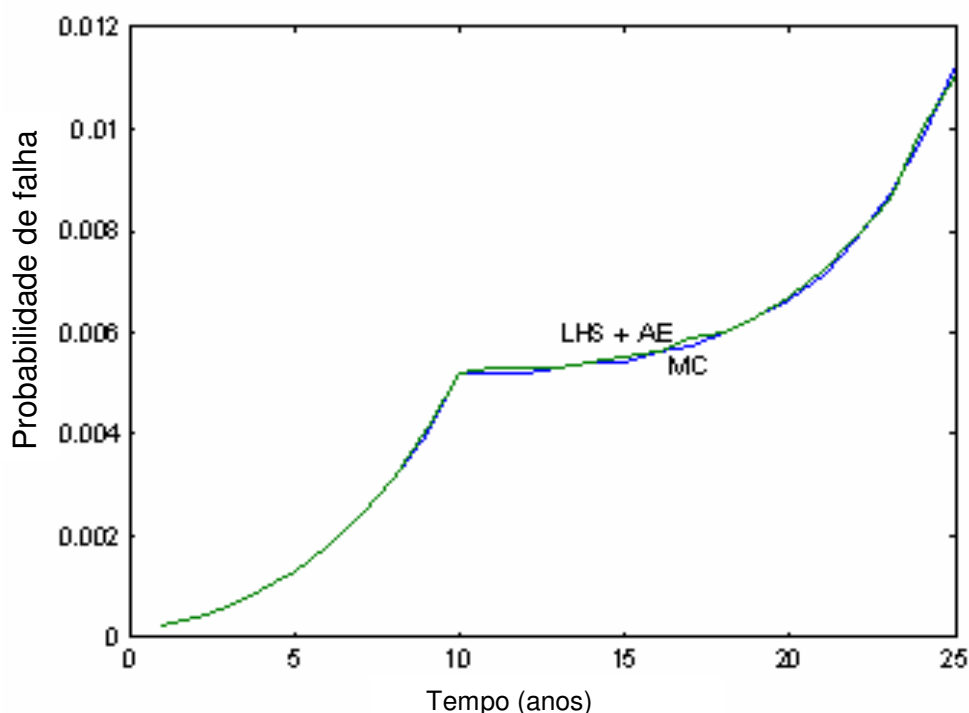


Figura 9: Obtenção da probabilidade de falha utilizando o método de Monte Carlo (MC) e amostragem composta (LHS + AE), para uma inspeção feita com 10 anos.

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 11 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.

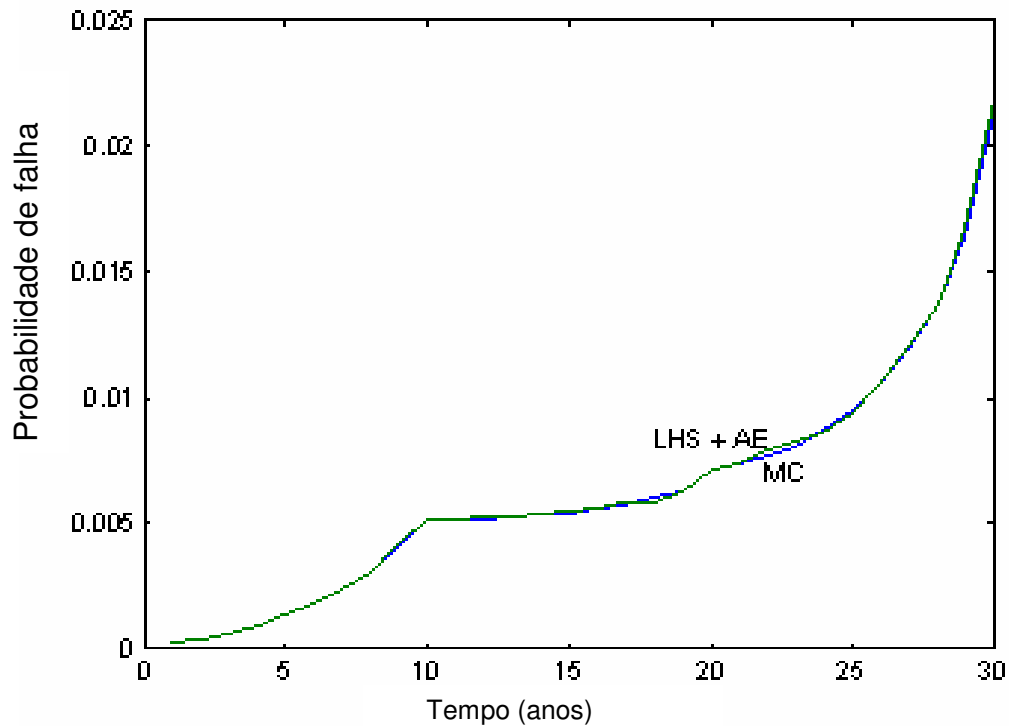


Figura 10: Obtenção da probabilidade de falha utilizando os métodos de Monte Carlo (MC) e amostragem composta (LHS + AE), para uma inspeção feita com 10 anos e outra com 20 anos.

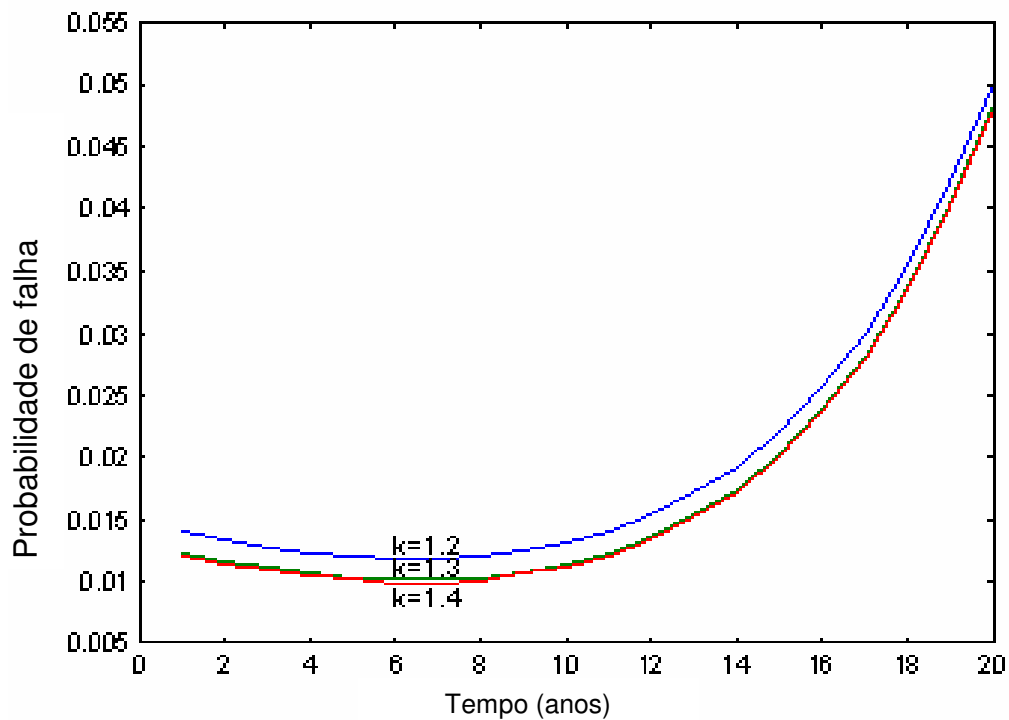


Figura 11: Otimização do tempo de inspeção variando o critério de reparo (considerando $k = 1,2; 1,3$ e $1,4$).

5. 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 estimação 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

- Ayyub, B. M.; Lai, K., Structural Reliability Assessment using Latin Hypercube Sampling. *5th International Conference on Structural Safety and Reliability*. San Francisco, USA, 1989.
- Caleyo, F., Gonzalez, J.L., Hallen, J.M., A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion. *International Journal Pressure Vessels Piping*, v. 79, 77–86, 2002.
- Clayton, P. Specialist Pigging and Line Cleaning. *Second Latin American Pipeline Integrity Conference*. Puerto La Cruz, Venezuela, 1999.
- Cosham, A., Hopkins, P., Macdonald, K. A., Best practice for the assessment of defects in pipelines - Corrosion. *Engineering Failure Analysis*, v. 14, p. 1245–1265, 2007.
- Dawson, J.; Race, J.; Peet, S.; Krishnamurthy, R., *Pipeline Corrosion Management*. Houston, USA. 2000.
- Fishman, G.S., *Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications*. Springer. 1996.
- Hocevar, D.E.; Lightner, M.R.; Trick, T.N.,. A Study of Variance Reduction Techniques for Estimating Circuit Yields. *Computer-Aided Design*, v. 2, n. 3, p. 180-192, 1983.
- Karamchandani, A., *Structural System Reliability Analysis Methods*. Report n. 83, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, USA, 1987.
- 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.
- Liu, P.L.; Der Kiureguian, A., *Finite-Element Reliability Methods for Geometrically Nonlinear Stochastic Structures*. Report n. UCB/SEMM-89/05, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, USA, 1989.
- Pandey, M.D., Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines. *NDT&E International*. Great Britain, v. 31, p. 349-358, 1997.
- Sisquini, G. R., Thom, F. C. M., Martins Filho, B., Técnicas de Amostragem Aplicadas na Confiabilidade e Durabilidade de Estruturas. In: *XXIX CILAMCE - Iberian Latin American*

Congress on Computational Methods in Engineering. Maceió, p. 1-18, 2008.
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.