



UM MODELO BASEADO NA EQUAÇÃO DE ITÔ DA ANÁLISE DA CORROSÃO
DE TUBULAÇÕES DE CENTRAIS NUCLEARES PARA A EXTENSÃO DA SUA
VIDA ÚTIL QUALIFICADA

Gladson Silva Fontes

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e
Melo

Rio de Janeiro
Outubro de 2014

UM MODELO BASEADO NA EQUAÇÃO DE ITÔ DA ANÁLISE DA CORROSÃO
DE TUBULAÇÕES DE CENTRAIS NUCLEARES PARA A EXTENSÃO DA SUA
VIDA ÚTIL QUALIFICADA

Gladson Silva Fontes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

Prof. José Antônio Carlos Canedo Medeiros, D.Sc.

Prof. Luis Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

Prof. Marcelo Ramos Martins, D.Sc.

Dr. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

Dr. Marco Antônio Bayout Alvarenga, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL.

OUTUBRO DE 2014

Fontes, Gladson Silva

Um Modelo Baseado na Equação de Itô da Análise da Corrosão de Tubulações de Centrais Nucleares para a Extensão da sua Vida Útil Qualificada/ Gladson Silva Fontes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XVII, 137 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo
Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 112-125.

1. Modelo de Degradação. 2. Envelhecimento. 3. Equação de Itô. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

A Deus, pelo Dom da Vida,
À minha esposa Cicéli pelo incentivo dedicado
em prol da realização desta obra, e
Aos meus pais Eno e Benedita pela educação e
carinho proporcionados a mim ao longo da vida.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Cicéli, pelo amor, incentivo, companheirismo, compreensão, carinho, atenção, amizade e principalmente por todos os esforços que dedicou nos momentos antes e durante a execução desta obra.

Ao meu orientador Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo e aos Doutores Cláudio Luiz de Oliveira, Pedro Luiz da Cruz Saldanha e Newton José Ferro, pela paciência, eficiência, entusiasmo, objetividade, clareza, continuidade e original orientação. Obrigado pela transmissão de seus vastos conhecimentos que não se limitaram às fronteiras deste trabalho, capacitando-me à pesquisa no campo ciência e tecnologia através de seus exemplos.

Ao Exército Brasileiro, ora representado pelo Instituto Militar de Engenharia (IME), por todo crescimento moral e profissional em mim investido.

Aos D.Sc José Antônio Carlos Canedo Medeiros, D.Sc Luis Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc Marcelo Ramos Martins, D.Sc Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira e D.Sc Marco Antonio Bayout Alvarenga pela honra de tê-los na banca examinadora e pelas sugestões para o aprimoramento desta tese.

Ao Tenente Coronel Walter José Guimarães Júnior, chefe de Seção de Ensino/7, Engenharia Nuclear, do Instituto Militar de Engenharia pela colaboração, incentivo e amizade na realização do doutorado.

Ao meu amigo e colega de estudo M.Sc Antônio Sérgio de Martin Alves, pelas valiosas discussões, que contribuíram muito para o fechamento desta tese.

A todos os professores, alunos e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE.

Aos meus pais por toda educação, apoio e confiança que moldaram o meu caráter e minha personalidade, capazes de me permitir vencer obstáculos e desafios.

A todos que de alguma forma bem contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta obra.

Enfim a Deus, Autor e Consumador da Fé.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UM MODELO BASEADO NA EQUAÇÃO DE ITÔ DA ANÁLISE DA CORROSÃO
DE TUBULAÇÕES DE CENTRAIS NUCLEARES PARA A EXTENSÃO DA SUA
VIDA ÚTIL QUALIFICADA

Gladson Silva Fontes

Outubro/2014

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

A proposta desta tese é apresentar um modelo estocástico e determinístico baseado em uma abordagem contínua no tempo e com espaço de estados também contínuo no tempo para determinar a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão em uma tubulação de uma central nuclear. O processo é modelado através da equação de Itô que descreve tal evolução entre diferentes estados. Uma modelagem de Itô de ponto de corrosão pode ser desenvolvida para qualquer componente de uma central nuclear para o qual dados de profundidades pontos de corrosão estejam disponíveis. A abordagem proposta acima fornece um modo preciso e fácil de monitorar ao longo do tempo a profundidade de um ponto de corrosão que é um ponto crítico para o desenvolvimento de modelos de confiabilidade, informação do risco e para o planejamento de inspeções e manutenção de linhas de tubulações corroídas. O presente modelo estocástico é desenvolvido considerando a influência do ruído Gaussiano branco em corrosão. A equação do modelo estocástico é resolvida analiticamente baseada no método da integral de Itô e numericamente utilizando o método de Euler-Maruyama. Neste estudo, é calculado o tempo máximo de operação de uma tubulação antes que sua parede alcance a espessura mínima permitida.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A MODEL BASED ON ITÔ EQUATION TO ANALYSIS OF CORROSION OF
PIPES OF NUCLEAR POWER PLANT FOR EXTENSION OF ITS QUALIFIED
USEFUL LIFE

Gladson Silva Fontes

October/2014

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

The purpose of this thesis is to present a stochastic and deterministic model based on a continuous time and space state approach to the time evolution of depth of a pit corrosion in nuclear power plant piping (NPP) systems. The process is modeled by the Itô equation which describes temporal evolution of pit corrosion depth among different states. An Itô modeling of pit corrosion can also be developed for any component of a NPP for which pit corrosion depths data are available. The above proposed approach provides a precise and easy way in which pit corrosion depth can be monitored over time, which is critical for developing reliability and risk-informed models for inspection and maintenance planning of corroded pipelines. The presented stochastic model is developed considering the influence of the Gaussian white noise in corrosion. The equation of the stochastic model is solved analytically based on the Itô integral and numerically by utilizing the Euler-Maruyama method. It calculates the maximum operating time of a pipe before its wall reaches the minimum allowable thickness.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 EXÓRDIO	1
1.2 JUSTIFICATIVA	4
1.3 OBJETIVO	5
1.4 MOTIVAÇÃO, ORIGINALIDADE E RELEVÂNCIA	5
1.5 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	7
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	8
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
CAPÍTULO 3 ESTUDO DO ENVELHECIMENTO	23
3.1 GERAL	23
3.2 MECANISMOS DE ENVELHECIMENTO	23
3.2.1 FRAGILIZAÇÃO	24
3.2.2 FADIGA	34
3.2.3 CORROSÃO	35
3.2.4 CORROSÃO COM EROSÃO	42
3.2.5 RADIAÇÃO INDUZINDO FLUÊNCIA, RELAXAÇÃO OU INCHAMENTO	43
3.2.6 DESGASTE MECÂNICO	44
3.2.7 MANIPULAÇÃO DE COMPONENTES	45
3.2.8 DEFEITOS DE FABRICAÇÃO	45
3.3 OUTROS CASOS IMPORTANTES DE DEGRADAÇÃO EM EQUIPAMENTOS E COMPONENTES RELEVANTES PARA PWRs	46
CAPÍTULO 4 EQUAÇÃO DE ITÔ – UM MODELO PARA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PROFUNDIDADE DE UM PONTO DE CORROSÃO	51
4.1 GERAL	51
4.2 VARIÁVEL DETERMINÍSTICA E VARIÁVEL ESTOCÁSTICA	52
4.3 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS	53
4.3.1 CAMINHO ALEATÓRIO	56
4.3.2 PROCESSO DE MARKOV	57
4.3.3 PROCESSO DE LEVY	58
4.3.4 PROCESSO DE WIENER	58
4.3.5 RUÍDO GAUSSIANO BRANCO	59
4.3.6 PROCESSO DE ITÔ	60
4.4 EQUAÇÃO DE FOKKER-PLANCK	60
4.5 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS (EDE)	61
4.6 EQUAÇÃO DIFERENCIAL DE ITÔ	63

CAPÍTULO 5 APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL ESTOCÁSTICA DE ITÔ AO ESTUDO DE UMA TUBULAÇÃO CORROÍDA DE ANGRA I	65
5.1 GERAL	65
5.2 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	66
5.3 CASO A SER MODELADO	69
5.4 CRITÉRIOS DE ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS (OUTLIERS)	72
5.4.1 CRITÉRIO DE CHAUVENET	72
5.4.2 CRITÉRIO DE PEIRCE	74
5.4.3 CRITÉRIO DO ESCORE PADRONIZADO (Z _I)	75
5.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO A SER EMPREGADO	76
5.5.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS DE ITÔ COM COEFICIENTES CONTANTES	83
5.5.2 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A SOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS	86
5.5.2.1 MÉTODO DE EULER - MARUYAMA	87
5.5.2.2 MÉTODO DE MILSTEIN	89
5.5.2.3 MÉTODO DE RUNGE-KUTTA	89
5.6 RESULTADOS DO MODELO	90
CAPÍTULO 6 COMPARAÇÃO COM OUTROS MODELOS	98
6.1 GERAL	98
6.2 MODELAGEM DE CADEIAS DE MARKOV PARA PITES DE CORROSÃO EM TUBULAÇÕES ENTERRADAS, CALEYO ET AL (2009)	98
6.3 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO E O MÉTODO DE CONFIABILIDADE DE TUBULAÇÕES PARA INSPEÇÃO BASEADA NO RISCO, MOKHTAR (2009).	100
6.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS MODELOS	104
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	109
7.1 CONCLUSÕES	109
7.2 RECOMENDAÇÕES	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
APÊNDICE A – TABELA: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	126
APÊNDICE B – GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS E EXPRESSÕES UTILIZADAS	128
APÊNDICE C – TABELA EXEMPLOS DE CORROSÃO OBSERVADAS EM REATORES A ÁGUA PRESSURIZADA	132
APÊNDICE D – A PROBABILIDADE PERCENTUAL	133

APÊNDICE E – TABELA DO CRITÉRIO DE PEIRCE	134
APÊNDICE F – PROGRAMA PARA RESOLVER A EQUAÇÃO DE ITÔ	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Conjunto de funções amostrais ou realizações de um processo estocástico.

Figura 4.2 – Subconjunto de funções amostrais que definem $P(y,t)$.

Figura 4.3 – Subconjunto de funções amostrais que definem $P_{1|1}(y_2,t_2|y_1,t_1)$.

Figura 4.4 – Uma trajetória possível do caminho aleatório bidimensional

Figura 5.1 – Distribuição de frequências da profundidade dos pontos de corrosão ao longo da parede da tubulação.

Figura 5.2 – Perfil da profundidade dos pontos de corrosão ao longo da parede da tubulação.

Figura 5.3 – Estados possíveis para transição a partir do estado y_0 .

Figura 5.4 – Densidade de probabilidades de um processo browniano com termo de arraste.

Figura 5.5 – Densidade de probabilidade como função da profundidade para vários instantes de tempo.

Figura 5.6 – Distribuição de probabilidades das profundidades de corrosão em vários instantes de tempo.

Figura 5.7 – Parte determinística da Equação de Itô ($b=0$).

Figura 5.8 – Parte estocástica da Equação de Itô ($a=0$).

Figura 5.9 – Solução da Equação de Itô completa ($a \neq 0$ e $b \neq 0$) em azul e solução determinística em vermelho.

Figura 5.10 – Evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação segundo a solução analítica da equação de Itô.

Figura 5.11 – Evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação segundo a solução numérica da equação de Itô.

Figura 5.12 – Superposição entre as soluções analítica (Integral de Itô) e numérica (método de Euler-Maruyama) da equação de Itô.

Figura 5.13 – Evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação segundo as

soluções analítica estocástica e analítica determinista da equação de Itô.

Figura 5.14 – Evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão com b aumentado 100 vezes – 1ª história.

Figura 5.15 – Evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão com b aumentado 100 vezes – 2ª história.

Figura 5.16 – Densidade de probabilidade de um processo browniano com termo de arraste.

Figura 5.17 – Densidade de probabilidade para vários valores da posição.

Figura 5.18 – Distribuição de probabilidades das profundidades de corrosão em vários instantes de tempo.

Figura 6.1 – Espaço de estado do modelo.

Figura 6.2 – Evolução temporal da profundidade média da corrosão. Cada estado corresponde a 0,1 mm de espessura.

Figura 6.3 – Quadro da análise de degradação para estimar a confiabilidade de tubulações.

Figura 6.4 – Evolução temporal da profundidade média da parede da tubulação quando a corrosão atinge 50% (ou 3,5 mm) de sua espessura.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo dos principais equipamentos, componentes, materiais, desgastes ou falhas operacionais relatados em PWR.

Tabela 5.1 – Resultados para uma corrida de Ultrassom de uma tubulação de Angra I.

Tabela 6.1 – Regressão linear a dados de tempo de falha.

GLOSSÁRIO

AOP – Autorization Operation Provisional
API – American Petroleum Institute
ASME – American Society of Mechanical Engineers
BWR – Boiling Water Reactor
CFR – Code of Federal Regulations
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
EDE – Equação Diferencial Estocástica
EPRI – Electric Power Research Institute
E/C – Erosion Corrosion
ETN – Eletronuclear
FAC – Flow Accelerated Corrosion
GV – Gerador de Vapor
IAEA – International Atomic Energy Agency
IASCC – Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking
IBTV – Inférence Bayésienne pour le Traitement du Vieillissement
IGSCC – Intergranular Stress Corrosion Cracking
LOCA – Loss of Coolant Accident
MDMS – Multi Directional Measurement Sensitivity
MSS – Multiple State System
NPAR – Nuclear Power Plant Ageing Research
NRC – Nuclear Regulatory Commission
NUREG – Nuclear Regulatory
PdM – Predictive Maintenance
PE – Ponto de Ebulição
PSA – Probabilistic Safety Assessment
PWR – Pressurized Water Reactor
RI-ISI – Risco Informado no Sistema de Inspeção
SCC – Stress Corrosion Cracking
TGSCC – Transgranular Stress Corrosion Cracking
TIRGALEX – Technical Integration Review Group for Ageing and Life Extension
VPR – Vaso de Pressão do Reator
WNA – World Nuclear Association

LISTA DE SÍMBOLOS

- $a(y,t)$ – Coeficiente de difusão
 $A(y,t)$ – Coeficiente de arraste
 $b(y,t)$ – Coeficiente de arraste
 $B(y,t)$ – Coeficiente de difusão
 E – Energia
 $E(X)$ – Valor esperado
 $f(y,t)$ – Função amostral
 F – Vetor
 h – Distância
 i – Limite para reparo
 j – Limite para substituição
 j – Instante de tempo
 K – Tensão mínima
 l – Variável numérica
 L – Estado falho
 m – Somatório de variáveis aleatórias σ
 n - Nêutron
 N – Número de reparos ou Número de medições
 $N(0,1)$ – Distribuição normal padrão
 p – probabilidade
 p_1 – Número real
 q – Probabilidade
 R – Estado do componente, número de medições
 s,t – tempo
 S – Espaço percorrido
 t_{sus} – número de desvios padrão pelo qual x_{sus} difere de \bar{x}
 T – Período para inspeção, tempo ou temperatura
 V – Velocidade de propagação
 Wt ou $W(t)$ – Processo de Wiener
 x – Variável aleatória

\bar{x} , x_m - média da medida

y – Profundidade do ponto de corrosão

$Y(t)$ – Variável aleatória

Z_i – Escore padronizado

α – Probabilidade de reparo de um estado para outro, partícula alfa ou difusividade térmica

γ – Raio gama

$\rho(x)$ – Densidade de probabilidade

τ – Intervalo de tempo

σ – Variável aleatória independente, desvio padrão

σ^2 – Variância

μ - média, vetor

$\varepsilon(t)$ – Ruído branco

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 EXÓRDIO

Com o crescimento global do consumo energético, muitos esforços têm sido feitos para aumentar a oferta de energia, com a energia nuclear se configurando como uma das tecnologias mais importantes para o futuro deste mercado. A energia nuclear tem uma das melhores taxas de geração de calor entre as fontes térmicas de geração e não emite gases do efeito estufa. É uma produção de energia em larga escala, se configurando como uma energia de base de sistemas, concentrada em uma pequena área com um combustível potente e de preço extremamente competitivo.

Para que as funções de uma sociedade moderna sejam desempenhadas a contento (movimentar indústria, comércio, prover comunicação, saúde, serviços públicos, etc) é indispensável dispor de energia, em especial da elétrica, de forma confiável e a preço adequado. O suprimento e a segurança energética são hoje questões essenciais para qualquer país, e está na origem de muitas das decisões estratégicas dos governos.

Um estudo recente desenvolvido pela Eletrobrás Termonuclear (ELETRONUCLEAR, 2013) registrou a existência de 435 reatores comerciais operacionais ou operacionais desligados em 30 países, onde vive 2/3 da população mundial. Entre os maiores parques geradores, destacam-se os Estados Unidos com 100 unidades (67 são PWRs e 33 são BWRs), França com 58 reatores e o Japão com 50. Destes 435 reatores em operação 62% são reatores a água pressurizada (PWR), o mesmo modelo de Angra 1 e 2, e aproximadamente 19% são reatores a água fervente (BWR), outros 19% empregam tecnologias que estão se tornando obsoletas e sumirão da matriz nuclear mundial na medida que estas usinas chegarem ao final da vida útil.

Até setembro de 2013, segundo a IAEA (ELETRONUCLEAR, 2013), 82,7% dos reatores 359 em operação no mundo tinham mais de 20 anos de atividade; destes, 183 unidades tinham entre 20 e 30 anos e 176 mais de 30 anos de atividade. Os reatores que operaram por mais de trinta anos terão que ser substituídos por outros novos ou por outra fonte de geração. Parte da solução é ampliar a vida útil das usinas existentes, evidentemente que a extensão da vida útil deve atender a critérios muito rigorosos,

principalmente com relação a questões de segurança, ambientais e econômicos. Segundo a World Nuclear Association (WNA) até 2030, 143 reatores devem ser fechados por término da vida útil qualificada.

A extensão da vida útil qualificada das centrais nucleares em operação comercial no mundo vem sendo uma opção relevante de tendência internacional. As renovações das licenças estão fundamentadas na determinação de que cada usina continue a manter um adequado nível de segurança ao longo de seu ciclo de vida.

Muitas usinas nucleares, tanto nos Estados Unidos, quanto em outras partes do mundo (no Brasil com Angra 1), em operação comercial ou estão muito próximas de atingirem o seu período de vida útil ou até já o atingiram.

A usina nuclear Angra 1, em 2014, completou 30 anos de operação comercial, com muitas melhorias de projeto, atualizações de procedimentos e troca de equipamentos importantes como, por exemplo, os geradores de vapor. O período de vida útil estipulado para as usinas nucleares americanas é de 40 anos e o pedido de extensão de vida útil por 20 anos deve atender a todas as exigências ambientais, das agências reguladoras e econômicas.

A Comissão Reguladora Nuclear norte-americana (NRC) emitiu em dezembro de 1991 regras e documentação associadas que descrevem como o licenciado deve estar capacitado a demonstrar que a unidade pode continuar operando por 20 anos adicionais após a expiração dos 40 anos de licença. Essas regras foram estabelecidas no 10CFR51 (1991), requisitos de proteção ambiental e no 10CFR54 (1995), requisitos técnicos, sendo denominada renovação de licença.

No Brasil, a Usina Nuclear Angra 1 de fabricação Westinghouse, teve seu licenciamento regido pela norma CNEN (1984) e baseado no modelo NRC (guias reguladores de revisão padronizados), o tempo de 40 anos foi considerado como base para 1984, sendo prevista a cada 10 anos uma revisão de autorização para ratificar ou retificar os seus termos. Este procedimento garante uma periodicidade da revisão da avaliação de segurança mantendo as bases do licenciamento no seguimento da norma CNEN (1984).

O estudo de extensão da vida qualificada possui dois componentes, um determinístico e outro probabilístico e um complementa o outro. A avaliação com base nos métodos determinísticos define a diferença entre o estado atual do item e o estado na fase de qualificação, porém, não define a probabilidade de ele continuar exercendo a sua função adequadamente por um período além do definido pela sua vida qualificada.

Não existe no Brasil uma formalização dos aspectos relacionados à extensão da licença de operação para além dos 40 anos. Na verdade, no Brasil segue-se a legislação do país de origem do projeto do reator. Contudo, a Autorização Provisória de Operação (AOP) estabelece diversos programas que buscam uma atualização do Projeto de Angra 1, em relação à tendência internacional, em destaque: Programa de Proteção Contra Incêndio, Programa de Qualificação Ambiental de Equipamentos Elétricos, Programa de Eficiência da Manutenção e Programa de Revisão das Especificações Técnicas (SALDANHA, 2003).

Na análise de extensão de vida de reatores nucleares, é fundamental o entendimento dos mecanismos de envelhecimento que afetam seus materiais e componentes. Tal envelhecimento é efeito não só das características gerais dos materiais como também de suas características relativas ao comportamento quando submetidas à radiação.

Envelhecimento, em geral, é definido como a degradação de sistemas, estruturas e componentes de uma central nuclear, de natureza cumulativa e dependente do tempo, que, quando não minorada, pode comprometer a sua segurança, o seu desempenho ou mesmo reduzir a sua vida útil estabelecida em projeto (NRC, 1990).

Todos os materiais em uma central nuclear podem sofrer maior ou menor degradação por envelhecimento, o que pode levar a degradações funcionais dos componentes da usina.

As experiências adquiridas com a operação das usinas nucleares mostram que as rupturas observadas em vários componentes ocorreram devido aos processos de degradação, tais como: corrosão geral e localizada, erosão, erosão-corrosão, fragilização induzida pela radiação e pelo calor, fadiga, fluência e desgaste com o regime de

funcionamento. A tendência a rupturas e problemas resultantes do envelhecimento, devido aos processos supracitados, pode aumentar nas centrais nucleares da primeira geração, em decorrência da aproximação do final de sua vida nominal de projeto. Sabe-se que tais rupturas provocadas pelo envelhecimento prejudicam um ou mais dos múltiplos níveis de proteção de sistemas, estruturas e componentes da usina nuclear, baseados no conceito de defesa em profundidade. É possível que a degradação, não revelada durante a operação normal e nos testes, leve à ruptura ou múltiplas rupturas de componentes, quando estes forem submetidos a tensões no ambiente nuclear, gerando uma desordem operacional ou acidente.

Uma dos elementos estruturais mais importantes em refinarias, plantas nucleares e petroquímicas é o sistema de tubulações. Segundo as estatísticas, o maior percentual de elementos estruturais nestas plantas é de sistemas de tubulação se comparado a outros equipamentos (CHANG et al, 2005). Em geral, sistemas de tubulação em refinarias e plantas nucleares e petroquímicas são expostos a ambientes corrosivos devido à presença de água, minerais e concentração de tensões e estes conduzem os sistemas a vários tipos de mecanismos de degradação.

Um dos mecanismos mais comuns de danos experimentados pelos sistemas de tubulações é o afinamento de parede que pode ocorrer devido a muitas razões, incluindo a corrosão acelerada pelo escoamento (HALES et al, 2002 e YUAN et al, 2008).

1.2 JUSTIFICATIVA

Vários autores (NUREG/CR-6415, 1996, DO VAN, 2008) têm se dedicado ao estudo de degradação de componentes ativos. Por outro lado, há uma carência em estudos de envelhecimento de componentes passivos.

Os dois processos de degradação possuem natureza markoviana reconhecida (WILLIAMS et al, 1985, EVANS, 2004, YEH, 1996), pois, no que diz respeito ao processo de corrosão, o estado futuro do ponto de corrosão depende apenas do estado atual.

A usina nuclear Angra I já ultrapassou a metade de sua vida útil, o que intensifica a necessidade de monitorar parâmetros que permitam alta eficácia na manutenção.

1.3 OBJETIVO

O objetivo da tese é propor uma modelagem não só com viés determinístico mas também estocástico que permita observar, em sistemas passivos (tubulações), a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão em tubulações através da equação diferencial estocástica de Itô, e também, observar tal evolução como um processo markoviano, contínuo no tempo e com espaço de estados também contínuo.

A modelagem proposta aqui é, se comparada a outras, mais simples, pois não necessita do conhecimento de um grande número de taxas de transição entre os vários estados de um processo markoviano com espaço de estados discretos. Basta conhecer apenas duas funções, $A(y)$ e $B(y)$, ou seja, os coeficientes de arraste e difusão que serão aplicados à Equação de Itô.

1.4 MOTIVAÇÃO, ORIGINALIDADE E RELEVÂNCIA

A motivação para este estudo é contribuir de maneira significativa para o processo de renovação de licença de operação de Angra I. Além do mais, as plantas nucleares poderão contar com uma modelagem precisa na determinação da profundidade de um ponto de corrosão de suas linhas de água de serviço e linhas de água do sistema de resfriamento, entre outras.

Outra motivação está em utilizar abordagens de análise probabilística de segurança em componentes passivos (tubulações).

A avaliação da integridade estrutural destas linhas é de suma importância para prever falhas que possam desencadear eventos indesejáveis que comprometam os níveis de segurança da planta.

A originalidade desta tese está em utilizar a equação diferencial estocástica de Itô para determinar a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão como um processo markoviano.

Esta abordagem é inédita, já que é a primeira vez que se propõe a equação diferencial estocástica de Itô como uma modelagem não apenas determinística, mas também estocástica para descrever a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão acelerado pelo escoamento de uma tubulação que sofre inspeções regulares.

CAMACHO (2010) utilizou a Equação de Fokker-Planck para determinar a densidade de probabilidade da evolução de um ponto de corrosão como um processo markoviano.

Infelizmente, exigências reguladoras sobre segurança e intervalos de inspeção de tubulações estão em falta quando comparadas a vasos de pressão onde a exigência do intervalo de inspeção está claramente documentada. O Instituto Americano de Petróleo (API) fornece uma diretriz sobre o intervalo de inspeção de três categorias de sistemas de tubulação baseados no conteúdo do fluido ou meia-vida restante (API, 2001). Todavia, esta é uma generalização insuficiente enquanto as condições atuais da tubulação não são consideradas e assim as possibilidades de falhas da tubulação não é geralmente quantificada.

A relevância deste trabalho é caracterizado por:

Relevância científica ao se modelar adequadamente a corrosão, parâmetro fundamental no estudo de envelhecimento de tubulações, como uma variável estocástica e obter equações que são resolvidas dentro da técnica do cálculo estocástico;

Ainda como relevância científica pode-se mencionar o fato de que o mesmo problema é resolvido analítica e numericamente permitindo uma comparação coerente entre os resultados obtidos;

Relevância técnica ao deixar como herança um programa de cálculo (Apêndice F) que permite a realização de simulações, envolvendo a corrosão de parede de tubulações sem que inspeções sucessivas e de altos custos financeiros sejam necessárias. Este programa de cálculo pode ser útil para a Eletronuclear (ETN), uma vez que este trabalho pode ser considerado como uma ferramenta de tomada de decisão no estudo de envelhecimento de componentes passivos (tubulações) no caso da extensão da vida útil qualificada da usina nuclear Angra I.

1.5 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O afinamento gradual da parede de uma tubulação pode causar vazamento ou, no pior cenário, a ruptura da tubulação. Uma vez que sistemas de tubulação transportam hidrocarbonetos ou outros fluidos de processo, a presença de pequeno vazamento ou ruptura nas linhas pode conduzir a uma situação perigosa. Por isso, para manter uma operação segura e contínua, a inspeção e manutenção adequada desses sistemas de tubulação é crucial (MOKHTAR et al, 2009).

A profundidade de um ponto de corrosão, num dado instante de tempo, pode assumir qualquer valor entre as extremidades da espessura da parede de uma tubulação.

Num instante de tempo imediatamente posterior, a nova profundidade deste ponto de corrosão pode assumir qualquer outro valor compreendido entre o valor atual da profundidade do ponto de corrosão e o fundo da parede da tubulação.

A natureza estocástica de pontos de corrosão tem sido reconhecida desde os anos 30 (AZIZ, 1956 e SHIBATA, 1996).

Assim, a profundidade do ponto de corrosão é um processo estocástico e, como o estado futuro depende apenas do estado atual, o processo estocástico é markoviano, contínuo no tempo e com espaço de estados também contínuo.

A equação diferencial estocástica de Itô, aplicada a tubulações, é capaz de propor, simultaneamente, um modelo estocástico, determinístico e markoviano da evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese é constituída de sete capítulos organizados da forma descrita a seguir.

O Capítulo 2 consiste de uma revisão da literatura onde se faz um resumo em ordem cronológica de vários artigos que se aproximam do tema abordado na tese, e que têm o intuito de ressaltar a originalidade do que está sendo feito.

O Capítulo 3 contém os principais mecanismos de envelhecimento das estruturas, equipamentos e componentes de um reator PWR.

O Capítulo 4 descreve resumidamente processos estocásticos, equações diferenciais estocásticas e particularmente a equação diferencial de Itô.

O Capítulo 5 descreve a construção do modelo a ser aplicado, contém uma aplicação do modelo proposto a um caso e apresenta os resultados e discussões.

A modelagem desta tese é comparada a outras modelagens de sistemas semelhantes no Capítulo 6.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalho futuros.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo levantar o estado da arte dos modelos de corrosão propostos para o estudo de tubulações no contexto de envelhecimento de plantas nucleares, mais especificamente os modelos de degradação por envelhecimento, além de identificar os estudos de aplicações da equação diferencial estocástica de Itô.

Processos estocásticos têm sido aplicados em várias áreas da ciência onde é reconhecida a natureza estocástica do fenômeno. Neste trabalho foram citadas as áreas da biologia, geologia, economia, sistemas mecânicos e de controle onde, especificamente, foi usada a equação diferencial estocástica de Itô. Tal equação também é proposta no desenvolvimento desta tese, dado o caráter estocástico da corrosão em tubulações.

Diversos estudos a respeito de envelhecimento de sistemas de tubulações têm sido desenvolvidos desde a década de 1980, uns com o objetivo de elaborar políticas ótimas de manutenção e outros com o objetivo de estender a vida útil das plantas, levando em consideração a tomada de decisão com informação do risco.

Como foi abordado no Capítulo 1, até setembro de 2013, segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), 176 dos 359 reatores em operação no mundo tinham mais de 30 anos de atividade. Estes reatores terão que ser substituídos por outros novos ou por outra fonte de geração. Parte da solução é ampliar a vida útil das usinas existentes, evidentemente que a extensão da vida deve atender a critérios muito rigorosos, principalmente com relação a questões de segurança, ambientais e econômicas. Segundo a World Nuclear Association (WNA) até 2030, 143 reatores devem ser fechados por término da vida útil qualificada (ELETRONUCLEAR, 2013).

Portanto, os materiais de uma central nuclear podem sofrer maior ou menor efeito da degradação por envelhecimento, o que torna essencial avaliar estes efeitos em suas estruturas, sistemas e componentes.

Em 1985, um extenso programa de pesquisa sobre o envelhecimento das plantas de potência nuclear nos Estados Unidos, o NPAR (*Nuclear Power Plant Aging Research*), foi implantado pela NRC para identificar e resolver problemas técnicos de segurança relacionados com o envelhecimento de sistemas, estruturas e componentes de usinas

nucleares em operação. Este programa desenvolveu aplicações reguladoras que incluem revisões e elaboração de guias de regulamentação e especificações técnicas, suporte para resolver problemas genéricos de segurança, desenvolvimento de códigos e normas, avaliação de técnicas de diagnóstico e apoio técnico para o desenvolvimento de regras de renovação da licença de operação (NUREG 1144, 1991).

É importante citar o TIRGALEX (*Technical Integration Review Group for Aging and Life Extension*) como a base de dados mais completa utilizada em análises de riscos associados a envelhecimento. Nesta base de dados, é avaliada a contribuição do envelhecimento do componente para o risco da planta, o conhecimento das práticas de manutenção de tais componentes e a eficácia destas práticas na gestão da indústria de envelhecimento. O objetivo do programa TIRGALEX foi estabelecer prioridades para a avaliação dos efeitos do envelhecimento em estruturas e componentes (NUREG/CR-5248, 1988).

Em relação ao bom gerenciamento do ciclo de vida de uma instalação industrial e tendo em vista uma possível extensão da sua vida de serviço, é necessário poder prever os efeitos do envelhecimento. Em geral, para cumprir este objetivo, devem-se analisar falhas potenciais que podem ocorrer e desta forma propor soluções para evitá-las ou reduzir a severidade dos seus efeitos (BOUZAIENE *et al*, 2003).

A seguir, é apresentada uma pesquisa bibliográfica dos trabalhos mais relevantes que mais se assemelham ao tema nos seguintes aspectos abordados na tese: envelhecimento, processo markoviano, componentes passivos, tubulações, corrosão, análise de degradação de componentes e modelos estocásticos.

SOONG (1973), descreve o processo de solução gerada pela equação de Itô como markoviano, para o qual existem técnicas poderosas para a obtenção de sua solução.

NUREG/CR-5612, BNL-NUREG-52252 (1991) descreve um abordagem para analisar a degradação de componentes e dados de falha para entender o processo de envelhecimento. A modelagem da degradação é a análise de informações sobre a degradação de componentes, a fim de desenvolver modelos de processos e suas implicações. Esta modelagem particular está focada na análise dos tempos de

degradação de componentes para modelar a mudança da taxa de degradação com o envelhecimento do componente. A metodologia também discute a eficácia da manutenção, bem como a sua aplicabilidade às avaliações de envelhecimento. As técnicas estatísticas aplicadas permitem que tendências de envelhecimento sejam efetivamente identificadas nos dados de degradação e de falha. Estes resultados são os primeiros passos na modelagem de degradação e mostram que a degradação pode ser modelada para identificar tendências de envelhecimento.

BLENMAN et al (1995) propuseram a aplicação do cálculo estocástico de Itô a problemas na economia e finanças, o que deu origem a várias publicações de modelagem. O modelo canônico de McShane e o cálculo estocástico alternativo resolvem estes problemas de forma satisfatória. A abordagem de McShane é aplicada principalmente em quatro áreas: estimação e testes de modelos estocásticos, modelo de Fischer da demanda para títulos indexados, precificação de opções e investimento ideal sob incerteza no nível de preço.

NUREG/CR-6415 (1996) apresenta duas aplicações para a análise da degradação na confiabilidade de componentes ativos. A primeira, analisa os tempos de ocorrência de degradação a fim observar tendências na taxa de degradação. A segunda aplicação aborda os modelos de Markov descritos em NUREG/CR-5967 (1994) para avaliar quantitativamente o impacto da manutenção sobre componentes indisponíveis.

YEH (1996) propôs uma abordagem que redundou numa proposta de inspeção ótima e política de substituição para um sistema semi-markoviano em deterioração. Usou uma aproximação em que este modelo de manutenção semi-markoviano pode ser aproximado em um modelo de manutenção markoviano tal que analiticamente a rastreabilidade do modelo markoviano pode ser preservada. Com base no modelo markoviano, algoritmos são providos para obter uma política ótima de inspeção e substituição dependente da idade e do estado em que o sistema se encontra, minimizando o custo esperado a longo prazo. Além disto, procedimentos são desenvolvidos para implantar a política ótima em sistemas semi-markovianos em deterioração.

SHIBATA (1996) observou que corrosão não pode ser explicada sem pontos de vista estatístico e estocástico, devido à grande dispersão de dados comuns no laboratório e no campo.

PHAM et al (1997) observaram que em alguns ambientes, os componentes nem sempre falham totalmente, mas podem degradar-se em vários estágios. Em tais casos, a eficiência do sistema pode diminuir e alcançar um limite inaceitável que pode ser considerado falha total do sistema. No entanto, o sistema pode falhar de forma aleatória em qualquer estado e ser reparado. Além disso, a ação de reparo pode não levar o sistema a um estado bom, mas poderá torná-lo operacional e a taxa de falha do sistema será a mesma que antes da falha. Neste estudo, é apresentado um modelo para prever a confiabilidade, disponibilidade, tempo médio de vida e tempo médio para a primeira falha de sistemas degradados de multi-estados degradados com reparo parcial.

PERELLÓ et al (2000) observaram que Black, Scholes e Merton propuseram um método de precificação de opções (instrumentos financeiros destinados a proteger investidores da aleatoriedade do mercado de ações) muito popular usando equações diferenciais estocásticas através da interpretação de Itô. Assim, obteve-se a equação de Black-Scholes para o preço da opção usando o cálculo de Stratonovich e um método de precificação de opções clássica baseado no cálculo Itô

ZHANG E LOVE (2000) supuseram que um sistema reparável (mecânico) está sujeito a falha, e para cada época de falha um reparo geral é realizado. Este reparo retorna o sistema a uma condição de trabalho entre tão bom quanto novo (reparo perfeito) e tão ruim quanto velho (reparo mínimo). Uma questão importante para tal sistema é que o tempo de inspeção maior deve ser conduzido para que a unidade retorne a um estado tão bom quanto novo. Duas políticas de manutenção foram investigadas para esta pesquisa. Tais políticas se baseiam na revisão em intervalos fixos e variáveis, conduzida após a primeira falha, e mostraram nesta pesquisa que ambas as políticas podem ser analisadas utilizando um simples modelo de Markov.

CHIANG e YUAN (2001) sugeriram uma política de manutenção dependente do estado $R_i; j(T; N; \alpha)$, onde i é o limite para reparo, j é o limite para substituição, T , período para inspeção, N , número de reparos e α a probabilidade de reparo de um estado para outro.

Esta política foi proposta para um modelo markoviano de multi-estados contínuos no tempo de um sistema sujeito à deterioração por envelhecimento ou falha súbita por choques fatais, considerando o estado 0 (estado novo) $1 < 2 < \dots < L$ (estado falho). Sob esta política $R_{i;j}(T;N;\alpha)$, o sistema é inspecionado no final de cada período de tempo T para identificar o estado atual e decidir se faz imediatamente ou não o reparo ou substituição de acordo como os resultados do modelo. Adicionalmente, a substituição é realizada sempre que L ocorre devido a choque fatal. Este modelo markoviano considera múltiplos estados degradados e serve para testar e determinar o i^* ótimo (limiar para reparo), j^* (limiar para substituição) e T^* (período de inspeção para identificar os estados correntes) tais que a taxa de custo esperada a longo prazo seja minimizada.

BLOCH-MERCIER (2001) considerou que sistemas reparáveis com graus diferentes de perfeição são possíveis para o reparo (ou manutenção corretiva), e que vão de um "mínimo" até um reparo completo. A questão é encontrar o grau ideal para a reparação de tal forma que a disponibilidade de longo prazo seja ótima. O sistema evolui no tempo de acordo com um processo de Markov com espaço de estados finito enquanto ele está sendo executado, considerando que a duração do reparo segue uma distribuição geral. Após o reparo, o sistema começa novamente no estado de funcionamento com uma determinada probabilidade. Observou sobre um exemplo em que a distribuição ideal de reinício (tal que o longo tempo de disponibilidade é ótimo) pode ser aleatória. A distribuição ideal de reinício é fornecida por duas estruturas clássicas de confiabilidade, isto é, para os sistemas de votação e os componentes redundantes em reserva.

BARATA et al (2002) modelaram sistemas degradados continuamente através de monitoramento por meio de simulação de Monte Carlo e incorporando resultados do modelo com condições de otimização de manutenção planejada que visa minimizar o custo total esperado do sistema para um dado tempo de missão. O modelo de simulação foi introduzido pela primeira vez considerando um simples componente não reparável sujeito à degradação estocástica. Num segundo momento, a modelagem é então generalizada para sistemas de multicomponentes reparáveis. Para encontrar os limites de degradação ótimo para a intervenção de manutenção, o procedimento de otimização de custo empregado é uma simples busca no espaço dos limites de manutenção.

VINOD et al (2003) desenvolveram uma inspeção de serviço baseada em Risco Informado no Sistema de Inspeção (RI-ISI) que visa priorizar os componentes para inspeção dentro de um nível de risco permitido, evitando assim inspeções desnecessárias. Os dois principais fatores que vão para a priorização dos componentes são a frequência de falha e a consequência da falha destes componentes. Este estudo foi focado em componentes de tubulações, onde a frequência de falha é altamente influenciada pelos mecanismos de degradação agindo sobre eles. Estas frequências são modificadas quando a manutenção/ISI (inspeção em serviço) é retomada. A fim de incorporar os mecanismos de efeito de degradação e de atividades de manutenção, modelos de Markov são sugeridos como um método eficiente para uma análise realista. A ênfase tem sido dada a mecanismos de erosão/corrosão, que são dominantes em reatores pressurizados a água pesada. Este artigo destaca um modelo analítico para estimar a taxa de corrosão e também para encontrar a probabilidade de falha de tubulação, o qual pode ser utilizado em RI-ISI.

MOUSTAFA et al (2004) mostraram um modelo de manutenção para um sistema degradado semi-markoviano de multi-estados. Este modelo permite que seja tomada uma de três possíveis decisões de manutenção (não fazer manutenção, fazer manutenção mínima ou fazer substituição) a respeito de um estado do sistema. Foi utilizado uma política de limite de controle e desenvolvido um algoritmo para encontrar uma política ótima de manutenção que minimizasse o longo prazo esperado da taxa de custo do sistema.

FLEMING (2004), como parte de um projeto de pesquisa patrocinado pelo EPRI (Electric Power Research Institute) para desenvolver tecnologia com base na informação do risco em avaliações de inspeção de serviço de sistemas, novos métodos e uma base de dados foram criados para prever a confiabilidade do sistema de tubulação. Os métodos incluem uma técnica de modelagem de Markov para prever a influência de estratégias de influências alternativas em sistemas de confiabilidade de tubulações e uma análise de incerteza de Bayes para quantificar incertezas nos parâmetros de confiabilidade do sistema de tubulação. Este artigo descreve estes métodos e dados de base associados necessários para a sua quantificação com particular ênfase na aplicação do modelo de confiabilidade de Markov para tubulações. Conhecimentos são desenvolvidos sobre as métricas de confiabilidades que devem ser

utilizadas na avaliação de risco para estimar frequências de acidentes de perda de refrigeração e eventos de inundação interna.

BRAVERMAN. *et al.*(2004) desenvolveram um programa de pesquisa para avaliar a degradação relacionada com a idade de estruturas e componentes passivos importantes para a operação segura de usinas nucleares (centrais nucleares). O objetivo da pesquisa foi desenvolver base técnica para a validação e aperfeiçoamento de métodos analíticos e critérios de aceitação que podem ser usados para a tomada de decisões com informação do risco e para tratar de questões técnicas relacionadas com a degradação de estruturas e componentes passivos. Foram realizadas análises de fragilização das estruturas não degradadas e degradadas e de componentes passivos. Estes resultados podem ser usados para avaliar o impacto potencial de degradação do risco global da planta.

CLAROTTI *et al.*(2004) pesquisaram a origem das falhas em um equipamento. Quando muitas falhas ocorrem em um determinado equipamento, torna-se útil identificar se estas falhas são atribuídas a erros de projeto ou ao fenômeno de envelhecimento. Se o envelhecimento for confirmado, o problema será identificar o momento em que o processo foi iniciado e que medida corretiva é mais adequada para retardar a ocorrência de falhas. Assim, esta medida torna possível estender a vida útil do equipamento. O método apresentado pelos autores é baseado na hipótese simples de um modelo de passo de envelhecimento e em técnicas bayesianas. De acordo com os autores, a principal vantagem do método proposto é a determinação do momento em que começa o envelhecimento, a evolução na taxa de falha do componente no seu estado inicial e depois de modificada, a probabilidade de sucesso da medida corretiva. Para este método, foi desenvolvido pelos autores o software IBTV (*‘Inférence Bayésienne pour le Traitement du Vieillissement’* — Inferência bayesiana para o tratamento do envelhecimento) para implantar esta metodologia.

BRAVERMAN *et al* (2005) estudaram os efeitos da degradação relacionada com o envelhecimento de tubulações enterradas em centrais nucleares. A pesquisa foi realizada com o objetivo de desenvolver métodos de análise e critérios de aceitação de degradação que possam ser utilizados para avaliar o estado de degradação de tubulações enterradas. A pesquisa incidiu sobre uma abordagem com informação do risco para avaliar os efeitos mais comuns de envelhecimento em tubulações enterradas consistindo

de um afinamento geral das paredes da tubulação, bem como perdas localizadas de material/pontos de corrosão. Os efeitos da degradação ao longo do tempo foram incluídos na metodologia desenvolvida para avaliar a tubulação enterrada.

No NUREG/CR-6920 (2006), os resultados da análise estrutural são integrados para obter uma perspectiva com informação do risco sobre a degradação da contenção. Os modelos de risco requerem uma descrição probabilística da capacidade da contenção em resistir a de diferentes modos de falha. Uma amostragem de dados é usada para desenvolver conjuntos de entrada para modelos de elementos finitos, em condições originais e em condições degradadas. Descrições probabilísticas sobre a capacidade de contenção são obtidas a partir dos resultados dos modelos de análise estrutural e utilizados como dados de entrada no modelo de risco. Através desta abordagem, o risco e a variação no risco associado com a degradação podem ser estimados.

MYÖTYRI *et al.* (2006) abordaram uma modelagem de filtragem estocástica para prever o tempo de vida restante de um componente com base em informações sobre o processo de degradação estocástica e medidas de condições de incertezas no monitoramento. O modelo é ilustrado através de um estudo de caso em que a degradação é assumida para o crescimento de trinca como sendo um processo simplificado de fadiga. O modelo contabiliza incertezas tanto nos processos de degradação quanto nas condições de medição. Se fornecidas informações sobre custos de monitoramento, de falha e de substituição, tal modelo deveria ser usado para otimizar ambas as condições de intervalo de monitoramento e tempo para substituição do componente.

PERES *et al.* (2007) apresentam uma metodologia para antecipar falhas em um componente até o final de seu ciclo de vida. Muitas vezes, os dados de retroalimentação não são suficientes e faz-se necessário utilizar pareceres de peritos. O objetivo da metodologia é antecipar os mecanismos de degradação responsáveis pelo envelhecimento e avaliar sua relevância e incertezas relacionadas. Esta é uma informação necessária para a análise de risco relacionada com o funcionamento de um componente até o final do seu ciclo de vida. Finalmente, a metodologia foi desenvolvida no contexto específico da indústria nuclear mas pode ser aplicada a outras indústrias como a aeroespacial e química.

BURGAZZI (2007) analisa o estado da arte em confiabilidade de sistemas passivos devido a sua ampla utilização em centrais nucleares. A inclusão de modos de falha e a estimativa de confiabilidade para sistemas passivos são previstos em Análise Probabilísticas de Segurança (PSA). Apresenta conclusões resultantes da pesquisa sobre questões técnicas relacionadas com avaliação de confiabilidade de sistemas passivos no contexto da segurança nuclear, práticas reguladoras e análises probabilísticas de segurança.

LISNIANSKI (2007) aborda um sistema reparável com múltiplos estados como uma extensão do método clássico de confiabilidade de diagrama de blocos. Este modelo é muito adequado para aplicações de engenharia, uma vez que o procedimento seja bem formalizado e baseado na decomposição natural de todo sistema multi-estado (o sistema é apresentado com uma coleção de seus elementos). O método clássico de diagrama de blocos não possibilita a avaliação de confiabilidade para sistemas reparáveis com muitos estados. O método sugerido tem base nos processos aleatórios combinados e na técnica de função geradora universal que reduz drasticamente o número de estados no modelo de múltiplos estados.

TORRES e RUIZ (2007) propuseram o desenvolvimento de ferramentas matemáticas para avaliar a confiabilidade estrutural, em um intervalo de tempo, levando em consideração a redução em sua capacidade devido ao envelhecimento. Dois indicadores alternativos são considerados: (1) o número esperado de falhas sobre um intervalo de tempo levando em conta as incertezas aleatórias e epistemológicas e (2) o fator e nível de confiança em função do tempo. Ambos os indicadores são estendidos (com base na abordagem proposta por Cornell e colaboradores) para estimar a confiabilidade de uma estrutura sobre um intervalo de tempo. Esta análise de confiabilidade leva em conta eventos de diferentes intensidades (todos eventos possíveis no local) através de curvas de risco ambiental. Foi assumido que a capacidade estrutural diminui linearmente com o tempo.

VALOR *et al* (2007) desenvolveram e validaram um novo modelo estatístico capaz de simular a corrosão por pites. A corrosão por pite é modelada pela combinação de dois processos estocásticos: um para o surgimento do pite de corrosão e outro para o seu

crescimento. O surgimento do pite de corrosão é modelado como um processo de Poisson não-homogêneo no qual o tempo de indução para o surgimento do pite é simulado como um processo de Weibull. Desta forma, as distribuições exponencial e de Weibull podem ser consideradas como possíveis distribuições para o surgimento do pite. O crescimento do ponto de corrosão, por outro lado, é modelado através de um processo de Markov não-homogêneo.

DO VAN *et al* (2008) propuseram um estudo de confiabilidade para a análise de sensibilidade de sistemas dinâmicos incluindo componentes interligados e dependência de falhas (carga compartilhada, recursos compartilhados, etc) no estado estacionário, descritos por modelos de Markov ou, de modo mais geral, por modelos de sistemas dinâmicos de eventos discretos. Neste trabalho, um método de perturbação é usado para estimar um fator de importância, chamado de mensuração de sensibilidade multidirecional (MDMS) no âmbito de um sistema markoviano. Este método oferece uma promissora ferramenta para a análise de sensibilidade no estado estacionário de processos de Markov em estudos de confiabilidade.

TAN e RAGHAVAN (2008) desenvolveram um quadro simples e prático para a manutenção preditiva (PdM) baseado em programação de sistemas de múltiplos estados (MSS). As manutenções programadas são derivadas a partir de perspectivas do sistema usando os tempos de falha para estimar o seu desempenho a partir de tendências de degradação. Observou-se que uma ligeira melhoria na qualidade da manutenção pode adiar o tempo do sistema de substituição do componente. A consistência na qualidade do trabalho de manutenção com variância mínima também é identificado como um fator muito importante e que aumenta a previsão de eventos operacionais futuros e o tempo de inatividade do sistema. Este estudo revela ainda que, para reduzir a frequência das operações de manutenção, é necessário diminuir ao mínimo a demanda de uso do sistema e assegura que, ao mesmo tempo, o sistema ainda realiza as suas funções com eficiência.

CHIQUET *et al* (2008) apresentaram um quadro geral para modelar a dinâmica de processos em degradação através de sistemas estocásticos dinâmicos pelo processo markoviano. Este modelo foi proposto para o problema do crescimento de trincas por fadiga. A estimativa para os parâmetros do modelo foi feita com um conjunto de dados

reais de crescimento de trinca. Desta forma, foi possível simular alguns caminhos de crescimento de trincas que são usados para análise de confiabilidade através de técnicas de Monte Carlo.

BARKER e NEWBY (2009) determinaram estratégias de inspeção e manutenção de um sistema cujo estado é descrito por um processo estocástico multivariado. O objetivo do trabalho é obter uma ótima relação custo-inspeção e de políticas de manutenção para um complexo sistema de multicomponentes, cujo estado de degradação é modelado com a utilização de um processo de Markov. O modelo específico utilizado é baseado na suposição de que o processo subjacente é um processo de Wiener de multivariáveis. O estado do sistema é um processo estocástico multivariável, decisões são baseadas em uma medida de desempenho definidas pelas variáveis funcionais do processo, e a decisão de substituição baseia-se na extrapolação dos níveis considerados críticos. Os níveis críticos são definidos pela medida de desempenho do sistema e também da probabilidade dele não retornar a um nível satisfatório de desempenho. Os tempos de inspeção são determinados por uma função determinística do estado do sistema. A política de inspeção não-periódica é desenvolvida e avaliada pela expectativa do custo de vida útil, é uma política ideal, uma escolha ideal da função de inspeção. O modelo desta maneira dá um nível garantido de confiabilidade ao longo da vida do projeto.

CALEYO *et al* (2009) utilizaram processos de Markov não-homogêneos, contínuos no tempo e com crescimento linear para modelar pontos de corrosão externa de tubulações subterrâneas. As soluções das equações de Kolmogorov para o processo de Markov são utilizadas para descrever as probabilidades de transição entre profundidades do ponto de corrosão. A identificação da função probabilidade de transição pode ser alcançada pela correlação entre a média estocástica da profundidade de corrosão com a média determinística obtida experimentalmente. Simulações de Monte Carlo foram usadas para prever a evolução no tempo do valor médio da distribuição da profundidade do ponto de corrosão nas diferentes classes de textura do solo. A distribuição simulada foi usada para criar um modelo estocástico empírico baseado em cadeia de Markov para prever a evolução da profundidade do ponto de corrosão e a distribuição das taxas a partir das propriedades do solo.

VALOR *et al* (2009) melhoraram um modelo estocástico anteriormente desenvolvido pelos autores usando cadeia de Markov, à luz das novas evidências experimentais. O novo modelo tem sido aplicado com sucesso para reproduzir a evolução temporal das profundidades extremas de corrosão em aço de baixo carbono. O modelo fornece uma melhor compreensão do processo físico de corrosão.

ACIKGOZ e DIWEKAR (2010) criaram uma metodologia com o objetivo de alcançar um melhor controle de glicose no sangue através da incorporação de incertezas dependentes do tempo nos parâmetros dos pacientes diabéticos em formulações de controle ótimo utilizadas na literatura de finanças. As incertezas dependentes do tempo são representadas por processos estocásticos chamados processos de Itô e por uma formulação matemática inerente a este estudo. A utilidade dessa abordagem é mostrada usando dados experimentais de um paciente diabético e um cálculo do controle ótimo do perfil estocástico e determinístico. O perfil estocástico apresentou poucas variações nos níveis de glicose no sangue a partir da referência de 4,5 mMol/L se comparado com o perfil determinístico em presença de incertezas paramétricas. Este método possui a promessa de reduzir as grandes oscilações de glicose no sangue observadas em pacientes diabéticos e prevenir possíveis complicações da diabetes.

SORO *et al* (2010) desenvolveram um modelo para avaliar a disponibilidade, taxa de produção e a função confiabilidade de sistemas multi-estados degradados submetidos a reparo mínimo e manutenção preventiva imperfeita. É considerado que o sistema pode se degradar com o uso e que estas degradações podem diminuir a eficiência do sistema. O sistema pode se degradar dentro de diversos estados discretos, que são caracterizados por diferentes taxa de desempenho, que vão desde um funcionamento perfeito até uma falha completa. Observa-se que o nível de degradação atinge um limiar crítico tal que a eficiência pode diminuir até um limite inaceitável. Além disso, o sistema pode falhar de forma aleatória a partir de algum estado operacional ou aceitável e pode ser reparado. Esta ação de reparação leva o sistema ao seu estado operacional anterior sem afetar sua taxa de falha (ou seja, reparação mínima). A política de manutenção preventiva sugere que se o sistema atingir o último estado de degradação aceitável, ele pode ser trazido de volta para um estado com alta eficiência. Considerando a demanda do cliente como constante, o sistema é modelado como um processo de Markov de tempo contínuo para avaliar suas medidas de desempenho instantâneas e estacionárias.

BENEVIDES e DIWEKAR (2012) realizaram o controle ótimo para a produção de biodiesel em um reator de batelada quando a incerteza na composição de alimentação é considerável. Na produção de biodiesel, há incertezas inerentes que surgem devido à variação na composição inicial, nos parâmetros de operação e no projeto de equipamento mecânico que pode ter um impacto significativo sobre a quantidade, qualidade e processo de economia do produto. Uma das mais influentes incertezas neste processo é a composição de alimentação, uma vez que a percentagem e o tipo de triglicerídeo na composição do biodiesel variam consideravelmente. Sob o controle de temperatura do reator foi aplicado um método numérico chamado método hamiltoniano para resolver o problema de controle ótimo estocástico envolvendo a aplicação de processos de Itô. Verificou-se, também, que o perfil de temperatura obtido usando um controle ótimo determinístico é robusto em face à incerteza na composição de alimentação.

TELESCA e CZECHOWSKI (2012) observaram que sinais geoeletricos podem ser considerados como o produto final de interações complexas e coletivas entre elementos de um sistema. O comportamento dinâmico destes sinais poderia ser diferente se eles fossem medidos em áreas sísmicas ou assísmicas. Foi usada, então, a equação de Itô que representa um bom modelo macroscópico de fenômenos no qual interações microscópicas são em média adequadas. Mostra-se que os dados geoeletricos registrados em áreas sísmicas são bem distintos daqueles medidos em áreas assísmicas. Estes resultados contribuem para uma melhor caracterização dinâmica de sinais geoeletricos.

TAN e LE (2013) Propuseram uma estratégia que combina inspeção e monitoração contínua para reduzir inspeções e melhorar a confiabilidade do sistema. Um sistema operando sofre degradação. Cada nível de degradação pode ser representado por um estado, tornando o sistema multi-estado. Em muitas situações, não há evidências aparentes indicando o estado do sistema e o nível de degradação só pode ser conhecido através de inspeções. Através do monitoramento de condições, o estado do sistema pode ser estimado com alguma incerteza. Neste artigo, foi investigado um esquema de inspeção de manutenção para este tipo de sistema. As hipóteses são que a manutenção é imperfeita e a degradação é um processo de Markov contínuo no tempo. A estratégia de

manutenção ótima é obtida por um algoritmo iterativo que minimiza a taxa de custo médio de longo prazo.

XUDONG e WEIGIU (2014) desenvolveram um novo método de média estocástica para prever a resposta de sistemas impacto-vibratórios de perturbações aleatórias. O movimento dos sistemas sem amortecimento e perturbação aleatória é dividido em movimento periódico sem impacto e movimento quase periódico com impacto de acordo com o nível de energia do sistema. A perda de energia durante cada impacto é encontrada por estar relacionada com o fator de restituição e o nível de energia antes do impacto. Sob a hipótese de amortecimento leve e perturbação aleatória fraca, a energia do sistema é um processo que varia lentamente e uma equação diferencial estocástica de Itô para sistema de energia pode ser deduzida.

Um estudo detalhado da corrosão é bastante complexo tendo em vista o grande número de variáveis que podem estar envolvidas na interação entre o metal e ambiente que o cerca como, por exemplo, sua composição e microestrutura e ainda a composição e temperatura do ambiente em que está imerso (FRANKEL, 1998).

Muitos autores têm se dedicado ao estudo dos mecanismos físico-químicos fundamentais ao desenvolvimento da corrosão. Estes estudos são baseados na termodinâmica e na cinética de corrosão (FRANKEL, 1998).

Na pesquisa bibliográfica realizada nesta tese, não foi encontrado nenhum estudo que proponha a equação de Itô para a determinação da evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão em uma tubulação.

Desta forma, ressalta-se como um dos pontos de originalidade deste trabalho a utilização da equação de Itô no estudo da corrosão como uma variável estocástica.

CAPÍTULO 3 ESTUDO DO ENVELHECIMENTO

3.1 GERAL

Na análise de extensão de vida de reatores nucleares, é fundamental o entendimento dos mecanismos de envelhecimento que afetam seus materiais e componentes. Tal envelhecimento é efeito não só das características gerais dos materiais como também de suas características relativas ao comportamento quando submetidos à radiação.

Envelhecimento, em geral, é definido como sendo a degradação de sistemas, estruturas e componentes de uma central nuclear, de natureza cumulativa e dependente do tempo, que quando não minorada pode comprometer sua segurança, seu desempenho ou mesmo reduzir a sua vida útil estabelecida em projeto (NRC, 1990).

Todos os materiais em uma central nuclear podem sofrer maior ou menor degradação por envelhecimento, o que pode levar a degradações funcionais dos componentes da usina.

As experiências adquiridas com a operação das usinas nucleares mostram que as rupturas observadas em vários componentes ocorreram devido aos processos de degradação, assim como corrosão geral e localizada, erosão, erosão-corrosão, fragilização induzida pela radiação e pelo calor, fadiga, fluência e desgaste com o regime de funcionamento. A tendência a rupturas e problemas resultantes do envelhecimento, devido aos processos supracitados, pode aumentar nas centrais nucleares de primeira geração, em decorrência da aproximação do final de sua vida nominal de projeto. Sabe-se que tais rupturas provocadas pelo envelhecimento prejudicam um ou mais dos múltiplos níveis de proteção de sistemas, estruturas e componentes da usina nuclear, baseados no conceito de defesa em profundidade.

3.2 MECANISMOS DE ENVELHECIMENTO

Os mecanismos de envelhecimento são processos específicos responsáveis pela alteração gradual das características de um componente com o tempo e o uso.

As degradações decorrentes do envelhecimento são aquelas alterações das propriedades dos materiais, de natureza cumulativa, que atuam no sentido de reduzir a capacidade de um componente funcionar segundo os critérios de aceitação.

As condições de serviço, às quais os componentes do reator estão submetidos, fora dos limites prescritos causados por erros de projeto, fabricação, instalação, operação e de manutenção, podem aumentar a velocidade de degradação de componentes da usina.

A avaliação dos mecanismos de envelhecimento e das condições de operação do reator, de um modo geral, baseia-se na experiência de serviço de PWRs e de outros tipos de reatores, bem como em dados de laboratório pertinentes e na experiência acumulada de indústrias.

Os processos para a avaliação dos mecanismos de degradação, relevantes para o desempenho de componentes indispensáveis à segurança da usina nuclear, levam a uma das duas possíveis conclusões seguintes (IAEA, 2007):

- a degradação por envelhecimento é potencialmente significativa para o grau (específico) de avaliação e monitoramento da usina; ou
- a degradação por envelhecimento não é significativa, já que não reduz a capacidade do componente de continuar a desempenhar sua função com segurança.

Os principais mecanismos de envelhecimento avaliados são descritos a seguir (IAEA, 2007):

3.2.1 FRAGILIZAÇÃO

Após anos de bombardeio do núcleo do reator, o aço do vaso de pressão do reator (VPR) pode gradualmente perder parte de sua tenacidade em um processo chamado de fragilização. A fragilização provocada por nêutrons é intensificada quando o aço ou material de soldagem contém traços de cobre ou níquel. A ameaça de choque térmico sob pressão constitui-se no maior problema do VPR fragilizado podendo levá-lo à trinca. O choque térmico pode ocorrer durante certos eventos anormais na planta, como por exemplo, quando água fria é introduzida no vaso de pressão sob alta pressão após

um acidente por perda de refrigerante, mais conhecido como LOCA (do inglês *Loss of Coolant Accident*).

Existem dois tipos de fragilização que poderiam afetar componentes de reatores nucleares: fragilização devido à irradiação, que pode afetar os componentes internos na região do núcleo, e a fragilização térmica, capaz de afetar componentes fabricados em aço inoxidável fundido e em aço inoxidável martensítico.

A fragilização, em decorrência da radiação ou quanto aos efeitos térmicos, não se constitui em uma causa direta da ocorrência de trincas nos materiais de componentes do reator. Entretanto, há redução do limite de segurança em relação à resistência de propagação de trincas decorrentes de outras causas, tais como, fabricação, fadiga ou corrosão sob tensão fraturante. O significado da fragilização para um dado componente depende da probabilidade de aparecimento de trincas e da carga à qual o componente está submetido. Uma avaliação da fratura mecânica de um material, exposto a uma alta taxa de fluência neutrônica, deve ser realizada para garantir a estabilidade à trinca de um componente de acordo com dados específicos.

- Fragilização provocada pela irradiação

A fragilização ocorre quando nêutrons produzem átomos de retrocesso (de energia primária) que deslocam grande número de átomos de suas posições na rede cristalina devido a uma cadeia de colisões atômicas. O número de nêutrons que bombardeiam um dado local é tradicionalmente medido pela fluência (nêutrons/cm², com energia $E > 1,0$ MeV). A medida mais recente dos danos causados pela exposição a nêutrons é conhecida como deslocamentos por átomo (dpa) e é verificada em um espectro de energia de nêutrons mais completo do que o obtido pela fluência. A fluência ou o número de deslocamentos por átomo fornece parte da informação necessária para avaliar a fragilização causada pela irradiação.

O aço austenítico forjado, de grande utilização em PWR, não exhibe a nítida transição dúctil-frágil, comportamento característico dos aços comuns ao carbono (aços-carbono) e de baixa liga. Preferivelmente, as perdas de tenacidade devido à irradiação tendem a

acumular com o aumento da fluência e a saturação ocorre em níveis superiores a $1,0 \times 10^{21}$ n/cm².

Até recentemente, havia pouca informação disponível para quantificar os efeitos da fragilização provocada por irradiação sobre VPR. Novas informações descrevem os resultados de um estudo realizado sobre a resistência à ruptura de material irradiado interno de um reator BWR (aço inoxidável Tipo 304) com faixa de fluência de 1×10^{21} a 6×10^{21} n/cm², $E > 1$ MeV.

A avaliação dos resultados de estudos de fraturas em aços inoxidáveis (do tipo 304, 316 CW e 347) foi feita em componentes internos de vaso de pressão de PWR irradiados, os quais se submeteram a uma fluência tão alta como $2,0 \times 10^{22}$ n/cm² (a energias $E > 0,1$ MeV). Essa avaliação mostrou altos valores de resistência à fratura para todos os valores de fluência considerados (IAEA, 2007).

Ensaio mostram que a resistência à propagação de trincas em materiais internos decresce com o aumento da fluência neutrônica; assim a integridade do aço inoxidável de componentes internos do vaso de pressão pode ser efetivamente avaliada através da mecânica da fratura, necessitando de uma análise detalhada de elementos finitos e uma base de dados para fornecer as taxas de crescimento de trincas e a tenacidade à fratura para os materiais de interesse.

- Defeitos provocados pela Radiação encontrados em materiais de reatores PWR

Apesar das doses acumuladas serem geralmente baixas, bem inferiores a 1 dpa, as alterações das propriedades mecânicas podem ser grandes. A fragilização manifesta-se quando há grandes elevações na temperatura de transição dúctil-frágil. Suas causas, de natureza microscópica, baseiam-se nos obstáculos ao movimento de discordâncias, formação de centros de endurecimento, alterações na composição química e na estrutura em regiões interfaciais. A formação de centros de endurecimento pode incluir aglomerados de defeitos pontuais, interações defeitos-impurezas e precipitados ricos em cobre, por exemplo.

Apesar do fato desta coleção de efeitos apresentar características diversas e complexas, sua formação depende de uma base comum – da produção de lacunas e auto-interstícios resultantes da irradiação com partículas. Esses centros de endurecimento, principais imperfeições na rede cristalina, podem ser gerados diretamente em cascata, na forma de ciclos de discordâncias ou aglomerados tridimensionais de tamanhos da ordem de nanômetros. Eles podem ser também criados pela agregação gradual de defeitos.

Por sua vez, a geração do defeito pontual pode ser decorrente de um número de distintos mecanismos, tais como: deslocamento causado por nêutrons rápidos em reações elásticas ou inelásticas; reações (n, γ) produzindo núcleos de recuo, reações com emissão de partículas carregadas, assim como (n, α) ou (n, p) , onde tanto as partículas emitidas quanto os núcleos de recuo podem causar deslocamentos; interações iniciadas por raios γ de altas energias, liberadas nas reações de fissão ou em reações (n, γ) .

Dos mecanismos citados, os nêutrons rápidos são considerados como a maior fonte de efeitos da radiação em componentes de reatores nucleares. Entretanto, na prática, outras reações podem contribuir para o deslocamento de átomos, que são descritas sucintamente abaixo.

- Reações (n, γ)

As reações de nêutrons térmicos com núcleos de recuo, na quais raios gama são emitidos, podem causar deslocamentos de átomos na rede cristalina do material. Este tipo de reação é importante em espectros de nêutrons altamente termalizados. Para energias próximas a 1 MeV, a seção de choque é de cerca de 10^3 barns. Este é o valor de seção de choque ótimo para reatores rápidos ou para a porção rápida do espectro no espectro misto de reatores.

- Reações (n, α)

Uma reação envolvendo partículas carregadas de fundamental importância, em aços utilizados na construção de vasos de pressão, é a reação $^{10}\text{B} (n,\alpha) \rightarrow ^7\text{Li}$. O boro ocorre como uma impureza em aços ou é incluído na composição de materiais estruturais a fim de promover o estudo dos efeitos introduzidos pelo hélio na microestrutura e nas propriedades desses materiais.

A reação acima pode ser escrita, de forma completa, como:



- Reações fotonucleares ou fotoeletrônicas

Os vasos de reatores nucleares podem sofrer danos devido ao deslocamento de átomos de seus materiais estruturais em decorrência da irradiação com raios γ , originados na fissão do combustível nuclear, na interação de nêutrons rápidos ou lentos com materiais do núcleo do reator ou mesmo com materiais estruturais da periferia do núcleo. As principais causas de deslocamentos de átomos da rede cristalina do material são, então, a transferência da energia gama para elétrons e a interação de núcleos atômicos com os raios gama. (MANSUR e FARRELL, 1996).

As reações de elétrons com raios γ mais importantes são o espalhamento Compton, produção de pares e efeito fotoelétrico. No efeito Compton, o fóton é espalhado por um elétron de baixa energia de ligação, que recebe somente parte de sua energia, continuando a existir dentro do material em outra direção. Como a transferência de energia depende da direção do elétron emergente, sendo esta aleatória, de um fóton de energia fixa podem resultar elétrons com energia variável (valores de zero até um valor máximo). Quando a energia de ligação dos elétrons orbitais se torna desprezível em comparação com a energia do fóton incidente, a probabilidade de ocorrência de espalhamento Compton aumenta de maneira considerável.

Na produção de pares ocorre a absorção da radiação eletromagnética de alta energia e a produção de pares elétrons-pósitrons. Este efeito ocorre quando fótons de energia

superior a 1,022 MeV passam perto de núcleos de número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear, ocorrendo assim, o desaparecimento do fóton e simultaneamente a formação do par elétron-pósitron ($2mc^2 = 1,022$) por meio da reação: $\gamma \rightarrow e^- + e^+ + \text{energia cinética}$.

As duas partículas transferem suas energias cinéticas para o meio material, sendo que o pósitron volta a se combinar com um elétron do meio e dá origem a dois fótons, cada um com energia de 0,511 MeV (SALATI e et al, 2001).

As reações fotonucleares que potencialmente podem produzir danos por deslocamento são, por exemplo, as reações (γ, n) proporcionando aumento dos nêutrons mais energéticos e de átomos de recuo. Em materiais fissionáveis, as reações de fissão fotoelétricas induzidas por raios- γ liberam grandes quantidades de energia, que ficam disponíveis para gerar deslocamentos de átomos da rede cristalina (MANSUR e FARRELL, 1996).

Intensa radiação, ou irradiação, e altas temperaturas podem alterar as propriedades nucleares, físicas, térmicas, químicas e mecânicas dos materiais, principalmente dos materiais nucleares fabricados e operados por um longo período no núcleo do reator. As mudanças ou alterações destas propriedades com o tempo de operação podem ser drásticas e têm que ser consideradas no projeto do reator e dos equipamentos associados.

Os tipos de radiação que afetam os componentes e estruturas de reatores nucleares são: α , β , raios γ , fragmentos de fissão, nêutrons (principalmente), e possivelmente prótons. Os efeitos da radiação nuclear de sólidos cristalinos variam com o tipo de estrutura cristalina e natureza da radiação. Ionização e excitação eletrônica, por exemplo, produzidas por partículas β e raios γ , causam pequenas alterações de natureza permanente, em metais. Partículas mais densas tais como nêutrons, prótons, partículas α e fragmentos de fissão, podem produzir alterações significativas nas propriedades dos metais. Ensaios cristalográficos mostram que essas partículas geram imperfeições ou defeitos no arranjo dos átomos da rede cristalina dos sólidos, tanto em metais quanto em materiais não-metálicos.

- Classificação das imperfeições ou defeitos em cristais

Com o desenvolvimento da técnica de difração de raio X em cristais e a consequente elucidação das estruturas de vários sólidos, as propriedades dos sólidos tem sido entendidas. Um cristal perfeito ou ideal pode ser definido como sendo aquele em que o arranjo de sua rede cristalina não apresenta defeitos em qualquer de suas direções. Em outras palavras, um cristal perfeito é constituído de um arranjo periodicamente ordenado de átomos cuja arrumação satisfaz a condição de um agrupamento espacial da teoria ou da cristalografia geométrica.

As imperfeições ou defeitos têm sido frequentemente utilizados para caracterizar algum desvio do arranjo ordenado de átomos em sólidos cristalinos, nos casos de trabalho mecânico (a frio ou pelo encruamento, isto é, endurecimento por deformação a frio) e de radiação (ou irradiação) devido a partículas pesadas. Se o desvio de um arranjo ordenado é localizado na vizinhança de somente uns poucos átomos, ele é chamado defeito ou imperfeição pontual.

As soluções sólidas de metais constituem-se em exemplos típicos defeitos pontuais. Esses defeitos (CALLISTER, 1997) classificam-se em:

- **Defeito de lacuna:** trata-se do defeito pontual que envolve a falta de um átomo dentro da rede cristalina do metal. Tais defeitos podem ser resultantes de um empacotamento imperfeito durante a cristalização original ou podem se originar das vibrações térmicas dos átomos em temperatura elevada, pois, conforme a energia térmica se eleva, aumenta também a probabilidade dos átomos individuais se afastarem de suas posições de menor energia;

- **Defeito Frenkel:** quando átomos são deslocados de suas posições no retículo para interstícios e assim criam lacunas.

- **Defeito Schottky:** quando átomos estão ausentes de suas posições regulares.

- **Defeitos intersticiais:** onde átomos extras estão aprisionados dentro de cristais em pontos intermediários entre as posições normais da rede. O defeito intersticial em metais

puros é decorrente do bombardeamento com partículas nucleares de alta energia (dano por radiação), podendo dificilmente ocorrer como resultado da ativação térmica.

Todavia, se o desvio se estende por regiões microscópicas do cristal, ele é denominado imperfeição da rede, em decorrência de produzir descontinuidade na rede cristalina do sólido. Os cristais podem apresentar dois tipos de imperfeições da rede (VAN VLACK, 1977):

- **Os defeitos de linha – discordâncias:** que se propagam no cristal como linhas ou sob a forma de uma rede bidimensional. Há duas classes de defeitos de linha relacionados com as discordâncias:

- discordância em aresta ou de Taylor-Orowan: a linha de discordância parece representar a aresta de um plano de átomos que são inseridos, em parte, dentro do metal.
- discordância em espiral, helicoidal ou de Burgers: na qual um conjunto de átomos acima de um plano cristalográfico normal aparece na forma helicoidal, como em um parafuso. A discordância em hélice consiste habitualmente de uma linha de átomos, cada qual apresentando um número fixo de átomos coordenados. A coordenação é, entretanto, distorcida devido ao movimento de discordâncias. A direção e a magnitude de uma são representadas pelo vetor de Burger, que é normal ao plano distorcido do cristal. A origem da discordância helicoidal é claramente examinada em uma visão tridimensional do cristal.

O defeito de plano ocorre quando defeitos de linha aglomeram-se em um plano. Dentre os defeitos de plano, os mais importantes são:

- **Defeito de fronteira:** as imperfeições cristalinas podem se estender em duas dimensões como em uma fronteira. A fronteira mais indicada para ocorrência de defeitos é a externa. Os átomos da superfície não estão ligados ao número máximo de vizinhos mais próximos, e estão, portanto, em um estado de maior energia do que os átomos mais internos. As ligações desses átomos da superfície que não estão completadas dão origem a uma energia de superfície. Para reduzi-la, os materiais tendem a minimizar, se for possível, a área total da superfície.

- **Contornos de grãos:** embora um material, como o cobre de um condutor elétrico, contenha apenas uma fase, ele é constituído de muitos cristais com varias orientações. Esses cristais individuais são denominados grãos. A forma do grão em um sólido é normalmente controlada pela presença dos grãos circunvizinhos. No interior de cada grão, todos os átomos estão arranjados segundo um mesmo modelo e uma única orientação. Entretanto, no contorno de grão entre dois grãos adjacentes existe uma zona de transição, a qual não está alinhada com nenhum dos grãos. Podemos considerar o contorno de grão como bidimensional, embora, na realidade, tenha uma espessura finita de 2 a 10 ou mais distâncias atômicas. A diferença na orientação dos grãos adjacentes produz um empacotamento menos eficiente dos átomos ao longo do contorno. Dessa forma, os átomos ao longo do contorno têm uma energia mais elevada do que aqueles do interior dos grãos. Isto justifica o ataque corrosivo mais rápido dos contornos de grãos dos materiais, como ocorre com os materiais do reator nuclear, expostos a agentes corrosivos do meio operacional.

- **Falha ou defeito de sequência de empilhamento:** neste defeito de plano, a fronteira entre as duas partes de um empacotamento sofre empilhamentos alternados. A maioria dos materiais utilizados em reatores nucleares consiste de vários cristais de conexão ou grãos, de tamanhos reduzidos e orientações randômicas. A fronteira entre grãos adjacentes deve ser compatível com as estruturas e orientações de todos os grãos envolvidos na borda comum, ou fronteira do grão, mas as fronteiras dos grãos podem estar distorcidas, ocasionando defeitos de empilhamento.

As discordâncias de linha e os defeitos helicoidais foram introduzidos para explicar os fenômenos de deformação plástica, crescimento do cristal, resistividade elétrica, e propriedades físicas de sólidos metálicos. A discordância pode também ser descrita por meio de um circuito fechado, ou circuito de Burger, envolvendo a discordância. O plano distorcido que contém a discordância é conhecido como plano de deslizamento. Uma discordância em aresta está livre para mover-se em seu plano de deslizamento, devido à coordenação dos átomos na discordância em aresta ser diferente da coordenação de outros conjuntos de átomos paralelos do mesmo cristal. Uma discordância em hélice, entretanto, pode mover-se em qualquer plano paralelo ao seu, em consequência desse movimento ser possível ao logo de átomos sucessivos ou mesmo em conjuntos de átomos paralelos. Quando uma discordância em aresta move-se para fora de seu plano

de deslizamento, o processo é conhecido como escalagem, e tal movimento é acompanhado normalmente da criação de interstícios ou lacunas (defeitos de ponto) no cristal.

- Fragilização provocada por envelhecimento térmico

A fragilização provocada por envelhecimento térmico é um mecanismo de degradação dependente da temperatura e do tempo. É causada pelo movimento de átomos da rede cristalina (ativados termicamente) por um longo período; um processo que pode ocorrer sem solicitação mecânica externa, gerando alterações nas propriedades dos materiais tais como: decréscimo da ductilidade e da tenacidade, e aumento da resistência e dureza, como consequências destes processos de difusão.

Os parâmetros significativos responsáveis por este processo de envelhecimento são:

- temperatura;
- estado do material (microestrutura);
- tempo.

Susceptíveis tanto à fragilização causada pela radiação quanto pelos efeitos térmicos estão os aços inoxidáveis fundidos, metal de solda e alguns aços martensíticos enriquecidos com Cr, os dois últimos em menor grau. Inúmeros projetos de pesquisa (IAEA, 2007) financiados pelo NRC, EPRI, pelo consórcio WESTINGHOUSE-FRAMATOME-EDF e pela empresa George Fisher (Suíça) avaliaram a degradação das propriedades mecânicas resultantes do envelhecimento devido à fragilização em aços inoxidáveis duplex fundidos (IAEA, 2007). Neste tipo de aço o processo de degradação pode levar à precipitação de fases menos estáveis na ferrita, tais como: fase α enriquecida com Cr, fase enriquecida com Ni e Si e de carbeto de fórmula $M_{23}C_6$ (onde M é o cromo). O aço inoxidável duplex usado em tubulações de pressão do primário pode ser susceptível à fragilização por envelhecimento térmico nas temperaturas de operação (290°C – 325°C no sistema de geração de vapor). Tal mecanismo pode causar, nestas temperaturas, um aumento na dureza e da resistência à tração, como também, decréscimos da ductilidade, da resistência ao impacto e da tenacidade à fratura do material.

A fragilização por envelhecimento térmico não é um mecanismo significativo para VPR feitos a partir de aço forjado ou pela liga Ni-Cr-Fe, pois estes materiais não são susceptíveis a mecanismos ou níveis de stress de magnitude suficiente para provocar a quebra independentemente do teor de ferrite.

3.2.2 FADIGA

A fadiga é caracterizada pela deterioração estrutural, decorrente de repetidos ciclos de tensão/deformação, provocados pela flutuação de cargas e temperaturas.

O acúmulo de danos microestruturais, em grande escala, após os ciclos, leva à iniciação de trincas macroscópicas nos locais mais afetados, que se propagam quando submetidas a novos ciclos tensão/deformação.

Os principais parâmetros relacionados ao comportamento da fadiga são:

- limite de tensão;
- tensão média;
- frequência dos ciclos;
- acabamento superficial;
- condições do meio.

A propagação de trincas ocorre em locais onde existam concentradores de tensão, tais como: entalhes geométricos e defeitos de superfície. As curvas do início de propagação de trincas decorrentes da fadiga indicam quantos ciclos de tensão são responsáveis pelo surgimento dessas trincas em componentes de usinas nucleares.

Um parâmetro que pode influenciar significativamente o início de propagação das trincas relacionadas à fadiga é o meio operacional. A fadiga, gerada pelo meio e pelas condições de operação, é caracterizada como fadiga devido à corrosão, devendo ser considerada quando se trata de componentes de um PWR.

Existem três fontes de fadiga relevantes para PWR, a saber :

- **Ciclos do sistema:** refere-se a alterações no sistema do reator, provocadas pelas variações de pressão e de temperatura. Como exemplos de ciclos do sistema têm-se: início de operação do reator, paralisação programada do reator, paralisação de emergência do reator e descarga da válvula de alívio do sistema de segurança.

- **Ciclos térmicos:** a fadiga térmica pode ocorrer devido a flutuações da temperatura. Transientes de temperatura durante a operação podem causar gradientes de temperatura localizados ou em todo o sistema, resultando em uma ciclagem térmica na interface material/meio. Suaves e acentuados gradientes de temperatura geram ciclos térmicos lentos ou rápidos, respectivamente, sendo ambos fontes de acúmulo de fadiga. As causas para transientes suaves são, geralmente, os procedimentos de início de operação e desligamento do reator ou a carga submetida ao sistema conforme os procedimentos de operação. As conexões e desconexões de sistemas, injeção de água no sistema e vazamento de água quente ou fria através de uma válvula podem provocar um choque térmico. Tais efeitos térmicos resultam no envelhecimento do material em termos de fadiga em baixo ciclo ou fadiga em alto ciclo.

- **Vibração induzida pelo escoamento:** trata-se de um efeito causado pelo escoamento turbulento do refrigerante no núcleo do reator, que produz cargas cíclicas (formação de vórtices). Em geral, estas cargas ocorrem em frequências de aproximadamente 20 Hz ou superiores, levando à suposição de que os ciclos de vibração induzida pelo escoamento são produzidos, provavelmente, durante os testes de pré-operação.

3.2.3 CORROSÃO

Trata-se de uma deterioração sofrida por um material geralmente metálico em consequência da ação química ou eletroquímica do meio, associada ou não a esforços mecânicos.

Considerando-se como oxi-redução todas as reações químicas que consistem em ceder ou receber elétrons, então, pode-se caracterizar os processos de corrosão como reações de oxidação dos metais, isto é, o metal age como redutor, cedendo elétrons para uma

substância, denominada oxidante, no meio corrosivo. Logo, a corrosão é um modo de destruição do metal, agindo de modo progressivo através de sua superfície.

A corrosão pode surgir sob diferentes formas, localizada ou generalizada e o conhecimento das mesmas é indispensável no estudo dos processos corrosivos.

Os principais tipos de corrosão são apresentados considerando-se a sua aparência ou forma de ataque e as suas diferentes causas e mecanismos. Assim pode-se ter os seguintes tipos de corrosão, segundo a morfologia da superfície: (GENTIL, 2003).

- **Uniforme** - a corrosão se processa em toda a extensão da superfície metálica, ocorrendo perda uniforme de espessura.

- **Alveolar** - a corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.

- **Puntiforme ou por pite** – a corrosão ocorre em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície do metal produzindo pites, que são cavidades apresentando o fundo em forma angular e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro.

- **Corrosão sob tensão (SCC)** - existem três mecanismos que explicam a SCC em vários sistemas metal/meio (DI LORENZO et al., 2000):

- ✓ Mecanismo do caminho ativo preexistente é uma justificativa para trincas intergranulares;
- ✓ Mecanismo do caminho ativo auxiliado pela deformação é uma justificativa para trincas transgranulares;
- ✓ Mecanismo da fragilização provocada pela adsorção de hidrogênio.

Variando-se as condições de pressão e temperatura, haverá a transição de um mecanismo para outro (DI LORENZO et al., 2000).

Nas análises quantitativas de corrosão sob tensão deve-se levar em conta o comportamento do material analisado em ambientes similares às condições encontradas no ambiente real, isto é, no ambiente de radiação. Um dos métodos de estudo da corrosão sob tensão é o ensaio de deformação lenta, que é capaz de fornecer dados para realizar-se a avaliação de integridade estrutural.

Os ensaios de corrosão sob tensão procuram quantificar exclusivamente a tensão mínima ou o fator de intensidade de tensão (K), mínimo necessário para provocar a propagação da trinca. No ensaio de deformação lenta, o material é submetido a um esforço de tração, deformando-o lentamente, proporcionando-lhe constante ruptura da película protetora e expondo o material ao meio corrosivo, o que facilita a deterioração pela corrosão sob tensão. Para altas taxas de deformação, superiores a 10^{-4} s^{-1} , a falha ocorre devido ao esforço mecânico. Para taxas inferiores a 10^{-8} s^{-1} , a película se refaz e a trinca não se propaga. Na faixa entre 10^{-8} s^{-1} e 10^{-4} s^{-1} , ocorre a fragilização do material.

As principais vantagens do ensaio de deformação lenta são:

- considerar as tensões residuais existentes nos materiais resultantes dos processos de fabricação, e
- considerar os produtos de corrosão que migram para o interior das trincas e geram campos de tensões localizados, fortes o suficiente para desencadear sua propagação, provocando a fragilização do material.

Assim, os dois primeiros mecanismos citados anteriormente justificam o surgimento da corrosão intergranular ou intercrystalina – tipo de corrosão que surge entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde as suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se então a fratura intergranular sob tensão (Intergranular Stress Corrosion Cracking – IGSCC) e a corrosão intragranular ou transgranular ou transcrystalina – este tipo de corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico, que perde as suas propriedades mecânicas, podendo fraturar à menor sollicitação mecânica, dando origem à fratura transgranular sob tensão- Transgranular Stress Corrosion Cracking - TGSCC).

A corrosão sob tensão é um dos mecanismos de degradação mais atuantes durante a operação de uma instalação nuclear. A combinação de efeitos sinérgicos de esforços mecânicos com a ação do ambiente corrosivo pode causar a falha espontânea de um componente estrutural ou mecânico de uma usina nuclear. A corrosão sob tensão ocorre sem sinais macroscópicos de uma fratura iminente, pois muitas trincas intergranulares (sob a influência do meio operacional; tensão e material) ou transgranulares (influenciada pela ação de íons cloreto na água, intensificada pela presença de oxigênio e pela temperatura) se propagam com quase nenhuma indicação de produtos de corrosão. As trincas que surgem segundo este processo, geralmente, se propagam sem grandes deformações plásticas e o rompimento acontece por clivagem, que é uma característica de fratura frágil, porém com uma velocidade de propagação bem menor.

Dentre os tipos de corrosão mais comumente encontrados o que maiores danos pode causar a um reator, é o intercrystalino.

Atualmente, sabe-se que a corrosão intercrystalina sofre a influência de três fatores (IAEA, 2007):

- **Influência do meio operacional:** relacionada a parâmetros como a condutividade da água e ao potencial eletroquímico. Os maiores benefícios em relação à prevenção da corrosão intergranular são obtidos quando tais parâmetros são controlados.

A probabilidade de ocorrência de trincas intergranulares é significativamente aumentada pela atuação do meio operacional sobre as frestas que o material do reator pode apresentar.

A água leve usada como refrigerante em PWR é um eletrólito de baixo poder de condução de eletricidade, mas tal propriedade será incrementada se apresentar outras espécies iônicas dissolvidas, o que proporcionará um aumento da probabilidade de ocorrência de corrosão.

O potencial eletroquímico é uma medida termodinâmica da tendência de um material sofrer uma reação de corrosão sob certas condições fixadas. A radiólise da água que

passa pelo núcleo resulta em grandes concentrações de H_2 , O_2 , H_2O_2 e vários outros radicais livres.

No refrigerante do PWR, o nível de espécies oxidantes, isto é, oxigênio e peróxido de hidrogênio primariamente controlam a condutividade e o potencial eletroquímico de todos os materiais estruturais. Para o PWR o potencial eletroquímico é menor do que – 230 mV, assim, a IGSCC de um aço inoxidável sensibilizado termicamente não é possível.

- **Influência da tensão:** há três fontes primárias de tensão nos componentes internos do vaso do reator, a saber:

- **Tensões induzidas pela fabricação do componente:** consistem de tensões introduzidas durante a manufatura e instalação (isto é, usinagem, conformação e soldagem) desse componente. Durante o procedimento de instalação pode haver a geração de carga residual acima ou abaixo do ponto de escoamento do material.

- **Tensões primárias:** incluem as tensões desencadeadas pelas cargas mecânicas, devido à pressão, que podem ser tão altas como as tensões de escoamento às quais as EC (Corrosão com Erosão) estão sujeitas. A tensão provocada pelos produtos de corrosão pode também possuir um importante significado na propagação de trincas.

- **Tensões secundárias:** são as tensões geradas por transientes térmicos, podendo ser muito expressivas.(IAEA, 2007)

- **Influência do material:** a susceptibilidade à IGSCC varia segundo a composição da liga e com as condições metalúrgicas. Por exemplo, dadas condições de tensão normal e ambiente operacional em PWR, os principais materiais destes reatores têm mostrado susceptibilidade à IGSCC como resultado do próprio material ou devido ao seu histórico de fabricação. Para os componentes internos do vaso do reator, estes materiais incluem os aços inoxidáveis austeníticos Tipo 304/304L, ligas à base de níquel 600 e X-750 e solda metálica 182.

As operações de trabalho a frio dos aços tais como: flexão, corte, conformação, laminação e, especialmente, retificação podem tornar o aço austenítico susceptível à SCC no respectivo meio. A natureza do trabalho a frio afetará o grau de susceptibilidade à corrosão sob tensão, desde que a região do material trabalhada a frio seja somente na superfície. A combinação dos efeitos do trabalho a frio com a sensibilização é responsável pelo aumento do dano.

Ligas de níquel constituintes de tubos de geradores de vapor, penetrações do topo de vasos de pressão e pinos de reatores a água pressurizada têm sofrido IGSCC. As ligas usadas em soldas também sofrem este tipo de corrosão.

Os aços inoxidáveis austeníticos são particularmente susceptíveis à SCC em ambientes na presença de íons cloreto; temperatura e a presença de oxigênio tendem a agravar a SCC causada pelos íons cloreto. O tipo de corrosão sob tensão que ocorre neste meio é tipicamente transgranular. A sensibilidade à IGSCC não é necessária para a ocorrência da TGSCC. Há evidências comprovando os efeitos combinados de íons cloreto e do oxigênio na promoção da TGSCC em soluções de aço inoxidável austenítico recozido. Altos níveis de íons cloreto não resultam em SCC na ausência de oxigênio na água. Além disso, como o conteúdo de oxigênio do meio é aumentado, a concentração de íons cloreto torna-se menor.

Podem ocorrer fraturas intergranulares provocadas também pela corrosão sob tensão induzida pela irradiação – IASCC que são também caracterizadas pela iniciação e propagação de trincas intergranulares, mas apresentam diferenças sutis em relação à corrosão sob tensão fraturante intergranular (IAEA,1990). Outros fatores como o potencial hidrogeniônico (pH), condutividade, fissuras, dentre outros, são, juntamente com a irradiação, responsáveis pelo desenvolvimento e difusão deste tipo de corrosão.

Apesar de a IASCC de vasos internos de um PWR não ter sido ainda observada para os componentes estruturais, a sua importância como mecanismo de degradação tende a aumentar com o decorrer do tempo. Algumas trincas observadas em parafusos e em barras de controle foram atribuídas à IASCC. Isto indica que este processo de corrosão pode tornar-se um mecanismo de envelhecimento significativo para vasos internos de pressão de um PWR.

Um dos principais parâmetros para se determinar os fatores do ambiente responsáveis pela IASCC é a geração direta de oxidantes na ponta da trinca, enquanto uma das principais abordagens para confirmar os seus efeitos baseia-se nas medições simultâneas da taxa de propagação de trinca e das concentrações de oxidantes sob condições de irradiação (SATOH, T., SATOH, Y., UCHIDA, S., 2003).

A tabela do Apêndice C relaciona alguns tipos de corrosão com os materiais mais susceptíveis ao seu ataque, e também com os agentes responsáveis pelo seu surgimento.

- **Deformação por mossas:** deformação física de tubos de inonel, quando estes passam através da placa suporte, causada pela queima de material corrosivo no espaço entre o tubo e a placa (WADE, 1995). Uma camada de óxido, sem efeito protetor, é formada no lugar do material original, como resultado do processo de corrosão ROBERTS (1981).

- **Desgaste químico:** corrosão geral causada por ataque químico de fosfato na fase aquosa, em áreas de baixo escoamento de água. Este tipo de corrosão provoca redução da espessura da parede de tubos em regiões acima da placa tubular de geradores de vapor (ROBERTS, 1981).

- **Corrosão por esfoliação** – trata-se de um tipo de corrosão que progride paralelamente à superfície externa do metal, com conseqüente desprendimento de camadas, lâminas ou escamas do metal, pela formação de produtos de corrosão GENTIL (2003).

- **Empolamento ou fragilização causada pelo hidrogênio** – ocorre quando o hidrogênio atômico penetra no material metálico e, como apresenta pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente e, em regiões onde há descontinuidades, como inclusões e vazios, transforma-se em hidrogênio molecular (H₂), exercendo assim, pressão que propicia a formação de bolhas.

Este tipo de degradação por corrosão ataca principalmente o revestimento das varetas combustíveis.

3.2.4 CORROSÃO COM EROSÃO

Cabe ressaltar ainda que o efeito da velocidade de uma solução ou do movimento de um metal em uma solução na taxa e na forma de corrosão é extremamente complexo. De um ponto de vista geral, uma elevação na velocidade do fluido pode provocar um aumento da taxa de corrosão (IAEA, 2007).

O movimento de soluções acima de um certo limiar de velocidade pode resultar em outra forma de ataque devido à associação do desgaste mecânico induzido pelo fluido ou pela abrasão com a corrosão, a corrosão-erosão. O termo geral, “Corrosão com Erosão” (E/C), inclui todas as formas de ataques acelerados nas quais os filmes de proteção de superfícies e/ou as próprias superfícies dos metais são removidos pela combinação do efeito da velocidade do fluido com a corrosão-erosão localizada ou pela corrosão sob atrito.

O termo “corrosão acelerada pelo escoamento” é utilizado para descrever a erosão (ou redução da espessura) de aços carbono em usinas nucleares e naquelas que queimam combustíveis fósseis, onde não há um limiar de velocidade da solução. É decorrente de vários parâmetros da química da água, da composição do material e dos processos hidrodinâmicos. Este fenômeno complexo envolve os aspectos eletroquímicos gerais da corrosão mais os efeitos de transferência de massa e transferência de momentum. Tanto a erosão associada ao escoamento quanto E/C são caracterizados pela constante remoção de filmes de proteção (na forma de óxido), desde filmes passivos muito finos até filmes espessos de produtos de corrosão, da superfície metálica.

Tubos de aço carbono são comumente usados na tubulação do sistema secundário em reatores a água pressurizada. Sabe-se que esses tubos podem sofrer este tipo de degradação, sob condições de alta temperatura e alta velocidade de escoamento do fluido, apesar de suas boas características de fabricação. É, também, esperado que a possibilidade de ocorrência de falhas relacionadas a este tipo de degradação se eleve com o decorrer do tempo de operação da central nuclear. Portanto, a redução de parede induzida pelo escoamento de fluido tem sido considerada o principal mecanismo de degradação da tubulação de aço carbono do sistema secundário de PWR e um risco potencial à segurança da usina nuclear. Estudos substanciais têm sido realizados a fim

de se entender os parâmetros fundamentais para controlar o mecanismo responsável pela corrosão acelerada pelo escoamento (FAC) do refrigerante e desenvolver uma apropriada ação de mitigação dos seus danos em aços carbono. Entretanto, não é simples controlar e reduzir a FAC nas centrais nucleares em operação. Então, a avaliação estrutural de um sistema de tubos contendo defeito de redução de espessura da parede tornou-se indispensável na manutenção da integridade de tubos de aço carbono em centrais nucleares. Inúmeros estudos experimentais e analíticos foram realizados para desenvolver a metodologia de avaliação da integridade e de critérios para aprovação de tubulação que apresenta defeito em decorrência da redução da espessura de parede em centrais nucleares. A Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) estabeleceu procedimentos para avaliação e critérios de aprovação para a abordagem dos defeitos provocados pela redução da espessura da parede. Os tubos de aço carbono submetidos a altas energias seguem as normas dos códigos de projetos de construção para aquecedores e vaso de pressão da ASME.

Apesar dos esforços para desenvolver-se métodos de avaliação da integridade e de critérios de aceitação de tubos que apresentem diminuição da espessura da parede terem sido empreendidos, os efeitos decorrentes da redução de área em relação ao comprimento axial e à magnitude da pressão interna dos tubos no comportamento da ruptura não foram elucidados ainda. Além disso, os modelos desenvolvidos pelos estudos antecipados não consideram estes efeitos de maneira adequada. Por esta razão, tornou-se imperativo o esclarecimento dos efeitos da redução da espessura do comprimento axial e da pressão interna nas rupturas decorrentes da redução da espessura da parede em tubos de aço carbono.

3.2.5 RADIAÇÃO INDUZINDO FLUÊNCIA, RELAXAÇÃO OU INCHAMENTO

A irradiação por nêutrons cria um grande número de interstícios e vazios que podem aniquilar-se em defeitos (tais como deslocamentos, contornos de grãos, superfícies, etc) por processos controlados de difusão. A cinética de aniquilação é diferente para interstícios e vazios e depende da tensão, temperatura e microestrutura do material, principalmente. Quando os interstícios são eliminados rapidamente, os vazios em excesso aglutinam-se no interior de poros ou bolhas no metal, levando ao inchamento da estrutura.

Se uma tensão significativa é aplicada, os interstícios podem migrar em direção a locais perpendiculares à tensão aplicada produzindo fluência ou fenômenos de relaxação causados pela irradiação.

Apesar da fluência induzida termicamente constituir-se em fenômeno insignificante na faixa de temperatura nas condições de operação do VPR para um PWR, há exemplos de um aumento do diâmetro de várias peças de teste de aço austenítico irradiados a uma temperatura de 390 °C (IAEA, 2007). Esta deformação pode estar relacionada com a fluência e a inchação induzidas pela irradiação.

A fluência induzida pela irradiação apresenta característica linear na dose de exposição, em quaisquer temperaturas e doses para as quais a inchação e a fluência induzidas termicamente são desprezíveis. O efeito decorrente da irradiação, da temperatura, do fluxo de nêutrons e da taxa de produção de hélio no fenômeno de fluência é relativamente desconhecido para os materiais usados em projetos de componentes internos do vaso de pressão, principalmente na faixa de temperatura relevante para a operação de PWR.

O inchamento é caracterizado por uma dose de incubação e uma taxa constante de exposição à radiação: as temperaturas que são relevantes para os componentes internos do vaso de pressão correspondem a uma faixa de temperatura onde o inchamento é pequeno e é frequentemente estabelecido dentro da fase de incubação para as doses mais comumente alcançadas.

A temperatura de operação de componentes internos do vaso de pressão é baixa o bastante para limitar o efeito do inchamento. Entretanto, se a temperatura se eleva localmente, devido à radiação gama em partes de menor espessura, o inchamento pode ocorrer e criar tensão localizada. A principal causa do inchamento está relacionada às alterações geométricas que podem ocorrer. Isto poderia dar origem a um impacto negativo no movimento das barras de controle ou no escoamento do refrigerante.

3.2.6 DESGASTE MECÂNICO

Este tipo de degradação é completamente caracterizado como um mecanismo de degradação mecanicamente induzido. A degradação de alcance reduzido, movimento

oscilatório entre superfícies de atrito contínuas, é geralmente denominada de degradação por fricção ou atrito.

A vibração de amplitude relativamente grande, resultante de um intermitente contato por atrito entre duas partes, é denominada de desgaste por fricção ou simplesmente desgaste. O desgaste comumente resulta de efeitos sinérgicos de vibração e corrosão.

O principal fator causador de atrito e desgaste é o de vibração induzida pelo escoamento do refrigerante. A iniciação, estabilidade, e as características de amplificação do dano por estes mecanismos podem ser funções de um grande número de variáveis, incluindo a geometria local, acabamento superficial de cada componente, do *gap* entre esses componentes, das velocidades e direções de escoamento, e das características da camada de óxido. Desgaste é definido como a remoção de camadas da superfície do material devido ao movimento relativo entre duas superfícies ou sob a influência da abrasão.

O desgaste mecânico foi identificado como um mecanismo de degradação em locais específicos de componentes internos do vaso de pressão, decorrente de vibrações induzidas pelo escoamento.

3.2.7 MANIPULAÇÃO DE COMPONENTES

Estruturas internas de reatores nucleares são removidas periodicamente de forma parcial ou completa para recarga de combustível ou para inspeção em serviço. A manipulação desses componentes internos tem sido executada com grande cuidado, já que algumas partes dos componentes internos do vaso de pressão podem ser facilmente deformadas por impactos. Vários incidentes relacionados a este tipo de eventos foram relatados (IAEA, 2007).

3.2.8 DEFEITOS DE FABRICAÇÃO

Os defeitos de fabricação podem contribuir para a ocorrência mais rápida de trincas devido à fadiga e à corrosão. Os defeitos de fundição e conformação relacionados com os processos de soldagem de um material podem aumentar com as cargas cíclicas, ou

ficar expostos a ataques por corrosão. A distribuição de imperfeições em materiais dos componentes e estruturas de usinas nucleares é uma consideração importante; existem códigos de projeto que especificam o nível aceitável de defeitos de fabricação. Os métodos de identificação de defeitos de fabricação de um componente da usina incluem inspeções que utilizam técnicas de ensaios não-destrutivos, para detectar falhas geradas precocemente e repará-las quando for necessário.

3.3 OUTROS CASOS IMPORTANTES DE DEGRADAÇÃO EM EQUIPAMENTOS E COMPONENTES RELEVANTES PARA PWR

- Geradores de vapor

Desde que a energia nuclear começou a ser facilmente utilizada para propósitos comerciais na década de 60 do século XX, os operadores das usinas têm observado uma variedade de problemas nos principais componentes como resultado dos mecanismos anteriormente citados. Embora muitos desses problemas terem sido resolvidos, aqueles relacionados aos geradores de vapor (GVs) persistem. Em dezembro de 1994, trinta e cinco geradores de vapor foram substituídos em 12 dos 72 PWR em operação, e três unidades foram paralisadas prematuramente, em decorrência de degradação de seus geradores de vapor (WADE, 1995): Trojan, localizada no estado do Oregon, em 1992; San Onofre 1, localizada no estado da Califórnia, em 1992; e Rancho Seco, localizada em Sacramento, Califórnia, em 1989.

Assim, as questões associadas à degradação de geradores de vapor têm proporcionado um significativo impacto na operação de centrais nucleares. Como resultado, as instalações que identificaram degradação em seus geradores de vapor têm de realizar uma escolha entre a operação contínua do reator com o gerador de vapor degradado provocando elevação dos custos de operação e manutenção, exposição dos operadores da usina a altas doses de radiação, aumento dos riscos de vazamento forçados através de tubos rompidos, redução da potência da planta, através do fechamento de tubos, ou substituição deste gerador de vapor (WADE, 1995).

A forma mais comum de falha que compromete a integridade de geradores de vapor é a trinca devida à corrosão sob tensão que ocorre na região em curva dos tubos em pequenas moedas no tubo, mais especificamente causada pelo ataque intergranular

(GOPWANI, 1999). Esta forma de falha responde, atualmente, pelos danos observados em 60 a 80 % dos tubos que necessitam ser tamponados. As corrosões sob fricção ou atrito e por pites combinadas são responsáveis pela degradação de outros 15 a 20 % de todos os defeitos dos tubos. As falhas remanescentes são atribuídas a danos mecânicos, desgaste pelo ácido fosfórico, mossas e falhas por fadiga.

Inicialmente, os problemas foram considerados como decorrentes principalmente de defeitos de fabricação, de operações desfavoráveis e dos parâmetros físico-químicos da água. Todavia, modelos de falhas começaram a ser desenvolvidos, indicando fatores comuns e falhas de causa comum. Os fatores físicos mais frequentemente responsáveis por estas falhas são as seguintes (WADE, 1995):

- **Ligas para fabricação de tubos** – o fator mais comum de defeitos em tubos, tanto nos Estados Unidos quanto em outras partes do mundo, é a liga de fabricação de tubos de GV, denominada inonel 600, recozida. Trata-se de uma liga de níquel suscetível a muitas formas de trincas, corrosão por pite, moossa, e outros tipos de degradação.

- **Projeto de placa tubular e ligas** – os feixes de tubos de GV conectam-se pelas extremidades a placas perfuradas (tubulares) que têm como função separar a água do circuito primário da água do circuito secundário. Tanto a conexão da placa tubular quanto a superfície externa dos tubos em contato com a placa tendem a acumular lama, trinca decorrente de vibração e trinca provocada por fadiga.

- **Projetos de placas suporte e ligas** – os feixes de tubos são imobilizados por placas de suporte e barras antivibração. Conexões do suporte de tubos tendem a acumular lama corrosiva, trinca e desgaste.

- **Componentes poliméricos**

Componentes poliméricos são bastante utilizados em centrais nucleares em equipamentos fundamentais para a sua segurança. A degradação de tais componentes constitui-se em assunto de grande interesse para a indústria, gerando vários estudos no mundo inteiro. Os principais tipos de componentes fabricados com polímeros usados nas usinas são (BURNAY, S.G., 2001):

- selos e gaxetas;

- diafragmas de válvulas;
- isolamento elétrico, particularmente de cabos;
- luvas;
- revestimentos;
- suportes de amortecimento de vibrações.

Os estudos da degradação de componentes poliméricos têm concentrado sua atenção no comportamento de elastômeros usados como selos e em materiais de cabos elétricos.

Em uma central nuclear, os componentes poliméricos podem estar sujeitos a vários fatores de envelhecimento, dentre os mais importantes estão: a taxa de dose de radiação, a taxa total de dose, temperatura e presença de oxigênio.

Em determinadas áreas não é possível o funcionamento adequado do componente para o período que abrange a duração da vida útil da usina, devido à agressividade do ambiente.

As experiências de operação adquiridas em usinas nucleares de diferentes países demonstraram que o maior número de casos de degradação ocorreu em selos de válvulas, bombas e conectores manufaturados com elastômeros e em isolantes de cabos elétricos. Um cabo elétrico é um sistema mais complexo do que o selo, pois inclui vários componentes confeccionados com diferentes materiais, tanto poliméricos quanto metálicos, constituindo um só componente. A análise do comportamento de diferentes polímeros frente ao envelhecimento deve também considerar a interação desses materiais com outros componentes.

A maioria dos incidentes que ocorrem com materiais poliméricos de selos e isolamentos de cabos elétricos é decorrente principalmente do envelhecimento térmico do que devido ao efeito da radiação, mas não pode ser completamente descartado devido à possibilidade do aparecimento de “pontos quentes” nestes materiais, onde, conseqüentemente, ocorre dano.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos principais equipamentos e componentes e seus respectivos materiais, mecanismos de degradação e possíveis falhas

Tabela 3.1: Resumo dos Principais Equipamentos, Componentes, Materiais, Desgastes ou Falhas Operacionais Relatadas em PWRs (SIMÕES, 2003)

Componentes e equipamentos	Materiais	Desgastes e falhas relatadas
Combustível	UO ₂ sinterizado, enriquecido com U-235 de 3 a 4% UO ₂ + ZrO ₂ + Boro	Fluência, inchamento, trinca, ruptura
Varetas de revestimento do combustível	Zircaloy, Zr-Nb, aço inox, Zr+0,07% Boro	Fluência, trinca, ruptura, empolamento, fragilização pelo hidrogênio
Elementos de controle	Barras de controle de B ₄ C, liga de Ag-In-Cd com aço inox-Boro Inconel, Háfnio, Ácido Bórico (H ₃ BO ₃)	Desgaste mecânico, fadiga, trinca, fluência, fragilização térmica, fragilização por radiação
Grades de suporte do elemento combustível	Aço carbono, aço inox, Inconel e ligas de Zircônio	Corrosão intergranular, fragilização térmica, por radiação, estratificação
Vaso de pressão	Aços ferrítico inox, aço- liga (Vanádio, Titânio).	Fluência, desgaste, mecânico, corrosão, esfoliação.
Peças do topo do vaso	Aço inox, Zircaloy	Corrosão, fragilização, devido à radiação
Molas, pinos e parafusos, grades, placas, suportes.	Inconel, aço inox. Austenítico	Fadiga, corrosão-erosão, fragilização pela radiação.
Placas do núcleo	Aço inox e aço Austenítico	Corrosão intergranular e por estresse, fragilização térmica.
Geradores de vapor	Aços ferrítico, inox Austenítico, aço Carbono	Fragilização térmica, corrosão por pite.

Tubos do gerador de vapor	Inconel, Incoloy	Trincas intergranulares devido à corrosão sob tensão, desgaste químico.
Tubulações do primário	Aço carbono de baixa liga, aços inox Austenítico	Erosão-corrosão, ruptura com perda do refrigerante
Bombas	Aços carbono e inox	Fadiga (corrosão), desgaste mecânico, cavitação
Acumuladores	Aço Austenítico, aço baixa liga	Corrosão química
Soldas	Ligas Zircônio-Be, ligas de Níquel	Trinca, ruptura, falta de fusão, corrosão, fragilização
Turbina	Aços inox e Carbono	Erosão-corrosão, desgaste mecânico
Cabos	Polímeros (revestimento)	Fragilização térmica e por irradiação, fluência

CAPÍTULO 4 EQUAÇÃO DE ITÔ – UM MODELO PARA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PROFUNDIDADE DE UM PONTO DE CORROSÃO

4.1 GERAL

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos e definições importantes para o entendimento desta tese, tais como: variável determinística e variável estocástica, caminho aleatório, processos estocásticos, ruído gaussiano branco, equação de Fokker-Planck, equações diferenciais estocásticas e equação diferencial de Itô.

A natureza estocástica de pontos de corrosão tem sido reconhecida desde os anos 1930 (AZIZ, 1956 e SHIBATA, 1996). Vesely e colaboradores (NUREG/CR-5612, BNL-NUREG-52252, 1991) propuseram um modelo markoviano para estudar os efeitos do envelhecimento. Shibata (1996) observou que corrosão não pode ser explicada sem pontos de vista estatístico e estocástico devido à grande dispersão de dados comuns no laboratório e no campo. Assim, os modelos estocásticos são mais convenientes para a descrição da corrosão do que os determinísticos. Como se pôde observar na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, a abordagem markoviana da degradação por envelhecimento tem sido explorada nos últimos vinte anos. Nas várias abordagens propostas ao longo destes anos, um estado degradado corresponde ao agrupamento de diferentes condições degradadas num único estado. Modelos refinados consideram vários estados degradados e a possibilidade da transição entre eles.

O objetivo principal deste capítulo é apresentar a equação de Itô e suas propriedades gerais importantes para o propósito desta tese. Neste trabalho, a equação de Fokker-Planck fornecerá a densidade de probabilidade da evolução da profundidade de um ponto de corrosão e será citada somente para complementar os resultados obtidos. Pretende-se, desta forma, empregar a equação de Itô para modelar a evolução temporal da profundidade de pontos de corrosão em tubulações que sofrem inspeções regulares.

A profundidade de um ponto de corrosão, num dado instante de tempo, pode assumir qualquer valor entre as extremidades da espessura da parede de uma tubulação. Num instante de tempo imediatamente posterior, a nova profundidade deste ponto de corrosão pode assumir qualquer outro valor compreendido entre o valor atual da profundidade do ponto de corrosão e o fundo da parede da tubulação. Desta forma, a

profundidade de um ponto de corrosão é um processo estocástico e como o estado futuro depende apenas do estado atual, o processo estocástico é markoviano, contínuo no tempo e com espaço de estados também contínuo (CAMACHO, 2010).

O desenvolvimento de um modelo para descrever a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão que se baseia na equação de Itô necessita somente da determinação dos termos $A(y,t)$ e $B(y,t)$, respectivamente, coeficiente de arraste e coeficiente de difusão desta equação, que são específicos para o caso a ser modelado.

4.2 VARIÁVEL DETERMINÍSTICA E VARIÁVEL ESTOCÁSTICA

Uma variável é considerada determinística quando ela assume um único valor com probabilidade de 100%. A variável determinística pode ter seu resultado previsto com certeza mesmo antes do experimento ser repetido sob as mesmas condições, havendo apenas os erros de medida. Exemplos de variáveis determinísticas são: temperatura de ebulição da água, a massa de um corpo, a aceleração da gravidade, etc.

Uma variável estocástica ou aleatória está associada a uma regra que atribui um número a cada resultado de uma experiência aleatória (FELLER, 1957, 1967, PAPOULIS, 1985). Em outras palavras, uma variável é aleatória ou estocástica quando o seu valor está sujeito a variações devido ao acaso. A variável estocástica pode assumir um conjunto de possíveis valores diferentes, cada um associado a uma probabilidade. Possíveis valores de uma variável aleatória podem representar os possíveis resultados de um experimento ainda a ser realizado, ou os possíveis resultados de um experimento passado cujo valor já existente é incerto. Exemplos de variáveis aleatórias são: a profundidade de um ponto de corrosão, o número de filhos de uma pessoa, o número de lâmpadas defeituosas em um caixa com 10 lâmpadas, etc. Elas podem ser discretas como, por exemplo, o número de alunos de uma sala ou contínuas como tempo, distâncias, pesos, temperatura etc.

4.3 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS

Um processo estocástico é uma regra que atribui uma função do tempo a cada resultado de uma experiência aleatória. Assim, um processo estocástico é simplesmente uma função de duas variáveis, uma das quais, em geral, é o tempo e a outra uma variável estocástica (FELLER, 1957, 1967, GARDINER, 1983, PAPOULIS, 1985, VAN KAMPEN, 2007).

Processos estocásticos são de interesse para descrever o comportamento de um sistema operando em um período de tempo. Com isso, em termos formais, a variável aleatória $Y(t)$ representa o estado do sistema no tempo t . Portanto, pode-se afirmar que $Y(t)$ é definido em um espaço denominado espaço de estados (ROSS, 2007).

Podemos classificar os processos estocásticos em relação à natureza do espaço de estados e do espaço de parâmetros. As possíveis combinações são:

a) Em relação ao estado.

i) Estado discreto: $Y(t)$ é definido sobre um conjunto enumerável ou finito.

ii) Estado contínuo: $Y(t)$ representa uma função.

b) Em relação ao tempo.

i) Tempo discreto: " t " é finito ou enumerável.

ii) Tempo contínuo: " t " pertence a um intervalo.

Para a abordagem a seguir, a letra minúscula y , representará um valor possível de Y no instante t . Para um valor particular de y , $Y(y,t) \equiv f(y,t)$ é definida como uma função amostral ou realização do processo. Um processo estocástico pode ser pensado como um conjunto de tais funções amostrais. A Figura 4.1 mostra um conjunto de funções amostrais.

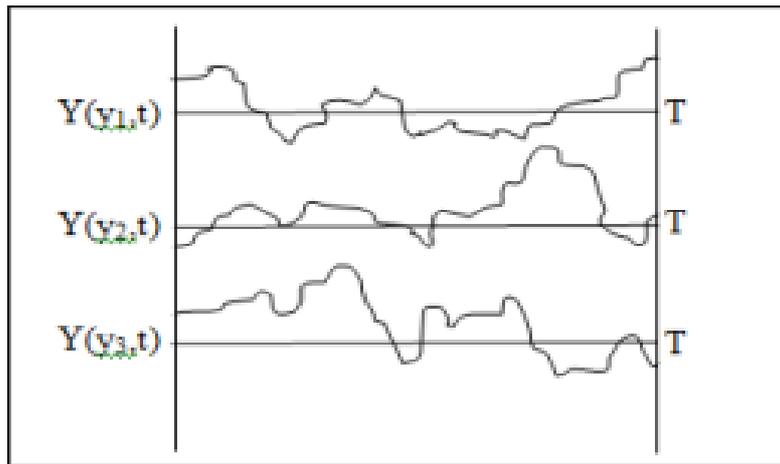


Figura 4.1 – Conjunto de funções amostrais ou realizações de um processo estocástico

Há na natureza muitos fenômenos para os quais uma grandeza varia com o tempo de forma muito complicada e irregular, como exemplo, pode-se citar: a dinâmica populacional, sismologia, psicologia experimental e difusão turbulenta entre outros (KLOEDEN e PLATEN, 1999). Em uma abordagem estocástica, uma única função que varia irregularmente com o tempo pode ser substituída por um conjunto de funções. O conjunto particular de funções apropriado dependerá da natureza da grandeza observada e dos processos naturais subjacentes. Um processo estocástico pode ser definido como um conjunto de tais funções irregulares.

Um processo estocástico é determinado matematicamente pelo conjunto de probabilidades $P_1(y_1, t_1)$, $P_2(y_1, t_1; y_2, t_2)$, ..., $P_n(y_1, t_1; y_2, t_2; \dots; y_n, t_n)$, onde $P_1(y_1, t_1)$ é a probabilidade do processo estocástico Y assumir o valor y no intervalo entre y e $y+dy$ no tempo t e $P_2(y_1, t_1; y_2, t_2)$ é a probabilidade conjunta do processo estocástico Y assumir o valor y_1 no intervalo entre y_1 e y_1+dy_1 no tempo t_1 e o valor y_2 no intervalo entre y_2 e y_2+dy_2 no tempo t_2 , e assim sucessivamente.

O conjunto de probabilidades acima permite calcular todos os momentos do processo estocástico que contém toda a informação que se pode ter de um processo desta natureza.

A função $P(y, t)$ pode ser interpretada como a fração relativa entre o número de funções que no instante t apresentam valor que não excede y e o total de funções amostrais. Este procedimento é mostrado na Figura 4.2. Observa-se que, entre todas as funções que

definem o conjunto, somente $Y(y_2,t)$, $Y(y_3,t)$ e $Y(y_4,t)$ satisfazem a condição de que no instante de tempo t o valor da variável estocástica não exceda a y .

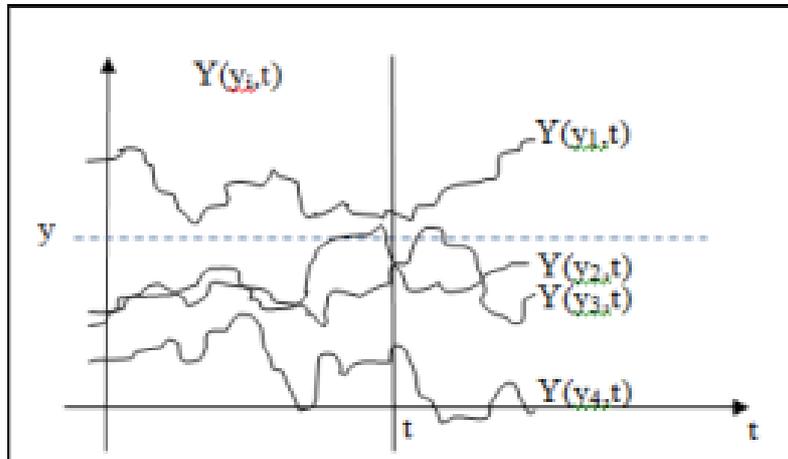


Figura 4.2 – Subconjunto de funções amostrais que definem $P(y,t)$

Uma grandeza muito empregada na descrição de um processo estocástico é a probabilidade condicional $P_{1|1}(y_2,t_2|y_1,t_1)$ que significa a probabilidade de Y assumir o valor y_2 no instante t_2 , dado que seu valor no instante t_1 era y_1 . Em outras palavras, dentre todas as funções amostrais $Y(y,t)$ do conjunto de funções amostrais, selecionam-se aquelas que passam pelo ponto y_1 no instante t_1 ; a fração deste subconjunto cujos valores de Y , no instante t_2 estão contidos no intervalo y_2, y_2+dy_2 é $P_{1|1}(y_2,t_2|y_1,t_1)dy_2$ (VAN KAMPEN, 2007). A Figura 4.3 mostra este procedimento. Observa-se que dentre as funções que definem o subconjunto daquelas que em t_1 passam no ponto y_1 , somente $Y(y_2,t)$, satisfaz a condição de que no instante de tempo t_2 o valor da variável aleatória está compreendido entre y_2 e y_2+dy_2 .

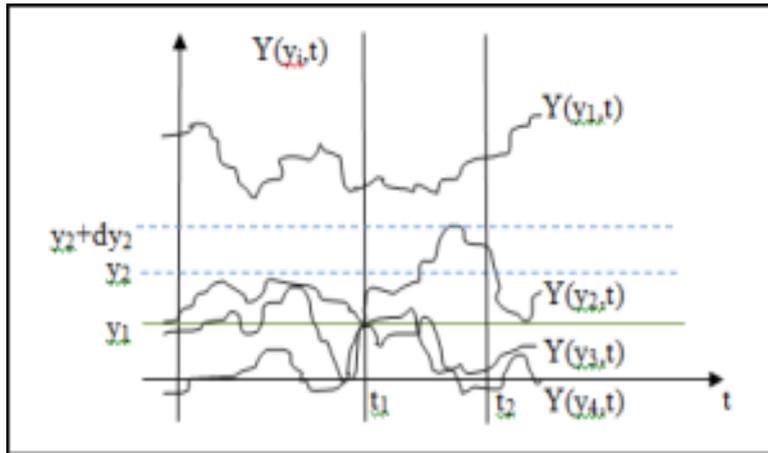


Figura 4.3 – Subconjunto de funções amostrais que definem $P_{l|k}(y_2, t_2 | y_1, t_1)$

Define-se a probabilidade condicional $P_{l|k}$ da seguinte forma (VAN KAMPEN, 2007):

$$P_{l|k}(y_{k+1}, t_{k+1}; \dots; y_{k+l}, t_{k+l} | y_1, t_1; \dots; y_k, t_k) = \frac{P_{k+l}(y_1, t_1; \dots; y_k, t_k; y_{k+1}, t_{k+1}; \dots; y_{k+l}, t_{k+l})}{P_k(y_1, t_1; \dots; y_k, t_k)} \quad (4.1)$$

4.3.1 CAMINHO ALEATÓRIO

Um tipo de processo estocástico de suma importância para esta tese é o denominado “caminho aleatório”. Para uma dimensão, o caminho aleatório (random walk) consiste numa sequência de passos, todos do mesmo tamanho, a partir de uma origem, para um lado ou outro determinado como resultado de um sorteio.

O processo inicia em $t=0$ e a localização no tempo t é uma função do tempo do tipo degrau. O processo estocástico $Y(y, t)$ depende da sequência particular de caras e coroas designada por y . A Figura 4.4 ilustra uma trajetória possível e, h e t se referem a cara e coroa, respectivamente.



Figura 4.4 – Uma trajetória possível do caminho aleatório bidimensional

4.3.2 PROCESSO DE MARKOV

Um processo de Markov é definido como um processo estocástico onde qualquer conjunto de n sucessivos instantes de tempo ($t_1 < t_2 < \dots < t_n$) deve satisfazer à seguinte propriedade:

$$P_{|n-1}(y_n, t_n | y_1, t_1; \dots; y_{n-1}, t_{n-1}) = P_{|1}(y_n, t_n | y_{n-1}, t_{n-1}) \quad (4.2)$$

isto é, a função densidade de probabilidade condicional para o instante t_n é determinada somente pelo conhecimento do valor y_{n-1} no instante t_{n-1} e não é afetada por qualquer conhecimento de valores assumidos pela variável estocástica em instantes anteriores. $P_{|1}$ é chamada probabilidade de transição.

O processo markoviano é inteiramente determinado por duas funções. A primeira, é $P_1(y_1, t_1)$, ou função de um instante, que pode ser definida como a probabilidade de um processo estocástico assumir o valor y_1 no tempo t_1 . A segunda, é $P_{|1}(y_2, t_2 | y_1, t_1)$, ou probabilidade condicional de transição entre dois estados. Toda a cadeia hierárquica das funções de três tempos, quatro tempos e assim sucessivamente, pode ser construída, pelas funções acima dando origem ao processo de Markov. Deste modo, temos:

$$P_3(y_1, t_1; y_2, t_2; y_3, t_3) = P_2(y_1, t_1; y_2, t_2) P_{|2}(y_3, t_3 | y_1, t_1; y_2, t_2)$$

$$= P_1(y_1, t_1) P_{|1|}(y_2, t_2 | y_1, t_1) P_{|1|}(y_3, t_3 | y_2, t_2) \quad (4.3)$$

Assim, todos outros P_n podem ser definidos em função de P_1 e $P_{|1|}$.

4.3.3 PROCESSO DE LEVY

Um processo estocástico $Y = \{Y_t; t \geq 0\}$ é dito ser um processo de Levy se ele satisfaz as seguintes propriedades (APPLEBAUM, 2004):

- a) $Y_0 = 0$
- b) Independência de incrementos: Para qualquer $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n < \infty$, então $Y_{t_2} - Y_{t_1}, Y_{t_3} - Y_{t_2}, \dots, Y_{t_n} - Y_{t_{n-1}}$, são independentes;
- c) Y tem incrementos estacionários
- d) Y é estocasticamente contínuo, isto é, para todo $a > 0$ e para todo $s \geq 0$,

$$\lim_{t \rightarrow s} P(|Y(t) - Y(s)| > a) = 0;$$

4.3.4 PROCESSO DE WIENER

Um processo padrão de Wiener, frequentemente chamado movimento browniano, sobre o intervalo de tempo $[0, T]$ é uma variável aleatória $W(t)$ que depende continuamente sobre o $t \in [0, T]$ e satisfaz as seguintes propriedades:

- $W(0) = 0$
- $E[W(t)] = 0$; $\text{Var}[W(t) - W(s)] = t - s$; $\forall 0 \leq s \leq t$
- Para $0 \leq s \leq t \leq T$, $W(t) - W(s) \sim \sqrt{t - s} \cdot N(0, 1)$

O processo de Wiener no intervalo de tempo $\Delta t = t - s$, com $0 \leq s < t \leq T$, é representado por números extraídos aleatoriamente de uma distribuição normal com média $\mu = 0$ e variância $\sigma = \Delta t$, ou seja:

$$W_{\Delta t} = N(0, \Delta t) \quad (4.4)$$

A Eq. (4.4) pode ser colocada na forma equivalente:

$$W_{\Delta t} = \sqrt{\Delta t} \cdot N(0,1) \quad (4.5)$$

onde $N(0,1)$ representa os números extraídos aleatoriamente de uma distribuição normal padrão, ou seja, uma distribuição normal com média $\mu = 0$ e desvio padrão $\sigma = 1$.

O processo de Wiener é crucial na modelagem de processos estocásticos, uma vez que representa a integral do ruído idealizado que é independente da frequência, chamado ruído gaussiano branco. O processo de Wiener, muitas vezes, é considerado para representar o acaso ou influências externas sobre um sistema dinâmico que, por uma variedade de razões, não pode ser modelado deterministicamente (FADUGBA et al, 2013).

4.3.5 RÚIDO GAUSSIANO BRANCO

O ruído gaussiano branco, $\varepsilon(t)$, descreve flutuações em equações diferenciais estocásticas, como, por exemplo, nas equações de Itô e Stratonovich. Este ruído pode ser considerado, formalmente, como a derivada (não existente), em um intervalo de tempo “ t ”, de um processo de Wiener, W_t (KLOEDEN e PLATEN, 1999).

Seja W_t , $t \geq 0$, o processo de movimento browniano ou processo de Wiener. A derivada convencional \dot{W}_t , $t \geq 0$, é definida como ruído gaussiano branco através da equação abaixo, SOONG (1973):

$$\varepsilon(t) = \frac{dW_t}{dt} \quad (4.6)$$

O ruído gaussiano branco não existe do ponto de vista matemático como uma função estocástica (VAN KAMPEN, 2007), pois a derivada da Eq. (4.6) não existe para alguns pontos (picos) da trajetória de W_t , pois as tangentes à esquerda e à direita destes pontos são diferentes entre si. Mesmo assim, a maioria dos autores, por exemplo, KLOEDEN e

PLATEN (1999) e SOONG (1973) definem $\varepsilon(t)$ pela Eq. (4.6) e esta mesma estratégia será utilizada aqui.

4.3.6 PROCESSO DE ITÔ

A generalização do Movimento Browniano, conhecida como Processo de Ito, é dada pelas seguintes equações (NORONHA, 2012):

$$dY_t = a(y, t).dt + b(y, t).dW_t \quad (4.7)$$

ou

$$\frac{dY_t}{dt} = a(y, t) + b(y, t).\varepsilon(t) \quad (4.8)$$

onde $a(y, t)$ é o coeficiente de arraste, $b(y, t)$ é o coeficiente de difusão, “t” é o tempo, W_t é o processo estocástico de Wiener e $\varepsilon(t)$ é o ruído gaussiano branco.

4.4 EQUAÇÃO DE FOKKER-PLANCK

A equação de Fokker-Planck também é chamada de equação de Smoluchowski, ou então de Equação de Difusão Generalizada, ou ainda de Segunda Equação de Kolmogorov. É usada como um modelo para um processo de Markov mais geral. Assim, devem ser consideradas transições entre estados próximos ou “pequenos saltos”, como são chamados (VAN KAMPEN, 2007, RISKEN, 1984, GARDINER, 1983). A probabilidade associada ao processo estocástico Y_t pode ser determinada utilizando-se a equação de Fokker-Planck (HOTTOVY, 2011).

No início, seu uso principal estava associado com uma descrição aproximada de alguns processos de Markov discretos cujos saltos individuais entre estados eram considerados pequenos. Neste sentido, a equação de Fokker-Planck foi utilizada por RAYLEIGH (1891, 1902), EINSTEIN (1905, 1906), VON SMOLUCHOWSKI (1906, 1916) e FOKKER (1914). Em seguida, PLANCK (1917) formulou uma equação de Fokker-Planck geral para pequenos saltos. Finalmente, KOLMOROGOV (1931) apresentou uma dedução matemática na qual considerava o limite infinitesimal de saltos entre estados.

A Equação de Fokker-Planck (4.6) pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial P(y,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} A(y,t)P + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} B(y,t)P \quad (4.9)$$

onde $a(y,t) = A(y,t)$ e $b(y,t) = [B(y,t)]^{1/2}$.

Ao resolver-se uma equação de Fokker-Planck, obtêm-se funções de distribuições, a partir das quais quaisquer valores médios de variáveis macroscópicas podem ser determinados por integração. Deve-se observar que o uso da equação de Fokker-Planck não está restrito a sistemas em equilíbrio e nem mesmo próximo a ele. Desta forma, esta equação descreve não apenas as propriedades estacionárias dos sistemas, mas também a dinâmica do próprio sistema, através da sua solução dependente do tempo.

Os coeficientes $A(y,t)$ e $B(y,t)$ são funções diferenciáveis reais com a única restrição $B(y,t) > 0$, pois a equação de Fokker-Planck é uma equação diferencial de segunda ordem. O primeiro termo do membro direito é chamado termo de transporte, termo de convecção, ou termo de arraste e $A(y,t)$ é identificado como coeficiente de arraste. O segundo termo é conhecido por termo de difusão ou termo de flutuação e a função $B(y,t)$ é identificada como coeficiente de difusão (VAN KAMPEN, 2007).

As funções $A(y,t)$ e $B(y,t)$ podem ser interpretadas, respectivamente, como a média e a variância dos saltos de todos os tamanhos possíveis da profundidade da corrosão, ao longo do tempo, partindo de um estado y_0 .

É de extrema relevância para esta tese a interpretação das funções $A(y,t)$ e $B(y,t)$ da equação de Fokker-Planck como momentos de uma distribuição de probabilidades, os chamados “momentos de saltos”. O termo salto, aqui, deve ser entendido como transição entre estados.

4.5 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS (EDE)

O estudo de equações diferenciais estocásticas desempenha um papel de destaque em várias áreas, como biologia, física, dinâmica populacional, finanças e economia.

Equações diferenciais estocásticas se tornaram modelos padrão para grandezas financeiras, tais como preços dos ativos e taxas de juros.

Quando um sistema está sujeito a influências de flutuações externas, suas equações de movimento são equações diferenciais com coeficientes aleatórios. Na maioria dos casos, estas equações podem ser solucionadas de forma exata ou aproximada. Em particular, quando flutuações são fracas e rápidas, uma expansão sistemática conduz a equações aproximadas explícitas.

Uma equação diferencial estocástica é uma equação referente a um processo estocástico e seus componentes determinísticos e aleatórios, assim resultando em uma solução que é em si um processo estocástico (FADUGBA et al, 2013).

Outra importante definição de equações diferenciais estocásticas é dada por VAN KAMPEN (2007), que afirma que equações diferenciais estocásticas são equações diferenciais cujos coeficientes são números aleatórios ou funções aleatórias da variável (ou variáveis) independente. Dessa forma, a equação diferencial estocástica é uma ferramenta apropriada para descrever sistemas com ruído externo.

A forma geral de uma equação diferencial estocástica é (VAN KAMPEN, 2007):

$$\dot{u} = F(u, t, Y(t)) \quad (4.10)$$

onde u e F podem ser vetores, e $Y(t)$ representa uma ou mais funções aleatórias cujas propriedades estocásticas são dadas. Esta equação, juntamente com uma condição inicial $u(t_0) = a$, determina, para cada realização particular $y(t)$, uma função $U(t; [y], a)$, que é função de $y(t)$, isto é, $U(t; [y], a)$ depende de todos valores $y(t')$ para $0 \leq t' \leq t$. O conjunto de soluções de $U(t; [y], a)$ para todos possíveis valores de $y(t')$ constitui um processo estocástico. A Eq. 4.17 é resolvida quando as propriedades estocásticas deste processo são encontradas. Às vezes, a condição inicial a é, também, uma função ou um vetor aleatório. Assim, o processo aleatório $U(t; [y], a)$ é função das variáveis aleatórias a e $y(t)$. De fato, na maior parte da literatura, o nome “equação diferencial estocástica” é restrita à equação de Itô.

4.6 EQUAÇÃO DIFERENCIAL DE ITÔ

Uma classe especial de equações diferenciais estocásticas que possui importantes aplicações na teoria de controle, geologia, tratamento de resíduos biológicos, hidrologia, estruturas mecânicas, entre outras, é a equação de Itô.

Um processo estocástico descrito por uma probabilidade condicional satisfazendo a equação de Fokker-Planck é equivalente à equação diferencial estocástica de Itô (GARDINER, 1983), a seguir:

$$dY_t = A(y,t)dt + \sqrt{B(y,t)}dW_t \quad (4.11)$$

onde o Y_t (vetor estocástico) tem somente componentes de ruído branco, W_t é o processo de Wiener ou movimento browniano (abordado no item 4.3.4) e que obedece à relação (conforme Eq. 4.4):

$$dW_t = \sqrt{t_{n+1} - t_n} \cdot N(0,1)_{t_{n+1}} \quad (4.12)$$

e $N(0,1)$ é uma variável gaussiana de média zero e variância 1.

A popularidade deste modelo em aplicações de controle e filtragem é devido a duas razões principais. A primeira, é a simplicidade matemática. Este modelo é uma extensão estocástica natural da poderosa abordagem de espaço de estados na teoria de controle. Além do mais, o processo de solução gerado pela Eq. (4.11) é markoviano (SOONG, 1973).

A segunda razão é que embora o ruído branco ($\varepsilon=dW/dt$ – processo de Wiener) seja um artifício matemático, ele se aproxima muito do comportamento de uma série de processos de ruído importantes em sistemas elétricos e eletrônicos.

A equação de Itô possui duas características relevantes. Em primeiro lugar, é uma equação diferencial ao invés de uma equação integro-diferencial, o que a torna mais fácil de trabalhar. Todavia, a segunda característica é ainda mais importante. Deve-se observar que não é necessário conhecer as taxas de transição entre todos os estados. Ao invés disso, é suficiente apenas que se conheçam as funções $A(y,t)$ e $B(y,t)$. E sucede

que tais funções podem ser determinadas, para quaisquer processos estocásticos, a partir de uma quantidade mínima de informação sobre os mecanismos estocásticos subjacentes.

Assim, para um modelo onde seja possível a transição entre os muitos estados, será necessário conhecer as taxas de transição entre todos eles, o que nem sempre é uma tarefa simples (NUREG/CR-6415, 1996, FLEMING, 2004).

CAPÍTULO 5 APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL ESTOCÁSTICA DE ITÔ AO ESTUDO DE UMA TUBULAÇÃO CORROÍDA DE ANGRA I

5.1 GERAL

O objetivo deste capítulo é apresentar uma modelagem da evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão, de uma tubulação que sofre afinamento de sua parede por corrosão acelerada pelo escoamento, através de uma equação diferencial estocástica de Itô.

Veseley e colaboradores foram os primeiros a aplicar as equações discretas de Markov ao estudo da degradação de componentes ativos de uma usina nuclear (NUREG/CR-5612, BNL-NUREG-52252, 1991) e Fleming foi o primeiro a aplicar tais equações ao estudo da degradação de tubulações de uma planta nuclear (FLEMING, 2004). Esta é a primeira vez que se aplica a equação diferencial estocástica de Itô à evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão acelerada pelo escoamento.

Assim, nesta tese aborda-se a evolução da profundidade de um ponto de corrosão como um processo markoviano, contínuo no tempo e com espaço de estados também contínuo.

Esta abordagem ao problema é inédita, uma vez que não há registro bibliográfico da aplicação da equação diferencial estocástica de Itô ao estudo de corrosão em tubulações.

A modelagem da evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão acelerado pelo escoamento através de uma equação diferencial estocástica de Itô é mais simples do que as modelagens discretas existentes, porque não se necessita conhecer as taxas de transição entre os vários estados, o que nem sempre é uma tarefa simples.

Apenas as funções $A(y,t)$ e $B(y,t)$ que definem a equação diferencial estocástica de Itô específica do problema precisam ser conhecidas, o que é possível através de uma quantidade mínima de informações sobre os mecanismos estocásticos subjacentes, que podem ser extraídas a partir dos dados de inspeção e manutenção de tubulações.

Um procedimento de inspeção muito comum na indústria nuclear e de óleo e gás é o que faz uso de ultrassom. Através deste procedimento, são mapeados os pontos de corrosão de uma tubulação e seu uso sistemático pode fornecer informações sobre a evolução da profundidade da corrosão e o respectivo comprometimento da sua integridade estrutural.

A corrosão acelerada pelo escoamento pode afetar praticamente toda a tubulação de aço carbono e componentes de reatores nucleares. A presença de afinamento de parede de tubulações causada pela corrosão acelerada pelo escoamento é determinada através do uso de técnicas de análise não destrutiva (SMITH, 2014).

Não é imperativo para o método que se apresenta aqui que o procedimento de inspeção seja o *ultrassom*. Levando em consideração que a Eletronuclear utilizava este método de inspeção nas tubulações de Angra I, e ainda que os dados utilizados nesta tese são reais e foram fornecidos pela Eletronuclear, este foi o procedimento que se escolheu para apresentar o caso em questão para o qual se conhecem o perfil da espessura da parede ao longo da tubulação e a respectiva distribuição de frequências da profundidade da corrosão.

5.2 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM

Uma tubulação, como qualquer equipamento, sofre degradação. A degradação pode ocorrer pela ação de condições de operação, de fatores ambientais e de fatores geológicos, dentre outros.

No início, uma tubulação tem sua espessura de parede adequadamente dimensionada para as condições daquele momento (ASME B.31.8, 1991). Portanto, os valores dos parâmetros de operação e processo podem variar num certo intervalo e ainda assim a tubulação irá operar numa condição segura. O tamanho destes intervalos caracteriza os fatores de segurança de engenharia.

Entretanto, à medida que o tempo passa, a degradação avança e, mesmo nos casos onde os programas de manutenção são rigorosos, as margens de segurança diminuem com o tempo, o que significa que os valores dos parâmetros de processo podem não ser mais

seguros.

Ferramentas amplamente empregadas em avaliações de integridade de tubulações são o ultrassom manual e os vários tipos de *PIG* instrumentados. Dentre os tipos de ultrassom mais comuns e que se aplicam à determinação e evolução da profundidade de pontos de corrosão, estão os com técnica de inspeção pulso-eco, com técnica de transparência e o com técnica de imersão (ANDREUCCI, 2006).

O ultrassom com técnica pulso-eco utiliza somente um transdutor que é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material. Nesta técnica, o transdutor é acoplado somente em um lado do material, podendo ser verificada a profundidade da descontinuidade, suas dimensões e localização na peça.

O ultrassom com técnica de transparência faz uso de dois transdutores separados, um transmitindo e outro recebendo as ondas ultrassônicas. Nesta técnica é necessário acoplar os transdutores nos dois lados da peça, de forma que estes estejam perfeitamente alinhados. Neste tipo de inspeção não se pode determinar a posição da descontinuidade, sua extensão, ou localização na peça, pois é somente um ensaio do tipo passa-não passa.

O ultrassom com técnica de imersão emprega um transdutor de imersão à prova d'água preso a um dispositivo. O transdutor pode se movimentar, tanto na distância até a peça quanto na inclinação do feixe de entrada na superfície da peça. Nesta técnica, a peça é colocada dentro de um tanque com água, propiciando um acoplamento sempre homogêneo.

Os sons produzidos em um ambiente qualquer refletem-se ou reverberam nas paredes que constituem o mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Fenômenos como este, apesar de simples e de serem frequentes em nossa vida cotidiana, constituem os fundamentos do ensaio ultrassônico de materiais.

Basicamente, o aparelho de ultrassom contém circuitos eletrônicos especiais que permitem transmitir ao cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultrassônicas. Os sinais

captados no cristal são mostrados na tela em forma de pulsos luminosos denominados ecos, que podem ser regulados tanto na amplitude como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material. O aparelho de ultrassom é basicamente um osciloscópio projetado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação: $S = V \times T$ onde o espaço percorrido (S) é proporcional ao tempo (T) e à velocidade de propagação (V) do material.

O ensaio por ultrassom é um método não-destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não-ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componente a ser examinada como, por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, microtrincas em forjados, escórias em uniões soldadas, e muitos outros. Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo exame não-destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais.

O método ultrassônico possui alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, por exemplo:

- Trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia);
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção;
- No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme que, via de regra, demanda tempo do informe de resultados;
- Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o ensaio ultrassônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para a sua aplicação;
- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico.

O julgamento da descontinuidade encontrada deve ser feita de acordo com o procedimento escrito, norma aplicável, especificação do cliente, ou por outro documento da qualidade aplicável. Em geral, as descontinuidades são julgadas pelo seu

comprimento e amplitude do eco de reflexão, que são quantidades mensuráveis pelo inspetor de ultrassom.

Avaliações de integridade servem para determinar se na data da inspeção os valores dos parâmetros se mantêm no interior de margens de segurança (ASME B31G, 2003 e Recommended Practice, DNV-RP-F101, 1999). Além disso, seus resultados podem ser usados para apontar uma data máxima para uma operação segura baseada numa análise de tendência (BRAVERMAN *et. al.*, 2005).

5.3 CASO A SER MODELADO

Os dados da aplicação do ultrassom utilizados nesta tese foram fornecidos pela Eletronuclear para a montagem da Tabela 5.1. Estes dados são reais e provenientes das linhas de água de serviço da usina nuclear Angra I. O aparelho de medição de espessura de parede de tubulações por ultrassom utilizado foi o pulso-eco de ondas longitudinais.

Os resultados de uma corrida de ultrassom se referem às características dos defeitos nas paredes da tubulação tais como: tipo de defeito e sua dimensão. A tabela a seguir apresenta os dados de profundidade máxima dos pontos de corrosão obtidos para uma corrida de ultrassom de uma tubulação de Angra I de 12,7 milímetros de espessura inicial de parede.

Tabela 5.1. Resultados para uma corrida de ultrassom de uma tubulação de Angra I

Ponto nr	Tubulação 1	Ponto nr	Tubulação 1
	Profundidade do		Profundidade do
	ponto de corrosão		ponto de corrosão
	após 3,5 anos		após 3,5 anos
	(mm)		(mm)
001	2,1	060	2,2
002	2,0	061	2,2
003	1,9	062	2,7
004	2,1	063	2,7
005	2,7	064	2,4
006	3,2	065	2,3
007	2,8	066	2,4
008	2,0	067	2,4
009	2,0	068	2,3
010	1,9	069	2,3
011	1,7	070	2,2
012	2,5	071	2,3

013	2,4	072	2,4
014	3,0	073	2,5
015	2,5	074	2,5
016	2,5	075	2,5
017	2,5	076	2,6
018	2,4	077	2,7
019	2,3	078	2,7
020	2,1	079	2,8
021	2,9	080	2,7
022	2,4	081	2,9
023	3,2	082	2,7
024	2,3	083	2,7
025	2,4	084	2,8
026	2,4	085	2,4
027	2,2	086	2,7
028	2,1	087	2,7
029	2,0	088	2,7
030	2,6	089	2,8
031	2,0	090	2,7
032	2,1	091	2,8
033	2,2	092	2,7
034	2,3	093	2,6
035	2,3	094	2,7
036	2,2	095	2,6
037	2,1	096	2,2
038	2,0	097	2,1
039	1,9	098	2,3
040	1,8	099	2,3
041	2,1	100	2,2
042	2,4	101	2,4
043	2,1	102	2,3
044	2,2	103	2,4
045	2,0	104	2,5
046	2,0	105	2,6
047	2,0	106	2,5
048	2,1	107	2,2
049	2,2	108	2,5
050	2,1	109	2,1
051	2,1	110	2,0
052	2,5	111	2,8
053	2,2	112	2,9
054	2,2	113	2,8
055	2,2	114	2,8
056	2,1	115	2,6
057	2,0	116	1,8
058	2,1	117	2,7
059	2,2	118	1,5

As Figuras 5.1 e 5.2 revelam, respectivamente, a distribuição de frequências da profundidade dos pontos de corrosão ao longo da tubulação e o perfil que dela decorre. Estes resultados estão apresentados graficamente nas Figuras 5.1 e 5.2 e utilizaram os dados da Tabela 5.1.

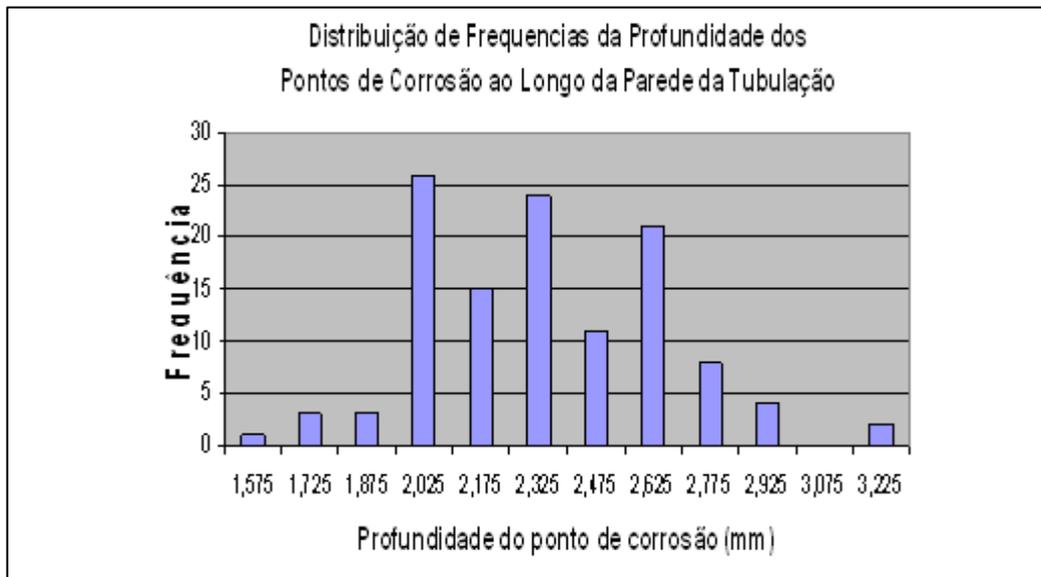


Figura 5.1 – Distribuição de frequências da profundidade dos pontos de corrosão ao longo da parede da tubulação.

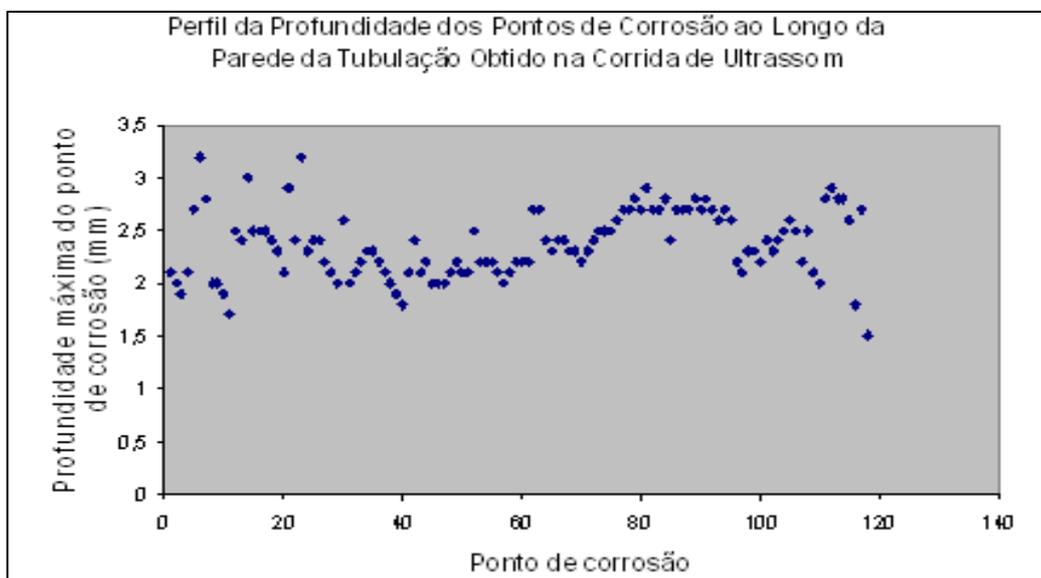


Figura 5.2 – Perfil da profundidade dos pontos de corrosão ao longo da parede da tubulação.

A distribuição de frequência da profundidade do ponto de corrosão de corrosão ao longo da parede da tubulação registrado pelo ultrassom é apresentado na Figura 5.1.

Na Figura 5.2 são apresentados os valores da profundidade máxima de cada ponto de corrosão ao longo da parede da tubulação que foi registrado pelo ultrassom na campanha ocorrida após 3,5 anos de operação.

5.4 CRITÉRIOS DE ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS (OUTLIERS)

Algumas vezes, uma medida de uma série de medições parece discordar fortemente de todas as outras. Quando isso acontece, o experimentalista deve decidir se a medida anômala resultou de algum erro, devendo ser rejeitada, ou se foi uma medida autêntica, que deve ser usada juntamente com as demais.

Infelizmente, estabelecer uma causa externa para o resultado anômalo é geralmente impossível. Deve-se decidir rejeitar ou não a anomalia simplesmente pelo exame dos próprios resultados.

A rejeição de dados é um problema controverso, sobre o qual os especialistas discordam. Além do mais, a decisão de rejeitar um dado é, em última análise, uma questão subjetiva, e o cientista que toma a decisão pode, com razão, ser acusado por outro cientista de estar “forçando” o dado. A situação se torna ainda pior com a possibilidade de que o resultado anômalo possa refletir algum efeito importante. Na verdade, muitas descobertas científicas essenciais primeiramente pareciam medidas anômalas que sugeriam erros (TAYLOR, 2012)

Os dados com as profundidades de corrosão de tubulações fornecidos pela ETN passaram por uma análise de eliminação de dados espúrios, o que justifica a apresentação deste item.

5.4.1 CRITÉRIO DE CHAUVENET

O critério de Chauvenet oferece uma aplicação simples e instrutiva da distribuição gaussiana. Este critério afirma que, se o número esperado de medidas que estão no mínimo tão afastadas quanto a medida suspeita for menor que um meio ($1/2$), então a medida suspeita deve ser rejeitada. Obviamente, a escolha ($1/2$) é arbitrária (TAYLOR, 2012).

A aplicação do critério de Chauvenet para um problema geral pode ser descrita como um critério onde todos os dados que se encontram dentro de um “desvio máximo” são considerados prováveis. Por outro lado, aqueles que caem fora deste “desvio máximo” devem ser rejeitados.

Suponha um experimento de N medições de uma única grandeza x, obtendo

$$x_1, \dots, x_N$$

A partir das N medidas, é possível calcular \bar{x} e σ_x . Se uma das medidas, x_{sus} , difere de \bar{x} , parecendo suspeita, então é possível determinar t_{sus}

$$t_{sus} = \frac{|x_{sus} - \bar{x}|}{\sigma_x} \quad (5.1)$$

o número de desvios padrão pelo qual x_{sus} difere de \bar{x} . A seguir, a partir do Apêndice D, é possível determinar a probabilidade

$$\text{Prob (fora de } t_{sus}\sigma) = 1 - \text{Prob (dentro de } t_{sus}\sigma)$$

de que uma medida legítima diferirá de \bar{x} por t_{sus} ou mais desvios padrão. Finalmente, multiplicando por N, o número total de medidas, é

$$\begin{aligned} n &= (\text{número esperado tão afastado quanto } x_{sus}) \\ &= N \cdot \text{Prob (fora de } t_{sus}\sigma) \end{aligned}$$

Se este valor esperado n for menor do que (1/2), então, de acordo com o critério de Chauvenet, x_{sus} pode ser rejeitado.

Se x_{sus} for rejeitado, deve-se recalcular \bar{x} e σ_x usando apenas os dados remanescentes; em particular, o resultado final para x será essa nova média com uma incerteza igual ao novo desvio padrão da média.

5.4.2 CRITÉRIO DE PEIRCE

O critério de Peirce é um método rigoroso baseado na teoria da probabilidade que pode ser usado para eliminar dados espúrios de um modo racional. Atualmente, o critério de Chauvenet é usado em muitas instituições educacionais e laboratórios para realizar esta função. Embora o critério de Chauvenet esteja bem consagrado, ele faz hipóteses arbitrárias em relação à rejeição de dados (ROSS, 2003). Além do mais, o critério de Chauvenet não faz distinção entre o caso de um ou vários valores de dados suspeitos, enquanto que o critério de Peirce é uma teoria rigorosa que pode ser facilmente aplicada no caso de vários valores de dados suspeitos.

O método para determinar se os valores dados devem ser rejeitados envolve as etapas abaixo:

1. Calcular a média e o desvio padrão da amostra completa de dados;
2. Obter R que corresponde ao número de medições tomadas da tabela de Peirce (Apêndice E). Deve-se assumir o caso de uma observação duvidosa primeiro, mesmo se existir mais que uma;
3. Calcular o desvio máximo permitido: $|x_i - x_m|_{\max}$;
4. Para qualquer medida de dado suspeito, obter $|x_i - x_m|$;
5. Eliminar as medidas suspeitas se:

$$|x_i - x_m| > |x_i - x_m|_{\max}$$

6. Se o passo anterior resultar na rejeição de uma medida, assumir o caso de duas observações duvidosas, mantendo os valores originais da média e do desvio padrão, e o número original de medidas. Ir para o passo 8.
7. Se mais que uma medida for rejeitada no teste acima, assumir o próximo valor mais alto de observações duvidosas. Por exemplo, se duas medidas forem rejeitadas no passo 5, assumir o caso de três observações duvidosas, mantendo os valores originais da média, e o número original de medidas.
8. Repetir os cálculos acima (passos 2-5) sequencialmente, aumentando o número de possibilidades de medidas duvidosas, até que nenhuma medida seja eliminada.
9. Por fim, obter o novo valor da média e desvio padrão do conjunto reduzido de dados.

É recomendado que o critério de Peirce seja usado ao invés do critério de Chauvenet para a eliminação de dados suspeitos pelas seguintes razões:

- A formulação de Peirce é mais rigorosa;
- O critério de Peirce não faz hipóteses arbitrárias em relação à rejeição de dados (ROSS, 2003);
- O critério de Peirce, teoricamente, considera os casos onde há mais que uma observação suspeita. O critério de Chauvenet, não.
- O método de Peirce pode ser facilmente seguido usando a tabela do Apêndice E.

Todavia, a tabela utilizada no critério de Peirce contém valores para, no máximo, 60 medidas.

5.4.3 CRITÉRIO DO ESCORE PADRONIZADO (Z_i)

Neste critério, consideram-se como dados falsos aqueles cujos escores, em valor absoluto, sejam maiores que 3. O escore padronizado (Z_i) é calculado pela diferença entre o valor do dado e a média do conjunto, dividido pelo desvio padrão do mesmo conjunto de dados (MARTINS, 2011).

Suponha-se um experimento de N medições de uma única grandeza x , obtendo

$$x_1, \dots, x_N$$

A partir das N medidas, é possível calcular \bar{x} e σ_x . Para cada medida, obtém-se o valor Z_i (escore padronizado) através da equação:

$$Z_i = \frac{|x_N - \bar{x}|}{\sigma_x} \quad (5.2)$$

Se Z_i for maior que 3, a medida deve ser rejeitada. Se Z_i for menor que 3 a medida deve ser mantida. Este procedimento deve ser recalculado até que nenhuma medida seja descartada (MARTINS, 2011).

O critério do escore padronizado foi escolhido para o tratamento dos dados desta tese

pelos seguintes motivos: não usa hipóteses arbitrárias e não há limitação do número de dados a serem tratados.

5.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO A SER EMPREGADO

A construção de um modelo para determinar a evolução da profundidade de um ponto de corrosão ao longo da parede de uma tubulação baseada na equação diferencial estocástica de Itô requer a determinação das funções $A(y,t)$ e $B(y,t)$, que são específicas do caso que se pretende modelar.

Como já foi observado na Seção 4.8, tais funções podem ser determinadas, para quaisquer processos estocásticos, a partir de uma quantidade mínima de informação sobre os mecanismos estocásticos subjacentes.

Para determinar os coeficientes $A(y,t)$ e $B(y,t)$, em princípio, seria necessário uma grande número de medidas da profundidade de corrosão de cada ponto para que a média e a variância pudessem ser calculadas, ou seja, necessita-se de dados de múltiplas inspeções em linha (múltiplas corridas de ultrassom). No entanto, este procedimento torna-se inviável, uma vez que tais inspeções têm periodicidade normalmente ditada por normas técnicas ou padrões corporativos e por serem caras. Além do mais, seria necessário um longo tempo para que todas as inspeções fossem executadas e uma quantidade de dados significativos para cada ponto de corrosão fosse coletada para a aplicação deste modelo. Tal procedimento poderia levar os resultados desta metodologia a estarem prontos somente próximo ao fim da vida útil da tubulação.

Desta forma, em vez de considerarmos uma evolução temporal para a profundidade de cada ponto de corrosão, ou seja, um sistema onde cada ponto de corrosão tem um valor de profundidade para as diversas inspeções ao longo de sua vida útil, pensa-se em um conjunto estatístico composto por um número muito grande de réplicas do sistema original. Em outras palavras, aplicaremos o conceito de *ensemble* (canônico) de Gibbs (GIBBS, 1902), que permite considerar um conjunto estatístico composto por um número muito grande de pontos de corrosão ao longo da tubulação em um único instante de tempo.

Do ponto de vista da mecânica estatística, um ensemble canônico é um ensemble

estatístico que se usa para representar os estados possíveis de um sistema em equilíbrio térmico de um reservatório térmico, de modo que os diversos estados do sistema podem diferir em relação a sua energia total. A composição, volume e forma do sistema são os mesmos em todos os seus estados possíveis.

O ensemble canônico é o que descreve os possíveis estados de um sistema isolado em equilíbrio térmico com um reservatório térmico. Neste caso, o ensemble canônico se aplica exatamente a sistemas de qualquer tamanho.

Embora seja necessário assumir que o reservatório térmico seja muito grande (um limite macroscópico), o sistema em si pode ser pequeno ou grande.

A variável termodinâmica do ensemble canônico é a temperatura absoluta (T). O ensemble canônico também depende de variáveis mecânicas, tais como o número de partículas no sistema (N) e o seu volume (V), sendo denominado ensemble NVT, pois cada uma destas grandezas é uma constante do ensemble.

O conjunto canônico atribui uma probabilidade P a cada microestado distinto, dado por $P = e^{\frac{A-E}{kT}}$, onde E é a energia do microestado e k é a constante de Boltzmann. A representa a energia livre de Helmholtz, sendo uma constante para o ensemble. Esta energia mede o trabalho útil que se pode obter de um sistema termodinâmico fechado a uma temperatura constante.

Duas das principais propriedades de um ensemble canônico são descritas a seguir:

- O ensemble canônico é univocamente determinado para um dado sistema a uma dada temperatura, não dependendo de escolhas arbitrárias (unicidade);
- Um ensemble canônico não evolui em função do tempo, embora o sistema subjacente esteja em constante movimento, pois o ensemble canônico é função somente de uma grandeza do sistema que se conserva (energia), o que caracteriza equilíbrio estatístico.

Dadas as características do sistema em estudo, o caso desta tese pode utilizar o conceito de ensemble.

GIBBS (1902) propôs que fossem realizadas médias de um conjunto estatístico composto por sistemas estatisticamente representativos, ao invés da média temporal. Desse modo, para um único intervalo de tempo se constrói um conjunto estatístico representativo composto por um número muito grande de pontos de corrosão ao longo de uma tubulação.

O conjunto estatístico representativo para o estudo de caso a ser realizado nesta tese pode ser obtido pelos dados de uma única corrida de ultrassom, desde que possua muitos pontos e muitas profundidades para a obtenção de resultados satisfatórios.

Os dados de uma corrida de ultrassom se referem aos diversos defeitos encontrados ao longo de uma tubulação e, portanto, não apenas a um único ponto. Entretanto, num trecho da tubulação onde as propriedades do fluido, da operação, do processo e da própria tubulação não flutuam significativamente de um ponto a outro, as várias profundidades neste trecho podem ser pensadas como estatisticamente equivalentes à distribuição das várias profundidades de um único ponto (FRANKEL, 1998, SHIBATA, 1996, TAKEYAMA, 1976).

O parágrafo anterior ratifica que a distribuição de profundidades dos vários pontos de corrosão ao longo de uma tubulação, obtidos numa corrida de ultrassom podem ser utilizados como conjunto estatístico de profundidades do único ponto de corrosão cuja evolução temporal se está modelando.

Aplicando o conceito de GIBBS aos coeficientes $A(y,t)$ e $B(y,t)$, respectivamente, coeficientes de arraste e difusão, pode-se eliminar sua dependência temporal e representá-los como coeficientes $A(y)$ e $B(y)$.

Como foi apresentado no Capítulo 4, os coeficientes agora definidos como $A(y)$ e $B(y)$ podem ser interpretadas como média e variância de saltos de todos os tamanhos possíveis da profundidade da corrosão, partindo do estado y_0 .

Considerando a probabilidade de transição, $P(y,t | y_0,t_0)$, com $t = t_0 + \Delta t$ e Δt muito pequeno, os coeficientes $A(y_0)$ e $B(y_0)$ podem ser determinados de acordo com VAN KAMPEN (2007),

$$\frac{\langle \Delta y \rangle}{\Delta t} = A(y_0) \quad (5.3)$$

e

$$\frac{\langle (\Delta y)^2 \rangle}{\Delta t} = B(y_0) \quad (5.4)$$

Ou seja, no intervalo de tempo Δt a partir de t_0 , o estado do sistema, isto é, a profundidade do ponto de corrosão, pode transitar para um novo estado cuja profundidade tem o valor y com uma dada probabilidade, ou outro valor com a respectiva probabilidade. A Figura 5.3 ilustra estas possibilidades.

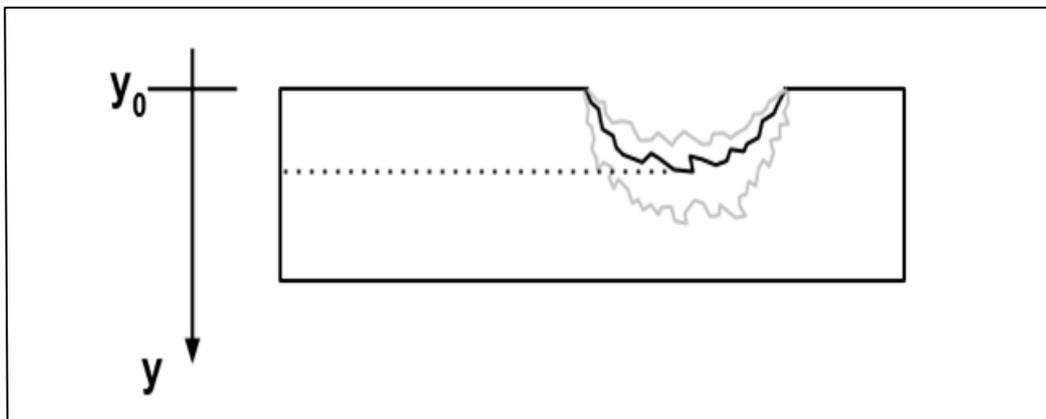


Figura 5.3 – Estados possíveis para transição a partir do estado y_0 .

Desta forma, a Eq. (5.3) significa que a função $A(y)$ no ponto y_0 é o valor médio das flutuações ($\Delta y = y - y_0$), em torno de y_0 , sendo dividido pelo intervalo de tempo. O mesmo ocorre para $B(y)$ no ponto y_0 , sendo que este é o valor médio do quadrado das flutuações, dividido pelo intervalo de tempo.

A média $\langle \Delta y \rangle$ e a variância $\langle (\Delta y)^2 \rangle$ para distribuições discretas podem ser calculadas a partir de (EBERLING, 1997):

$$\langle \Delta y \rangle = \mu = \sum_{\text{todo } y} yp(y) \quad (5.5)$$

e

$$\langle (\Delta y)^2 \rangle = \sigma^2 = \sum_{\text{todo } y} (y - \mu)^2 p(y) \quad (5.6)$$

Desta forma, a distribuição de profundidades dos vários pontos de corrosão ao longo de uma tubulação, obtidos numa corrida de ultrassom, podem ser usados como o conjunto estatístico de profundidades do único ponto de corrosão cuja evolução temporal se está modelando.

Assim, os dados das corridas de ultrassom podem ser utilizados na determinação das médias nas Equações (5.3) e (5.4) e o intervalo entre as corridas de ultrassom, como sendo o intervalo de tempo, Δt , presentes nestas equações.

A equação de Fokker-Planck é, por definição, uma equação linear na sua incógnita P.

A partir da resolução da equação de Fokker-Planck, é possível obter funções distribuições, através das quais quaisquer valores médios de variáveis macroscópicas podem ser determinados por integração. Cabe ressaltar que a equação de Fokker-Planck não está limitada a sistemas em equilíbrio ou próximo a ele. Assim, esta equação descreve não somente as propriedades estacionárias dos sistemas, mas também a dinâmica do sistema, em virtude de sua solução dependente do tempo.

Para o estudo proposto nesta tese, os coeficientes de arraste e difusão são constantes, pois são gerados através de dados de profundidade de corrosão da Tab. 5.1 e das Eqs. (5.3), (5.4), (5.5) e (5.6), que representam a média e variância destes pontos, o que modifica a Eq. (4.16) para

$$\frac{\partial P(y,t)}{\partial t} = -A \frac{\partial}{\partial y} P + \frac{1}{2} B \frac{\partial^2}{\partial y^2} P \quad (5.7)$$

Em relação à determinação da solução da equação de Fokker-Planck, esta pode ser obtida através do método da expansão em autofunções, a exemplo do que ocorre com as equações de difusão ou de onda (VAN KAMPEN, 2007, RISKEN, 1984, GARDINER, 1983).

A equação de Fokker-Planck também pode ser resolvida através do uso de métodos de

integração numérica (FORSYTHE e WASOW, 1967; SMITH, 1965).

A solução da Eq. (5.7) é encontrada em VAN KAMPEN (2007), RISKEN (1984) e GARDINER (1983):

$$P(y, t|0,0) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Bt}} \exp\left(-\frac{y^2}{4Bt} + \frac{A}{2B}y - \frac{A^2}{4B}t\right) \quad (5.8)$$

Observa-se que, para valores fixos de t , a densidade acima é gaussiana. A Figura 5.4 ilustra um exemplo do comportamento da distribuição de probabilidade de transição acima.

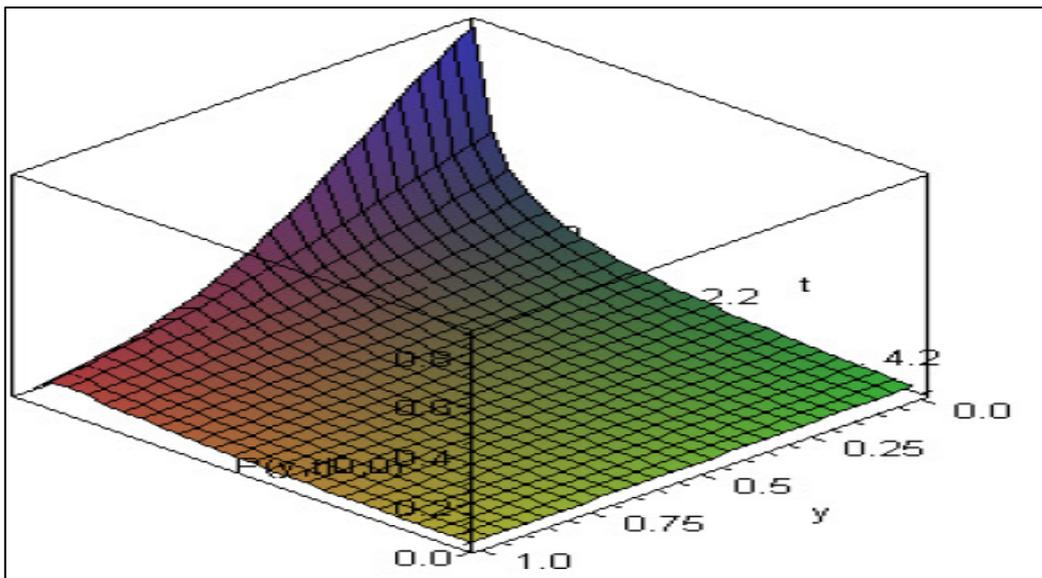


Figura 5.4 – Densidade de probabilidades de um movimento browniano com termo de arraste.

A Figura 5.5 ilustra um exemplo do comportamento da densidade de probabilidade como função da posição, para vários instantes de tempo.

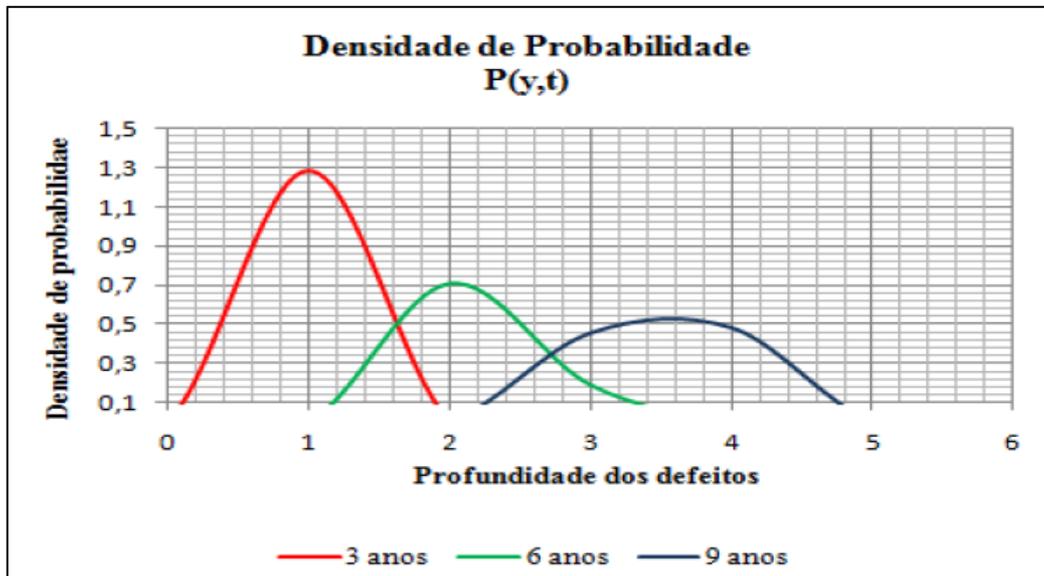


Figura 5.5 – Densidade de probabilidade como função da profundidade para vários instantes de tempo

A Figura 5.6 ilustra um exemplo do comportamento da distribuição de probabilidade da profundidade da corrosão para vários instantes de tempo.



Figura 5.6 – Distribuição de Probabilidades das profundidades de corrosão em vários instantes de tempo.

O objetivo em apresentar a equação de Fokker-Planck para esta tese está em complementar o estudo probabilístico a respeito da evolução temporal da profundidade

de um ponto de corrosão, já que esta equação fornece a evolução no tempo da densidade de probabilidade para vários valores de profundidade.

Aplicando o conceito de Gibbs à equação de Itô, é possível eliminar sua dependência temporal e considerando os coeficientes de arraste e difusão constantes, a Eq. (4.18) é modificada para:

$$dY_t = A dt + \sqrt{B} dW_t \quad (5.9)$$

Ao contrário dos modelos determinísticos, as equações diferenciais estocásticas têm soluções que são processos estocásticos contínuos no tempo (SAUER, 2012).

A solução de uma equação diferencial estocástica pode ser obtida de forma analítica ou numérica. A solução analítica pode ser determinada, por exemplo, através de métodos de integração; nesta proposta de tese, especificamente, será usada a integral de Itô. Por outro lado, a solução numérica pode ser encontrada por métodos de solução computacional baseados em técnicas similares para resolver equações diferenciais ordinárias, como por exemplo, métodos de Euler e Runge-Kutta .

O processo de solução gerada pela equação de Itô, que é um modelo linear para a análise de degradação em estudo, é markoviano, para as quais existem técnicas numéricas (Métodos de Euler-Maruyama, Milstein e Runge-Kutta) e analítica (Integral de Itô) para a obtenção de sua solução (SOONG ,1973).

No caso dos métodos de solução numérica, este estudo fará menção dos métodos de Euler-Maruyama, Milstein e Runge-Kutta, que são os mais utilizados para a solução de equações diferenciais estocásticas.

5.5.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS DE ITÔ COM COEFICIENTES CONTANTES

Seja a equação de Itô

$$dY_t = A dt + \sqrt{B} dW_t \quad (5.10)$$

De acordo com MISTURINI (2010), a integral estocástica de Itô pode ser resolvida da maneira descrita a seguir:

Seja um intervalo de tempo $t \in [0, T]$ definido como:

$$0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq T$$

Para o intervalo definido anteriormente, observa-se que a integral de Itô para um processo estocástico, $Y(t)$, pode ser representada pela seguinte equação (MISTURINI, 2010):

$$Y_t - Y_0 = A \int_0^t dt + \sqrt{B} \int_0^t dW_t \quad (5.11)$$

onde

$$\int_0^t dW_t = \sum_{n=0}^N W_{t_{n+1}} - W_{t_n} = \sum_{n=0}^N \sqrt{t_{n+1} - t_n} \cdot N(0,1)_{t_{n+1}} \quad (5.12)$$

Assim,

$$Y_t - Y_0 = At + \sqrt{B} \sum_{n=0}^N \sqrt{t_{n+1} - t_n} \cdot N(0,1)_{t_{n+1}} \quad (5.13)$$

Na verdade, a Eq.(5.13) possui dois componentes em sua formação. O primeiro é determinístico (primeiro termo da equação de Itô) e o segundo, estocástico (segundo termo da equação de Itô), que determina a possível variação ponto a ponto da profundidade da corrosão.

Neste caso de coeficientes A e B constantes, o componente determinístico é uma função linear que pode ser representada individualmente como apresentado na Figura 5.7.

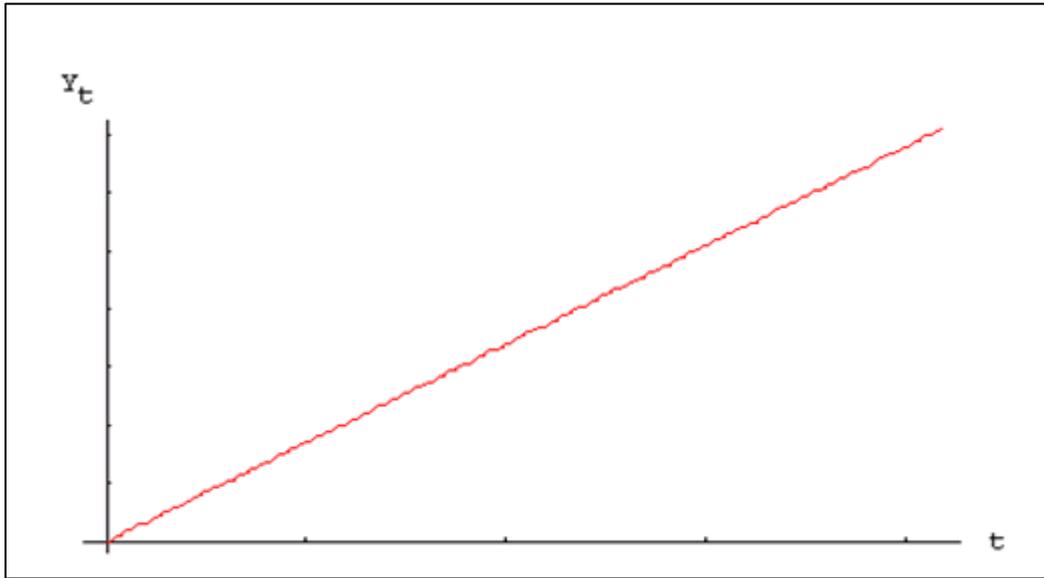


Figura 5.7 – Parte determinística da Equação de Itô ($b = 0$)

A segunda parte da Eq. (5.13), puramente estocástica, é influenciada pelos números extraídos de uma distribuição normal padrão que representam aleatoriedade ou influências externas sobre um sistema e pode ser visualizada individualmente como ilustrada na Figura 5.8.

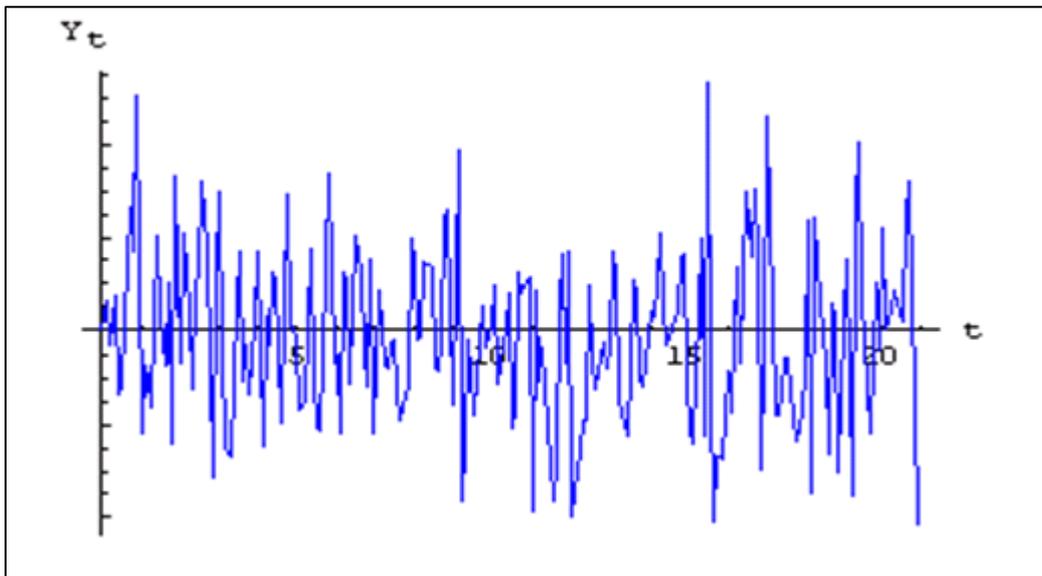


Figura 5.8 – Parte estocástica da Equação de Itô ($a = 0$)

Quando é realizada uma composição entre as partes determinística e estocástica da Eq. (5.13), temos a Figura 5.9 que representa a evolução temporal da equação de Itô com

variações ponto a ponto na variável Y_t devido ao ruído gaussiano branco (processo estocástico de Wiener).

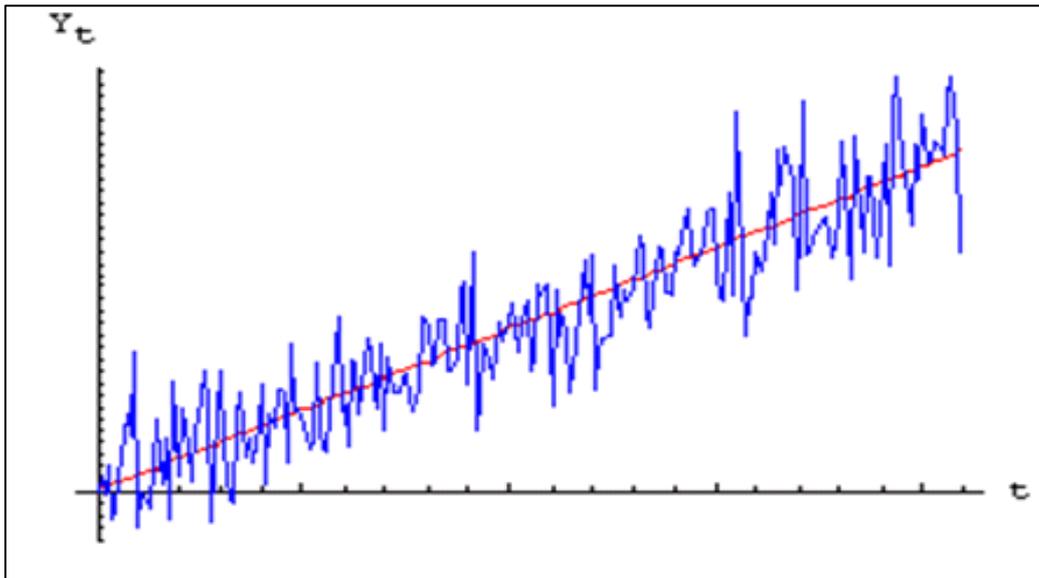


Figura 5.9 – Solução da equação de Itô completa ($a \neq 0$ e $b \neq 0$) em azul e solução determinística em vermelho

5.5.2 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A SOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS

Métodos numéricos para a solução de equações diferenciais estocásticas são essenciais para a análise de fenômenos aleatórios (SAUER, 2012), pois na maioria das vezes, tais equações não possuem solução analítica.

Existem muitos métodos numéricos desenvolvidos para a solução de equações diferenciais estocásticas (MAHONY, 2006; BURRAGE, 2014; KLOEDEN e PLATEN, 1999; SAYTO, 2014; AMINI, 2011 e SAUER, 2012), dentre os quais se destacam os métodos de Euler-Maruyama, Milstein e de Runge-Kutta para a solução das equações estocásticas (KLOEDEN e PLATEN, 1999).

Métodos de solução numérica de equações diferenciais estocásticas, geralmente, são prolongamentos de métodos aplicados na solução numérica de equações diferenciais ordinárias, combinados com simulação do termo estocástico. Alguns dos métodos são explícitos e alguns, implícitos. Os métodos são, também, classificados em fortemente ou fracamente convergentes.

5.5.2.1 MÉTODO DE EULER - MARUYAMA

A discretização mais simples no tempo de um processo estocástico de Itô é a aproximação de Euler-Maruyama (KLOEDEN e PLATEN, 1999).

O método de Euler-Maruyama utilizado na solução de equações diferenciais ordinárias estocásticas é o equivalente ao método de Euler para resolver equações diferenciais ordinárias determinísticas; apresentado sob o ponto de vista do algoritmo de Taylor, que simplifica consideravelmente a análise.

A aproximação de Euler é uma das mais simples aproximações discretas no tempo de um processo de Itô.

O método de Euler-Maruyama é o método numérico mais simples para resolver equações diferenciais estocásticas, mas tem convergência lenta (FADUGBA et al, 2013).

Seja Y_t um processo de Ito $t \in [t_0, T]$ satisfazendo a equação diferencial estocástica de Itô

$$dY_t = a(t, Y_t)dt + b(t, Y_t)dW_t, \quad Y_{t_0} = Y_0 \quad (5.14)$$

Para uma dada discretização $t_0 < t_1 < t_2 \dots < t_N = T$, uma aproximação de Euler-Maruyama é um processo estocástico Y_t em tempo contínuo, satisfazendo o seguinte esquema iterativo:

$$Y_{t_{n+1}} = Y_{t_n} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} a(t, y)dt + \int_{t_n}^{t_{n+1}} b(t, Y_t)dW_t \quad (5.15)$$

A primeira estratégia para o desenvolvimento de um algoritmo consiste em expandir a Eq. 5.14 em sua série de Taylor nos pontos (t_n, y_n) e $Y_n = Y_{t_n}$. Os termos envolvendo $(y - y_n)$ que surgem na expansão acima são sucessivamente substituídos pela expressão

$$Y_t = Y_{t_n} + \int_{t_n}^{t_1} a(t', y) dt' + \int_{t_n}^t b(t', y) dW_t \quad (5.16)$$

Expandindo em série de Taylor, as funções $a(t,y)$ e $b(t,y)$ acima, tornam-se

$$\begin{aligned} a(t, y) &= a(t_n + \delta t, y_n + \delta y) = a(t_n, y_n) + \frac{\partial a}{\partial t} \delta t + \frac{\partial a}{\partial y} \delta y + \dots \\ &= a(t_n, y_n) + \frac{\partial a}{\partial t} \left| \frac{t-t_n}{(t_n - y_n)} + \frac{\partial a}{\partial y} \left| \frac{y-y_n}{(t_n - y_n)} + \dots \right. \right. \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} b(t, y) &= b(t_n + \delta t, y_n + \delta y) = a(t_n, y_n) + \frac{\partial b}{\partial t} \delta t + \frac{\partial b}{\partial y} \delta y + \dots \\ &= a(t_n, y_n) + \frac{\partial b}{\partial t} \left| \frac{t-t_n}{(t_n - y_n)} + \frac{\partial b}{\partial y} \left| \frac{y-y_n}{(t_n - y_n)} + \dots \right. \right. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Substituindo as Eq. (5.17) e (5.18) na Eq. (5.15), obtém-se:

$$\begin{aligned} Y_{t_{n+1}} &= Y_{t_n} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \left(a(t_n, y_n) + \frac{\partial a}{\partial t} \left| \frac{t-t_n}{(t_n - y_n)} + \frac{\partial a}{\partial y} \left| \frac{y-y_n}{(t_n - y_n)} \right. \right) dt \\ &+ a(t_n, y_n) + \frac{\partial b}{\partial t} \left| \frac{t-t_n}{(t_n - y_n)} + \frac{\partial b}{\partial y} \left| \frac{y-y_n}{(t_n - y_n)} \right. \right) dW_t \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$Y_{t_{n+1}} = Y_{t_n} + a_n(t_{n+1} - t_n) + b_n(W_{t_{n+1}} - W_{t_n}) \quad (5.20)$$

A Eq. (5.20) é chamada método de Euler Maruyama e $W_{t_{n+1}} - W_{t_n} = \sqrt{t_{n+1} - t_n} \cdot N(0,1)$, processo de Wiener, conforme mencionado anteriormente, e $N(0,1)$ representa números extraídos aleatoriamente de uma distribuição normal padrão.

5.5.2.2 MÉTODO DE MILSTEIN

O método de Milstein é o esquema de Euler-Maruyama com o termo $\frac{1}{2}b\frac{\partial b}{\partial x}[(dW_t)^2 - dt]$ adicionado.

Portanto, têm-se da expansão Itô-Taylor o método Milstein abaixo (FADUGBA et al, 2013),

$$Y_{t_{n+1}} = Y_{t_n} + a_n(t_{n+1} - t_n) + b_n(W_{t_{n+1}} - W_{t_n}) + \frac{1}{2}b\frac{\partial b}{\partial x}[(dW_t)^2 - dt] \quad (5.21)$$

O método de Milstein é um método de Taylor, em outras palavras, ele é derivado do truncamento da expansão estocástica de Taylor da solução; neste caso, isso é, em muitos casos, uma desvantagem, uma vez que a derivada parcial aparece no método de aproximação e deve ser fornecida explicitamente pelo usuário.

Em geral, o método de Milstein converge mais rápido para a solução estocástica e é mais preciso que o método de Euler-Maruyama (FADUGBA et al, 2013).

5.5.2.3 MÉTODO DE RUNGE-KUTTA

Um dos métodos de aproximação de EDE é o método de Runge-Kutta que pode ser definido como segue abaixo:

$$Y_{t_{n+1}} = Y_{t_n} + a_n(Y_{t_n})(t_{n+1} - t_n) + b_n(Y_{t_n})(W_{t_{n+1}} - W_{t_n}) + \frac{1}{2}[b_n(Y_{t_n} + b_n Y_{t_n}(t_{n+1} - t_n)) - b_n(Y_{t_n})][(W_{t_{n+1}} - W_{t_n})^2 - (t_{n+1} - t_n)]/\sqrt{t_{n+1} - t_n} \quad (5.22)$$

Este método é essencialmente uma aproximação do método de Milstein, onde o 4º termo do membro da direita da Eq. (5.21) foi substituído pelo 4º termo do membro da esquerda na Eq. (5.22), ou seja, o termo com derivada foi substituído por uma expressão sem derivada, o que traz maior facilidade quando o método é implementado no computador.

5.6 RESULTADOS DO MODELO

A Tabela 5.1 apresenta as profundidades dos pontos de corrosão ao longo de uma tubulação da usina nuclear de Angra I medidas pelo ultrassom no intervalo de três anos e meio entre as inspeções.

Os dados da Tabela 5.1 foram organizados em um histograma (Figura 5.1) com a finalidade de viabilizar o cálculo dos coeficientes $A(y_0)$ e $B(y_0)$.

Na abordagem metodológica, foram apresentadas as expressões para o cálculo de $A(y_0)$ e $B(y_0)$. Aplicando os dados da Tab. 5.1 às Eqs. (5.3), (5.4), (5.5) e (5.6), obtém-se o coeficiente de arraste e o coeficiente de difusão $A(y_0)$ e $B(y_0)$, respectivamente, 0,6769 mm/ano e 0,0286 mm²/ano.

Nesta seção, serão apresentados os gráficos com a evolução temporal da profundidade de corrosão de acordo com os métodos analítico e numérico de solução da equação diferencial de Itô.

Segundo dados fornecidos pela Eletronuclear para a tubulação em estudo, a espessura mínima da parede da tubulação para uma operação segura é de 5,8 mm. Foi apresentado neste capítulo que a espessura inicial da parede da tubulação era de 12,7 mm, o que nos conduz ao resultado de 6,9 mm de diferença entre a espessura original e mínima da parede da tubulação.

A Figura 5.10 ilustra a solução analítica da equação diferencial estocástica de Itô que descreve a evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação ao longo do tempo.

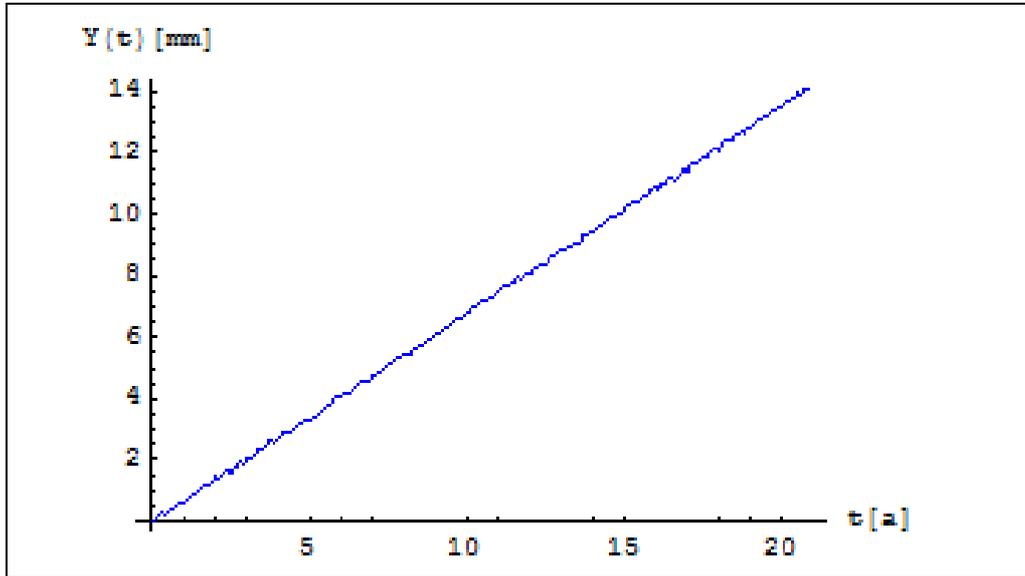


Figura 5.10 – Evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação segundo a solução analítica da equação de Itô.

A Figura 5.11 ilustra a solução numérica (Método de Euler-Maruyama) da equação diferencial estocástica de Itô que descreve a evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação ao longo do tempo.

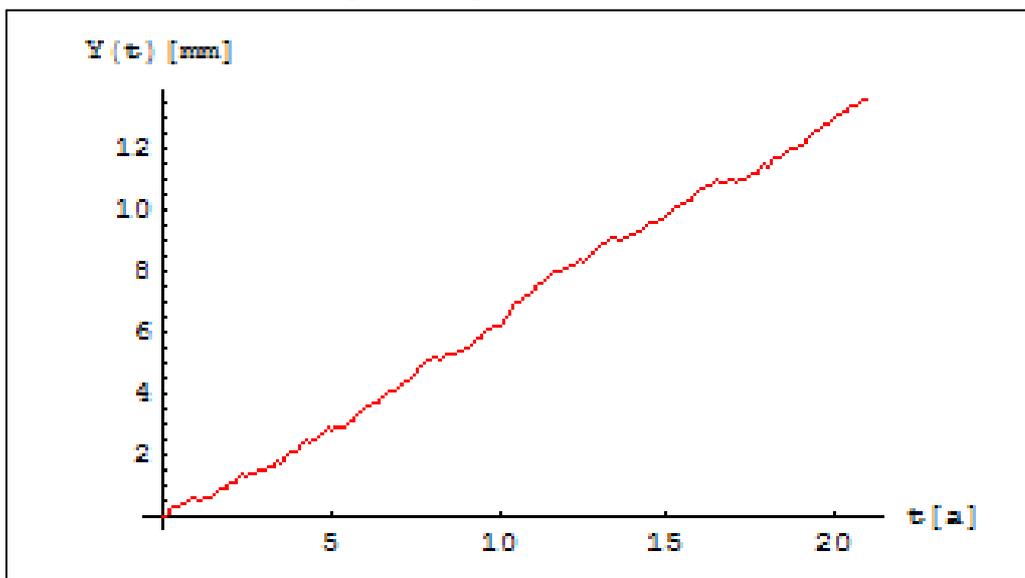


Figura 5.11 – Evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação segundo a solução numérica da equação de Itô.

A Figura 5.12 ilustra a superposição entre as soluções analítica e numérica (Método de Euler-Maruyama) da equação diferencial estocástica de Itô que descreve a evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação ao longo do tempo.

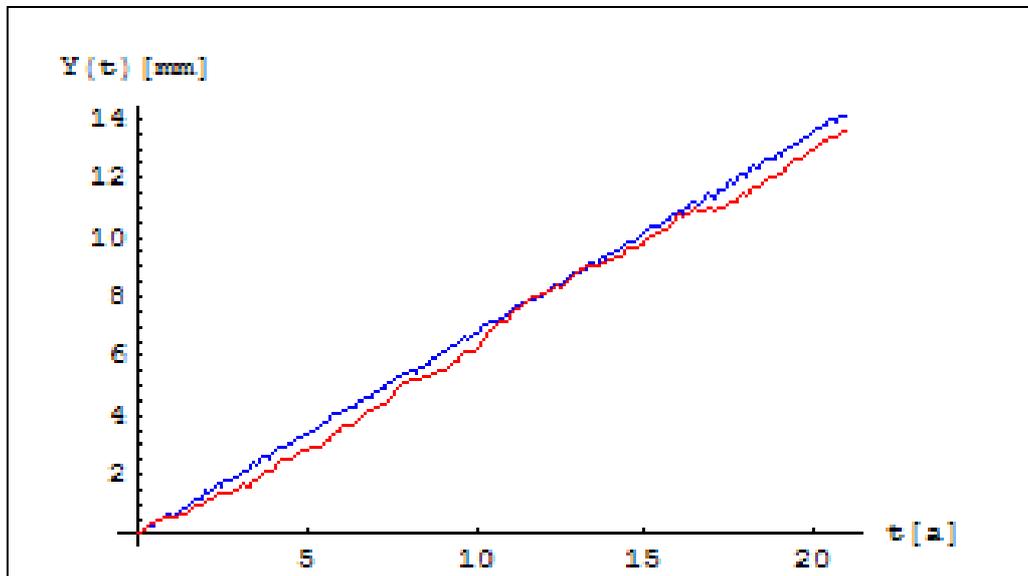


Figura 5.12 – Superposição entre as soluções analítica (Itô Integral) e numérica (Método de Euler-Maruyama) da equação de Itô.

De acordo com a Fig. (5.12), os valores de Y_t determinados com a solução analítica (Eq. 5.10) estão em concordância com os obtidos com o método de Euler-Maruyama (solução numérica) com um erro percentual máximo de 3%. Ambas as curvas são geradas a partir de números aleatórios obtidos de uma distribuição normal padrão. Uma melhor concordância entre estas soluções pode ser obtida através da redução do incremento de tempo no método de Euler-Maruyama.

Da análise dos resultados apresentados nas Figuras 5.10 e 5.11, observa-se que para a profundidade de um ponto de corrosão de 6,9 mm, indicada no eixo das ordenadas das figuras anteriores, na parede da tubulação, a solução analítica sugere a substituição da tubulação num período de operação de 10,1 anos (valor na abscissa da Fig. 5.10 correspondente à ordenada no valor de 6,9 mm), ao passo que, a solução numérica propõe a troca da tubulação para um período de 10,5 anos (valor na abscissa da Fig. 5.11 correspondente à ordenada no valor de 6,9 mm). É importante destacar que o período de operação da usina não leva em consideração as paradas para manutenção ou outras atividades, pois o mecanismo de envelhecimento predominante nesta tubulação em estudo, corrosão acelerada pelo escoamento, não causa deteriorização da tubulação

quando não há passagem de fluido por ela. Assim, o período de operação só considera o tempo efetivo de funcionamento da usina.

Para esta simulação, constata-se que a solução analítica é mais conservadora e está mais a favor da segurança em relação à solução numérica.

A Figura 5.13 mostra a superposição entre as soluções analítica estocástica e analítica determinista ($b = 0$) da equação diferencial estocástica de Itô que descreve a evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação ao longo do tempo.

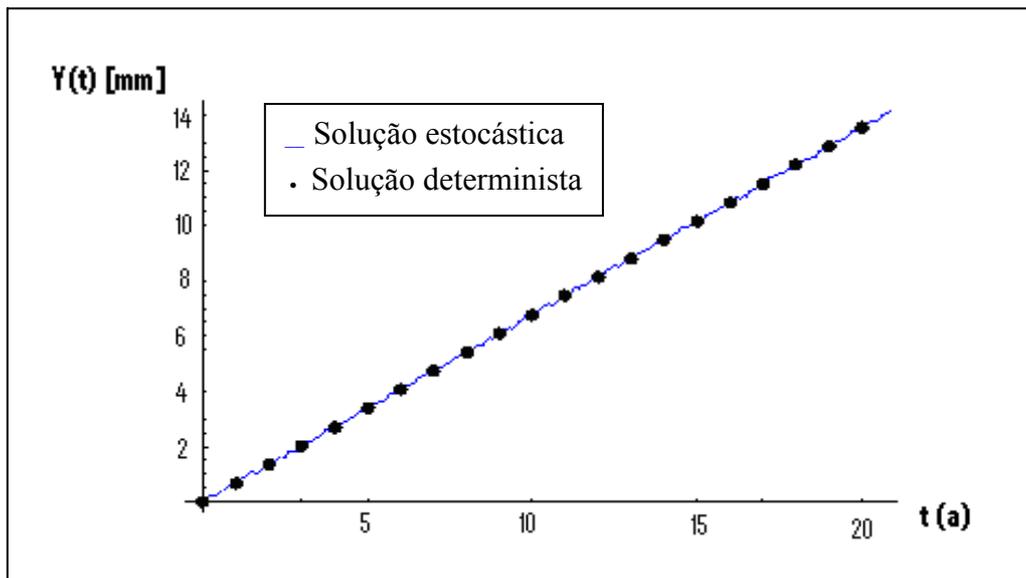


Figura 5.13 – Evolução temporal da profundidade da corrosão da tubulação segundo as soluções analítica estocástica e analítica determinista da equação de Itô.

É possível observar que os valores das profundidades dos pontos de corrosão Y_t ao longo do tempo são praticamente os mesmos para as soluções estocástica e determinista. Esta análise teve por finalidade verificar a contribuição da componente estocástica da equação de Itô no comportamento da evolução temporal da profundidade do ponto de corrosão para o estudo de caso apresentado. Pode-se concluir através desta análise que, para o estudo de caso em questão, a contribuição estocástica da equação de Itô é quase desprezível.

Observa-se, das Figs. 5.14 e 5.15 que, quando o coeficiente b é aumentado 100 vezes, a flutuação estocástica da profundidade da corrosão por pite é mais clara de observar, apesar de que, fisicamente, isto significa um mecanismo de corrosão muito mais

intenso, o que não ocorre para este estudo de caso.

Além disso, verifica-se também que essas duas figuras apresentam duas histórias distintas. Se fizermos novas simulações, encontraremos novas histórias, o que caracteriza a natureza estocástica da solução da Eq. (5.13) onde foi considerado que $Y_0 = 0$, ou seja, a profundidade inicial do defeito é zero e $t = 20$ anos e $N=200$ (número de intervalos considerados, o que significa que $t_{n+1} - t_n = 0,1$ anos). Desta forma, não faz sentido pensar em uma solução única.

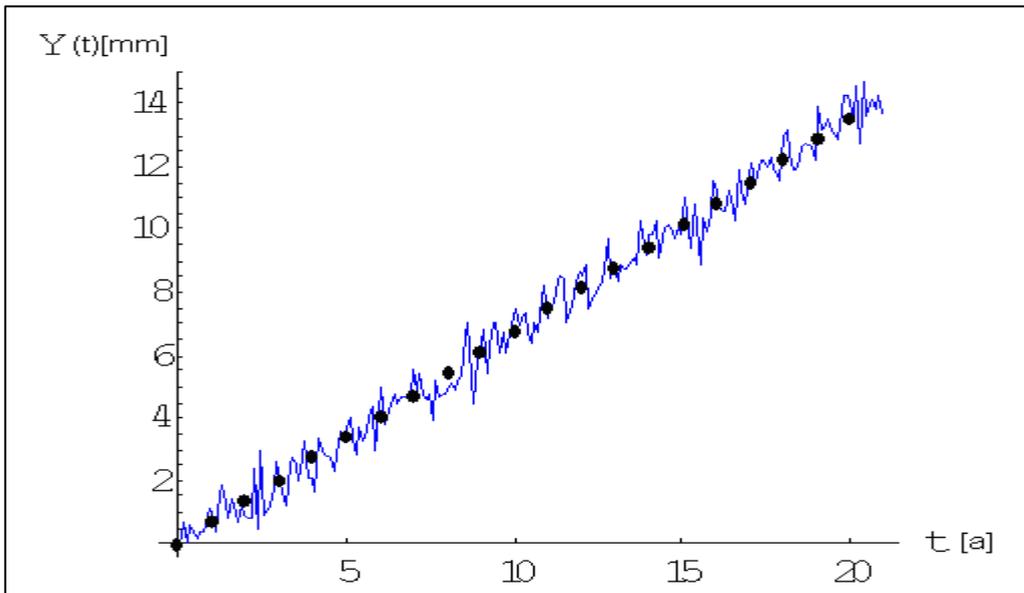


Figura 5.14 – Evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão com b aumentado 100 vezes – 1ª história.

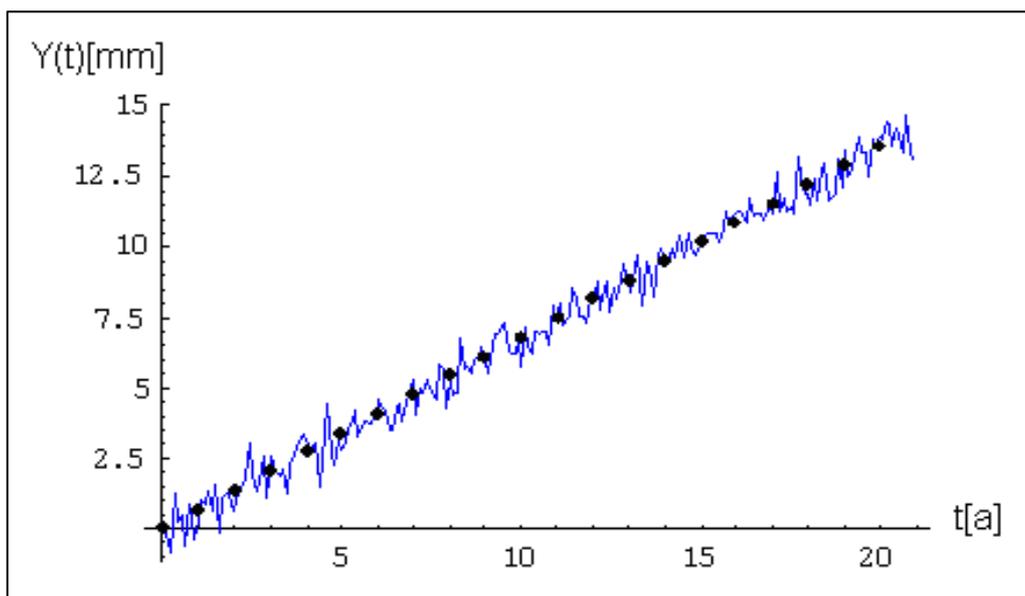


Figura 5.15 – Evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão com b aumentado 100 vezes – 2ª história.

Se considerarmos um instante t_1 arbitrário, por exemplo, na Fig. 5.14, encontraremos um valor de profundidade de defeito devido à corrosão por pite diferente do que encontraremos para o mesmo t_1 na Fig. 5.15. Se gerarmos novas histórias para este caso, encontraremos distintos valores dessa profundidade, o que nos faz pensar que eles seguem uma distribuição de probabilidade.

De fato, da Eq. (5.13), podemos considerar que

$$Y_t = At + \sqrt{2Bt}Z \quad (5.23)$$

onde $\mu = At$ é a média e $\sigma = \sqrt{2Bt}$ é o desvio padrão da distribuição de probabilidade que é solução da Equação de Fokker-Planck associada [Eq.(5.8)], a qual pode ser escrita como

$$P(y, t|0, 0) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Bt}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - At}{\sqrt{2Bt}}\right)^2\right] \quad (5.24)$$

a qual é uma distribuição normal de probabilidade.

A solução da Eq. (5.7), apresentada na Seção 5.5, agora para os dados referentes ao caso em questão fica:

$$P(y, t|0, 0) = \frac{1}{\sqrt{0,11\pi t}} \exp(-8,74 \frac{y^2}{t} + 11,83y - 4t) \quad (5.25)$$

A Figura 5.16 ilustra o comportamento da densidade de probabilidade de transição acima para vários valores de profundidade de corrosão e vários instantes de tempo.

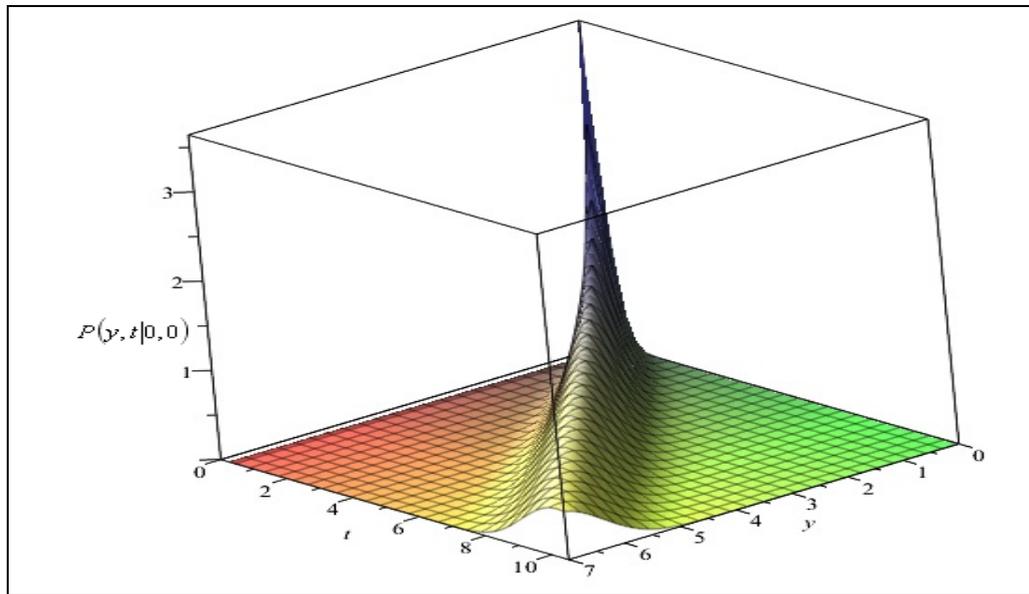


Figura 5.16 – Densidade de probabilidades de um processo browniano com termo de arraste.

A Figura 5.17, por sua vez ilustra o comportamento da função densidade de probabilidade como função da profundidade do defeito, para vários instantes de tempo.

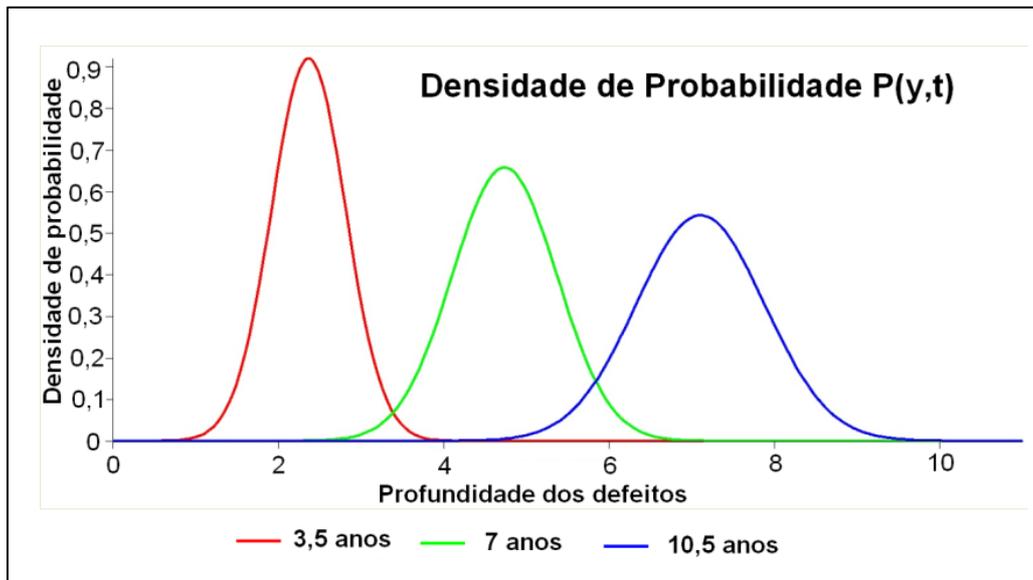


Figura 5.17 – Densidade de probabilidade para vários valores da posição.

A distribuição acumulada de probabilidades associada à densidade de probabilidades dada pela Eq. (5.25) é obtida integrando-se esta última (FELLER, 1957, PAPOULIS,

1985).

A Figura 5.18 ilustra o comportamento da distribuição de probabilidade como função da profundidade de corrosão, para vários instantes de tempo.

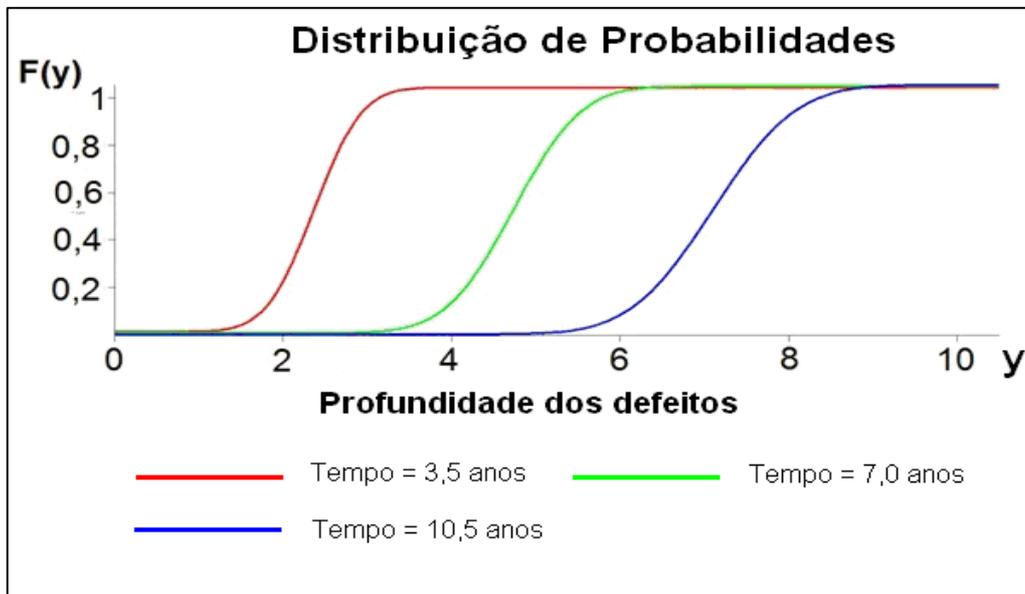


Figura 5.18 – Distribuição de probabilidades das profundidades de corrosão em vários instantes de tempo.

A Figura 5.18 mostra que a probabilidade de encontrar a profundidade de corrosão no intervalo entre 6,0 mm e 6,9 mm dez anos e meio após o início das operações é de aproximadamente 33%. Da mesma forma, a probabilidade de encontrar corrosão com uma profundidade no mesmo intervalo sete anos após o início das operações é de aproximadamente 2,3% e a respectiva probabilidade para os anos anteriores é de aproximadamente zero.

Resultados semelhantes são verificados para outros intervalos de profundidade de corrosão, a partir da Figura 5.18.

CAPÍTULO 6 COMPARAÇÃO COM OUTROS MODELOS

6.1 GERAL

Este capítulo tem por finalidade apresentar resultados de outros modelos aplicados ao estudo de sistemas semelhantes, isto é, corrosão em tubulações de plantas de potências nucleares, bem como a comparação entre tais resultados e aqueles obtidos pela aplicação do modelo proposto nesta tese.

6.2 MODELAGEM DE CADEIAS DE MARKOV PARA PITES DE CORROSÃO EM TUBULAÇÕES ENTERRADAS, CALEYO ET AL (2009)

O modelo de Caley e colaboradores para avaliar a confiabilidade de tubulações utilizou simulações de Monte Carlo para prever a evolução temporal do valor médio da profundidade do ponto de corrosão para diferentes tipos de solo. Tal modelo é um modelo de Markov de estados discretos.

Nesse modelo, é assumido que a espessura da parede da tubulação é dividida em N estados discretos e que a profundidade do pite de corrosão, em qualquer instante de tempo t , pode ser representada por uma variável aleatória discreta $D(t)$ com $P\{D(t)=i\} = p_i(t)$, $i = 1, \dots, N$, onde $p_i(t)$ representa a probabilidade de que a profundidade do defeito esteja no i -ésimo estado para um dado instante de tempo t . A probabilidade $p_i(t)$ é determinada pela distribuição de profundidades medidas ou assumidas para o instante de tempo t . A Figura 6.1 ilustra este espaço de estados.

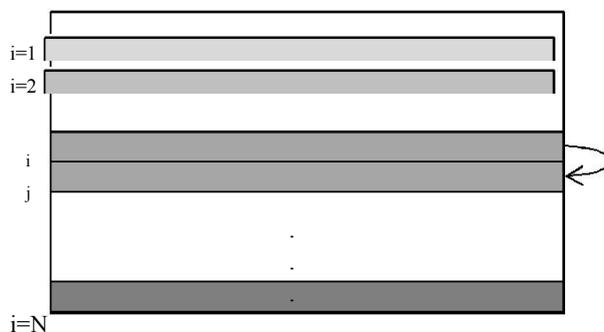


Figura 6.1 – Espaço de estado do modelo.

O presente modelo assume que a taxa de crescimento da corrosão, $\lambda(t)$, é tratada implicitamente como uma constante, enquanto a profundidade de corrosão é tratada como uma função linear do tempo de exposição.

$$\lambda_i(t) = i\lambda(t) \quad (6.1)$$

Este modelo é descrito pelo conjunto de equações diferenciais de Markov dado por:

$$\frac{dp_{ij}}{dt} = \begin{cases} \lambda_{j-1}(t)p_{ij-1}(t) - \lambda_j(t)p_{ij}(t), j \geq i+1 \\ -\lambda_i(t)p_{ij}(t) \end{cases} \quad (6.2)$$

onde P_{ij} representa a probabilidade de que o processo no atual estado i estará no estado j ($j \geq i$) algum tempo depois. Os autores determinaram que sua solução é dada por:

$$p_{mn}(t_0, t) = \binom{n-1}{n-m} e^{-[\rho(t)-\rho(t_0)]^m} \left\{ 1 - e^{-[\rho(t)-\rho(t_0)]} \right\}^{n-m} \quad (6.3)$$

$$\text{onde } \rho(t) = \int_0^t \lambda(t') dt' \quad (6.4)$$

Os referidos autores esclarecem que estimando λ_i , a profundidade da corrosão pode ser estimada para qualquer ponto no tempo, através da expressão abaixo:

$$\Delta \bar{D}(t) = \bar{\lambda}(t) \bar{D}(t) \Delta t \quad (6.5)$$

onde $\bar{D}(t)$ representa a média estocástica da profundidade do ponto de corrosão para o tempo t .

A partir da Eq. (6.5), os autores determinaram, para o seu modelo, o comportamento da evolução temporal da profundidade média do ponto de corrosão que é mostrado na Figura 6.2.

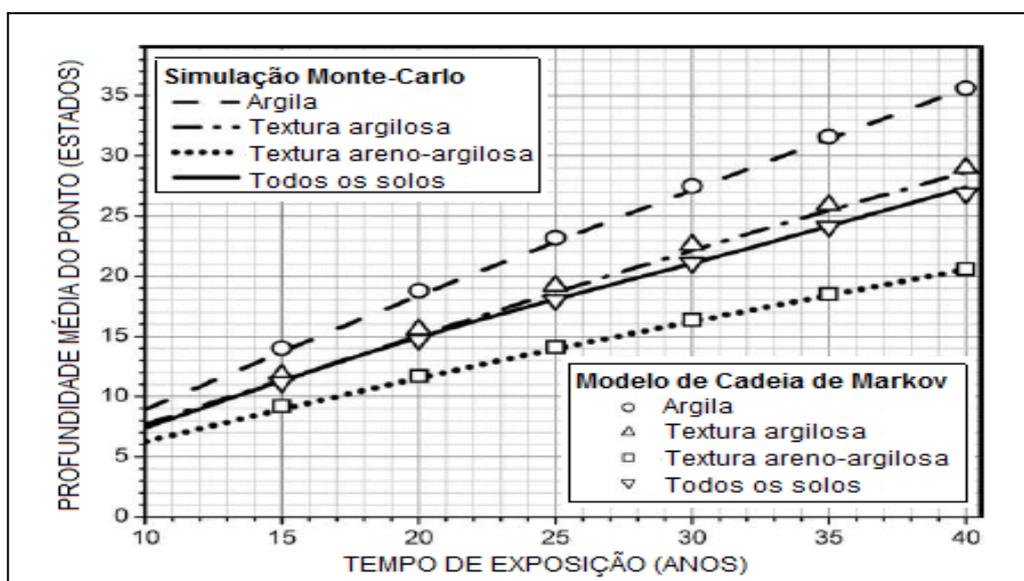


Figura 6.2 – Evolução temporal da profundidade média da corrosão. Cada estado corresponde a 0,1 mm de espessura (CALEYO et al, 2009).

6.3 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO E O MÉTODO DE CONFIABILIDADE DE PRIMEIRA ORDEM PARA AVALIAR A CONFIABILIDADE DE TUBULAÇÕES PARA A INSPEÇÃO BASEADA NO RISCO, MOKHTAR (2009).

O modelo de Mokhtar consiste em estimar a sua probabilidade de falha em uma tubulação corroída usando duas técnicas distintas chamadas de análise de degradação e método de confiabilidade de primeira ordem. A análise de degradação utiliza somente dados de espessura de parede de tubulações que são usualmente coletados durante inspeções em tubulações sujeitas a afinamento de suas paredes. Por outro lado, o método de confiabilidade de primeira ordem necessita de dados sobre as propriedades do material e da geometria das tubulações para estimar a probabilidade de falha.

Neste capítulo será abordado somente o método de análise de degradação, pois este método apresenta como resultado, além da probabilidade de falha, uma equação linear que modela a redução da espessura da parede de uma tubulação que servirá de comparação para o modelo desenvolvido nesta tese.

A análise de degradação envolve medição e extrapolação de dados de degradação que podem estar diretamente relacionados à falha presumida (ReliaSoft Corporation, 2006). O nível de degradação para o qual se diz que ocorreu uma falha é necessário ser definido primeiro. O uso do termo *falha* neste contexto é definido como por exemplo quando a espessura da parede de uma tubulação alcança uma espessura mínima permitida. Para realizar a análise de degradação, a extrapolação pode ser feita usando um dos seguintes modelos (MOKHTAR et al, 2009):

- Modelo linear $y = at + b$;
- Modelo exponencial $y = be^{at}$;
- Modelo de potência $y = bt^a$;
- Modelo logarítmico $y = a \ln(t) + b$

onde y representa a degradação, t representa o tempo e a e b são parâmetros a serem definidos. Uma vez que os parâmetros do modelo sejam estimados para cada amostra i , o tempo t_i poderá ser extrapolado, o que corresponde a definir níveis de falha y . O tempo t_i calculado pode agora ser usado como dado do tempo médio de falha a para análise de dados de vida.

No parágrafo anterior, MOKHTAR (2009) mostrou que a degradação sofrida pela parede de uma tubulação pode ser modelada através de um modelo linear onde a e b são parâmetros a serem definidos pelo modelo que neste trabalho são parâmetros constantes.

A análise de dados de vida é uma das bem conhecidas ferramentas de engenharia para a análise de dados de falha e tem se tornado a ferramenta escolhida de muitos engenheiros de confiabilidade. Esta ferramenta tem aplicações em vários tipos de indústrias, como militar, automotiva, eletrônica, aeroespacial, energia elétrica, energia nuclear e marketing. Há vários modelos de distribuição de tempo de vida que tiveram sucesso servindo como modelos populacionais para dados de falha como exponencial, Weibull, lognormal, gama e muitas outras distribuições. Neste estudo, os dados de tempo médio de falha estão adequados à distribuição de Weibull.

Na análise de dados de vida, a vida média é determinada pela utilização de dados de tempo de falha. Para o caso de confiabilidade de tubulações, os dados do tempo de falha são extrapolados da análise de degradação. A função densidade acumulada para a distribuição Weibull é

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (6.6)$$

onde $F(t)$ representa a função densidade acumulada do tempo de falha, isto é, a probabilidade que a falha ocorra antes do tempo t e t é o tempo de falha. A distribuição é caracterizada por dois parâmetros, o parâmetro de escala η e o parâmetro de forma β . O valor do parâmetro β identifica o modo da taxa de falha. Por exemplo, $\beta < 1$ significa taxa de falha decrescente, $\beta = 1$ indica falha aleatória (taxa de falha constante) e $\beta > 1$ descreve falha por desgaste (taxa de falha crescente). O parâmetro de escala η é definido como o tempo de vida para o qual 63,2% das unidades falharão. A Figura 6.3 retrata o quadro de análise de degradação para avaliar a probabilidade de falha.

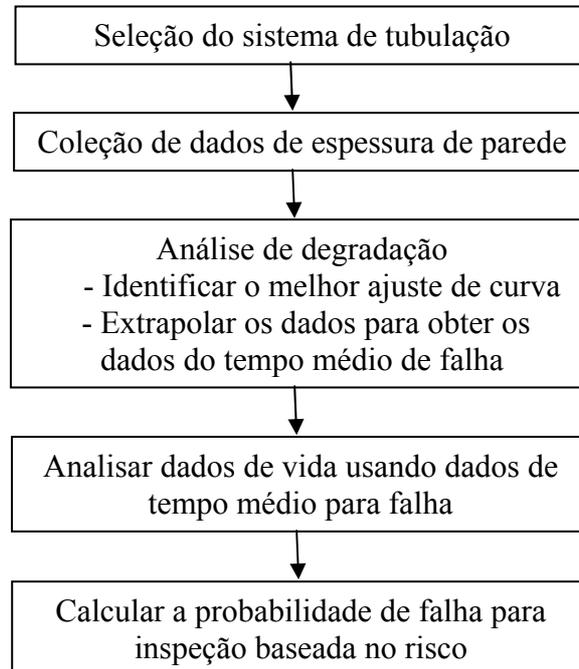


Figura 6.3 – Quadro de análise de degradação para estimar a confiabilidade de tubulações (MOKHTAR et al, 2009).

Mokhtar realizou um estudo de caso para vários pontos de corrosão localizados em posições diferentes na tubulação, onde um modelo linear foi adotado para descrever a relação entre a espessura da parede e o tempo. Usando regressão através da ferramenta de análise no Microsoft Excel, os parâmetros do modelo a , coeficiente angular ou taxa de corrosão e b , coeficiente linear são estabelecidas. A Tabela 6.1 mostra a equação do modelo linear para a posição de cada ponto. Todos os pontos mostram uma relação entre as duas variáveis, tempo e espessura da parede. Usando o modelo linear, os dados de espessura da parede foram extrapolados no tempo quando a falha presumida deve ocorrer. Aqui, a falha é definida quando a espessura da parede alcance 50% da espessura da parede, que é de 3,50 mm. Os dados do tempo de falha para cada ponto são encontrados na Tabela 6.1 e na Figura 6.4.

Tabela 6.1. Regressão linear e dados de tempo para falha (MOKHTAR et al, 2009)

Localização	Equação linear	Tempo para falhar (anos)
1	$y = - 0,033t + 6,938$	103,537
2	$y = - 0,058t + 7,041$	61,154
3	$y = - 0,051t + 7,056$	69,768
4	$y = - 0,051t + 7,008$	69,078
5	$y = - 0,037t + 6,966$	93,157
6	$y = - 0,065t + 7,078$	54,899

A função densidade acumulada para os dados pode ser expressa da seguinte forma:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{82,922}\right)^{4,093}\right]$$

onde t = tempo em anos. O parâmetro de forma β e o parâmetro de escala η para a distribuição de Weibull acima possuem os valores, respectivamente, de 4,093 e 82,922 anos. Esta função pode ser usada, juntamente com a equação linear da Tab. 6.1, para prever a confiabilidade do sistema de tubulação para qualquer ponto ao longo do tempo.

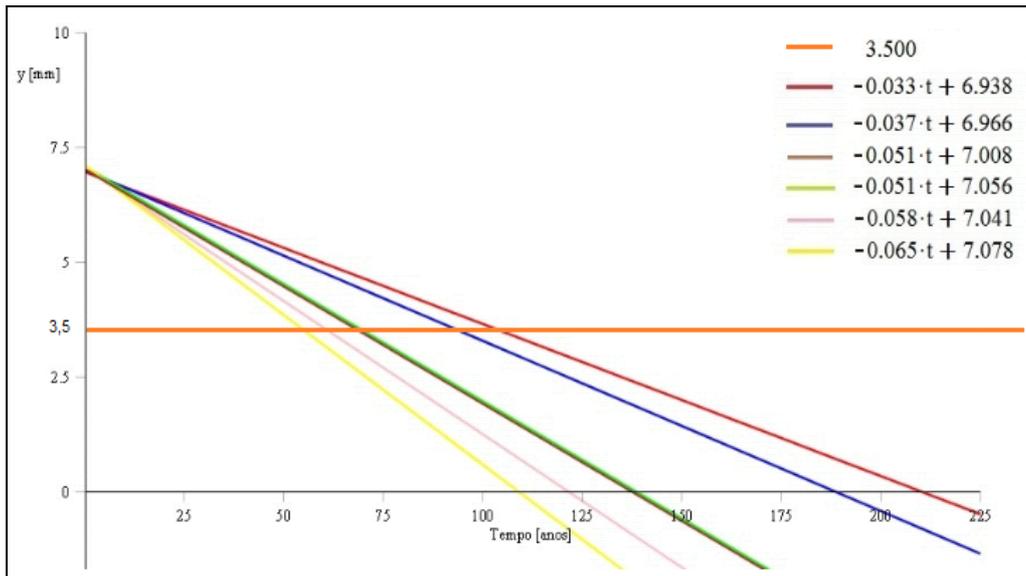


Figura 6.4 – Evolução temporal da profundidade média da parede da tubulação quando a corrosão atinge 50% (ou 3,5mm) de sua espessura. MUKHTAR et al, (2009).

6.4 COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE OS RESULTADOS DOS MODELOS

O modelo proposto por Caley e colaboradores é um modelo de Markov de espaço de estados discretos e não-homogêneo. Este modelo permite considerar um número finito N arbitrário de estados discretos correspondendo a diferentes estados de degradação, ou seja, profundidades de corrosão.

O fato de ser possível modelar a degradação com um número finito qualquer de estados representa um avanço importante na modelagem markoviana destes fenômenos.

Todavia, embora possam ser consideradas várias profundidades de corrosão no modelo de Caley e colaboradores, as possibilidades que se referem aos estados intermediários entre dois inteiros consecutivos não estão acessíveis, a priori, neste modelo.

Uma outra questão importante refere-se à dificuldade de obtenção de informações relativas às taxas de transição requeridas no modelo de Caley e colaboradores.

Neste modelo, os autores propõem que a função $\bar{D}(t)$, que aparece na Eq. (6.5), seja obtida pela relação aproximada:

$$\bar{D}(t) = k(t - t_{sd})^v \quad (5.7)$$

Entretanto, o parâmetro k é o resultado da soma de sete outros parâmetros e v , é o resultado da soma de outros cinco. As informações necessárias à determinação desses parâmetros, que envolve entre outros, o conhecimento de características físico-químicas do solo, está resumido na Tabela 1 de CALEYO et al., (2009).

Portanto, no modelo de Caley e colaboradores, é necessário o conhecimento de um grande número de informações e procedimentos para se determinar os dados que o alimentam.

O modelo proposto por Mokhtar utiliza uma equação linear com coeficientes constantes para determinar a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão e a função densidade acumulada de Weibull para determinar a probabilidade de falha de sistemas de tubulações.

O modelo proposto por Mokhtar é um modelo determinístico para determinar a evolução temporal de um ponto de corrosão, ao passo que o modelo de Caley faz uma abordagem estocástica deste fenômeno. Outra grande diferença entre estes dois modelos está na determinação dos dados que alimentam os sistemas. Na análise de degradação de Mokhtar, somente os dados de profundidade de pontos de corrosão coletados através de inspeções em tubulações são suficientes para alimentar o modelo. Por outro lado, no modelo de Caley, as informações necessárias à determinação dos parâmetros de seu modelo, envolve entre outros, o conhecimento de características físico-químicas do solo, o que torna a aquisição de dados mais complexa.

O comportamento linear do crescimento da profundidade da corrosão é uma característica comum em ambas as modelagens. No entanto, o modelo de Mokhtar apresenta um função decrescente da profundidade ponto de corrosão, pois considera a redução da espessura da tubulação, em vez de considerar o crescimento da profundidade do ponto de corrosão como consideraram Caley e esta tese.

Esta tese apresenta um modelo de Markov não-homogêneo (as probabilidades de transição mudam ao longo do tempo) de espaço de estados contínuo. Este caráter do

modelo proposto representa um avanço em relação ao modelo de Caley e colaboradores, pois sendo o espaço de estados contínuo, pode-se avaliar a probabilidade de transição entre quaisquer duas profundidades de corrosão, e não apenas entre profundidades determinadas por valores inteiros de N .

O modelo apresentado nesta tese utiliza as mesmas equações de Camacho (2010) para a obtenção das funções $A(y)$ e $B(y)$, ou seja, equações (5.3) e (5.4) que além de serem empregadas na equação de Fokker-Planck para determinar a densidade e a distribuição de probabilidades, agora são empregadas, também, na equação diferencial estocástica de Itô para descrever o crescimento da profundidade do ponto de corrosão ao longo do tempo. Ressalte-se que existe uma relação entre a equação de Fokker-Planck e Ito (Eq. 4.16 e 4.18), GARDINER, (1983).

Mostrou-se nesta tese que dados de inspeção instrumentada, como, por exemplo, os obtidos usando ultrassom, são suficientes para a determinação das funções $A(y)$ e $B(y)$ que caracterizam este modelo. Assim, as funções $A(y)$ e $B(y)$ podem ser caracterizadas como contínuas, já que necessitam de um número infinito e não enumerável de pontos para a sua determinação.

O modelo proposto por esta tese, da mesma forma que o modelo apresentado por Mokhtar, necessita ser alimentado somente por dados de profundidade de corrosão ao longo da tubulação. Diferentemente do grande número de informações constitutivas da tubulação e físico-químicas do solo, necessárias à alimentação do modelo de Caley e colaboradores.

Deve-se destacar que tanto no modelo de Mokhtar quanto no apresentado nesta tese, a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão é modelada através de uma função linear com coeficientes constantes.

Para definir o modelo proposto nesta tese são necessárias informações globais que, de certa forma, têm uma analogia com a definição termodinâmica do sistema, onde para tal são necessárias apenas poucas informações e, ainda assim, de natureza geral.

É comum encontrar em trabalhos científicos fenômenos estocásticos sendo tratados como fenômenos puramente determinísticos como, por exemplo, a chuva (COGHO &

BOTHA, 1984; HUNG ET al., 2000; ROOD, 2003; AGUIAR, 2006; PONTEDEIRO, 2006). Neste sentido, a aplicação de um método que utilize a equação diferencial estocástica de Itô ao estudo de fenômenos estocásticos representa uma importante superioridade em relação a outros métodos, na medida que em tal equação é possível considerar não somente o viés determinístico da corrosão como também o estocástico.

Outro aspecto importante a ser ressaltado entre os três modelos apresentados neste capítulo é o tratamento estocástico do fenômeno da corrosão dado nas modelagens de Caley e na apresentada nesta tese. Este fato traz uma superioridade das modelagens citadas em relação ao modelo de Mokhtar que aborda o fenômeno da corrosão como puramente determinístico.

Outro destaque do modelo apresentado nesta tese é o fato do mesmo poder ser aplicado a quaisquer modelos de crescimento, e não apenas aos lineares, como é o caso do modelo proposto por Caley e colaboradores.

Devido à necessidade dos modelos citados requererem procedimentos e dados de natureza diferente para a sua alimentação, não é possível uma comparação quantitativa direta entre os resultados obtidos pelos modelos discutidos aqui, incluindo o proposto nesta tese.

Entretanto, observa-se uma concordância qualitativa entre os modelos de Caley e colaboradores, Mokhtar e o proposto nesta tese, já que em todos os casos, observa-se um comportamento linear da evolução temporal da profundidade do ponto de corrosão. Tais semelhanças nos comportamentos qualitativos se observam nas Figuras (5.10), (5.11) e (6.2) e (6.4).

Finalmente, o modelo apresentado por Camacho (2010) permitiu prever a probabilidade de perfuração da tubulação, ou seja, a probabilidade de falha associada a este componente em serviço dado uma profundidade de corrosão e um tempo de operação para este componente através da equação de Fokker-Planck. O modelo apresentado nesta tese determina o comportamento da profundidade de um ponto de corrosão ao longo do tempo através da equação de Itô. Em outras palavras, através de dados de espessura mínima de operação de tubulações é possível determinar, através do modelo apresentado nesta tese, o tempo máximo de operação deste componente sem que as

especificações mínimas de segurança sejam comprometidas. Posteriormente à determinação do tempo provável para atingir a espessura mínima de operação da parede da tubulação, é possível, de posse do tempo de operação, complementar os estudos de confiabilidade estrutural através do método de Camacho (2010) para obter a probabilidade do ponto de corrosão de atingir a espessura mínima de operação ou perfuração da tubulação.

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

Sistemas de tubulações em plantas nucleares, petroquímicas e refinarias estão expostos a ambientes corrosivos que causam vários tipos de mecanismos de degradação. Um dos mecanismos danosos experimentados é o afinamento gradual da parede da tubulação que causa o seu rompimento. Uma vez que sistemas de tubulação conduzam hidrocarbonetos ou outros fluidos, a presença de pequenas rupturas deve levar a planta à situação de perigo. A falha nestas tubulações pode desencadear eventos indesejáveis de natureza patrimonial, ambiental e de segurança. Portanto, a inspeção adequada e manutenção desses sistemas são essenciais para manter uma operação segura e contínua.

Em geral, a instalação e a manutenção de uma tubulação é regida pelas normas técnicas de projeto e de segurança da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos como por exemplo, as normas ASME B31.8 (1991), ASME B31.1 (2007) e ASME B31.G (2003).

Esta tese propõe um modelo estocástico não-homogêneo de Markov com tempo contínuo e espaço de estados também contínuo para determinar a profundidade máxima de um ponto de corrosão de uma tubulação da usina nuclear Angra I.

O modelo de Markov tem se mostrado ser uma útil ferramenta para estudar o impacto de estratégias alternativas para manutenção em tubulações (inspeção e detecção de vazamentos). Juntamente com a estimação apropriada de seus coeficientes de entrada, o modelo é capaz de fazer previsões da confiabilidade de sistemas de tubulações dependentes do tempo.

O modelo proposto nesta tese recai na equação diferencial estocástica de Itô e requer apenas o conhecimento dos coeficientes de arraste e de difusão que são expressos pelas funções $A(y)$ e $B(y)$, onde a determinação dessas funções é possível através de dados de inspeção instrumentada, por exemplo, utilizando ultrassom.

Procedimentos de manutenção e inspeção de tubulações são rotinas na indústria nuclear. Através do modelo apresentado neste trabalho, é possível prever a evolução temporal

da profundidade de um ponto de corrosão e assim reduzir ou até mesmo eliminar o número de inspeções em tubulações. Conseqüentemente, o modelo apresentado aqui pode trazer redução no custo de manutenção de uma planta nuclear.

O surgimento da corrosão é governado pelo chamado sistema de corrosão constituído pelo metal e pelo meio corrosivo (ambiente) com todos os elementos que participam e podem influenciar o comportamento eletroquímico e os parâmetros da corrosão.

Dado o fato de que os coeficientes do modelo não dependam do material corroído, nem do ambiente da corrosão, o modelo é adequado para diferentes sistemas de corrosão.

No que diz respeito à instalação, as normas recomendam valores para as espessuras de parede da tubulação de acordo com condições de projeto e operação. Tais valores também recomendam fatores de segurança que levam em consideração o potencial de dano do fluido transportado e a distribuição populacional ao longo da tubulação.

Entretanto, estas normas não provêm informação sobre a probabilidade de falha e nem como se determina a evolução temporal de pites de corrosão.

A estimativa da probabilidade de falha de uma tubulação em serviço quer seja por perfuração, quer seja por ruptura, ocasionada pelo avanço do processo de corrosão é, portanto, assunto de grande interesse e é um dos principais objetivos da avaliação da sua confiabilidade estrutural.

Nesta tese foi proposto pela primeira vez um modelo estocástico markoviano não homogêneo, com tempo contínuo e espaço de estados também contínuo, para se descrever a evolução temporal da profundidade de um ponto de corrosão através da equação de Itô.

O principal problema com a análise estatística deste modelo proposto é a dificuldade de coletar dados suficientes de profundidades de pontos de corrosão de plantas nucleares para estimar os coeficientes de arraste e difusão da equação de Itô.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Com o intuito de prosseguir nos estudos sobre envelhecimento de centrais nucleares sugerem-se os seguintes pontos a serem analisados:

- Realização de um estudo minucioso sobre todas as técnicas existentes na atualidade para obtenção de dados de degradação em tubulações corroídas de plantas nucleares com uma análise de custo-benefício para cada destas técnicas;
- Aplicação deste modelo a componentes ativos reparáveis, ao invés de componentes passivos, fruto de estudo desta tese, para os quais há dados disponíveis de profundidades de pontos de corrosão;

No tocante a trabalhos de pesquisa envolvendo a equação diferencial estocástica de Itô em fenômenos estocásticos em geral pode-se recomendar a aplicação desta equação aos seguintes estudos:

- Aplicação da equação diferencial estocástica de Itô na modelagem dos preços de ações em investimentos financeiros dado que tais ações possuem flutuações aleatórias aparentes em seus preços;
- Modelagem estocástica da estabilidade orbital de satélites haja vista que rápidas flutuações sobre a densidade atmosférica da Terra e outros distúrbios acima da atmosfera devem ser levados em consideração na modelagem de dinâmicas de satélite. Normalmente, este modelo é incorporado em modelos determinísticos baseados na mecânica Newtoniana;
- Desenvolvimento de metodologia baseado na equação diferencial estocástica de Itô para contabilizar flutuações aleatórias na vazão de afluentes e na concentração de poluentes devido à queda de chuvas e descarga de resíduos domésticos e industriais;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACIKGOZ, U. S., DIWEKAR, U. L., 2010, “*Blood Glucose Regulation with Stochastic Optimal Control for Insulin – Dependent Diabetic Patients*”, *Chemical Engineering Science*, Volume 65, Issue 3, pp.1227-1236.
- AGUIAR, L. A., “*Avaliação de Risco de um Repositório Próximo à Superfície na fase Pós-Fechamento em Cenário de Liberação de Radionuclídeos por Infiltração de Água*”, Tese de Doutorado do PEN/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2001, “*Piping Inspection Code*”. API Publication 570.
- AMINI, M. et al., 2011, “*Numerical Solution of Stochastic Differential Equations Corresponding to Continuous Contribution*”, *Commun. Korean Math. Soc.* **26** (2011), No. 4, pp. 709-720.
- ANDREUCCI, R., 2006, “*Ensaio por Ultrassom*”, Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos e Inspeção, São Paulo, BRASIL.
- APPLEBAUM, D., 2004, “*Lévy Process – From Probability to Finance and Quantum Groups*” – *Notices of the American Mathematical Society*, **51**.
- ASME B31.1, 2007 “*Power Piping Design & Fabrication*”, ASME – American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- ASME B.31.8, 1991, “*Gas Transmission and Distribution Piping System*”, ASME – American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- ASME B31G, 2003, “*Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines*”, ASME – American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- AZIZ, P. M., 1956, “*Application of the Statistical Theory of Extreme Value to the Analysis of Maximum Pit Depth Data for Aluminum*”, *Corrosion* v.13, pp. 495-506.

- BARKER, C. T., NEWBY M. J., 2009, “*Optimal Non-Periodic Inspection for a Multivariate Degradation Model*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 94, pp.33-43.
- BARATA, J., GUEDES, S.C., MARSEGUERA, M., ZIO, E., 2002, “*Simulation modelling of Repairable Multi-Componentes Deteriorating Systems for ‘on Condition’ Maintenance Optimisation*” *Reliability Engineering & System Safety*, 76, pp.255-264.
- BENEVIDES, P. T., DIWEKAR, U. M., 2012, “*Studying Various Optimal Control Problems in Biodiesel Production in a Batch Reactor under Uncertainty*” *Computer Aided Chemical Engineering*, 31, pp.385-389.
- BLENMAN, L. P., CANTRELL, R. S., FENNELL, R. E., PARKER, D. F., RENEKE, J. A., WANG, L. F. S., WOMER, N. K. ,1995, “*An Alternative Approach to Stochastic Calculus for Economic and Financial Models*”, *Jornal of Economic Dynamics and Control, Volume 19, Issue 3*, pp.553-568.
- BLOCH-MERCIER, S., 2001, “*Optimal Restarting Distribution After Repair for Markov Deteriorating System*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 74, pp.181-191.
- BOUZAIENE, L., BILLY, F., BOUCQUET, J-C, HAIK, P, LANNOY, A., PERES, F, 2003, “*Expert Judgment Methodology for Failure Anticipation in Nuclear Power Plants*”, in Bedford and Van Gelder (editors), *Safety and Reliability, Lisse: Swets & Zeitlinger*, pp.195-200.
- BRAVERMAN, J. I., MILLER, C. A., HOFMAYER, C. H., ELLINGWOOD, B. R., NAUS, D. J., CHANG, T. Y., 2004, “*Degradation Assessment of Structures and Passive Components at Nuclear Power Plants*”, *Nuclear Engineering and Design*”, 228, pp.283-304.
- BRAVERMAN, J. I., DEGRASSI, G., HOFMAYER, C. H., MARTINEZ-GURIDI,G., MORANTE, R. J., 2005, “*Risk-Informed Assessment of Degraded Buried Piping Systems in Nuclear Power Plants*”, Division of Engineering Technology, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 115p.

- BURGAZZI, L., 2007, “State of the Art in Reliability of Thermal-Hydraulic Passive Systems”, *Reliability Engineering & System Safety*, 92, 671-675.
- BURNAY, S. G., 2001, “An Overview Of Polymer Ageing Studies in The Nuclear Power Industry”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* Volume 185. p 4-7.
- BURRAGE, K. et al., 2014, “Numerical Methods for Second-Order Stochastic Equations”, Advanced Computational Modeling Centre, Department of Mathematics, University of Queensland, Australia, downloaded from the site: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.2056327&rep=rep1&type=pdf>.
- CALEYO, F., VELÁZQUEZ, J. C., VALOR, A., HALLEN, J. M., 2009, “Markov Chain Modelling of Pitting Corrosion in Underground Pipelines”, *Corrosion Science*, 51, 2197-2207.
- CALLISTER, W.D., 1997, “Materials Science and Engineering: An Introduction”. John Wiley & Sons, Inc. New York. Fourth Edition. 852p.
- CAMACHO, E. N., 2010, “Modelo Markoviano de Degradação com Espaço de Estados Contínuo Aplicado à Avaliação de Envelhecimento de Componentes Passivos de Plantas Nucleares – Aplicações a Tubulações Corroídas”. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAMACHO, E. N., FRUTUOSO E MELO, P. F., SALDANHA, P. L. C., DA SILVA, E. P., 2012, “A Fokker-Planck Model of Pitting Corrosion in Underground Pipelines to Support Risk-Informed Decision Making”, *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*, Bérenguer, Grall, Guedes Soares (eds), Taylor and Francis, London, pp 2993-2999.
- CHANG, M., CHANG, R., SHU, C., LIN, K., 2005, “Application of Risk based Inspection in Refinery and Processing piping”, *Journal Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 397-402.
- CHIANG, J. H, YUAN, J., 2001, “Optimal Maintenance Policy for a Markovian System Under Periodic Inspection”, *Reliability Engineering & System Safety*, 71, 165-172.

- CHIQUET, J., EID, M., LIMNIOS, N., 2008, “*Modelling and Estimating the Reliability of Stochastic Dynamical Systems With Markovian Switching*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 93, pp.1801-1808.
- CLAROTTI, C., LANNOY, A., ODIN, S., PROCACCIA, H. 2004, “*Detection of Equipment Aging and Determination of the Efficiency of Corrective Measure*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 84, pp.57-64.
- COGHO, V. E. & BOTHA, J. F., “*Modeling Contamination of Ground Water in the Vicinity of a Nuclear Waste Disposal Site, Institute for Ground Water Studies*”, University of the Orange Free State, Bloemfontein, Republic of South Africa, 1984.
- DNV-RF-F101, 1999, “*Recommended Practice Corroded Pipelines*”, Norway, Det Norske Veritas.
- DO VAN, P., BARROS, A., BÉRENGUER C., 2008, “*Reliability Importance Analysis of Markovian System at Steady State Using Perturbation Analysis*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 93, pp.1605-1615.
- DI LORENZO, ROBERTO F., et al, 2001, “*Desenvolvimento de Técnicas de Corrosão sob Tensão para Avaliação da Integridade Estrutural e Prolongamento da Vida Útil de Usinas Tipo PWR*”. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. CNEN. Belo Horizonte.
- EINSTEIN, A., 1905, “*On the Molecular-Kinetic Theory of Heat Required by the Motion of Particles Suspended in Stationary Liquids*”, *Annalen der Physik* (4), 17, pp.549–560.
- EINSTEIN, A., 1906, “*On The Theory of Brownian Motion*” *Annalen der Physik* 19, pp 371 – 381.
- EPRI Final Report (2005), “*Life Cycle Management Sourcebook for Nuclear Plant Service Water Plants*”, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- EPRI (1997). Report GC-109054, “*NDE of Buried Pipes, Information Obtained at Pipe Line Walk*”, Houston Texas, Electric Power Research Institute, Inc., EPRI Nondestructive Evaluation Center, Charlotte, North Carolina.

- EPRI (1998). Report GC-108827, “*NDE Technology for In-line Inspection of Buried Service Water Piping*”, Electric Power Research Institute, Inc., EPRI Nondestructive Evaluation Center, Charlotte, North Carolina.
- EVANS, U. R., STAEHLE R. W. (Ed.), 2004, “*Localized Corrosion*”, 1 ed. Houston, TX, NACE.
- EBELING, C. E., 1997, “*An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*”, 5 ed. New York, Tata McGraw-Hill.
- ELETRONUCLEAR, 2013, Panorama da Energia Nuclear no Mundo. Disponível em:<<http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=fDwbsxOWKHU%3d&tabid=297>>. Acesso em 5 de maio de 2014.
- FADUGBA, S. E., ADEGBOYEGUN, B. J., OGUNBIYI, O. T., et al, 2013, “*On the Convergence of Euler-Maruyama Method and Milstein Scheme for the Solution of Stochastic Differential Equations*”, International Journal of Applied Mathematics and Modeling, Vol. 1, N_o. 1, pp.9-15.
- FELLER, W., 1957(vol. I) e 1967 (vol. II), “*An Introduction to Probability Theory and Its Applications*”, 2 ed. New York, John Wiley & Sons.
- FLEMING, N. K., 2004, “*Markov Models for Evaluating Risk-Informed In-Service Inspection Strategies for Nuclear Power Plant Piping Systems*” Reliability Engineering & System Safety, 83, pp.27-45.
- FOKKER A. D., 1914, "Die Mittlere Energie Rotierender Elektrischer Dipole im Strahlungsfeld", *Annalen der Physik* 43 pp. 810-820.
- FORSYTHE, G. E., WASOW, W. R., 1967, “*Finite-Difference Methods for Partial Differential Equation*”s, New York, Wiley.
- FRANKEL, G. S., 1998, “*Pitting Corrosion of Metals*”, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 145, pp. 2186-2198.
- GARDINER , C. W., 1983, “*Handbook of Stochastic Methods for Physics, Chemistry and the Natural Sciences*”, Springer-Verlag, Spring Series in Synergetics vol.13.

- GENTIL, V, 2003, “*Corrosão*”. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora. 341p.
- GIBBS, J. W., 1902, “*Elementary Principles in Statistical Mechanics*”, Charles Scribner’s Sons, New York.
- GOPWANI, S., 2003, “*Modes of Failure and Degradation in PWR Steam Generator Tubes*”. Disponível em: [http://sitka.engin.umich.edu/old/nuclearresearch/Final Steam Genarator Paper.pdf](http://sitka.engin.umich.edu/old/nuclearresearch/Final%20Steam%20Generator%20Paper.pdf)
- HALES, C., STEVENS, K. J., DANIEL, P. L., ZAMANZDEH, M., OWENS, A. D., 2002, “*Boiler Feedwater Pipe Failure by Flow-Assisted Chelant Corrosion*”, Engineering Failure Analysis, 9, 235-243.
- HOLMAN, J. P., WHITE, P. R. S., 1992, “*Heat Transfer*”, Seventh Edition, McGraw-Hill Company, Metric Editions, Mechanical Engineering Series, London, UK.
- HOTTOVY, S., 2011, “*The Fokker-Planck Equation*”, University of Wisconsin, Department of Mathematics, Madison, USA, downloaded from the site: [http://www.math.wisc.edu/~shottovy /Num PDEreport.pdf](http://www.math.wisc.edu/~shottovy/Num%20PDEreport.pdf), in 2013.
- HUNG, C. et al, PRESTO-EPA-POP: “*A Low-Level Radioactive Waste Environmental Transport and Risk Assessment Code*”, Methodology Manual, Vol. 1, Prepared for U. S. Environmental Protection Agency – Office of Radiation Programs, Washington, USA, 2000.
- IAEA. TEC DOC 981, 1997, “*Assessment for the Management of Ageing of Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators*”. Vienna. 175p.
- IAEA. TEC DOC-1557, 2007, “*Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: PWR vessel internals*”. Vienna, Update. 76 p.
- IAEA. TECHNICAL REPORTS SERIES No. 338, 1999, “*Methodology for the Management of Ageing of Nuclear Power Plant Components Important to Safety*”. Vienna. 47p.
- IAEA. TEC DOC-540, 1990, “*Safety Aspects of Nuclear Power Plant Ageing*”. Vienna. 126 p.

- IAEA. TEC DOC No. 1120, 1999, “*Assessment for the Management of Ageing of Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Pressure Vessel*”. Vienna. 175p.
- KLOEDEN, P. E., PLATEN, E., 1999, “*Numerical Solution of Stochastic Differential Equations*”, Applications of Mathematics – Stochastic Modeling and Applied Probability, Springer Publisher, New York, USA, 1999.
- KOLMOGOROV, A. N., 1931, “*Relating to analytical methods in probability theory*” *Mathem. Annalen* 104, pp.415-458.
- LISNIANSKI, A., 2007, “*Extended block diagram method for a multi-state system reliability assessment*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 92, pp.1601-1607.
- MANSUR, L. K., FAREL, L. K., 1997, “*Mechanisms of Radiationinduced Degradation of Reactor Vessel Materials*”. *Journal of Nuclear Materials* Vol. 244. p. 212-218.
- MAHONY, C. O., “*The Numerical Analysis of Stochastic Differential Equations*”, downloaded from the site: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.117.8043&rep=rep1&type=pdf>, in 2013.
- MARTINS, G. A., 2011, *Estatística Geral e Aplicada*, 2 ed. São Paulo, ed. Atlas.
- McCAVITT, M. J., 2009, Guide to the Papers of Norbert Wiener – MC.0022, Massachusetts Institute of Technology – MIT, Institute Archives and Special Collections – MIT Libraries, Cambridge, USA.
- MISTURINI, R., “*Movimento Browniano, Integral de Ito e Introdução as Equações Diferenciais Estocásticas*”, Dissertação de Mestrado, Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2010.
- MOKHTAR, A. A., ISMAIL, M. C., MUHAMMAD, M. 2009, “*Comparative Study between Degradation Analysis and First Order Reliability Method for Assessing Piping Reliability for Risk-Based Inspection*”, *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 9, N° 10.

- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C., 1999, "*Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*", Segunda Edição, Tradução de Verônica Calado, LTC Editora, Rio de Janeiro, Brasil.
- MOUSTAFA, M. S., MAKSOUD, E. Y. A., SADEK, S., 2004, "*Optimal Major and Minimal Maintenance Policies for Deteriorating Systems*", *Reliability Engineering & System Safety*, 83, pp.363-368.
- MYÖTYRI, E., PULKKINEN, U., SIMOLA, K., 2006, "*Application of Stochastic Filtering for Lifetime Prediction*" *Reliability Engineering & System Safety*, 91, pp.200-208.
- NORONHA, J. C. C., 2012, "*Investimentos em Distribuição de Energia Elétrica sob Incerteza Regulatória utilizando Opções Reais*". Tese de D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.
- NRC, 1990, "*Safety of Aging Nuclear Plants*". Disponível no site: <http://www.wws.princeton.edu/Cgi-bin/bytserv.prl/~ota/disk1/1993/9305/930504/pdf>.
- NUREG-1144, 1991, "*Nuclear Plant Aging Research (NPAR) Program Plan, Rev 2*", USA Nuclear Regulatory Commission- NRC, Washington, DC.
- NUREG-1350, 1997, "*Information Digest, Volume 9*", NUREG-1350, USA Nuclear Regulatory Commission- NRC, Washington, DC.
- NUREG-1377, 1991, "*NRC Research Program on Plant Aging: Listing and Summaries of Reports Issue Trough June 1991*", USA Nuclear Regulatory Commission- NRC, Washington, DC.
- NUREG-1522 (1995), "*Assessment of Inservice Conditions of Safety-Related Nuclear Power Plant Structures*", USA Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C.
- NUREG-1801 (2001), "*Generic aging lessons learned (GALL) report*", USA Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C.

- NUREG/CR-5248, 1988, LEVY, I. S., WREATHAL, J., DEMOSS, G, WOLFORD, A., COLLINS, E. P., JARREL, D. B., “*Prioritization of TIRGALEX-Recommended Components for Further Aging Research*”, USA Nuclear Regulatory Commission - NRC, Washington, DC
- NUREG/CR-5967, 1994, STOCK, D., VESELY, W., SAMANTA, P. K., E. AGGARWAL, S. K. “*Development and Application of the Degradation Modeling to Define Maintenance Practices*”, USA Nuclear Regulatory Commission - NRC, Washington, DC.
- NUREG/CR-5612, BNL-NUREG-52252 1991,. SAMANTA, P. K, VESELY, W. E., HSU, F. *at al*, “*Degradation Modeling with Application to Aging and Maintenance Effectiveness Evaluations*”. USA Nuclear Regulatory Commission - NRC, Washington, DC.
- NUREG/CR-6415, 1996, VESELY, W., SAMANTA, P. K. “*Applications of Reliability Degradation Analysis*”, USA Nuclear Regulatory Commission - NRC, Washington, DC.
- NUREG/CR-6876, 2005, BRAVERMAN, J. I., DEGRASSI, G, MARTINEZ-GURIDI, G., MORANTE, R. J, HOFMAYER, C. H. “*Risk-Informed Assessment of Degraded Buried Piping Systems in Nuclear Power Plants*” USA Nuclear Regulatory Commission - NRC, Washington, DC.
- NUREG/CR-6920, 2006, SPENCER, B. W., PETTI, J. P, KUNSMAN D. N. “*Risk-Informed Assessment of Degraded Containment Vessels*”, USA Nuclear Regulatory Commission - NRC, Washington, DC.
- PAPOULIS, A., 1985, “*Probability, Random Variables and Stochastic Processes*”, 2 ed. New York, Mc Graw Hill.
- PERES, F., BOUZAIENE, L, BOUCQUET, J-C., BILLY, F, *et al*, 2007, “*Anticipating Aging Failure Feedback Data and Expert Judgment*”, *Reliability Engineering & System Safety* , 92, 200-210.
- PERELLÓ, J., PORRÀ, J. M., MONTEIRO, M., MASOLIVER, J , 2000, “*Black-Scholes Option Pricing within Itô and Stratonovich Conventions*”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 278, Issues 1-2, pp.260-274.

- PHAM, H., SUPRASAS, A., MISRA, R.B, 1997, “ *Availability and Mean Life Time Prediction of Multistage Degraded System With Partial Repairs*” Reliability Engineering & System Safety, 56, 169-173.
- PLANCK, M.,1917., “*Sitzungsber*”. Preuss. Akad, Wissens Phys. Math. Kl.
- PONTEDEIRO, E. M. B. D., “*Avaliação de Modelos de Impacto Ambiental para Deposição de Resíduos Sólidos Contendo Radionuclídeos Naturais em Instalações Minero-Industriais*”, Tese de Doutorado do PEM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- RAYLEIGH, L, 1891, “*Dynamical Problems IX Illustration of The Theory of Gases*” *Philos. Mag.* 32, pp.424-445; Scientific Papers III, University Press, Cambridge, 1902.
- REICHL, L. E., 1980, “*A Modern Course in Statistical Physics*”, University of Texas Press, Austin.
- REIF, F., 1965. “*Statistical Physics, Berkeley Physics Course*”, 5, Mcgraw-hill, New York, US.
- RELIASOFT CORPORATION, 2006, “*Life Data Analysis*”. Tucson, AZ: ReliaSoft Publishing.
- RISKEN, H., 1984, “*The Fokker-Planck Equation, Methods of Solution and Applications*”, Berlin, Springer-Verlag.
- ROBERTS, J. T. A., 1981, “*Structural Materials in Nuclear Power Systems*”. Plenum Press. New York and London. 484p.
- ROOD, A. S., FOLAT: “*A Model for Assessment of Leaching and Transport of Radionuclides in Unsaturated Porous Media*”, Final Report of the Code, K-Spar Inc. Scientific Consulting, USA, 2003.
- ROSS, S. M., 2003, “*Peirce’s Criterion for the Elimination of Suspect Experimental data*”. Journal of Engineering Technology.
- ROSS, S. M., 2007, *Introduction to Probability Models*. 9^a ed., Elsevier, California.

- SALDANHA, P. L. C., 2003, “*Uma Aplicação de Processos Pontuais Modulados à Avaliação do Envelhecimento Para a Extensão da Vida Qualificada de Equipamentos de Centrais Nucleares*”. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SALATI, I. P.A., TAUHATA, L., DI PRINZIO, R., DI PRINZIO, A. R., 2001, “*Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*”. Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD-CNEN. Rio de Janeiro. 214 p.
- SALAMON, P. et al., 2006, “*A Review and Numerical Assessment of the Random Walk Particle Tracking Method*”, Science Direct, Elsevier - Journal of Contaminant Hydrology, 87(2006)277-305, Institute for Water and Environmental Engineering, Technical University of Valencia, Valencia, Spain.
- SATOH, T., SATOH, Y., UCHIDA, S., 2003, “*Water Chemistry in a Crack Tip under Irradiation, (II) Evaluation of Oxidant Concentration in the Crack Tip*”. Journal of Nuclear Science and Technology. Vol. 40, No. 5. p. 334-342.
- SAUER, T., “*Numerical Solution of Stochastic Differential Equations in Finance*”, Chapter 19 of Handbook of Computational Finance, Springer Handbooks of Computational Statistics DOI 10.1007/978-3-642-17254-0_19, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2012.
- SAYTO, Y., 2014, “*Stability Analysis of Numerical Methods for Stochastic System with Additive Noise*”, downloaded from the site: <http://www.shotoku.ac.jp/data/facilities/library/publication/education-keizai08206.pdf>.
- SHIBATA, T., 1996, “*Statistical and Stochastic Approaches to Localized Corrosion*”, *Corrosion* v. 52, pp. 813-830
- SIMÕES, C. A. A., “*Extensão de Vida de Reatores Nucleares – Análise de Reatores a Água Pressurizada (PWR)*”, Dissertação de Mestrado do IME, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- SMITH, G. D, 1965, “*Numerical Solution of Partial Differential Equations*”, 1 ed. London, Oxford University Press.
- SMITH, D., HOROWITZ, J., 2014, “*The Role of Cheworks in an Effective FAC Program*”, International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech Republic.

- SOONG, T. T., 1973 , “*Random Differential Equations in Science and Engineering*”, 1 ed. New York and London, Academic Press.
- SORO, W. I., NORELFATH, M., AÏT-KADI, D., 2010, “*Performance Evaluation of Multi-State Degraded Systems With Minimal Repairs and Imperfect Preventive Maintenance*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 95, pp.65-69.
- STROOCK, D. W., 2005, “*Introduction to Markov Processes*”, Department of Mathematics, Massachusetts Institute of Technology – MIT, Springer Publisher, Printed in Germany, Berlin, Germany.
- TAN, C.M., RAGHAVAN, N., 2008, “*A Framework to Practical Predictive Maintenance Modeling for Multi-State Systems*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 93, pp.1138-1150.
- TAN, C.M., LE, M.C., 2013, “*Optimal maintenance strategy of deteriorating system under imperfect maintenance and inspection using mixed inspection scheduling*”, *Reliability Engineering & System Safety*, 113, pp.21-29.
- TAKEYAMA, T., SHIBATA, T., 1976, “Pitting Corrosion as a Stochastic Process”, *Nature*, Vol. 260, No. 5549, pp.315-316.
- TANKOV, P., 2014, “*Financial Modeling with Lévy Processes*”, Centre de Mathématiques – Ecole Polytechnique – CMAP, Paris, France, downloaded from the site: <http://www.impan.pl/CZM/tankov.pdf> .
- TAYLOR, J. R., 2012, “*Introdução à Análise de Erros*”, 2 ed. Amsterdam, Bookman.
- TELESCA, L., CZECHOWSKI, Z. ,2012, “Discriminating Geoelectrical Signals Measured in Seismic and Aseismic Areas by Using Itô Models”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 391, Issue 3, pp.809-818.
- TOMÉ, T., DE OLIVEIRA, M. J.,2001, “*Dinâmica Estocástica e Irreversibilidade*”, Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- TORRES, M. A., RUIZ, S. E., 2007, “*Structural Reliability Evaluation Considering Capacity Degradation Over Time*”, *Engineering Structures*, 29, pp.2183-2192.

- VALOR, A., CALEYO, F., RIVAS, D., *et al*, 2009, “*Stochastic Approach to Pitting-Corrosion-Extreme Modeling in Low Carbon Steel*”, *Corrosion Science*, 52, pp.910-915.
- VALOR, A., CALEYO, F., ALFONSO, L., *et al*, 2007, “*Stochastic Modeling of Pitting Corrosion: A New Model for Initiation and Growth of Multiple Corrosion Pits*”, *Corrosion Science*, 49, pp.559-579.
- VAN KAMPEN, N. G., 2007, “*Stochastic Process in Physics and Chemistry*”, 3 ed. Amsterdam, Elsevier Science & Technology Books.
- VAN VLACK, L.W., 1977, “*Princípios de Ciência dos Materiais*”. Tradução do Prof. Luiz Paulo C. Ferrão. Editora Edgard Blücher LTDA. Sao Paulo. 4^a. ed. 1977. 427 p.
- VINOD, G., BIDHAR, S. K., KUSHWAHA, H. S., *et al*, 2003, “*A Comprehensive Framework for Evaluation of Piping Reliability Due to Erosion-Corrosion for Risk-Informed In-service Inspection*” *Reliability Engineering & System Safety*, 82, pp.187-193.
- VON SMOLUKOWSKI, M., *Ann. Physik* (4) 21, 756, (1906); *Physik. Zeits.* 17, 557 and 585, (1916).
- WILLIAMS, D. E., WESTCOTT, C., FLEISHMANN, M., 1985, “*Journal of the Electrochemical Society*”, vol. 132, pp. 1804.
- WADE, K. C., 1995, “*Steam Generator Degradation and Its Impact on Continued Operation of Pressurized Water Reactors in the United States*”. Disponível no site: <http://tonto.eia.doe.gov/FTPOOT/features/stemgen.pdf>.
- XUDONG, G., WEIGIU, Z., 2014, “*A Stochastic Averaging Method for Analyzing Vibro-Impact Systems under Gaussian White Noise Excitations*”, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 333, Issue 9, pp.2632-2642.
- YEH, R. H., 1996, “*Optimal Inspection and Replacement Policies for Multi-State Deteriorating Systems*” *European Journal of Operational Research*, 96, pp.248-259.

YUAN, X. X., PANDEY, M. D., BICKEL, G. A., 2008, “*A Probabilistic Model of Wall Thinning in CANDU Feeders due to Flow-Accelerated Corrosion*”, Nuclear Engineering and Design, 238 (1), 16-24.

ZHANG, Z. G., LOVE, C. E., 2000 “*A Simple Recursive Markov Chain Model to Determine the Optimal Replacement Policies Under General Repairs*” *Computers & Operations Research*, 27, pp.321-333.

ZITKOVIC, G., 2010, “*Introduction to Stochastic Process*” – Lecture Notes, Department of Mathematic, The University of Texas, Austin, USA.

APÊNDICE A – Tabela Composição química dos aços inoxidáveis austeníticos

Tipo SAE/ASTM	TIPO AISI	Composição química (%)				Observações
		(Fe-balanço)				
		C	Cr	Ni	Outros	
S30400	304	0,08 máx.	18-20	8-11	Mn-2,0 máx Si-1,0 máx	Teor de carbono muito baixo, grande soldabilidade
S30403	304 L	0,03	18-20	8-12	Mn-2,0 máx Si-1,0 máx	Empregado para evitar a sensitização dos aços
S30800	308	0,08 máx.	19-21	10-12	Mn-2,0 máx Si-1,0 máx	Trata-se do aço de maior resistência à corrosão (utilizado em eletrodos de solda)
S31600	316	0,10 máx.	16-18	10-14	Mo-2-3% Mn-2,0 máx Si-1,0 máx	Muito empregado na indústria
S31603	316 L	0,03	16-18	10-14	Mo-2-3% Mn-2,0 máx Si-1,0 máx	Empregado para evitar sensitização e corrosão em torno do cordão de solda
S34700	347	0,08 máx	17-19	9-12	Nb-10%	Aço tipo 18-8 estabilizado

					x C mín Mn-2,0 máx Si-1,0 máx	para resistir à corrosão, em serviço a alta temperatura e onde se exige solda
--	--	--	--	--	---	---

Fonte: Corrosão LTC, 2003.

APÊNDICE B – GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS E EXPRESSÕES UTILIZADAS

- **AÇO CARBONO.** Liga de ferro-carbono contendo de 0,008% até aproximadamente 2,0% de carbono, e outros elementos residuais, resultantes do processo de fabricação, como fósforo, enxofre, manganês e silício.

- **AÇO DE BAIXA-LIGA.** Aço que contém no máximo 10% de elementos de liga.

- **AÇO EUTETÓIDE.** Aço com teor de carbono igual a 0,8%.

- **AÇOS INOXIDÁVEIS.** Aços contendo, no mínimo, cerca de 11,5% de cromo.

- **AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.** São aços cromo-níquel, com teores de cromo entre 16 a 26% e de níquel de 7 a 22%. O níquel está presente nesses aços para austenitizá-los, aumentando a sua resistência mecânica e acelerando a formação da camada protetora de óxido de cromo. A sua dureza só pode ser obtida mediante tratamento mecânico. São não-magnéticos, ao contrário dos outros tipos de aços. Estes aços estão sujeitos à corrosão intergranular em torno do cordão de solda, que é evitada através da adição de titânio, com teores maiores ou iguais a cinco ou dez vezes ao de carbono, respectivamente, ou nióbio, com teores maiores ou iguais a cinco ou dez vezes ao de carbono, respectivamente, cujos carbeto precipitam antes do carbeto de cromo. Na classificação da AISI (American Iron and Steel Institut), os aços austeníticos obedecem à série 3XX, onde o primeiro algarismo indica aços ao níquel-cromo.

- **AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS.** São aços com teores de cromo de 11 a 27%. Sua estrutura será sempre ferrítica; qualquer que seja a velocidade de resfriamento são aços “intemperáveis”. Sua dureza só pode ser aumentada através de trabalho mecânico a frio. Por este motivo, o único tratamento térmico possível é o recozimento, para aliviar as tensões provocadas pelo encruamento. Na classificação da

AISI, os aços ferríticos obedecem à série 4XX, onde o algarismo quatro indica aços ao molibdênio.

- **AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.** São aços constituídos de microestruturas resultantes de um balanço de estruturas austenítica-ferrítica. Devido à presença dessas estruturas, são classificados como aços duplex. Eles apresentam melhor resistência à corrosão sob tensão e corrosão por pite. Esses aços apresentam baixo teor de carbono a fim de minimizar a sensibilização e nitrogênio para elevar o teor de austenita, diminuir a segregação de cromo e molibdênio, e aumentar a resistência à corrosão da fase austenítica.

- **AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS.** São aços-cromo (teores de 11 a 18% em cromo). Trata-se de aços temperáveis, podendo ser de baixo, médio e alto teor de carbono. Quanto menor o teor de carbono, mais deformável será o aço, a frio ou a quente. Devem ser empregados sem componentes e estruturas que requeiram têmpera, pois este tratamento favorece a resistência à corrosão, porque mais supersaturada torna-se a **martensita** e mais difícil a subsequente precipitação de carbeto de cromo. Na classificação da AISI, os aços martensíticos também obedecem à série 4XX.

- **AÇO HIPEREUTETÓIDE.** Aço com teor de carbono acima de 0,8%.

- **AÇO HIPOEUTETÓIDE.** Aço com teor de carbono abaixo de 0,8%.

- **AUSTENITA OU FERRO GAMA.** Forma estável de ferro (910°C - 1400°C) de estrutura cúbica de face centrada. Apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares; tem boa resistência mecânica e notável tenacidade, e é amagnética. A solubilidade máxima do carbono na austenita é de 2%.

- **BAINITA.** Microestrutura de cementita dispersa em ferrita, produzida pela transformação, em baixa temperatura (200 a 550°C), da austenita.

- **CEMENTITA.** Carbeto de ferro de fórmula Fe_3C , cujo conteúdo de carbono é 6,67% ; muito duro e quebradiço. É responsável pela elevada dureza e resistência de aços de alto teor de carbono. A célula indica que a célula unitária, ortorrômbica, contém doze átomos de ferro e quatro átomos de carbono.

- **CONTORNO DE GRÃO.** Superfície entre dois grãos.

- **ENCRUAMENTO.** O aumento na dureza e na resistência de um metal dúctil à medida que ele é submetido a uma deformação plástica abaixo de sua temperatura de recristalização.

- **FERRITA.** Ferro que apresenta estrutura cúbica de corpo centrado ou liga de ferro baseada nesta estrutura.

- **FORMAS ALOTRÓPICAS DO FERRO.** O ferro tem um ponto de fusão de 1535°C e apresenta três formas alotrópicas. Faixa de temperatura sob pressão de 1,0 atmosfera (atm), na qual a fase existente em equilíbrio é identificada:

ferro- α ou α -ferrita: até 910°C

ferro- γ ou γ -ferrita: de 910°C - 1390°C

ferro- δ ou δ -ferrita: de 1390°C - 1535°C.

Estas formas alotrópicas caracterizam-se por apresentar retículos cristalinos diferentes:

α -ferrita: estrutura cúbica de corpo centrado (os átomos ocupam os vértices e o centro do cubo);

γ -ferrita: estrutura cúbica de face centrada (os átomos ocupam os vértices e os centros das faces do cubo);

δ -ferrita: estrutura cúbica de corpo centrado.

Uma diferença fundamental entre estas variedades é em relação ao poder solvente do carbono: ferro- γ pode solubilizar até cerca de 2,06% de carbono a 1147°C, formando solução sólida (esta solução sólida é chamada austenita). À medida que a temperatura decresce, a solubilidade do carbono diminui.

- **LIGA METÁLICA.** Material constituído de dois ou mais elementos, sendo um deles metal.

- **MARTENSITA.** Fase metaestável correspondendo a uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro alfa (estrutura cúbica de corpo centrado). A martensita é resultante de um tratamento térmico com uma velocidade de esfriamento muito rápida da austenita, não permitindo a expulsão do carbono da solução sólida para formar Fe_3C . Ocorre, desta forma, a transformação alotrópica do ferro gama para ferro alfa. A distorção do reticulado cúbico de corpo centrado provocada por esse tratamento é responsável pela sua extrema dureza.

- **PERLITA.** Microestrutura da liga ferro-carbono constituída de ferrita e cementita lamelares contendo 0,8% de carbono.

- **RECOZIMENTO.** Tratamento térmico realizado para alcançar um destes objetivos: remover tensões provocadas por tratamento mecânico a frio ou a quente; diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço; alterar as propriedades mecânicas como resistência, ductilidade; ajustar as dimensões dos grãos (cristais individuais); regularizar a textura bruta de fusão; remover gases; produzir uma microestrutura definida.

As estruturas resultantes do recozimento são a ferrita e perlita (aços hipoeutetóides), cementita e perlita (aços hipereutetóides) e perlita (aços eutetóides)

- **SINTERIZAÇÃO.** Aglomeração de sólidos por meios térmicos.

APÊNDICE C – Tabela Exemplos de corrosão observadas em reatores a água pressurizada

TIPOS DE CORROSÃO	MATERIAIS SUSCEPTÍVEIS	AGENTES CAUSADORES
Corrosão sob tensão	Aços inoxidáveis austeníticos	(íon cloreto), O ₂ , (íon fluoreto)
Corrosão cáustica	Zircaloy, aços austenítico e ferrítico	Concentrado cáustico no ponto de ataque
Corrosão galvânica	Vários materiais, cujas taxas de susceptibilidade dependem da resistência geral à corrosão e da posição dos elementos químicos na série eletroquímica	Contato de diferentes materiais, com a solução condutora
Corrosão por pite	Ligas ferríticas	(íon cloreto), O ₂
Corrosão sob contato ou em fresta	Vários materiais cujas taxas de Susceptibilidade depende da Resistência de cada material à corrosão	Frestas, O ₂ , sais dissolvidos em água
Corrosão sob tensão	Inconel	Chumbo em água

Fonte: Reatores a água pressurizada, NRC, 1974.

APÊNDICE D – A PROBABILIDADE PERCENTUAL

$$\text{Prob (dentro de } t\sigma) = \int_{X-t\sigma}^{X+t\sigma} G_{X,\sigma}(x)dx, \text{ COMO FUNÇÃO DE } t$$

t	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,0	0,80	1,60	2,39	3,19	3,99	4,78	5,58	6,38	7,17
0,1	7,97	8,76	9,55	10,34	11,13	11,92	12,71	13,50	14,28	15,07
0,2	15,85	16,63	17,41	18,19	18,97	19,74	20,51	21,28	22,05	22,82
0,3	23,58	24,34	25,10	25,86	26,61	27,37	28,12	28,86	29,61	30,35
0,4	31,08	31,82	32,55	33,28	34,01	34,73	35,45	36,16	36,88	37,59
0,5	38,29	38,99	39,69	40,39	41,08	41,77	42,45	43,13	43,81	44,48
0,6	45,15	45,81	46,47	47,13	47,78	48,43	49,07	49,71	50,35	50,98
0,7	51,61	52,23	52,85	53,46	54,07	54,67	55,27	55,87	56,46	57,05
0,8	57,63	58,21	58,78	59,35	59,91	60,47	61,02	61,57	62,11	62,65
0,9	63,19	63,72	64,24	64,76	65,28	65,79	66,29	66,80	67,29	67,78
1,0	68,27	68,75	69,23	69,70	70,17	70,63	71,09	71,54	71,99	72,43
1,1	72,87	73,30	73,73	74,15	74,57	74,99	75,40	75,80	76,20	76,60
1,2	76,99	77,37	77,75	78,13	78,50	78,87	79,23	79,59	79,95	80,29
1,3	80,64	80,98	81,32	81,65	81,98	82,30	82,62	82,93	83,24	83,55
1,4	83,85	84,15	84,44	84,73	85,01	85,29	85,57	85,84	86,11	86,38
1,5	86,64	86,90	87,15	87,40	87,64	87,89	88,12	88,36	88,59	88,82
1,6	89,04	89,26	89,48	89,69	89,90	90,11	90,31	90,51	90,70	90,90
1,7	91,09	91,27	91,46	91,64	91,81	91,99	92,16	92,33	92,49	92,65
1,8	92,81	92,97	93,12	93,28	93,42	93,57	93,71	93,85	93,99	94,12
1,9	94,26	94,39	94,51	94,64	94,76	94,88	95,00	95,12	95,23	95,34
2,0	95,45	95,56	95,66	95,76	95,86	95,96	96,06	96,15	96,25	96,34
2,1	96,43	96,51	96,60	96,68	96,76	96,84	96,92	97,00	97,07	97,15
2,2	97,22	97,29	97,36	97,43	97,49	97,56	97,62	97,68	97,74	97,80
2,3	97,86	97,91	97,97	98,02	98,07	98,12	98,17	98,22	98,27	98,32
2,4	98,36	98,40	98,45	98,49	98,53	98,57	98,61	98,65	98,69	98,72
2,5	98,76	98,79	98,83	98,86	98,89	98,92	98,95	98,98	99,01	99,04
2,6	99,07	99,09	99,12	99,15	99,17	99,20	99,22	99,24	99,26	99,29
2,7	99,31	99,33	99,35	99,37	99,39	99,40	99,42	99,44	99,46	99,47
2,8	99,49	99,50	99,52	99,53	99,55	99,56	99,58	99,59	99,60	99,61
2,9	99,63	99,64	99,65	99,66	99,67	99,68	99,69	99,70	99,71	99,72
3,0	99,73									
3,5	99,95									
4,0	99,994									
4,5	99,9993									
5,0	99,9999 4									

APÊNDICE E – TABELA DO CRITÉRIO DE PEIRCE

VALORES OF R

	Total number of observations								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	1.196								
4	1.383	1.078							
5	1.509	1.200							
6	1.610	1.299	1.099						
7	1.693	1.382	1.187	1.022					
8	1.763	1.453	1.261	1.109					
9	1.824	1.515	1.324	1.178	1.045				
10	1.878	1.570	1.380	1.237	1.114				
11	1.925	1.619	1.430	1.289	1.172	1.059			
12	1.969	1.663	1.475	1.336	1.221	1.118	1.009		
13	2.007	1.704	1.516	1.379	1.266	1.167	1.070		
14	2.043	1.741	1.554	1.417	1.307	1.210	1.120	1.026	
15	2.076	1.775	1.589	1.453	1.344	1.249	1.164	1.078	
16	2.106	1.807	1.622	1.486	1.378	1.285	1.202	1.122	1.039
17	2.134	1.836	1.652	1.517	1.409	1.318	1.237	1.161	1.084
18	2.161	1.864	1.680	1.546	1.438	1.348	1.268	1.195	1.123
19	2.185	1.890	1.707	1.573	1.466	1.377	1.298	1.226	1.158
20	2.209	1.914	1.732	1.599	1.492	1.404	1.326	1.255	1.190
21	2.230	1.938	1.756	1.623	1.517	1.429	1.352	1.282	1.218
22	2.251	1.960	1.779	1.646	1.540	1.452	1.376	1.308	1.245
23	2.271	1.981	1.800	1.668	1.563	1.475	1.399	1.332	1.270
24	2.290	2.000	1.821	1.689	1.584	1.497	1.421	1.354	1.293
25	2.307	2.019	1.840	1.709	1.604	1.517	1.442	1.375	1.315
26	2.324	2.037	1.859	1.728	1.624	1.537	1.462	1.396	1.336
27	2.341	2.055	1.877	1.746	1.642	1.556	1.481	1.415	1.356
28	2.356	2.071	1.894	1.764	1.660	1.574	1.500	1.434	1.375
29	2.371	2.088	1.911	1.781	1.677	1.591	1.517	1.452	1.393

30	2.385	2.103	1.927	1.797	1.694	1.608	1.534	1.469	1.411
31	2.399	2.118	1.942	1.812	1.710	1.624	1.550	1.486	1.428
32	2.412	2.132	1.957	1.828	1.725	1.640	1.567	1.502	1.444
33	2.425	2.146	1.971	1.842	1.740	1.655	1.582	1.517	1.459
34	2.438	2.159	1.985	1.856	1.754	1.669	1.597	1.532	1.475
35	2.450	2.172	1.998	1.870	1.768	1.683	1.611	1.547	1.489
36	2.461	2.184	2.011	1.883	1.782	1.697	1.624	1.561	1.504
37	2.472	2.196	2.024	1.896	1.795	1.711	1.638	1.574	1.517
38	2.483	2.208	2.036	1.909	1.807	1.723	1.651	1.587	1.531
39	2.494	2.219	2.047	1.921	1.820	1.736	1.664	1.600	1.544
40	2.504	2.230	2.059	1.932	1.832	1.748	1.676	1.613	1.556
41	2.514	2.241	2.070	1.944	1.843	1.760	1.688	1.625	1.568
42	2.524	2.251	2.081	1.955	1.855	1.771	1.699	1.636	1.580
43	2.533	2.261	2.092	1.966	1.866	1.783	1.711	1.648	1.592
44	2.542	2.271	2.102	1.976	1.876	1.794	1.722	1.659	1.603
45	2.551	2.281	2.112	1.987	1.887	1.804	1.733	1.670	1.614
46	2.560	2.290	2.122	1.997	1.897	1.815	1.743	1.681	1.625
47	2.568	2.299	2.131	2.006	1.907	1.825	1.754	1.691	1.636
48	2.577	2.308	2.140	2.016	1.917	1.835	1.764	1.701	1.646
49	2.585	2.317	2.149	2.026	1.927	1.844	1.773	1.711	1.656
50	2.592	2.326	2.158	2.035	1.936	1.854	1.783	1.721	1.666
51	2.600	2.334	2.167	2.044	1.945	1.863	1.792	1.730	1.675
52	2.608	2.342	2.175	2.052	1.954	1.872	1.802	1.740	1.685
53	2.615	2.350	2.184	2.061	1.963	1.881	1.811	1.749	1.694
54	2.622	2.358	2.192	2.069	1.972	1.890	1.820	1.758	1.703
55	2.629	2.365	2.200	2.077	1.980	1.898	1.828	1.767	1.711
56	2.636	2.373	2.207	2.085	1.988	1.907	1.837	1.775	1.720
57	2.643	2.380	2.215	2.093	1.996	1.915	1.845	1.784	1.729
58	2.650	2.387	2.223	2.101	2.004	1.923	1.853	1.792	1.737
59	2.656	2.394	2.230	2.109	2.012	1.931	1.861	1.800	1.745
60	2.663	2.401	2.237	2.116	2.019	1.939	1.869	1.808	1.753

APÊNDICE F – PROGRAMA PARA RESOLVER A EQUAÇÃO DE ITÔ

"MÉTODO DE EULER-MARUYAMA - SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ITO"

Evolução da Profundidade da Corrosão

```
<<Statistics`ContinuousDistributions`
```

```
ndist=NormalDistribution[0,1]
```

```
a=CDF[ndist,x]
```

```
tinicial=0
```

```
tfinal=21
```

```
deltat=0.1
```

```
a=0.676997579
```

```
b=0.028692904
```

```
x0=0
```

```
n=IntegerPart[(tfinal-tinicial)/deltat]
```

```
m=n
```

```
"Geração de n números aleatórios de uma distribuição normal"
```

```
nd1=Table[Random[ndist],{n}]
```

```
nd=ReplacePart[nd1,0,1]
```

```
"Gráfico de n números aleatórios gerados de uma distribuição normal"
```

```
Plot[nd[[IntegerPart[t]],{t,1,n},AxesLabel{"[x]","Number"}]
```

```
t=Table[i,{i,tinicial,tfinal-deltat,deltat}]
```

```
lista1=Table[0,{n}]
```

```
lista2=Table[0,{n}]
```

```
lista3=Table[0,{n}]
```

```
listabt=Table[0,{n}]
```

```
"Comprimentos de t e nd"
```

```
Length[t]
```

```
Length[nd]
```

```
"Outros dados do problema"
```

```
y[1]=x0
```

```
i=1
```

"Solução numérica"

```
"Loop estocástico"
```

```
(control=n-1;
```

```
i=1;
```

```
Label[dois];
```

```
Print["Valor de i"];
```

```
Print[i];
```

```
xa[i]=a;
```

```
Print["Valor de a[i]"];
```

```
Print[a[i];
```

```
xb[i]=(b^0.5);
```

```
Print["Valor de b[i]"];
```

```
Print[xb[i];
```

```
lista3[[i]]=y[i];
```

```

y[i+1]=y[i]+xa[i]*deltat+xb[i]*(nd[[i+1]]*((t[[i+1]]- t[[i]])^0.5));
Print["Valor de y[i]"];
Print[y[i]];
lista1[[i]]=xa[i];
lista2[[i]]=xb[i];
lista3[[i+1]]=y[i+1];
If[control>i,Goto[um],Break[]];
Label[um];
i=i+1;
Goto[dois]

```

"Solução analítica"

"Valor de t1"

$t1=(t^0.5)$

"Valor de xt"

$xt=a*t+(b^0.5)*nd*(deltat^0.5)$

"Valor de modxt"

$modxt=Table\{i*deltat-deltat,xt[[i]],\{i,1,m\}\}$

"Valor da lista3"

lista3

$modlista3=Table\{i*deltat-deltat,lista3[[i]],\{i,1,m\}\}$

"Gráfico de xt"

Print["Solução Analítica da Equação da Evolução da Profundidade da Corrosão"]

$plotmodxt=ListPlot[modxt,PlotJoinedTrue,AxesLabel\{t[a],Y(t)[mm]\},PlotStyle\{RGBColor[0,0,1]\}$

"Gráfico de lista3"

Print["Solução Numérica (Euler-Maruyama) da Equação da Evolução da Profundidade da Corrosão"]

$plotmodlista3=ListPlot[modlista3,PlotJoinedTrue,AxesLabel\{t[a],Y(t)[mm]\},PlotStyle\{RGBColor[1,0,0]\}$

$ploth=Show[plotmodxt,plotmodlista3]$

"Valores de xt e lista3"

xt

lista3

"Valores de xt[[70]], xt[[71]], lista3[[70]] e lista[[71]]"

xt[[70]]

xt[[71]]

lista3[[70]]

lista3[[71]]