

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DE SEGURANÇA DE DUTOS COM DEFEITOS
DE CORROSÃO**

AUTORA: RENATA SIQUEIRA AMARAL

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte da exigência para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, Junho de 2011

A485a Amaral, Renata Siqueira.
Análise de segurança de dutos com defeitos de corrosão [manuscrito] /
Renata Siqueira Amaral. - 2011.

ix, 82f.: il. color., grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil.
Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Mecânica dos fluidos -
Teses. 3. Dutos - Teses. 4. Corrosão - Teses. I.

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio e Teresa, pelo incentivo, apoio e por acreditarem no meu sucesso. Amo vocês!

Aos meus irmãos, Bruno e Fernanda, pela amizade e carinho. E aos meus cunhados, Kátia e Fernando pela amizade.

Ao Edilson, pelo carinho, incentivo, paciência e compreensão. Te amo!

Ao meu orientador Marcilio, pela oportunidade da orientação, pelo ensinamento, apoio e paciência. Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFOP pelo aprendizado.

Aos amigos do mestrado pelo companheirismo e ajuda principalmente a Rosana.

A república Lilith pela amizade.

A todos da minha família, avó, tias, tios, primas e primos pelo apoio e por torcerem por mim.

A todos que direta ou indiretamente me auxiliaram e rezaram por mim. Muito obrigada sem vocês não seria possível!

RESUMO

Um dos principais motivos de falhas de dutos é a corrosão. A identificação, monitoramento e controle da corrosão são de suma importância ao longo de toda a vida útil de um duto. Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a avaliação da pressão interna de falha para dutos corroídos. Entre os métodos analíticos semi-empíricos destacam-se ASME B31G, B31G modificado e RPA. A maioria destes métodos é de natureza determinística, não considerando, portanto, nenhuma incerteza nas variáveis envolvidas, além de considerar apenas configurações de defeitos simplificadas. Outra possibilidade de avaliar a pressão de falha do duto é utilizar o método dos elementos finitos, com a consideração das não linearidades envolvidas e uma configuração do defeito mais próximo da realidade. Esta possibilidade pode se tornar cara computacionalmente em algumas situações. Para isto será utilizada a teoria da confiabilidade estrutural aplicando o método FORM (*First Order Reliability Method*) para estimar a probabilidade de falha (confiabilidade) de dutos que apresentam defeitos de corrosão. Serão considerados vários parâmetros do duto e da geometria do defeito, tais como diâmetro e espessura do duto, tensão última e de escoamento do material do duto, comprimento e profundidade do defeito e a pressão do fluido. Todos estes parâmetros serão considerados como variáveis aleatórias, com uma distribuição de probabilidade associada a cada um deles.

ABSTRACT

One of the main reasons for failures of pipelines is corrosion. The identification, monitoring and controlling corrosion are of paramount importance throughout the life of a pipeline. Several methods have been developed for assessing the internal pressure of failure for corroded pipes. Among the semi-empirical analytical methods stand out ASME B31G modified B31G and RPA. Most of these methods are deterministic in nature and did not consider therefore, no uncertainty in the variables involved and consider only configurations of defects simplified. Another possibility to evaluate the failure pressure of the duct is to use the finite element method with consideration of the nonlinearities involved and a default configuration is closer to reality. This can become computationally expensive in some situations. This will be used for the theory of structural reliability using the method FORM (First Order Reliability Method) to estimate the probability of failure (reliability) of pipelines with defects of corrosion. Will be considered multiple parameters of duct and the geometry of the defect such as diameter and thickness of the pipe ultimate stress and drainage of the duct material length and defect depth and fluid pressure. All these parameters are considered as random variables with a probability distribution associated with each.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I- Introdução.....	1
1.1- Considerações Gerais.....	1
1.2- Objetivos e descrição do trabalho.....	3
1.3- Trabalhos anteriores	4
1.4- Estrutura do Trabalho	4
CAPÍTULO II – Corrosão em Dutos.....	6
2.1- Dutos e a Corrosão	6
2.2-Mecanismos da corrosão	7
2.3- Formas de corrosão.....	8
2.3.1- Corrosão Uniforme	10
2.3.2- Corrosão por placas	10
2.3.3- Corrosão alveolar.....	10
2.3.4 – Corrosão puntiforme ou por pites	10
2.3.5- Corrosão Intergranular (intercristalina).....	11
2.3.6- Corrosão intragranular (transgranular ou transcristalina).....	11
2.3.7- Corrosão filiforme	11
2.3.8- Corrosão por esfoliação	12
2.4- Localização e a taxa dos defeitos nos dutos	12
2.5- Controle de corrosão nos dutos	13
2.6- Inspeção para dutos	14
2.7 -Métodos Analíticos Semi- Empíricos.....	14
2.7.1-Método ASME B31G	16
2.7.2-Método B31G Modificado ou 085dL.....	18
2.7.3-Método RPA ou 085dL Modificado.....	19
2.7.4-Método DNV RP-F101.....	20

2.7.5-Método PCORRC ou Battelle	21
2.8 – Exemplo de determinação de pressão de falha	22
2.8.1 – Resultados para o exemplo	22
CAPÍTULO III – Análise de Confiabilidade Estrutural	24
3.1- Introdução	24
3.2- Identificação das incertezas	25
3.3 – Normas de projeto.....	29
3.4- Classificação dos métodos de confiabilidade	30
3.5- Considerações de Segurança nas Normas	32
3.5.1- Métodos das Tensões Admissíveis	33
3.5.2- Método dos Estados Limites	35
3.5.3- Ações	36
3.5.4- Processo de calibração de normas	37
3.6- Métodos para análise de confiabilidade	39
3.7- Método analítico FORM (First Order Reliability Method)	44
3.7.1- Transformação de variáveis.....	46
3.7.2- Busca ao Ponto de Projeto.....	49
3.7.3- Medidas de sensibilidade.....	50
3.8- Método SORM (<i>Second Order Reliability Method</i>)	52
3.9- Método de Monte Carlo.....	56
CAPITULO IV – Avaliação da segurança de dutos - Exemplos.....	60
4.1- Exemplo 1: Ahammed.....	60
4.1.1-Cálculo de importância das variáveis.	65
4.1.2- Comparação entre os métodos semi-empíricos	67
4.1.2.1- Defeitos Curtos.....	67
4.1.2.2 - Defeitos longos.....	68
4.1.3- Influência do coeficiente de variação para diferentes valores para a formulação de Ahammed.	69

4.2- Exemplo 2 (Adaptado de Zhou)	74
4.2.1- Cálculo da importância das variáveis	76
CAPÍTULO V – Comentários finais	78
CAPÍTULO VI- Referências Bibliográficas.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo corrosivo	8
Figura 2.2 - Formas de corrosão	9
Figura 3.1 - Função densidade de probabilidade $f_R(r)$ e $f_S(s)$	41
Figura 3.2 - Efeito da posição relativa entre $f_R(r)$ e $f_S(s)$ em P_f	42
Figura 3.3 - Efeito da dispersão em $f_R(r)$ e $f_S(s)$ em P_f	42
Figura 3.4 - Função densidade de probabilidade da margem de segurança	43
Figura 3.5 - Representação gráfica do Método FORM	45
Figura 3.6 - Demonstração gráfica da transformação de variáveis e dos métodos FORM e SORM.....	52
Figura 4.1 - Gráfico do índice de confiabilidade versus o período de exposição.....	63
Figura 4.2 - Gráfico da probabilidade de falha versus o período de exposição.....	64
Figura 4.3 - Índice de confiabilidade versus o período de exposição dos métodos semi-empíricos para defeitos curtos.	68
Figura 4.4 - Índice de confiabilidade versus o período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos.	69
Figura 4.5 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da profundidade do defeito para vários períodos.	70
Figura 4.6 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da pressão do fluido para vários períodos.	71
Figura 4.7 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da taxa de corrosão radial para vários períodos.	72
Figura 4.8 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da espessura da parede do tubo para vários períodos.....	73
Figura 4.9 - Gráfico do índice de confiabilidade versus o período de exposição.....	75
Figura 4.10 - Gráfico da probabilidade de falha versus o período de exposição.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores para o cálculo da pressão de falha.....	22
Tabela 2.2 - Resultados da pressão de falha para o exemplo	23
Tabela 3.1- Causas de falha estrutural	28
Tabela 3.2 - Fatores de erros cometidos pelas pessoas.....	28
Tabela 4.1 - Variáveis aleatórias e parâmetros de distribuição - Ahammed (1998).....	62
Tabela 4.2 - Cálculo do fator de importância de cada uma das variáveis dependendo do tempo de exposição.....	65
Tabela 4.3- Características probabilísticas dos parâmetros de entrada	74
Tabela 4.4 – Cálculo do fator de importância de cada uma das variáveis dependendo do tempo de exposição.....	77

CAPÍTULO I- Introdução

1.1- Considerações Gerais

Um dos motivos para a falha de um duto é a corrosão. A corrosão é a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição, processo que resulta na formação de produtos de corrosão e na liberação de energia.

O duto, como outras estruturas metálicas, deterioram-se com o tempo. Esta deterioração natural em um duto metálico geralmente ocorre como resultado dos efeitos nocivos do meio ambiente. O principal efeito é a corrosão, com a perda de metal na seção transversal, resultando em uma redução da capacidade e segurança do duto.

Para evitar prejuízos econômicos e ambientais é necessário avaliar de forma precisa os defeitos de corrosão. Baseados em ensaios experimentais para se determinar a capacidade de carga dos dutos, existem alguns métodos empíricos e semi- empíricos disponíveis, que dependendo das propriedades do material, da geometria do duto e da geometria do defeito podem mostrar-se conservadores e restritos.

Para garantir a vida longa de um duto, é necessário o estudo de métodos que controlem a corrosão e assim certificar o limite máximo de resistência de dutos que estão corroídos para se ter um maior controle do momento adequado para a intervenção numa linha, seja realizando manutenção ou alterando parâmetros operacionais.

Os métodos analíticos semi- empíricos como ASME B31G, ASME B31G modificado e RPA foram desenvolvidos para a avaliação da pressão interna de falha para dutos corroídos, sendo o método B31G o mais utilizado e aceito. O método dos elementos finitos também é uma forma para se avaliar a pressão de falha de um duto. A maioria desses métodos é considerada determinística, não se considerando a incerteza associada às variáveis utilizadas nas suas equações, impossibilitando que se garanta a segurança.

Os métodos citados estão preocupados com a estimativa da resistência atual, não se preocupando sobre a previsão de permanência em algum momento no futuro. Para um duto tal previsão seria muito útil, para estimar a segurança das operações futuras de um duto corroído. Com o monitoramento contínuo, com o reparo ou remoção de um duto pode-se reduzir ou eliminar a necessidade de manutenções.

Todos os métodos são de abordagem determinística que utilizam os valores nominais dos parâmetros de carga e resistência. Em uma abordagem determinística, os parâmetros associados são livres de qualquer incerteza, mas isso não é verdade, visto que geralmente os parâmetros de carga e resistência apresentam algum grau de variabilidade em seus valores. Isto dá origem a algumas incertezas na resistência de um duto, bem como a carga que atua sobre ele. A incerteza também pode ser devido à disponibilidade de dados limitada ou suposições simplificadoras. Essa abordagem determinística não pode fornecer qualquer informação quantitativa sobre a probabilidade de falha de um duto com o tempo. Para lidar com esses problemas é necessário empregar uma técnica de análise de confiabilidade. A análise de confiabilidade pode ser usada para avaliar a segurança e integridade, pode prever a vida útil restante ou remanescente de um duto corroído.

Os projetos de engenharia em geral envolvem a decisão sobre incertezas. Tradicionalmente o uso de normas facilita as considerações destas decisões, através do uso dos fatores de segurança que apresentam algumas limitações. Como segurança implica aferição de falha, é necessário quantificar a probabilidade de falha do duto. A determinação deste valor pode ser feita por métodos de confiabilidade os quais permitem a determinação do índice de confiabilidade, pelo método analítico de primeira ordem (FORM), que recai num problema de otimização. O presente trabalho tem como objetivo aplicar ferramentas de confiabilidade estrutural na análise de dutos com defeitos causados por corrosão. A análise de confiabilidade é conduzida levando-se em conta incertezas como o diâmetro do duto, espessura da parede do duto, comprimento do defeito, profundidade do defeito, taxa de corrosão radial, taxa de corrosão longitudinal, tensão de escoamento do material e pressão interna.

Este estudo foi conduzido em ambiente MATLAB com caracterização da função de falha obtida por soluções empíricas, considerando a pressão do fluido e a pressão de falha obtida por normas técnicas tais como os métodos semi-empíricos.

Será apresentada uma abordagem para quantificar a redução na segurança do duto e a vida útil restante. Irá se concentrar principalmente na superfície de corrosão orientada longitudinalmente. Com base na força circunferencial do duto, um modelo de confiabilidade será desenvolvido. A redução na resistência está diretamente relacionada com o crescimento de uma falha de corrosão. Para ilustrar a análise de confiabilidade é realizada em um duto, como exemplo, para vários períodos de exposição do mesmo. Uma análise de sensibilidade também é realizada para identificar os parâmetros mais importantes que afetam a segurança dos dutos corroídos.

1.2- Objetivos e descrição do trabalho

O objetivo do presente trabalho é o estudo da segurança ao longo do tempo, para diferentes condições de operação de dutos metálicos com defeitos produzidos por corrosão. Para isto será utilizada a teoria da confiabilidade estrutural aplicando o método FORM (First Order Reliability Method) para estimar a probabilidade de falha (confiabilidade) de dutos que apresentam defeitos de corrosão. Serão considerados vários parâmetros do duto e da geometria do defeito, tais como diâmetro e espessura do duto, tensão última e de escoamento do material do duto, comprimento e profundidade do defeito e a pressão do fluido. Todos estes parâmetros serão considerados como variáveis aleatórias, com uma distribuição de probabilidade associada a cada um deles.

Um dos principais motivos de falhas de dutos é a corrosão. A identificação, monitoramento e controle da corrosão são de suma importância ao longo de toda a vida útil de um duto. Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a avaliação da pressão interna de falha para dutos corroídos. Entre os métodos analíticos semi-empíricos destacam-se ASME B31G, B31G modificado e RPA. A maioria destes métodos é de natureza determinística, não considerando, portanto, nenhuma incerteza nas variáveis

envolvidas, além de considerar apenas configurações de defeitos simplificadas. Outra possibilidade de avaliar a pressão de falha do duto é utilizar o método dos elementos finitos, com a consideração das não linearidades envolvidas e uma configuração do defeito mais próximo da realidade. Esta possibilidade pode se tornar cara computacionalmente em algumas situações e não será utilizada neste trabalho.

1.3- Trabalhos anteriores

- Aplicação dos Métodos FORM e SORM para avaliação de dutos corroídos, André Luiz Rufino Cordeiro, Roberto Dalledone Machado, João Elias Abdalla Filho, Pontifícia Universidade Católica do Paraná;

- Análise de Confiabilidade de Oleodutos Corroídos utilizando o Método de Monte Carlo, Roberto M. F. Squarcio, Universidade Federal do Paraná;

- Análise de Dutos Corroídos por meio de Métodos de Confiabilidade Estrutural, Vicente Vanhazebrouck, Roberto Dalledone Machado, João Elias Abdalla filho, Pontifícia Universidade Católica do Paraná;

- Aplicação da Análise de Confiabilidade de dutos com defeitos causados por corrosão, Juliana Von Schmalz Torres, Silvana Maria Bastos Afonso da Silva, Universidade Federal de Pernambuco.

1.4- Estrutura do Trabalho

O conteúdo da dissertação está organizada em introdução (capítulo 1), revisão bibliográfica (capítulos 2 e 3), exemplos (capítulo 4), conclusões (capítulo 5) e referencias bibliográficas (capítulo 6).

O capítulo 1 faz considerações gerais dos dutos com corrosão. O capítulo 2 consiste na descrição dos dutos, os problemas de corrosão nos dutos, os métodos analíticos semi-empíricos para a avaliação dos dutos com defeito de corrosão.

O capítulo 3 descreve a confiabilidade estrutural, o método analítico FORM, as medidas de sensibilidade. Neste capítulo também é apresentado o método analítico SORM e o método Monte Carlo.

No capítulo 4 são considerados dois exemplos para avaliação de segurança dos dutos, são apresentados os resultados e análises dos exemplos.

Capítulo 5 são feitos comentários finais para a avaliação dos dutos considerando o método FORM, faz-se algumas discussões dos exemplos apresentados no capítulo 4. O capítulo 6 trata das referências bibliográficas.

CAPÍTULO II – Corrosão em Dutos

2.1- Dutos e a Corrosão

Os dutos se destinam ao transporte de fluidos ao longo de grandes distâncias, se classificando quanto ao emprego como tubulação de transporte. O duto é uma linha de condução de fluido, composto por vários segmentos: os tubos, unidos normalmente por soldas circunferências. O oleoduto ou poliduto é um duto destinado ao transporte de petróleo e seus derivados líquidos, podendo também transportar outras variedades de líquidos como o álcool. O gasoduto se destina ao transporte de grandes volumes de gases, principalmente o gás natural.

Os dutos metálicos enterrados utilizados no transporte de fluidos, instalados em áreas comuns às linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, tem apresentado histórico de corrosão externa mesmo estando protegidos catodicamente. Estudos atribuem este problema à presença de corrente alternada induzida na tubulação pelas linhas de transmissão de energia. As empresas de transporte de fluidos, principalmente as de derivados de petróleo e gás, preocupadas com a segurança pessoal e com o impacto ambiental causado no caso de vazamentos, investem cada dia mais em busca de soluções para evitar este tipo de corrosão. Os problemas vêm sendo atribuídos a diversos fatores: densidade de corrente alterada, frequência alternada, resistividade do solo, temperatura, pH e tamanho da área do defeito do revestimento.

A corrosão é a destruição ou deterioração de um material devido à reação química com seu meio. Quando isso ocorre, o metal perde suas qualidades essenciais, como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade e o produto de corrosão formado é extremamente pobre em termos desta propriedade. Quase sempre, a corrosão metálica (por mecanismo eletroquímico), está associada à exposição do metal num meio no qual existe a presença de moléculas de água juntamente com o gás oxigênio ou íons de hidrogênio, num meio condutor. Em geral é um processo espontâneo e, não fosse o emprego de mecanismos protetores, ter-se-ia a destruição completa dos materiais metálicos. Todos os metais estão sujeitos ao ataque corrosivo se o meio for

suficientemente agressivo. A importância dos problemas de corrosão é encarada segundo dois aspectos principais. O primeiro deles é o econômico, causando prejuízos para diversas empresas e o segundo relaciona-se com a conservação das reservas de minérios. Tendo em vista a permanente destruição dos materiais pela corrosão, há necessidade de uma reposição do que foi deteriorado.

2.2-Mecanismos da corrosão

A corrosão pode ser entendida como a reação inversa do processo metalúrgico (ABRACO, 2004). O metal, ao oxidar-se (sofre corrosão), transforma-se em um óxido semelhante ao do início do processo metalúrgico. O óxido de ferro encontrado na natureza com mais frequência é a hematita, cujo símbolo é Fe_2O_3 . A hematita é a matéria prima para a produção de ferro. A ferrugem, produto da corrosão do ferro, é nada mais do que esse mesmo composto hidratado, ou seja, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Uma maneira de produzir ferro é expor a hematita a temperaturas elevadas pela queima do carvão. É uma reação endotérmica (que consome energia):



Essa é uma reação reversível. O produto Fe (ferro) é instável à temperatura ambiente. A volta do elemento à forma original acontece naturalmente:



Essa última reação é espontânea, com desprendimento de energia para o meio ambiente. Esse processo corrosivo pode ser visto na Figura 2.1.

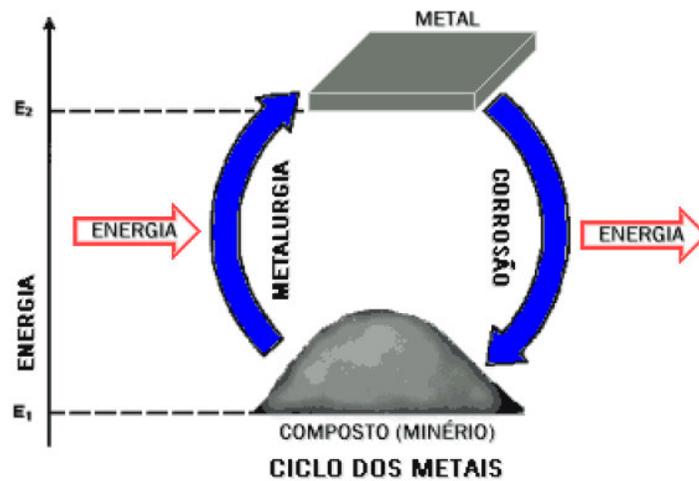


Figura 2.1 - Processo corrosivo

Fonte: www.abraco.org.br/corros11.htm

A corrosão deve ser levada em conta nas etapas de projeto, construção e acompanhamentos dos dutos, assim garantindo a vida útil de um duto e minimizando os riscos de acidentes. A adoção de uma ou mais formas de proteção contra a corrosão dos metais deve levar em conta aspectos técnicos e econômicos. Para se diminuir os custos decorrentes da corrosão podem ser feitas a aplicação de revestimentos e proteção catódica ou a substituição de tubos corroídos.

2.3- Formas de corrosão

As formas de corrosão podem ser generalizadas ou localizadas.

A corrosão pode ocorrer das seguintes formas: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme, intergranular (ou incristalina), intragranular (ou transgranular ou trascristalina), filiforme, por esfoliação.

As diversas formas de corrosão estão apresentadas na Figura 2.2.

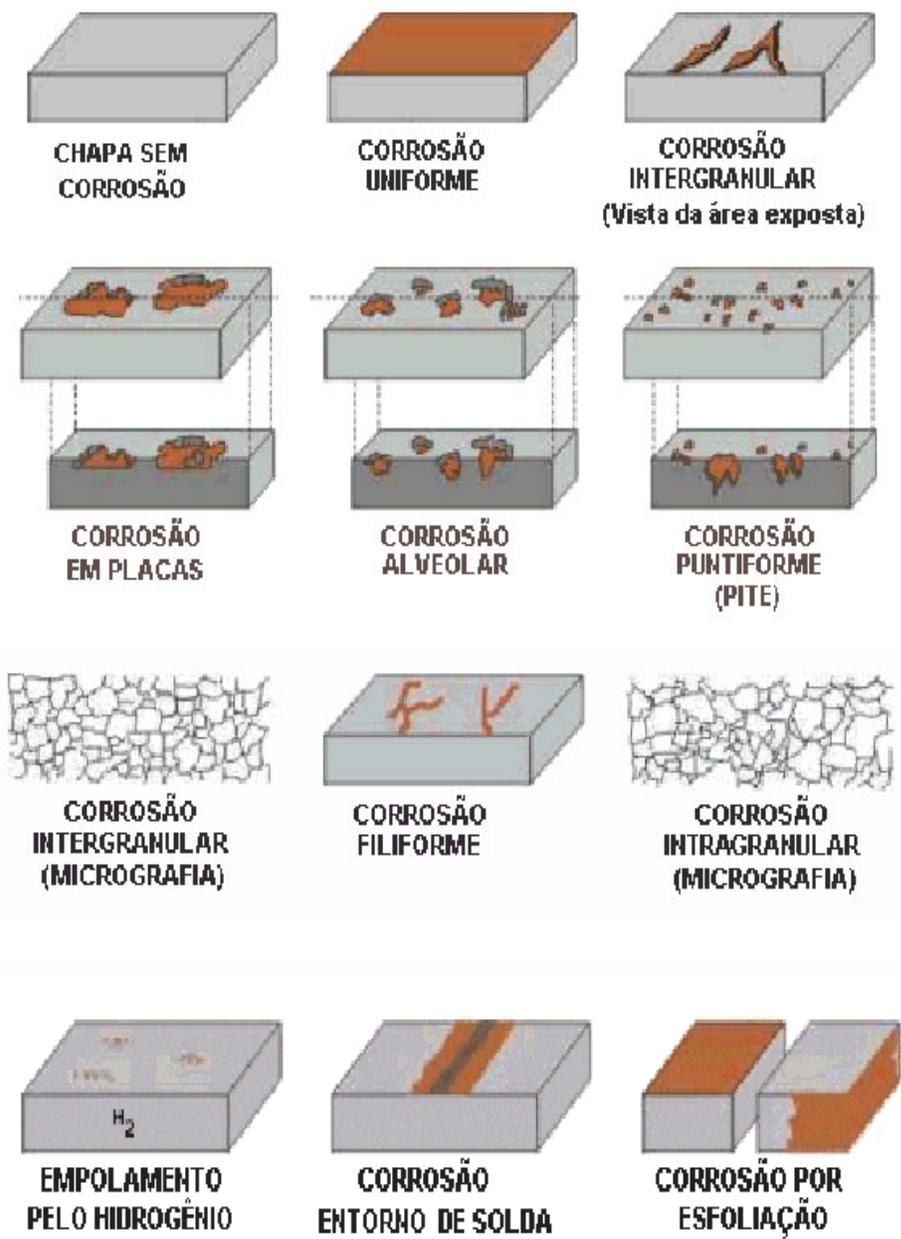


Figura 2.2 - Formas de corrosão

Fonte: www.abraco.org.br/corros11.htm

2.3.1- Corrosão Uniforme

A corrosão uniforme acontece quando toda a superfície metálica sofre a corrosão uniformemente, com igual perda de espessura. É também conhecida como corrosão generalizada. É comum em metais que não formam películas protetoras. Fácil de ser detectada por ser visível.

2.3.2- Corrosão por placas

A corrosão por placas acontece quando os produtos de corrosão formam-se em placas que se desprendem progressivamente. É comum em metais que formam película inicialmente protetora mas que, ao se tornarem espessas, fraturam e perdem aderência, expondo o metal a novo ataque.

2.3.3- Corrosão alveolar

A corrosão alveolar acontece quando o desgaste provocado pela corrosão se dá sob forma localizada, com o aspecto de crateras. Apresenta fundo arredondado e profundidade geralmente menor do que seu diâmetro.

2.3.4 – Corrosão puntiforme ou por pites

A corrosão puntiforme ou por pites localiza-se em alguns pontos distribuídos ao acaso e praticamente não existe na maior parte da superfície metálica. Há perda de massa do metal, mas não de maneira uniforme. Caracteriza-se pelo surgimento de cavidade em pequenas áreas da superfície metálica, apresentando o fundo em forma de ângulos e profundidade maior que seu diâmetro. Essas pequenas cavernas são chamadas de pites.

O pite pode atravessar completamente a espessura de uma chapa metálica. Ela é mais grave que a corrosão uniforme, porque é perfurante e mais difícil de ser detectada.

2.3.5- Corrosão Intergranular (intercristalina)

A corrosão intergranular acontece quando o ataque se manifesta no contorno dos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se a corrosão sob tensão fraturante. Os materiais mais susceptíveis são os aços inoxidáveis e as ligas de alumínio.

2.3.6- Corrosão intragranular (transgranular ou transcristalina)

A corrosão intragranular acontece quando o fenômeno se manifesta sob a forma de trincas que se propagam pelo interior dos grãos da rede cristalina do material, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fraturar-se a menor solicitação mecânica, tendo-se também a corrosão sob tensão fraturante.

2.3.7- Corrosão filiforme

A corrosão filiforme se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se cruzam. Ocorre geralmente em superfícies metálicas revestidas com tintas ou com metais onde se dá o deslocamento do revestimento. Observa-se o problema com mais frequência quando a umidade relativa do ar supera 85%, e principalmente em revestimentos mais permeáveis a penetração de oxigênio e de água, ou ainda, quando o revestimento apresenta imperfeições.

2.3.8- Corrosão por esfoliação

A corrosão por esfoliação se processa de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas cujos grãos foram achatados ou alongados. Caso estes sejam atingidos pela corrosão ocorre a separação das camadas e desintegração do material por esfoliação.

2.4- Localização e a taxa dos defeitos nos dutos

Os defeitos de corrosão quanto à localização nos dutos podem ser internos ou externos e longitudinais ou circunferenciais. Estes defeitos podem aparecer isolados ou em colônias.

Devem ser consideradas as taxas de corrosão para uma avaliação da vida útil de um duto. Essas taxas de corrosão expressam a velocidade do desgaste na superfície metálica. Os valores das taxas de corrosão podem ser expressos por meio da redução de espessura do material por unidade de tempo, como em mm/ano, ou em perda de massa por unidade de área por unidade de tempo. Para o conhecimento é necessário fazer medições sucessivas ou consultar tabelas na literatura. Essas taxas também podem variar ao longo do tempo. Na corrosão eletroquímica, por exemplo, a taxa de corrosão é diretamente proporcional a taxa do fluxo de corrente. A taxa do fluxo de corrente é afetada por diversos fatores, entre eles, a resistividade do solo e a eficiência do revestimento da tubulação.

Na avaliação da vida útil dos dutos é utilizada a redução de espessura por unidade de tempo, ou seja, o aumento de profundidade, largura e comprimento dos defeitos de corrosão ao longo do tempo. As taxas estão associadas aos métodos tradicionais de avaliação da resistência residual dos dutos, normalmente estando relacionadas também aos métodos estatísticos, ajudando assim a compor a avaliação de risco de um duto.

2.5- Controle de corrosão nos dutos

A manutenção e monitoramento da corrosão nos dutos podem evitar a deteriorização e falha nos dutos, com isso economizam dinheiro, preservam o meio ambiente e garantem a segurança pública. Os principais métodos de controle da corrosão nos dutos são:

- Os revestimentos: com a finalidade de formar um filme contínuo, constituído de material isolante, sobre uma superfície metálica que se pretende isolar. É a principal ferramenta para a defesa contra a corrosão. Podem ser aplicados revestimentos externos ou internos nos dutos, sendo normalmente a resina sintética epóxi. Os revestimentos são freqüentemente aplicados em conjunto com a proteção catódica para prover proteção mais efetiva.

- Por proteção catódica: é o uso direto de eletricidade corrente de uma fonte externa, em oposição da corrente de descarga da corrosão de áreas anódicas que estarão normalmente presentes. É usada quando parte ou todo um duto está enterrado ou submerso em água. Em novos dutos a proteção catódica pode prevenir o começo da corrosão. Em dutos existentes pode ajudar a parar o aumento da corrosão.

- Por inibidores de corrosão: que é uma substância química que sob determinadas condições elimina ou reduz o processo de corrosão. Podem ser aplicados no ambiente do duto ou no seu interior. Também servem para evitar a contaminação do produto transportado.

- Por controle de pigs: que são dispositivos que podem ser impulsionados pelo fluxo do próprio produto transportado dentro do duto. Pela sua passagem periódica no interior dos dutos deslocando colchões e raspadores, podem retirar sedimentos, fazer limpeza química assim como aplicar inibidores de corrosão ou revestimentos.

2.6- Inspeção para dutos

Existem vários métodos de inspeção para os dutos, entre eles estão:

- Inspeção visual: pode ser feito através do deslocamento de operadores ao longo dos trechos do duto. A dificuldade no método são as grandes distâncias a percorrer, sendo as vezes de difícil acesso. Pode ser usado o registro aéreo ou os pigs.

-Por pigs: que possuem grande capacidade de captação de dados por sensores. Os sensores podem ser, por exemplo, mecânicos, magnéticos ou ultra-sônicos. Possuem a facilidade de acesso a dutos enterrados ou submarinos. As principais funções dos pigs são: localizar e medir as perdas de material pela corrosão, localizar restrições ou válvulas parcialmente abertas, determinar seu raio de curvatura, levantar a configuração espacial do duto e detectar vazamentos.

-Por testes hidrostáticos: é colocada água dentro do duto sob pressões maiores que a de trabalho. São realizados durante a instalação do duto e também posteriormente.

-Por monitoramento estático: através de extensômetros colocados externamente nos dutos pode-se conhecer as tensões e deformações.

- Por detecção de vazamento: são posicionados sensores ao longo dos dutos para a detecção de vazamentos do produto transportado e monitora-se a pressão interna em cada instante.

2.7 -Métodos Analíticos Semi- Empíricos

O método ASME B31G é o que apresenta resultados mais conservadores na avaliação de dutos, podendo ser antieconômicos. Avalia dutos submetidos à pressão interna. Foi posteriormente alterado com a implementação do método 085dL ou B31G modificado que é menos conservador, mas com pressão máximas recomendadas abaixo das pressões de falha e apresentam resultados contra a segurança para defeitos longos e profundos. Por esta razão criou-se o método RPA ou 085dL modificado.

Estes métodos são baseados em equações da Mecânica da Fratura, em ensaios experimentais até a ruptura dos dutos, em simulações de elementos finitos, e cada método possui uma formulação para determinar a pressão de falha de dutos com defeitos de corrosão. O método ASME B31G é pioneiro na avaliação dos dutos corroídos desde o início da década de 70, possuindo ampla tradição de uso em campo devido ao seu conservadorismo, sendo a favor da segurança. Segundo este método, um duto com defeito de corrosão com a relação d/t maior que 0,8 (profundidade do defeito maior que 80% da espessura da parede do duto) deve ser reparado ou substituído. Se a relação d/t for menor que 0,1, o duto pode continuar operando normalmente, e para as condições intermediárias deve ser utilizado o método para avaliação.

O conservadorismo do método B31G é reconhecido como excessivo para defeitos de corrosão longos. O método considera os defeitos como infinitos a partir de um comprimento $a > \sqrt{20Dt}$, sendo D o diâmetro externo do duto e t a espessura da parede do duto, trazendo prejuízos econômicos pelo reparo devido a substituição de dutos ainda em condições de operação ou redução na pressão de operação.

O método 085dL é recomendado quando o material do duto não possui o limite mínimo de dureza. Este método não foi mais amplamente utilizado por muitas vezes apresentar resultados contra a segurança para defeitos uniformes longos e profundos.

A equação básica NG-18 *Surface Flaw Equation* é expressa por:

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \cdot f_r \quad (2.3)$$

onde σ_{rup} é a tensão de ruptura

σ_{flow} é a tensão de fluência

f_r é o fator de redução

A tensão circunferencial do duto é dada por $\sigma_{circ} = P \left(\frac{D}{2t} \right)$ e, no estado limite, $\sigma_{circ} = \sigma_{rup}$. Nesta situação particular considera-se que a pressão P é a pressão de falha (P_f). A pressão de falha é dada por:

$$P_f = \frac{2 \cdot \sigma_{rup} \cdot t}{D} = \sigma_{flow} \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \cdot \left[\frac{1 - \alpha \cdot \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \alpha \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^{M-1}} \right] \quad (2.4)$$

onde,

P_f é a pressão interna atuante no duto para ruptura do material;

t é a espessura da parede do duto;

D é o diâmetro externo do duto;

α é o fator empírico;

d é a profundidade de corrosão;

M é o fator de dilatação de Folias (adimensional).

2.7.1-Método ASME B31G

O método ASME B31G veio auxiliar as operadoras de dutos na tomada de decisão de continuar operando o duto, com defeitos de corrosão, de forma segura na pressão máxima de operação, definida para o sistema em operação.

O emprego deste método está limitado às seguintes condições:

- Dutos construídos segundo as normas ASME B31.4, ASME B31.8 e ASME B31.11.
- Dutos, com corrosão, fabricados com aço carbono ou aços de alta resistência de baixa liga, do tipo ASTM A 53, A 106, A 381, API 5LX e API 5L.
- Corrosão no corpo do duto, com contornos relativamente suaves que não cause elevada concentração de tensão.
- Não pode ser aplicado para corrosão em soldas longitudinais ou circunferenciais, áreas afetadas termicamente, danos mecânicos e defeitos de fabricação na chapa de aço.

- Duto sujeito apenas a carregamento de pressão interna.
- Defeitos de corrosão com perda de espessura compreendida entre 10% e 80%

da parede do duto.

O método ASME B31G foi concebido a partir do método semi-empírico NG-18 Surface Flaw Equation. As considerações feitas para a sua aplicação são as seguintes:

- A tensão circunferencial no defeito no instante da ruptura é igual à tensão de escoamento média (σ_{flow}) que é calculada da seguinte forma: $\sigma_{flow} = 1,1 \sigma_{esc}$, onde σ_{esc} é a tensão de escoamento do material, em MPa;

- O defeito é considerado curto se $a \leq \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$ e longo se $a > \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$, onde a é o comprimento do defeito, D o diâmetro do duto e t a espessura;

- Para defeitos considerados longos, o valor do fator de dilatação de Folias M assume um valor muito grande, tendendo para infinito;

- A área A é definida como sendo a área de material perdido projetada no plano que corta a parede do duto e passa pelo seu eixo;

- A área original da região corroída “ A_o ” é calculada como:

$$A_o = at;$$

- A área corroída “ A ” pode ser expressa por:

$$A = \alpha \cdot a \cdot d$$

onde α é a constante que define a forma geométrica adotada para representar a área de material perdido e a profundidade máxima do defeito.

O método ASME B31G definiu que a área de um defeito de corrosão considerado como curto assume uma forma de parábola, ou seja, $\alpha = 2/3$, enquanto que em defeitos longos, a área perdida assume a forma retangular, portanto α igual ao valor da unidade.

Este método considera as seguintes variáveis:

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

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \cdot \left(\frac{2 \cdot t}{D}\right) \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{A}{A_0}}}{1 - \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{A}{A_0} \cdot M^{-1}}} \right] \quad (2.5)$$

$$\text{onde } M = \sqrt{1 + 0,8 \left(\frac{a^2}{D \cdot t}\right)} \quad (2.6)$$

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

A é a área longitudinal de perda de metal devido à corrosão

A_0 é a área longitudinal do duto sem corrosão

a é o comprimento do duto

2) Pressão de falha para defeitos longos ($a > \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$, $\alpha=1$ e $M \rightarrow \infty$) que tem por expressão:

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \cdot \left(\frac{2 \cdot t}{D}\right) \cdot \left(1 - \frac{d}{t}\right) \quad (2.7)$$

2.7.2-Método B31G Modificado ou 085dL

Esta versão modificada do método ASME B31G foi proposta por Kiefner e Vierth (1996), como resultado do Projeto PR 3-805 do Pipeline Research Committee da AGA com o Instituto Battelle. Este método é também conhecido como Rstreng/0,85 dL.

As principais diferenças entre a versão modificada e original da ASME B31G são as seguintes:

- A área do material perdido equivale a 0,85 dL, ou seja $\alpha = 0,85$

- A tensão de escoamento média é dada por:

$$\sigma_{\text{flow}} = \sigma_{\text{esc}} + 69 \text{ MPa} \quad (2.8)$$

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

Aplicável para defeitos de corrosão com perda de espessura compreendida entre 20% e 80% da parede do duto, inclusive na região do cordão de solda do tipo SAW (soldagem por arco submerso).

1) Para defeitos curtos considera-se $a \leq \sqrt{50 \cdot D \cdot t}$, e o fator de Folias

$$M = \sqrt{\left[1 + 0,6275 \cdot \frac{a^2}{D \cdot t} + 0,003375 \cdot \left(\frac{a^2}{D \cdot t}\right)^2\right]} \quad (2.9)$$

onde a é o comprimento de corrosão.

2) Para defeitos longos considera-se $a > \sqrt{50 \cdot D \cdot t}$ e temos

$$M = 3,3 + 0,032 \cdot a^2 \cdot (D \cdot t)^{-1} \quad (2.10)$$

Para este método a pressão de falha é determinada por:

$$P_f = (\sigma_{\text{esc}} + 68,95) \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \cdot \left[\frac{1 - 0,85 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)}{1 - 0,85 \cdot \left(\frac{a}{t}\right) \cdot M^{-1}} \right] \quad (2.11)$$

2.7.3-Método RPA ou 085dL Modificado

Para defeitos curtos $a \leq \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$, a formulação é igual ao método B31G Modificado ou 085dL e para defeitos longos $a > \sqrt{20 \cdot D \cdot t}$, $M = 2,1 + 0,07 \cdot \frac{a^2}{D \cdot t}$:

Sendo,

$$P_f = (\sigma_{esc} + 68,95) \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \cdot \left[\frac{1 - 0,85 \cdot \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - 0,85 \cdot \left(\frac{d}{t}\right) \cdot M^{-1}} \right] \quad (2.12)$$

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

2.7.4-Método DNV RP-F101

Esta recomendação prática é baseada em duas alternativas de avaliação da corrosão. A principal diferença entre estas duas alternativas de avaliação, está no critério de segurança adotado.

As incertezas associadas à dimensão da corrosão e à propriedade do material são consideradas especificamente. Utilizam-se equações probabilísticas, juntamente com os fatores parciais de segurança, para se determinar a pressão de operação admissível.

É calculada a pressão de falha e depois se multiplica a mesma por um fator baseado no fator de projeto original. As considerações nas incertezas com o tamanho da corrosão ficam a critério do usuário. Esta alternativa será a utilizada aqui senco semelhantes aos outros métodos apresentados.

O método DNV RP-F101 é válido para os dutos corroídos sujeitos aos seguintes tipos de carregamentos:

- carregamento de pressão interna;
- carregamento de pressão interna combinada com compressão longitudinal (somente para defeitos isolados).

Os tipos de corrosão que podem ser avaliados por esta norma são:

- corrosão interna no material base;
- corrosão externa no material base;

- corrosão de geometria complexa;
- corrosão em soldas;
- corrosão em soldas ao longo da circunferência;
- colônias de corrosão que interagem.

Quando existem colônias de corrosão que interagem, precisa-se verificar se um defeito de corrosão está influenciando o outro.

Este método utiliza o fator $\alpha=1$ com $\sigma_{flow} = \sigma_u$.

$$M = [1 + 0,31 \cdot \frac{a^2}{D \cdot t}]^{1/2} \quad (2.13)$$

$$P_f = \frac{\sigma_u \cdot 2 \cdot t}{D - t} \cdot \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} \cdot M^{-1}} \right] \quad (2.14)$$

2.7.5-Método PCORRC ou Battelle

Nos anos 90, o Laboratório Battelle empreendeu uma investigação para American Gas Association (AGA) a fim caracterizar o mecanismo de falha de defeitos de corrosão em dutos.

Na investigação, foi percebido que materiais dúcteis falham por colapso plástico, como assumido nos desenvolvimentos anteriores. Porém, no caso de materiais de menor dureza, a falha ocorre por um mecanismo diferente e normalmente falham numa pressão mais baixa que dutos com dureza de moderada a alta. Além disso, o estudo mostrou que a pressão de falha por colapso plástico é controlada pela tensão última do material ao invés de tensão de fluxo.

Para defeitos de corrosão por colapso plástico foi desenvolvido um software em elementos finitos, conhecido como PCORR, que prevê a falha de defeitos de corrosão sob carregamento combinado de pressão interna e externa.

A análise em elementos finitos realizada pelo programa foi comparada aos resultados experimentais da BG Technology e a partir desta obteve-se uma equação que define a pressão de falha em defeitos de corrosão de dutos de alta a moderada dureza.

Este método apresenta a seguinte equação:

$$M = 1 - \exp \left[-0,157 \cdot \frac{a}{\sqrt{D \cdot \left(t - \frac{d}{2} \right)}} \right] \quad (2.15)$$

$$P_f = \frac{\sigma_u \cdot 2 \cdot t}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \cdot M \right] \quad (2.16)$$

2.8 – Exemplo de determinação de pressão de falha

Serão feitos exemplos para os métodos semi-empíricos apresentado acima, para a pressão de falha. Considerando os valores médios dos dados apresentados na Tabela a seguir:

Tabela 2.1 - Valores para o cálculo da pressão de falha

Variável	Descrição	Média
do	Profundidade do defeito inicial	3 mm
D	Diâmetro do duto	600 mm
ao	Comprimento do defeito inicial	200 mm
Pa	Pressão interna	5 Mpa
tensesc	Tensão de escoamento do material do duto	423 Mpa
t	Espessura da parede do duto	10 mm
Rd	Taxa de corrosão radial	0.10 mm/ano
Ra	Taxa de corrosão longitudinal	0.10 mm/ano

2.8.1 – Resultados para o exemplo

Para o exemplo será considerado o a diferença de tempo entre as medidas igual a 10 anos. Para os métodos DNV e PCORRC que utiliza-se a tensão última, foi considerado igual a 513 MPa.

Tabela 2.2 - Resultados da pressão de falha para o exemplo

Métodos	Pressão de falha	
	Defeitos Curtos	Defeitos longos
ASME B31G	12,7157	9,3060
B31G modificado	12,7486	12,0571
RPA	12,7486	10,8242
DNV RP-F101	13,5093	
PCORRC	14,5975	

CAPÍTULO III – Análise de Confiabilidade Estrutural

3.1- Introdução

A segurança é a maior das preocupações, em uma obra de engenharia. As estruturas têm que oferecer segurança e condições de utilização. O termo segurança significa que a estrutura não romperá, nem pode falhar, durante sua vida útil, de maneira que não mate e nem pode ferir os usuários ou causar perda econômica. E o termo utilização significa que os usuários não podem sentir desconforto ou perdas financeiras devidos aos esforços aos quais a estrutura fica sujeita. Uma estrutura bem projetada deve ser segura, útil e otimizada em termos de custos. Entretanto, na prática, não é fácil alcançar este princípio de otimização (Galambos, 1982).

Toda estrutura deve ser útil, segura e econômica. Com isso, normas de dimensionamento se tornaram necessárias com o motivo de buscar uma maior uniformidade. Os critérios de dimensionamento devem ser tão simples quanto possível e desenvolvidos de maneira que possam ser usados pelos profissionais, sem ter complicações desnecessárias. Independente do critério adotado, a estrutura tem que garantir segurança.

A estrutura tem que ser projetada prevendo a possibilidade de excesso de carga, que pode surgir a partir de mudanças no uso, subestimação dos efeitos de cargas, simplificações na análise estrutural e variações no processo construtivo para assim garantir um funcionamento adequado durante a vida útil de uma estrutura. Deve-se verificar a possibilidade da resistência dos materiais ser menor que a especificada no projeto, e os desvios nas dimensões dos componentes estruturais. A confiabilidade estrutural está relacionada com as variáveis que descrevem o sistema estrutural, mais precisamente com a variabilidade das mesmas. Esta variabilidade apresenta-se nos sistemas estruturais sob a formas de incertezas.

A análise de confiabilidade estrutural em geral, por envolver um grande número de variáveis aleatórias ou exigir uma grande quantidade de simulações, se depara com a questão do custo computacional. A análise de confiabilidade é um procedimento que

estima um índice de confiabilidade para a estrutura, β , a probabilidade de a estrutura falhar e também, medidas de sensibilidade que fornecem a importância de cada variável. São utilizadas técnicas como o método Monte Carlo e os métodos do FORM e SORM. No presente trabalho vamos utilizar apenas o método FORM.

3.2- Identificação das incertezas

A existência de incertezas nos parâmetros que estão envolvidos na análise estrutural é um dos fatores importantes que podem influenciar a segurança estrutural, contribuindo para que se tenha uma probabilidade não nula de que a estrutura não atenda aos objetivos os quais foi concebida. Essa probabilidade é definida como probabilidade de falha e pode ser determinada pelo método analítico de confiabilidade estrutural.

Em uma análise de confiabilidade, nem todas as incertezas podem ser levadas em conta, o que resulta em uma confiabilidade estimada, chamada de confiabilidade “nominal” ou “formal”. A confiabilidade “nominal” fica restrita à comparações entre sistemas estruturais em que as mesmas incertezas são adotadas. Entretanto, para objetivos práticos, a confiabilidade “nominal” pode ser aceita como uma medida da probabilidade de falha.

Em um passo inicial é preciso identificar as incertezas existentes em um projeto. As incertezas podem ser devidas a experiências não consolidadas, à capacidade intelectual humana limitada e ao caráter incerto do futuro. A definição de todas as incertezas envolvidas em um projeto é quase impossível de ser detectada. Apesar destas limitações, existem maneiras para classificar os tipos de incertezas. As incertezas podem ser classificadas em dois grandes grupos:

- em incertezas aleatórias ou intrínsecas- que se referem em incertezas inerentes a um sistema;

- em incertezas epistêmicas – aquelas que podem ser reduzidas com dados e informações adicionais, com modelos mais refinados e com melhor estimativa dos parâmetros.

São inúmeras também as incertezas ligadas ao projeto e construção de quaisquer estruturas. Uma classificação mais detalhada das incertezas é apresentada por Melchers (1999):

- Incertezas físicas: variabilidades inerentes ao carregamento, às propriedades dos materiais e às dimensões. Podem ser reduzidas com aumento de dados disponíveis, ou em alguns casos, com o controle de qualidade;

- Incertezas estatísticas: ligadas à escolha apropriada do tipo de distribuição de probabilidade e à determinação numérica dos seus parâmetros, baseados em uma amostra de dados de tamanho limitado;

- Incerteza do modelo: representando as incertezas devido às simplificações, condições de contorno desconhecidas e efeito ignorado de outras variáveis. Este tipo de incertezas é devido, em geral, à falta de conhecimento, mas pode ser reduzida com pesquisa ou aumento das informações disponíveis;

- Incertezas fenomenológicas, associadas à ocorrência de eventos imprevisíveis, devidas ao desconhecimento de qualquer aspecto de um possível comportamento estrutural sob condições de serviço ou condições extremas;

- Incertezas de avaliação, associadas à definição e à quantificação do desempenho do sistema estrutural, bem como à caracterização dos estados limites;

- Incertezas devidas à fatores humanos, associadas aos erros humanos ou à intervenção humana no comportamento do sistema estrutural.

Como exemplos das incertezas físicas presentes em um projeto estrutural citam-se, com relação:

1 – Quanto aos materiais:

- resistência à compressão do concreto;

- tensão de escoamento do aço;
- módulo de elasticidade do concreto;
- módulo de elasticidade do aço.

2 – Quanto às dimensões:

- dimensões da seção transversal;
- espessura do recobrimento;
- área da seção transversal de aço.

3 – Quanto ao carregamento:

- cargas permanentes;
- cargas acidentais;
- cargas de sujeição (exemplos: temperatura, recalque).

A teoria de confiabilidade, a partir de conhecimentos de incertezas inerentes às variáveis de projeto, por meio de suas distribuições de probabilidade e a determinação da probabilidade de a estrutura falhar é uma ferramenta que proporciona o fornecimento da importância de cada variável nessa probabilidade. Com isso são de fundamental importância na tomada de decisões que envolvam a segurança estrutural.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as principais causas de falhas estruturais (Melcher, 1999, adaptado de Walker, 1981). As fontes de erros que podem afetar a confiabilidade de uma estrutura podem ser devido a fatores humanos, como negligência, arredondamentos e aproximações, falta de conhecimentos, ou fenômenos da natureza, como a neve, gelo, terremoto, tráfego ou outras ações.

Tabela 3.1- Causas de falha estrutural

Causa	%
Consideração inadequada das condições de carregamento ou comportamento estrutural	43
Erros de detalhamento ou cálculos	7
Informação inadequada em documentos contratuais ou instruções	4
Violação de cláusulas contratuais ou instruções	9
Execução inadequada de processos construtivos	13
Mau uso da estrutura, sabotagem, catástrofe, deterioração	7
Variação aleatória no carregamento, estrutura, materiais, ação humana	10
Outros	7

A Tabela 3.2 apresenta as causas observadas em erros comuns cometidos pelas pessoas, como a ignorância, descuido e negligência. Outra fonte de crítica de erro humana vem da falta de conhecimento. Este é um aspecto importante, que precisa ser reconhecido. A maioria destes fatores de erro são difíceis de quantificar e são classificados como variáveis aleatórias. (Melcher, 1999, adaptado de Matousek e Schneider, 1976).

Tabela 3.2 - Fatores de erros cometidos pelas pessoas

Fator	%
Ignorância, descuido, negligência	35
Esquecimento, erros, equívocos	9
Confiança depositada em outros, sem controle suficiente	6
Subestimação de influências	13
Conhecimento insuficiente	25
Situações imprevisíveis	4
Demais fatores	8

Para garantir a segurança estrutural, o projeto de uma estrutura requer o estabelecimento de estados limites para esclarecer estas prováveis fontes de erro. Um estado limite, representado por uma função matemática, é o limite entre o desempenho desejado e o indesejado de uma estrutura. A confiabilidade estrutural utiliza a quantificação probabilística destes estados limites para determinar a falha provável de

uma estrutura em conseqüência do colapso de um componente ou do sistema estrutural. Os métodos probabilísticos requerem a quantificação estatística das variáveis aleatórias que estão envolvidas na estabilidade do sistema. Fundamentalmente, considera-se falha em um estrutura ou componente estrutural, se a ação (Q) exceder sua capacidade resistente (R).

Em geral, os problemas de engenharia não possuem valores quantitativos exatos para que se possa equacioná-los e resolvê-los de maneira direta e precisa. A confiabilidade estrutural pode ser considerada como uma importante ferramenta que se dispõe para quantificar a confiança que uma estrutura possui em atender aos objetivos para os quais a mesma foi projetada, considerando as incertezas nas variáveis inerentes ao projeto. Cada uma destas variáveis, de comportamento aleatório, está associada a uma distribuição de probabilidade qualquer.

A avaliação da confiabilidade de sistemas de engenharia é obtida através do uso de fatores de segurança e hipóteses conservadoras adotadas no projeto. Procura-se adequar a resistência mínima da estrutura com a solicitação máxima. Estas dificuldades são inerentes ao sistema de engenharia por causa da falta de informações completas.

3.3 – Normas de projeto

O objetivo de uma norma de projeto é regulamentar o dimensionamento de estruturas e componentes estruturais, de forma que a estrutura fique segura, útil e econômica. Essa norma visa também garantir uma uniformidade em todos os projetos.

Em uma norma de projeto todas as estruturas de um mesmo tipo são mensuradas. Na fase de projeto, a norma faz o papel de regulador para assegurar que todas as estruturas daquela população de edificações obedeçam aos mesmos critérios mínimos. O trabalho criativo do engenheiro projetista está no planejamento, na definição de cargas e na análise estrutural. A verificação da conformidade com a norma é um trabalho árduo, mas necessário. A conformidade com a norma protege os projetistas contra difamação, caso o que ocorra errado esteja coberto pela norma. A conformidade

com a norma é igualada a segurança estrutural nas mentes dos engenheiros, do governo e da sociedade. Na realidade, isto não é totalmente verdade, porque conformidade com a norma assegura para a sociedade que existe uma chance pequena, mas acertável, que um mal funcionamento da estrutura ocorra (Galambos, 1982).

Uma norma pode ser interpretada também como uma ferramenta de previsão, no sentido em que o projetista, seguindo as prescrições contidas nas normas de projeto, pode esperar que a estrutura resultante seja suficientemente segura e útil, durante o período de vida esperado. Entretanto, durante a fase de projeto, alguns problemas não são conhecidos com algum grau de certeza e apenas podem ser estimados. A maneira como uma norma é estruturada para incorporar estas incertezas afetará a utilidade esperada para qualquer estrutura projetada segundo seus critérios (Melchers, 1999).

Quando uma determinada estrutura é usada pela primeira vez, ela em geral resulta pesada, pois há falta de experiência e confiança. Se experiências bem sucedidas são conseguidas, os calculistas ficam mais confiantes e o peso tende a cair. Esta tendência continua até ocorrer uma falha, quando as exigências de peso aumentam novamente, geralmente mais que o necessário. O peso eventualmente decresce gradualmente até que um nível de cálculo satisfatório, testado com o tempo, seja alcançado.

A partir de 1960 surgem os estudos para a elaboração de normas de projeto em estados limites e a idéia de que os parâmetros de cálculo podem ser racionalmente quantificados através da teoria da probabilidade. Do ponto de vista científico, é necessária uma abordagem mais consistente para uma melhor quantificação da segurança nas estruturas, o que pode ser feito através da teoria da confiabilidade.

3.4- Classificação dos métodos de confiabilidade

O estudo da confiabilidade estrutural inclui tanto a segurança contra a falha estrutural ou colapso de parte da estrutura, conhecida como estado limite último, quanto à disfunção no uso da estrutura, conhecida como estado limite de serviço. Definidos pelo projetista os estados limites relevantes, deve-se calcular o nível de segurança com

respeito a esses estados. A identificação das incertezas presentes no projeto constitui o passo inicial deste processo de cálculo.

Devido à grande variedade de idealizações nos modelos de confiabilidade estrutural e às várias maneiras de combinar estas idealizações de modo a adequá-las a um tipo de dimensionamento, uma classificação faz-se necessária. Os métodos de confiabilidade estrutural são divididos em níveis, de acordo com a quantidade de informação usada e disponível sobre o problema estrutural.

Os métodos de confiabilidade que usam o formato das tensões admissíveis são chamados de métodos do nível 0. No método das tensões admissíveis todas as ações são tratadas similarmente e as tensões elásticas são reduzidas por um fator de segurança.

Os métodos de confiabilidade que empregam um valor característico para cada valor incerto são chamados de métodos do nível I. Como exemplo têm-se os formatos do tipo LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) ou Método dos Estados Limites.

Os métodos de confiabilidade que empregam dois valores para cada parâmetro incerto (usualmente média e variância) e uma medida da correlação entre parâmetros (usualmente covariância) são chamados métodos do nível II. Os métodos do índice de confiabilidade são exemplos de métodos do nível II.

Os métodos de confiabilidade que empregam a probabilidade de falha da estrutura como medida de sua confiabilidade, nos quais a função densidade de probabilidade das variáveis básicas é requerida, são chamados métodos do nível III.

O princípio de um método de confiabilidade é uma justificação em termos daquele método de nível mais elevado. Então um método de nível I pode ser justificado no nível II, no qual ele fornece um índice de confiabilidade que é próximo a um valor objetivo. Os parâmetros do método são determinados por calibração para aproximar o nível mais elevado. Os métodos do nível I nas novas normas de dimensionamento são rotineiramente calibrados pelos métodos do nível II ou nível III (Madsen et al., 1986).

3.5- Considerações de Segurança nas Normas

Para a estrutura ser considerada segura, ela deve ser verificada quanto aos possíveis estados limites últimos e quanto aos estados limites de serviço.

A definição de segurança estrutural adotada nas normas é: “Uma estrutura é segura se a chance de ultrapassar um estado limite fixado na norma de projeto, durante sua vida útil, é aceitavelmente pequena” (Galambos, 1982).

A principal preocupação das normas é que na fase de projeto não são conhecidas com certeza as propriedades da estrutura nem a duração e a magnitude das cargas. Para lidar com estas incertezas, tradicionalmente, as normas usam fatores de segurança (Galambos, 1982). A seguir, discutem-se os principais métodos para a incorporação de critérios de segurança nas normas técnicas, a saber o Método das Tensões Admissíveis e o Método dos Estados Limites.

No método das tensões admissíveis a estrutura é investigada sob ações nominais, impondo-se que uma tensão admissível não seja excedida. As ações nominais são as máximas ações esperadas para o tempo de vida útil da estrutura. As tensões resultantes são calculadas admitindo comportamento elástico e linear. A tensão admissível é uma fração de alguma tensão limitante, tal como a tensão de escoamento ou a tensão crítica de flambagem. A relação da tensão limitante para a tensão admissível é denominada fator de segurança. Este fator prevê a possibilidade de ocorrência de valores desfavoráveis das ações e propriedades dos materiais, assim como as incertezas do modelo teórico.

O método das tensões admissíveis assegura que sob condições extremas de carregamento, que podem ser verificadas facilmente, a estrutura responde elasticamente. Não há problemas com a presença de múltiplas ações, podendo haver a superposição de efeitos. Assegurando a não superação de uma tensão admissível elástica.

A partir de ampla pesquisa do comportamento de resistência última de vários tipos de estrutura e ligações, surgiu a primeira geração de normas de cálculo baseadas na

capacidade última e, eventualmente, conhecidas como normas de cálculo em estados limites (Castro, 1997).

3.5.1- Métodos das Tensões Admissíveis

O método das tensões admissíveis é uma filosofia de projeto que evoluiu a partir da aplicação da Teoria da Elasticidade. Esta teoria assume linearidade entre tensões e deformações na estrutura. No método das tensões admissíveis, a filosofia de dimensionamento consiste em se calcular a tensão σ , no regime elástico-linear para o carregamento máximo esperado e compará-las à tensão admissíveis σ_{adm} , que é uma fração da tensão limite. A tensão limite define o nível de tensão a partir do qual o comportamento elástico-linear não mais se aplica.

Este critério de projeto pode ser definido como se segue:

$$\sigma \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{FS} \quad (3.1)$$

onde FS é o fator de segurança.

A interpretação tradicional do método das tensões admissíveis é:

- sob cargas de serviço a estrutura tem um comportamento elástico-linear;
- resistência e carregamento são incertos, mas é postulado que, um limite superior para o carregamento e um limite inferior para a resistência (valores característicos) podem ser estabelecidos.

Existem muita objeções a este modo de tratar o problema da segurança estrutural, tanto do ponto de vista científico, probabilístico ou econômico (Galambos, 1982):

- tensões e deformações nem sempre são lineares, por exemplo, a curva tensão-deformação do concreto é não-linear mesmo para baixas tensões;

- efeitos do tempo (fluência e retração do concreto), efeitos ambientais (umidade na resistência da madeira, corrosão de metais) e efeitos de taxa de carregamento introduzem não-linearidades no espaço e no tempo;

- efeitos de carga e deformação nem sempre são lineares;

- comportamento carga-deformação pós-escoamento pode ser: dúctil, com grande ou pequena reserva de resistência, ou frágil;

- sob algumas circunstâncias é necessário utilizar a capacidade de absorção de energia da região não-linear para resistir a terremotos ou a explosões;

- a chance de exceder o estado limite de início da não linearidade depende da variabilidade das cargas, dos materiais e do modelo computacional utilizado. A confiabilidade dos elementos dentro da estrutura ou de diferentes estruturas pode então variar consideravelmente;

- novos materiais de construção e técnicas de projeto podem demandar anos de testes até que um fator de segurança possa ser definido;

- todas as ações são assumidas como tendo a mesma variabilidade;

A probabilidade de falha é desconhecida e o mesmo fator de segurança pode corresponder a distinta probabilidade de falha.

Esta e muitas outras objeções do método das tensões admissíveis já eram, em sua maioria, conhecidas dos pesquisadores há décadas. Os esforços para desenvolver outro método de projeto que acomodaria estas objeções começaram na década de 1930 na União Soviética e, na década de 1940 na Inglaterra e nos Estados Unidos (Galambos, 1982). O método resultante é conhecido como Método dos Estado Limites.

3.5.2- Método dos Estados Limites

No sentido de minorar as objeções relativas ao Método das Tensões Admissíveis, foi desenvolvido o Método dos Estados Limites. Um estado limite é uma condição onde a estrutura ou elemento estrutural torna-se inadequado para desempenhar a função proposta. No Método dos estados Limites, o projeto estrutural começará com a verificação da resistência última (para segurança humana), seguida da verificação do estado limite de utilização.

O Método dos Estados Limites é também conhecido como método semi-probabilístico, fundamentado em análise estatística com coeficientes ponderados aplicados tanto às ações quanto às resistências dos materiais, porém admitindo o comportamento estrutural como determinístico. Daí o nome semi-probabilístico.

A idéia central deste critério é que as resistências devem ser minoradas (fator de minoração ϕ) e as cargas devem ser majoradas (fator de majoração γ).

O formato geral deste critério de projeto é (Galambos, 1982):

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (3.2)$$

onde $\phi < 1,0$ é o fator de minoração da resistência ou

$$\phi = 1 / \gamma_m, \gamma_m > 1,0 \text{ é o fator do material.} \quad (3.3)$$

O lado do carregamento da Equação 3.2 pode assumir outras alternativas, como o formato existente na NBR 8681 (2003):

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^m \gamma F_{Gi,k} + \gamma_q [F_{Qi,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{oj} K_{Qj,k}] \quad (3.4)$$

onde $F_{Gi,k}$ representa o valor característico das ações permanentes, $F_{Qi,k}$ representa o valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação e $\psi_{oj} F_{Qj,k}$ representa o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis. Em casos especiais devem ser consideradas duas combinações:

numa delas, admite-se que as ações permanentes sejam desfavoráveis e na outra que sejam favoráveis para a segurança.

As principais vantagens do Método dos Estados Limites, em relação a Tensões Admissíveis são:

- confiabilidade mais uniforme, pois os coeficientes de segurança, são determinados de modo a prevenir que algum estado limite seja ultrapassado;
- permite desmembrar as incertezas da avaliação das ações e do modelo de cálculo;
- controle da segurança na determinação de efeitos das ações, cujos valores são reduzidos pelas ações permanentes.

Os fatores de majoração de cargas e minoração de resistência são ajustados de tal maneira a se obter maior uniformidade da probabilidade de falha P_f , considerada aceitável para uma determinada classe de estruturas. O processo de ajuste dos fatores ϕ e γ é conhecido como calibração da norma.

3.5.3- Ações

As ações são as causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. Na prática, as forças e as deformações impostas pelas ações são consideradas como se fossem as próprias ações.

As ações a serem adotadas no projeto das estruturas de aço e seus componentes são as estipuladas pelas normas apropriadas e as decorrentes das condições a serem preenchidas pela estrutura. Essas ações devem ser tomadas como nominais, devendo ser considerados os seguintes tipos de ações nominais:

- ações permanentes: tem pequena variação em torno da média, durante o tempo de vida da construção (peso próprio, revestimento, acabamentos);

- ações variáveis: tem grandes variações em torno da média, durante a vida da construção (sobrecarga, divisórias, equipamentos, vento);

- ações excepcionais: tem durações extremamente curtas e de baixa ocorrência durante a vida da construção (explosões, choques de veículos, terremotos, incêndio).

Na evolução do Método dos Estados Limites, logo se compreende que alguns tipos de ações são conhecidos mais precisamente do que outros. Por exemplo, o peso próprio tem uma menor variabilidade do que a sobrecarga ou ação de vento. O conceito de vários fatores de carga foi introduzido para levar em consideração este fato.

Não é conveniente adotar para ações de pouca duração, tais como sobrecarga, vento ou terremoto, valores máximos de vida útil, simultaneamente.

3.5.4- Processo de calibração de normas

O procedimento geral para a calibração de norma é quase o mesmo, independente do refinamento da teoria da confiabilidade usada. Segundo Melchers (1999), os seguintes passos devem ser seguidos para a calibração da norma:

1- Definir o escopo

Uma vez que não podemos ainda contar com um formato de norma de projeto estrutural para representar todas as situações de projeto, é conveniente delimitar o escopo da norma a ser calibrada. Dessa forma, pode-se estabelecer o material (por exemplo, estruturas de aço), o tipo estrutural (por exemplo, estruturas de edifícios), etc.

2- Selecionar os pontos de calibração

É escolhido um espaço de projeto, consistindo de todas as variáveis básicas, tais como comprimento da viga, área da seção transversal e propriedades, valores das tensões nominais permitidas, intervalo das cargas aplicadas e tipos de carregamentos. É então dividido em um conjunto de zonas discretas aproximadamente uniformes. Os

pontos discretos resultantes são usados para calcular os valores do índice de confiabilidade β_0 para a verificação do formato da norma existente.

3- Norma de cálculo em vigor

A norma de cálculo estrutural em vigor é usada para calcular o elemento. Isto é repetido para todas as combinações apropriadas dos pontos de calibração dentro de cada zona discreta.

4- Definir estados limites

A função de estado limite para cada modo de falha é então definida. Cada estado limite deve ser expresso em termos das variáveis básicas. A definição dos estados limites também requer uma decisão sobre os modelos de combinação de cargas que vai ser empregado. Para facilitar a calibração da norma, é usual escolher um modelo simples de combinação de cargas.

5- Determinar as propriedades estatísticas

Para a determinação do índice de confiabilidade β_0 são necessárias para cada uma das variáveis básicas as propriedades estatísticas apropriadas (distribuições, médias, variâncias, valores médios).

6- Empregar métodos de análise de confiabilidade

Usando um método de análise de confiabilidade apropriado, juntamente com as funções de estados limites e os dados estatísticos, cada uma das opções de projeto é analisada para determinar β_0 para cada ponto de calibração dentro de cada zona. Os resultados podem ser convenientemente ajustados de modo que o carregamento aplicado torne-se o parâmetro independente.

7- Escolher o valor alvo β_0

A partir de diversas análises, torna-se evidente a variação de β_0 e a partir desta informação, uma média ponderada de β_0 pode ser determinada e usada como uma confiabilidade alvo β_0 .

8- Selecionar os fatores parciais

Os fatores parciais não são constantes para um dado formato de verificação da segurança, e um dado valor alvo β_0 . Como, por conveniência, utilizam-se fatores parciais constantes, pelo menos para grandes grupos de situações de projetos, espera-se que ocorra algum desvio em relação ao valor alvo β_0 . Portanto, a seleção de fatores parciais apropriados envolve algum julgamento subjetivo.

3.6- Métodos para análise de confiabilidade

A análise de confiabilidade estrutural é baseada na existência de uma função de falha ou função de estado limite $G(U)$, sendo que $U=(U_1, U_2, \dots, U_n)$ representa o conjunto de variáveis aleatórias envolvidas na análise, ou seja, todas aquelas com alguma informação estatística ao seu respeito. A função de falha $G(U)$ deve ser definida de maneira que o limite $G(U)=0$ separe o domínio de falha ($G(U)<0$) do domínio seguro ($G(U)>0$).

Desta forma a confiabilidade estrutural deve buscar qual probabilidade dos acontecimentos de falhas, ou seja, qual a probabilidade da função de falha assumir valores pertencentes ao domínio de falha. Esta probabilidade é chamada de probabilidade de falha e é definida por:

$$P_f = P[G(U) \leq 0] \quad (3.5)$$

Sabendo-se que $f_u(U)$ representa a função densidade de probabilidade conjunta de todas as variáveis U envolvidas na análise, a probabilidade de falha pode ser descrita como:

$$P_f = \int_{D_f} f_u(U) du \quad (3.6)$$

De maneira geral podemos definir a função de falha $G(U)$, como sendo:

$$G(U) = R - S \quad (3.7)$$

onde: R- representa a variável aleatória de resistência;

S- representa a variável aleatória de solitação.

No caso de dutos com defeitos, a variável aleatória de resistência pode ser definida por um dos métodos semi-empíricos ou por modelos computacionais baseados no Método dos Elementos Finitos.

Admite-se que as funções densidade de probabilidade e funções densidade acumulada de R e S sejam conhecidas. Desse modo, as probabilidades associadas aos eventos podem ser definidas:

$$P_f = P(R < S) = P(G(U) \leq 0) = \int f_u(u) du = F_U(0) \quad (3.8)$$

Assumindo-se que R e S são estatisticamente independentes, para R e S contínuas, a probabilidade de falha (P_f) pode ser representada como:

$$P_f = \int \int f_R(r) \cdot f_S(s) dr ds = \int F_R(s) \cdot f_S(s) ds \quad (3.9)$$

onde: $f_S(s)$ é a função densidade de probabilidade de variável S;

$F_R(s)$ é a função distribuição acumulada da variável R.

A confiabilidade é definida como sendo a probabilidade de R ser maior que S, ou seja, $(1 - P_f)$. No entanto, o grande número de variáveis aleatórias envolvidas em muitos problemas práticos torna bastante difícil a obtenção da função conjunta de densidade de probabilidade e a integração da equação é quase sempre inviável. Alternativamente, mede-se a segurança estrutural em função do índice de confiabilidade β , definido como a menor distância da origem do espaço das variáveis padronizadas, ou variáveis reduzidas, até a superfície de falha.

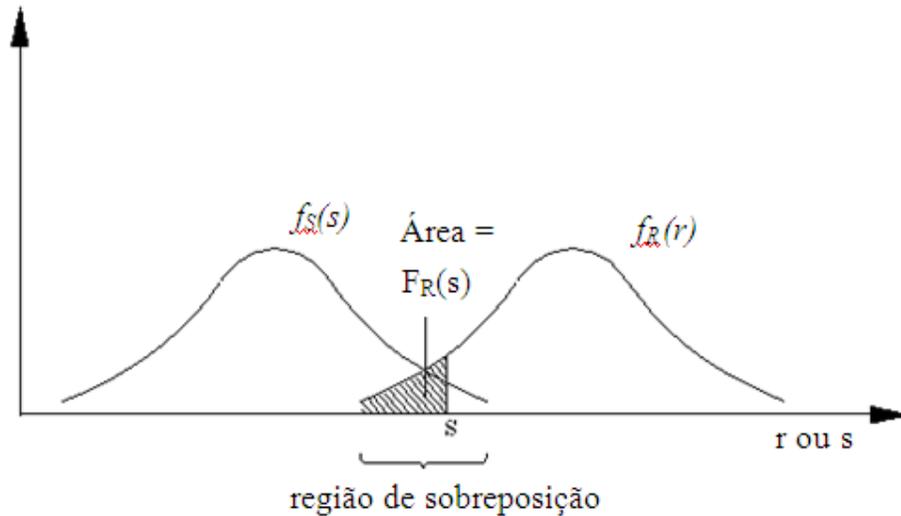


Figura 3.1 - Função densidade de probabilidade $f_R(r)$ e $f_S(s)$

Fonte: (Ang e Tang, 1990).

Como mostra a Figura 3.1, a sobreposição das curvas $f_R(r)$ e $f_S(s)$ representa uma medida da probabilidade de falha. Com respeito a isso, observa-se que:

- a região de sobreposição depende das posições relativas de $f_R(r)$ e $f_S(s)$, como mostra a Figura 3.2, isto é, quando as duas curvas se afastam P_f diminui, quando as duas curvas se aproxima, P_f aumenta. A posição relativa entre $f_R(r)$ e $f_S(s)$ pode ser medida pela diferença $(\mu_R - \mu_S)$, chamado “margem de segurança média”, ou μ_R/μ_S , conhecido como “fator de segurança central”.

- a região de sobreposição também depende do grau de dispersão em $f_R(r)$ e $f_S(s)$, como mostra a Figura 3.3. Mantidos os valores das médias e aumentando-se de $f_R(r)$ e $f_S(s)$, ou ambas, a dispersão, observa-se que a região de sobreposição aumenta.

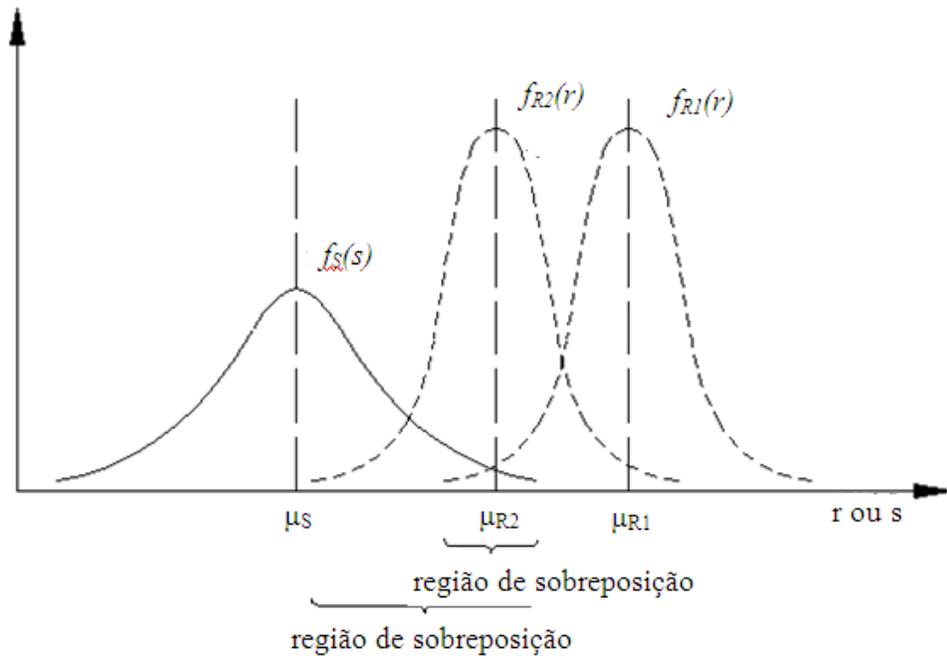


Figura 3.2 - Efeito da posição relativa entre $f_R(r)$ e $f_S(s)$ em P_f

Fonte: (Ang e Tang, 1990).

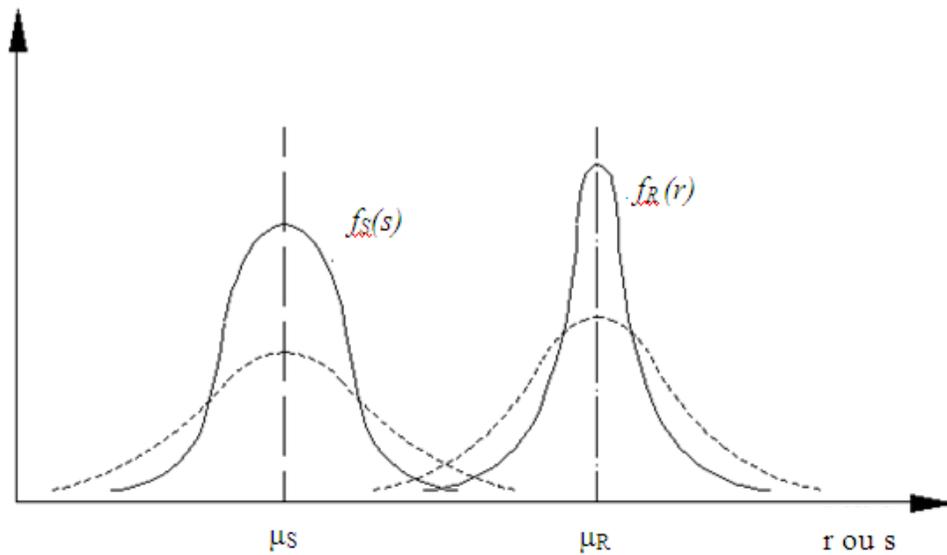


Figura 3.3 - Efeito da dispersão em $f_R(r)$ e $f_S(s)$ em P_f

Fonte:(Ang e Tang, 1990).

No caso de R e S serem correlacionadas, a probabilidade de falha é dada por:

$$P_f = \int_0^{\infty} \left[\int_0^s f_{R,S}(r,s) dr \right] ds \quad (3.10)$$

onde $f_{R,S}(r,s)$ é a função densidade de probabilidade conjunta das variáveis R e S, enquanto a probabilidade de sobrevivência (confiabilidade) é dada por:

$$P_s = \int_0^{\infty} \left[\int_0^s f_{R,S}(r,s) dr \right] ds \quad (3.11)$$

A margem de segurança M é definida com $M=R-S$. Dado que R e S são variáveis aleatórias, M também é uma variável aleatória, com função densidade de probabilidade $f_M(m)$. Neste caso, o evento falha é ($M < 0$), e a probabilidade de Falha é (Ang e Tang, 1990):

$$P_f = P(M < 0) = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm = F_M(0) \quad (3.12)$$

Graficamente, isto pode ser representado como na Figura 3.4.

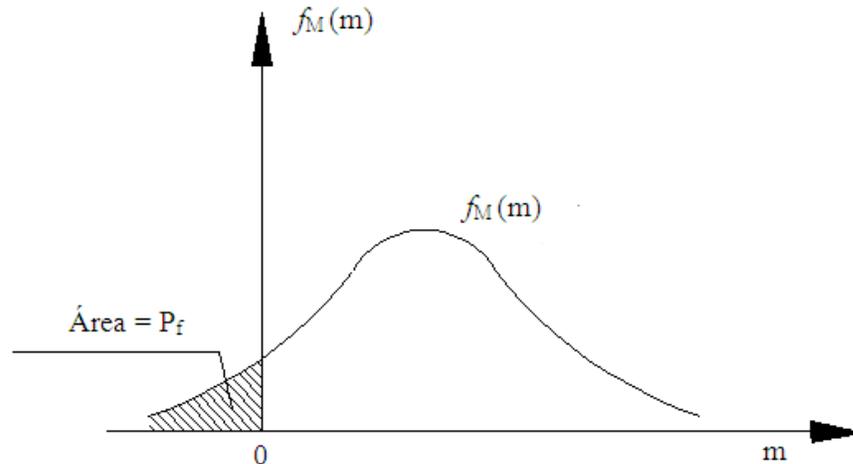


Figura 3.4 - Função densidade de probabilidade da margem de segurança

Fonte: (Ang e Tang, 1990).

Por envolver um grande numero de variáveis aleatórias ou exigir uma grande quantidade de simulações a análise de confiabilidade estrutural se depara com a questão do custo computacional. No presente trabalho será utilizado o método analítico FORM, que apresenta alguns problemas em função da complexidade da análise.

3.7- Método analítico FORM (First Order Reliability Method)

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

As variáveis aleatórias U , cujas distribuições são quaisquer e podem ser dependentes entre si ou não, são transformadas em variáveis Y normais padrão estaticamente independentes. A função de falha $G(U)$ é escrita em função das variáveis Y com $g(Y)$. Além disso, a superfície de falha $g(Y)=0$. 0 é aproximada por uma superfície linear no ponto com a menor distância até a origem, identificado por Y^* , onde Y^* é o ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas. Com isso, a probabilidade de falha pode ser simplesmente calculada como:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (3.13)$$

onde β é a distancia do ponto Y^* até a origem e é calculado como

$$\beta = |Y^*| \quad (3.14)$$

Temos que $Y^* = -\alpha\beta$

$$e \ g(Y) = \beta - \sum \alpha_i \beta_i \quad (3.15)$$

onde α é o vetor normal a superfície de falha no ponto de projeto.

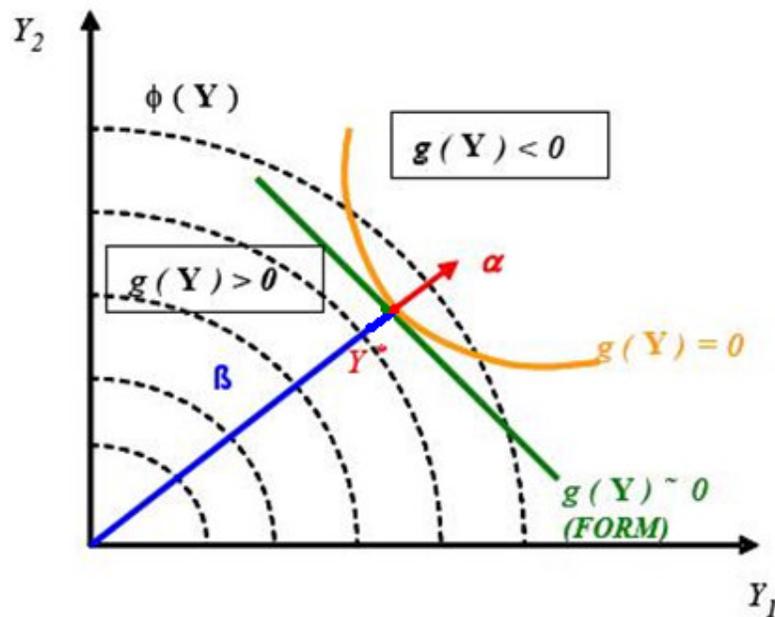


Figura 3.5 - Representação gráfica do Método FORM

O método FORM calcula a probabilidade de falha de forma aproximada e dependendo da forma da função $g(Y)$ no espaço das variáveis reduzidas. Conforme a figura esta aproximação pode ser a favor da segurança quando $g(Y)$ for convexa em torno do ponto de projeto ou ser contra a segurança no caso contrário. Para casos práticos de estruturas, a diferença entre valor real e o valor aproximado da probabilidade de falha é irrelevante.

Para este método os principais desafios são a busca ao ponto de projeto Y^* e a transformação das variáveis em variáveis normais padrões. Essa transformação das variáveis pode ser feita utilizando as distribuições normais equivalentes e o ponto de projeto pode ser obtido através da solução de um problema de otimização.

3.7.1- Transformação de variáveis

Existem algumas formas para a se transformar as variáveis aleatórias U em aleatórias Y normais padrão e estatisticamente independentes. A metodologia com maior uso em confiabilidade estrutural baseia-se na transformação de variáveis normais correlacionadas em variáveis normais estatisticamente independentes. Esta transformação é conhecida como transformação de Nataf (Der Kiureghian and Liu, 1986).

Se U contem somente variáveis normais e estas forem correlacionadas entre si (ou não) um conjunto de variáveis normais padrão estaticamente independentes pode ser obtido pela seguinte transformação:

$$Y = \Gamma \sigma^{-1} (U - m) \quad (3.16)$$

onde m é o vetor com as médias das variáveis U, σ é uma matriz diagonal contendo os desvios padrão das variáveis U e $\Gamma = L^{-1}$, sendo L a matriz triangular inferior obtida da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação de U, e é expressa por:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & 0 \\ L_{12} & L_{22} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{1n} & L_{2n} & \cdot & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

onde n é o número de variáveis aleatórias envolvidas na transformação.

Para a determinação do ponto de projeto é necessário a definição do Jacobiano da transformação:

$$J = \frac{\partial Y}{\partial U} \quad (3.18)$$

Temos

$$J = \Gamma \sigma^{-1} \quad (3.19)$$

Na maioria dos casos as variáveis não são normais e para estes casos, uma transformação em normal equivalente pode ser empregada. Deve ser colocado que a transformação em normais equivalentes não considera casos onde as variáveis são correlacionadas. No caso de variáveis correlacionadas também é possível usar a mesma transformação para obtermos normais equivalentes, desde que os coeficientes de correlação entre as variáveis originais sejam corrigidos para coeficientes de correlação entre as normais equivalentes.

Sejam duas variáveis U_i e U_j com distribuições de probabilidade quaisquer e dependentes entre si, cuja dependência é definida pelo coeficiente de correlação ρ_{ij} , então, o coeficiente de correlação equivalente entre as duas distribuições normais equivalentes às variáveis U_i e U_j pode ser definido como:

$$\rho_{ij}^E = F \rho_{ij} \quad (3.20)$$

onde F é um valor que depende somente de ρ_{ij} e dos coeficientes de variação das variáveis U_i e U_j . Este valor não depende do ponto onde a transformação esta sendo realizada.

Uma vez definidas as normais equivalentes para as variáveis U e as suas correlações equivalentes, a equação 3.16 pode ser então empregada para obter variáveis normais padrão estatisticamente independentes Y .

Quando não há correlação entre variáveis, ou seja, as variáveis aleatórias são independentes, a matriz L torna-se uma matriz diagonal unitária ou matriz identidade.

A transformação de Nataf opera com a distribuição marginal das variáveis aleatórias e com o coeficiente de correlação entre as variáveis, ou seja, a função densidade de probabilidades conjunta $f_u(U)$ não precisa ser conhecida. Por este motivo, se diz que tais informações, distribuição marginal e coeficiente de correlação, são informações probabilísticas incompletas. Porém, este é o caso da grande maioria das aplicações práticas.

No caso onde as informações probabilísticas completas são conhecidas, ou seja, $f_u(U)$ é conhecida, a transformação de Rosenblatt (Madsen, 1986) é a mais indicada para a transformação das variáveis U em Y . Esta transformação é definida como:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \Phi^{-1}(F_{U_1}(U_1)) \\ Y_2 &= \Phi^{-1}(F_{U_2}(U_2/U_1)) \\ Y_n &= \Phi^{-1}(F_{U_n}(U_n/U_1U_2\dots U_{n-1})) \end{aligned} \quad (3.21)$$

onde $F_{U_n}(U_1/U_1U_2\dots U_{i-1})$ é a função cumulativa de probabilidade da variável U_i condicionada a valores conhecidos da variáveis U_1, U_2, \dots, U_{i-1} e $\Phi^{-1}(\cdot)$ é o inverso da função cumulativa normal padrão.

Na prática poucas vezes tem-se dados disponíveis na forma adequada à transformação de Rosenblatt e por isso a transformação de Nataf é a mais usada. Mesmo para os casos onde distribuição de probabilidade conjunta das variáveis é conhecida, o modelo de Nataf pode ser empregado utilizando alguns detalhes a mais do que fora apresentados anteriormente.

A transformação de Nataf é possível desde que as variáveis U apresente distribuição de probabilidade normal. Quando uma variável apresenta distribuição de probabilidade não normal qualquer é necessário fazer anteriormente sua “normalização”, que consiste em substituir cada distribuição de probabilidade não normal por uma distribuição normal equivalente. As equações (3.22) e (3.23) podem ser aplicadas diretamente para distribuições quaisquer não correlacionadas, caso contrário é necessário fazer sua correção com um coeficiente de correlação equivalente entre as variáveis. Der Kiureghian e Liu (1986) apresentam expressões analíticas para tal coeficiente para um grande número de distribuições de probabilidade.

$$\sigma_u^N = \varphi\left\{\frac{\phi^{-1}(Fu_i(U^*))}{fu_i(U_i^*)}\right\} \quad (3.22)$$

$$\mu_u^N = U_i^* - \sigma_u^N \phi^{-1}(Fu_i(U_i^*)) \quad (3.23)$$

onde σ_u^N e μ_u^N são o desvio padrão e a média da distribuição normal equivalente para variável U_i ;

$(Fu_i(U^*))$ é a função de distribuição acumulada original da variável U_i ;

$fu_i(U_i^*)$ é a função distribuição de probabilidade original da variável U_i ;

Φ é a função distribuição de probabilidade normal padrão.

Quando as variáveis são estatisticamente independentes a transformação de variáveis é simplesmente calculada para cada uma das variáveis através da seguinte equação:

$$Y_i = \Phi^{-1}[Fu_i(U_i)] \quad (3.24)$$

3.7.2- Busca ao Ponto de Projeto

O ponto de projeto, cuja distância da função de falha à origem no espaço reduzido é a menor possível, pode ser determinado através de um algoritmo de otimização ou programação não linear cuja restrição pode ser expressa por: mínimo $|Y|$ com $g(Y)=0$.

Existem vários algoritmos de otimização para resolver este problema. O algoritmo mais usado na análise de confiabilidade estrutural é aquele desenvolvido por Hasofer e Lind (1974) e aprimorado por Rackwitz e Fiessier (1978). Este algoritmo é comumente identificado como HLRF e é resumido pela seguinte expressão recursiva:

$$Y^{k+1} = \frac{1}{|\nabla g(Y^k)|^2} [\nabla g(Y^k)^T Y^k - g(Y^k)] \nabla g(Y^k)^T \quad (3.25)$$

onde $\nabla g(Y^k)$ é o gradiente da função de falha no espaço reduzido e $g(Y^k)$ é o valor da função de falha, ambos avaliados no ponto Y^k .

Para a utilização do método HLRF, são de extrema utilidade as seguintes relações:

$$g(Y) = G(U)$$

$$Y = \Gamma \sigma^{-1}(U - m) \quad (3.26)$$

$$\nabla g(Y) = (J^{-1})^T \nabla G(U)$$

onde $\nabla G(U)$ é o gradiente da função de falha no espaço original avaliado no ponto U .

O critério de convergência do método HLRF é geralmente definido como:

$$\frac{|V^K| - |V^{K+1}|}{|V^K|} \leq \text{Tolerância} \quad (3.27)$$

O valor da tolerância usado neste trabalho é 10^{-5} .

O ponto de projeto no espaço original é definido pela Equação 3.28 e após a convergência do método HLRF ser atingida, pode ser calculada a probabilidade de falha, considerando o ponto de projeto da última interação do método.

$$U^{K+1} = U^K + (J^{-1})^T \cdot (V^{K+1} \cdot V^K) \quad (3.28)$$

Após a convergência, ou seja, quando a tolerância admitida é satisfeita, pode-se então calcular a probabilidade de falha dada por:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (3.29)$$

A experiência tem mostrado que embora na maioria das vezes este método alcance a convergência rapidamente, ele pode não convergir em algumas situações.

3.7.3- Medidas de sensibilidade

Além da probabilidade de falha, que o método analítico FORM fornece, ele pode fornecer outras medidas importantes para a análise prática de confiabilidade. Estas medidas são conhecidas como medidas de sensibilidade. Algumas das medidas de sensibilidade são os fatores de importância, fatores de omissão e fatores de sensibilidade paramétricos.

O fator de importância de cada variável aleatória i envolvida na análise de confiabilidade é definido por:

$$I_i = \alpha_i^2 \quad (3.30)$$

onde α_i é o cosseno diretor com relação a variável U_i do vetor normal a superfície de falha no ponto de projeto e no espaço das variáveis reduzidas

$$\alpha_i = \frac{\Delta g(V^*)}{|\Delta(V^*)|} \quad (3.31)$$

onde $\Delta g(V^*)_i$ é a componente do gradiente da função de falha no espaço das variáveis reduzidas avaliado no ponto de projeto Y^* . Os fatores de importância indicam qual é a importância relativa de cada variável no valor final da probabilidade de falha. Variáveis com fatores de importância baixos podem ser consideradas como determinísticas na análise. Variáveis com fatores de importância altos são aquelas que efetivamente contribuem com maior participação na probabilidade de falha. Assim, para melhorar um projeto, por exemplo, um investimento maior deveria ser feito sobre estas últimas variáveis.

O chamado fator de omissão está diretamente ligado ao fator de importância e é definido como a relação inversa entre o índice de confiabilidade atual e o índice de confiabilidade considerando que a variável aleatória U_i é determinística. Para variáveis estatisticamente independentes e o valor determinístico como sendo a média, este fator é definido por:

$$\gamma U_i = \frac{\beta(U_i = \mu U_i)}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha_i^2}} \quad (3.32)$$

Os fatores de sensibilidade paramétricos são aqueles que fornecem a variação do índice de confiabilidade quando ocorre mudança nos parâmetros que definem a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória. Para uma variação Δp_j em um parâmetro p_j da distribuição de probabilidade da variável i , o novo índice de confiabilidade é dado por:

$$\beta_{novo} = \beta_{velho} + \frac{\partial \beta}{\partial p_j^i} \Delta p_j \quad (3.33)$$

sendo $\frac{\partial \beta}{\partial p_j^i}$ obtido através de expressões que envolvem a transformação de variáveis.

Através dessa expressão é possível fazer uma previsão dos valores de um determinado

parâmetro de uma determinada variável de forma a atender um determinado índice de confiabilidade, sem repetir a análise.

3.8- Método SORM (*Second Order Reliability Method*)

A idéia do método analítico SORM é basicamente a mesma do FORM. A diferença entre ambos consiste na aproximação feita para superfície de falha no espaço reduzido. No SORM, ao invés de se fazer uma superfície linear no ponto de projeto Y^* se faz uma aproximação por uma superfície quadrática, como mostra a figura 3.6 a seguir:

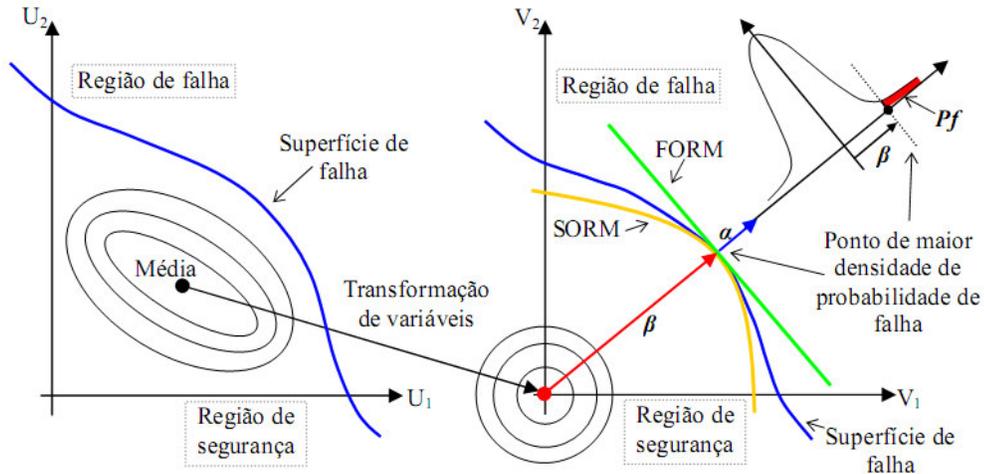


Figura 3.6 - Demonstração gráfica da transformação de variáveis e dos métodos FORM e SORM

Fonte: Adaptado de Rojas (2008)

Aplicando uma expansão por série de Taylor em torno das variáveis U^* , uma função de falha não linear qualquer pode ser aproximada pela Equação 3.34, onde as derivadas são avaliadas no ponto de projeto U^* no espaço original. Se as variáveis não são correlacionadas, pode-se efetuar a transformação definida na Equação 3.36 definida por Finessler et al. (1979 apud Rojas, 2008).

$$G(U_i) = G(U_i^*) + \sum_{i=1}^n (U_i - U_i^*) \frac{\partial G(U)}{\partial U_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (U_i - U_i^*)(U_j - U_j^*) \frac{\partial^2 G(U)}{\partial U_i \partial U_j} + \dots \quad (3.34)$$

$$V_i = \frac{(U_i - \mu_{ui}^N)}{\sigma_{ui}^N} \quad (3.35)$$

Utilizando a aproximação da Equação 3.35 e uma análise assintótica, Breitung (1984, apud Rojas, 2008) propôs uma a outra aproximação através do ajuste de uma curva à função de falha e a determinação de um sistema de eixos ortogonais. O n-ésimo eixo do sistema é escolhido de modo à posicionar o ponto de projeto na origem e os outros eixos são determinados a partir de um procedimento de ortogonalização de Gram-Schmidt, assim a probabilidade de falha é definida por uma aproximação assintótica de segunda ordem.

O teorema de Breitung (1984 *apud* Tvedt, 1990) pode ser implementado se as seguintes condições forem atendidas:

- Um único ponto de projeto V^* ;
- A função de falha deve possuir derivada de segunda ordem no ponto de projeto V^* ;
- As curvaturas principais k_j | $j=1:n-1$ da superfície de falha deve respeitar a condição:

$$K_i \beta = K_j > -1, \quad \beta \rightarrow \infty \quad K_j = \text{constante} \quad (3.36)$$

$$P_{f_{SORM}} = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \beta k_j)^{-1/2}, \quad \beta \rightarrow \infty \quad (3.37)$$

K_i – são as curvaturas principais da superfície de falha no ponto de projeto V^* ;

n – número de variáveis randômicas na análise;

A forma matricial da Equação (3.39) proposta por Madsen et al. (2006) é a seguinte:

$$P_f = \Phi(-\beta) [\det(I + 2\beta A)]^{-1/2} \quad (3.38)$$

I - Matriz identidade com dimensão n-1

A - Matriz cujos elementos são definidos como:

$$A_{ij} = \frac{(HDH^T)_{ij}}{|\nabla g(V)|}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.39)$$

H- Matriz que representa a transformação ortogonal para rotacionar o eixo V_n (eixo que representa a n-ésima variável aleatória) na direção do vetor normal α^* no ponto de projeto V^* .

A matriz H é obtida através do procedimento de ortogonalização de Gram-Schmidt (Bathe *apud* Lee et al., 2008) onde a enésima linha de H coincide com o vetor normal α^* .

A matriz H pode ser definida através do procedimento apresentado por Lee et al. (2008) e Rojas (2008), utilizando a matriz H_0 definida com o uso de cossenos diretores:

$$H_0 = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots \\ \alpha_1 & \dots & \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

As linhas da matriz H são definidas por:

$$h_n = h_{0n} \quad (3.41)$$

$$h_k = h_{0k} - \sum_{j=k+1}^n \frac{h_j \cdot h_{0k}^T}{h_j \cdot h_j^T} \cdot h_j \quad (3.42)$$

D ou $D(V^*)$ – Matriz de derivadas parciais de segunda ordem de $g(V^*)$ no ponto de projeto V^* no espaço reduzido;

$g(V^*)$ – função de falha avaliada no ponto de projeto V^* no espaço reduzido;

Os elementos da matriz D podem ser definidos por:

$$D_{ij}(V^*) = \frac{\partial^2 g(V^*)}{\partial v_i \partial v_j} \quad (3.43)$$

Segundo Sagrilo (1994) a matriz D pode ser definida através da regra da cadeia e a transformação de variáveis apresentada na formulação do método FORM, sendo:

$$D(V^*) = (J^{-1})^T [D(U^*)\sigma(U^*) + G'(U^*)\sigma'(U^*)]L \quad (3.44)$$

onde $D(U^*)$ – Matriz de derivadas parciais de segunda ordem de $G(U^*)$ no ponto de projeto U^* no espaço original;

$G(U^*)$ - função de falha avaliado no ponto de projeto V^* no espaço original;

$\sigma(U^*)$ - Matriz diagonal com os desvios padrões das distribuições normais equivalentes das variáveis aleatórias avaliadas no ponto de projeto U^* ;

$G'(U^*)$ – Matriz diagonal com as derivadas de primeira ordem da função de falha avaliada no ponto U^* ;

$\sigma'(U^*)$ – Matriz diagonal com as derivadas dos desvios padrões das distribuições normais equivalentes avaliadas no ponto de projeto U^* .

Os elementos da matriz D podem ser definidos por:

$$D_{ij}(U^*) = \frac{\partial^2 G(U^*)}{\partial u_i \partial u_j} \quad (3.45)$$

$$G'(U^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial G(U^*)}{\partial u_1} & 0 \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial G(U^*)}{\partial u_2} & 0 \\ 0 & 0 \dots & \frac{\partial G(U^*)}{\partial u_n} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$\sigma'(U^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_{U_1}^N}{\partial u_1} & 0 \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial \sigma_{U_2}^N}{\partial u_2} & 0 \\ 0 & 0 \dots & \frac{\partial \sigma_{U_n}^N}{\partial u_n} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Para variáveis cuja distribuição de probabilidade é normal, a derivada do desvio padrão será igual a 1.

Definida a matriz A através da Equação (3.39), pode-se então estimar a probabilidade de falha pelo método SORM empregando a Equação (3.38).

3.9- Método de Monte Carlo

Para Evans e Olson (1998), a simulação de Monte Carlo é basicamente um experimento amostral cujo objetivo é estimar a distribuição de resultados possíveis da variável aleatória, com base em uma ou mais variáveis de entrada que se comportam de forma probabilística e de acordo com alguma distribuição estipulada. Já Law e Kelton (2000) definem a simulação de Monte Carlo como sendo uma abordagem que emprega números aleatórios para resolver problemas estocásticos ou determinísticos.

Pulido et al (1992) afirmam que o Método de Monte Carlo é um método de amostragem artificial utilizado na solução de experimentos aleatórios, onde se tem conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas e que tem sido utilizado para determinar a confiabilidade de sistemas estruturais.

Ehlers (2003) aplica o método de Monte Carlo para estimar o valor de uma integral definida através do seu valor esperado, isto é, para estimar o resultado numérico de uma integral definida de uma função $g(x)$, no intervalo (a,b) .

Assim tem-se que:

$$I = \int_a^b g(x)dx = \int_a^b (a - b)g(x) \frac{1}{(b-a)} dx = (b - a)E[g(X)] \quad (3.48)$$

sendo X uma variável aleatória com distribuição uniforme $f(a,b)$.

Desta forma, transformou-se o problema de avaliar a integral no problema estatístico de estimar uma média, $E[g(X)]$.

Quando se dispõe de uma amostra aleatória de tamanho n , x_1, \dots, x_n da distribuição, no intervalo (a, b) pode-se obter, também, uma amostra de valores $g(x_1), \dots, g(x_n)$ da função $g(x)$ e a integral acima pode ser estimada pela média amostral, isto é,

$$\hat{I} = (b - a) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i) \quad (3.49)$$

A generalização é simples para o caso de outra distribuição de probabilidade $g(x)$, cuja função densidade de probabilidade seja $p(x)$, ou seja,

$$I = \int_a^b g(x)p(x)dx = E[g(x)] \quad (3.50)$$

A variância pode ser estimada como,

$$\sigma^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (g(x_i) - \bar{g})^2 \quad (3.51)$$

Para n grande segue que

$$\frac{\bar{g} - E[g(X)]}{\sqrt{\sigma^2}} \quad (3.52)$$

tem distribuição aproximadamente $N(0,1)$.

Assim, pode-se usar este resultado para testar a convergência e construir intervalos de confiança.

No caso multivariado a extensão também é direta, isto é, sendo $x=(x_1, \dots, x_k)'$ um vetor aleatório de dimensão k com função de densidade $p(x)$. O que acontece é que na simulação de Monte Carlo as variáveis aleatórias são múltiplas. Para contabilizar o resultado da simulação de diversas variáveis aleatórias basta fazer o seu somatório, ou seja, a cada iteração tem-se o somatório destas variáveis.

O somatório das variáveis aleatórias só é possível devido ao Teorema do Limite Central que, sob condições gerais, estabelece que a função de distribuição acumulada de uma soma de variáveis aleatórias independentes aproxima-se da distribuição acumulada de uma variável aleatória Gaussiana. Ou seja, pouco importa a distribuição de probabilidade de cada variável aleatória independente correspondente a cada risco

analisado, o somatório das mesmas resulta sempre em uma distribuição Normal. Isto na prática significa que o resultado da simulação de Monte Carlo responde à uma curva normal de distribuição de probabilidade.

Neste caso os valores gerados serão também vetores x_1, \dots, x_n e o estimador de Monte Carlo fica,

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i) \quad (3.53)$$

Por outro lado, Laranja e Brito afirmam que o Método de Monte Carlo é uma técnica de simulação numérica, que tem por objetivo a obtenção dos parâmetros estatísticos das variáveis de saída, resultantes do modelo computacional de um sistema, sendo dados os parâmetros estatísticos das variáveis básicas de entrada do modelo. Em cada ciclo de simulação, são gerados valores para as variáveis básicas de entrada, obedecendo às respectivas distribuições, e são calculados os valores das variáveis de saída pelo modelo computacional. É realizado um determinado número de ciclos, sendo o conjunto dos resultados obtidos utilizado para estimar parâmetros estatísticos das variáveis de saída.

Para obter a estimativa de probabilidade de falha associada a um estado limite definido por uma função $g(X)=0$, a simulação pelo método de Monte Carlo consiste na aplicação do seguinte algoritmo:

- 1- Geração de valores para as variáveis básicas de entrada de acordo com as respectivas funções de distribuição.
- 2- Estimação da função de estado limite $g(X)$ com os valores amostrais, obtendo $g(X_i)$, $i=1,2,\dots,N$, onde N é um número muito grande.
- 3- Verificação da coerência da violação do estado de segurança ou seja, $g(X_i) \leq 0$, para $i=1,2,\dots,N \rightarrow \infty$
- 4- Contagem do número de vezes em que é ultrapassado o estado limite, $N\#[g(X)<0]$
- 5- Estimativa da probabilidade de falha média, através de :

$$\bar{p}_f = p[g(x) \leq 0] = \frac{N\#[g(x) \leq 0]}{N} \quad (3.54)$$

O número de simulações a realizar, N , depende, sobretudo, da ordem de grandeza da probabilidade de falha, P_f , e da função que descreve a função de falha, $g(X)$.

Valores muito pequenos de P_f conduzem a valores elevados de N , sendo este o principal inconveniente apontado ao Método de Monte Carlo. Também a irregularidade de $g(X)$ pode provocar um aumento do número de simulações necessário.

Admitindo que o gerador de números pseudo-aleatórios utilizado garanta as propriedades de independência e de uniformidade, tem-se resultados exatos quando o número de simulações tende para o infinito:

$$\bar{p}_f = p[g(x) \leq 0] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N\#[g(x) \leq 0]}{N} \quad (3.55)$$

É possível, também, determinar os momentos estatísticos do conjunto dos resultados das N simulações, e ajustar uma função de probabilidade teórica, a partir da qual se determina o valor de P_f .

Outro importante detalhe a ser levado em conta para a qualidade dos resultados obtidos com a simulação é a escolha do modelo, ou seja, da melhor distribuição de probabilidade para cada risco analisado.

A partir dos dados e informações sobre o problema é possível usar métodos estatísticos como testes de aderência ou softwares de ajuste de curvas para encontrar a distribuição de probabilidade que melhor representa um determinado histórico.

CAPITULO IV – Avaliação da segurança de dutos - Exemplos

Neste capítulo serão apresentados dois exemplos em que foi desenvolvido um procedimento para a análise de confiabilidade estrutural de dutos com defeitos causados por corrosão. Desta forma, pode ser calculado o índice de confiabilidade e conseqüentemente a probabilidade de falha do duto, levando-se em consideração diversos parâmetros, propostos por Ahammed e Zhou, tais como profundidade do defeito, diâmetros da tubulação, comprimento do defeito, pressão do fluido, tensão de escoamento do material do duto, tensão última do material do duto e espessura da parede do duto. Estas variáveis são aleatórias e podem ser representadas por funções densidade de probabilidade normal e log-normal. Para estimar o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha do duto com defeitos, utilizando o método interativo de primeira ordem e segundo momento, denominado FORM. A função de falha é definida em termos da pressão interna aplicada, ou seja, pressão do fluido e da pressão de falha do duto. Portanto para o desenvolvimento foi implementado um programa em ambiente MATLAB visando aplicar o método analítico FORM em exemplos típicos. Em seguida é realizada uma análise comparativa entre os métodos empíricos em termos de função de falha e índice de confiabilidade.

4.1- Exemplo 1: Ahammed

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

Considera-se o exemplo de um duto para o qual inspeções regulares foram realizadas em intervalos pré- especificados. A última inspeção foi realizada para um duto com 10 anos e os valores correspondentes ao comprimento do defeito inicial e a taxa de corrosão radial foram medidos e calculados nesse tempo. Estas e outras variáveis aleatórias consideradas nesta análise são apresentadas na Tabela 4.1,

juntamente com seus tipos de distribuição e valores estatísticos. Nos casos em que os parâmetros de variável aleatória não estavam diretamente disponíveis a função de distribuição e os valores da variável foram estimados criteriosamente, a partir de informações disponíveis na literatura. Os valores estatísticos para a tensão de escoamento do material do duto, foram calculados a partir de valores medidos por Bubenik. Para o tipo de aço de grau X52, a média e o coeficiente de variação dos valores de tensão medidos foram de 423 MPa e 0,067, respectivamente, e uma curva log-normal também foi encontrada para se aproximar dos dados medidos.

Ahammed (1998) apresenta um exemplo de uma tubulação típica com um defeito conhecido e assim consideram-se os valores escolhidos como sendo realísticos.

Neste exemplo a função de falha é dada por:

$$z = P_f - P_a \quad (4.1)$$

onde P_a é a pressão aplicado pelo fluido no duto e P_f é a pressão de falha, portanto isso indica que se z assume valores positivos a tubulação está segura, porém se z assume valores negativos a tubulação está em um estado de falha.

Ahammed (1998) apresentou um critério de determinação de pressão de falha (P_f) que se baseia no método B31G modificada, só que adotou um valor unitário para o fator α .

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

$$R_d = \Delta d / \Delta T \quad (4.2)$$

$$R_a = \Delta a / \Delta T \quad (4.3)$$

onde:

Δd - Diferença entre duas medidas de profundidade do defeito;

Δa - Diferença entre duas medidas de comprimento do defeito;

ΔT - Diferença de tempo entre duas medidas.

A variação da profundidade e do comprimento do defeito ao longo do tempo é definida como sendo linear:

$$d = d_o + R_d * (T - T_o) \quad (4.4)$$

$$a = a_o + R_a * (T - T_o) \quad (4.5)$$

onde:

d_o - Valor da profundidade do defeito no tempo T_o ;

a_o - Valor do comprimento do defeito no tempo T_o .

Tabela 4.1 - Variáveis aleatórias e parâmetros de distribuição - Ahammed (1998)

Variável	Descrição	Função Densidade de Probabilidade	Média	Coefficiente de Variação	Desvio Padrão
Do	Profundidade do defeito inicial	Normal	3 mm	0.1	0.3
D	Diâmetro do duto	Normal	600 mm	0.03	18
ao	Comprimento do defeito inicial	Normal	200 mm	0.05	10
Pa	Pressão interna	Normal	5 MPa	0.1	0.5
tensesc	Tensão de escoamento do material do duto	Lognormal	423 MPa	0.067	283.410
t	Espessura da parede do duto	Normal	10 mm	0.05	0.5
Rd	Taxa de corrosão radial	Normal	0.10 mm/ano	0.2	0.02
Ra	Taxa de corrosão longitudinal	Normal	0.10 mm/ano	0.2	0.02

Foi desenvolvido um programa em ambiente MATLAB para calcular o índice de confiabilidade, probabilidade de falha e os fatores de importância.

No exemplo apresentado foram feitos os cálculos e com isso apresentados os resultados. Para o tempo de exposição de 10 anos, 20 anos, 30 anos foram feitos, 5 iterações até o resultado, já para os anos de 40, 50 e 60 anos foram feitos, 4 iterações.

Na Figura 4.1 são apresentados os valores do índice de confiabilidade e na Figura 4.2 são apresentados os valores da probabilidade de falha para o exemplo apresentado acima tendo sido adotado o método analítico semi-empírico.

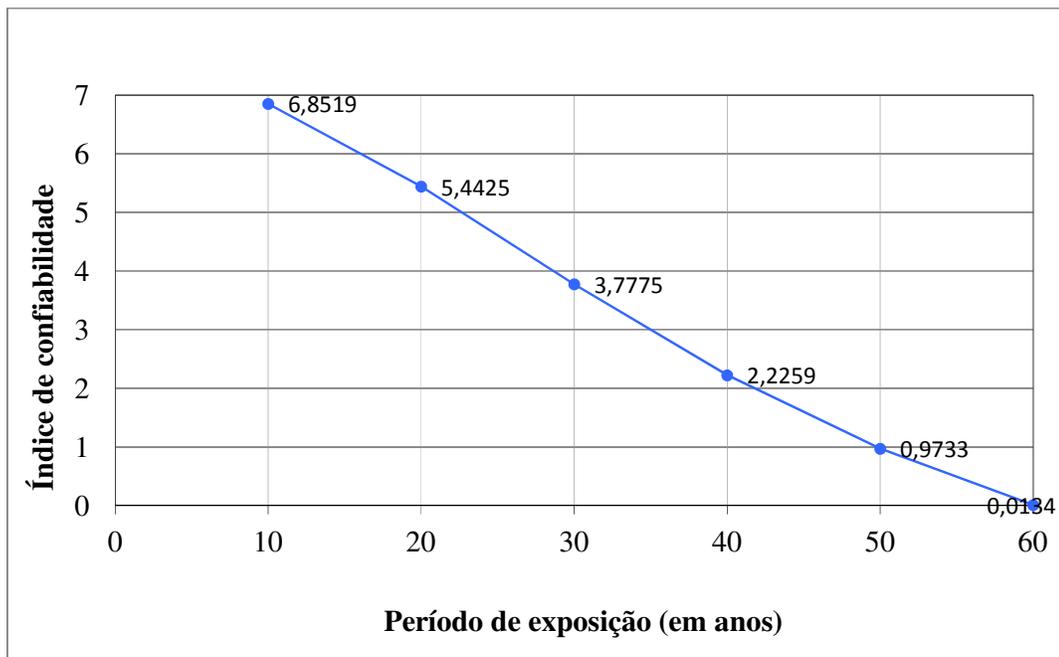


Figura 4.1 - Gráfico do índice de confiabilidade versus o período de exposição

Como podemos perceber na Figura 4.1 o índice de confiabilidade vai diminuindo com o passar do tempo de forma quase linear, mas a probabilidade de falha apresenta um comportamento não-linear. Isto pode ser esperado e pode ser explicado pelo aumento do tempo de exposição, a área do defeito aumenta, resultando em uma redução da capacidade causando um aumento da probabilidade de falha do duto. Com esse

gráfico é possível planejar inspeções, determinar a vida do duto, fazer reparos ou substituir o duto com defeito,

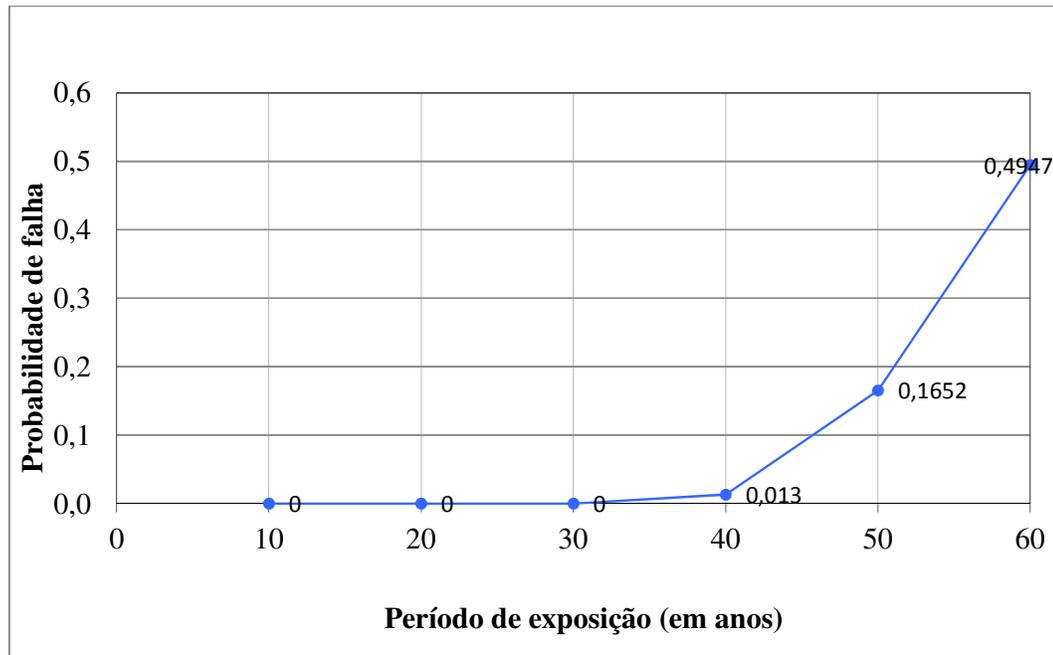


Figura 4.2 - Gráfico da probabilidade de falha versus o período de exposição

Para a probabilidade de falha versus o período de exposição tem-se os seguintes valores, para o tempo de exposição de 10 anos a probabilidade de falha é de $3,6442 \cdot 10^{-12}$, para 20 anos é de $2,627 \cdot 10^{-8}$, para o tempo de 30 anos é de $7,9198 \cdot 10^{-5}$, para 40 anos tem-se 0,013, para o tempo de 50 anos 0,1652 e para o tempo de exposição de 60 anos a probabilidade de falha é 0,4947.

4.1.1-Cálculo de importância das variáveis.

Outra análise é feita através do cálculo das medidas de sensibilidade, como o cálculo do fator de importância. A Tabela 4.2 mostra a contribuição de cada uma das variáveis aleatórias para o cálculo do índice de confiabilidade para diferentes tipos de distribuição.

Tabela 4.2 - Cálculo do fator de importância de cada uma das variáveis dependendo do tempo de exposição

Variável	Descrição	T=20 anos	T=30 anos	T=40 anos	T=50 anos
Do	Profundidade do defeito inicial	0,1402	0,1321	0,1068	0,0815
D	Diâmetro do duto	0,0162	0,0088	0,0049	0,003
ao	Comprimento do defeito inicial	0,0040	0,0037	0,0028	0,0021
Pa	Pressão interna	0,1653	0,1125	0,0741	0,0504
tensesc	Tensão de escoamento do material do duto	0,0795	0,0466	0,0275	0,0174
t	Espessura da parede do duto	0,5326	0,4614	0,3568	0,2663
Rd	Taxa de corrosão radial	0,0623	0,2348	0,4271	0,5794
Ra	Taxa de corrosão longitudinal	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Pode-se notar na Tabela 4.2 que as variáveis diâmetro do duto (D), comprimento inicial do defeito (ao) e a taxa de corrosão longitudinal (Ra) possuem contribuição baixa, eles continuam baixos para todos os valores do período de exposição. Em vista dessa contribuição baixa pode-se dizer que não haveria diferença significativa para os resultados globais, se estas variáveis forem tratadas como determinísticas. A contribuição de algumas variáveis, por exemplo, a profundidade do defeito, a pressão

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

O índice de confiabilidade do duto é afetado pelo grau de incerteza presente nas variáveis aleatórias. O valor do coeficiente de variação (cov) de uma variável aleatória é uma medida do seu grau de incerteza. O comportamento e a extensão não é tão óbvia por isso resolveu-se realizar um estudo de sensibilidade de alguns dos principais parâmetros, para assim demonstrar o efeito e sua variação na segurança do duto. Os principais parâmetros foram a profundidade do defeito do duto (do), a pressão interna do fluido (Pa), a taxa de corrosão radial (Rd) e a espessura da parede do tubo (t).

Para o estudo de sensibilidade, os valores do coeficiente foram variados ao longo do tempo. Os valores de referência dos parâmetros foram tomados como iguais aos valores apresentados na Tabela 4.1 e os índices de confiabilidade foram avaliados em vários períodos de exposição.

Uma tendência que pode ser observada é que o índice de confiabilidade diminui com o aumento dos valores de coeficiente de variação (cov) das variáveis aleatórias. Isso significa que, mesmo se os valores médios das variáveis aleatórias permanecerem inalterados, a probabilidade de falha do duto aumenta com o aumento dos valores de coeficiente de variação das variáveis aleatórias. A taxa de variação do índice de confiabilidade é dependente de fatores como a variável aleatória, período de exposição, valor do coeficiente de variação, entre outros.

4.1.2- Comparação entre os métodos semi-empíricos

Utilizando a formulação apresentada para o cálculo da pressão de falha será feita uma comparação entre os métodos semi-empíricos. Com o método FORM pode ser feito o cálculo do índice de confiabilidade para cada método. O aumento do defeito ao longo do tempo é dado por uma aproximação linear, serão analisados os parâmetros apresentados por Ahammed (1998), que representa um defeito curto. A diferença é que em alguns métodos utiliza-se a tensão última do material, como os métodos DNV e o PCORRC. Utiliza-se a tensão última do material do duto (σ_u) para o aço de classe X52 de 513 MPa. Em seguida será realizada uma análise para defeitos longos.

4.1.2.1- Defeitos Curtos

Para a comparação dos métodos para defeitos curtos será utilizado os dados da Tabela 4.1, considerando a tensão última do material do duto para o aço de classe X52 de 513 MPa. Na Figura 4.3 estão apresentados os índices de confiabilidade para os métodos com defeitos curtos.

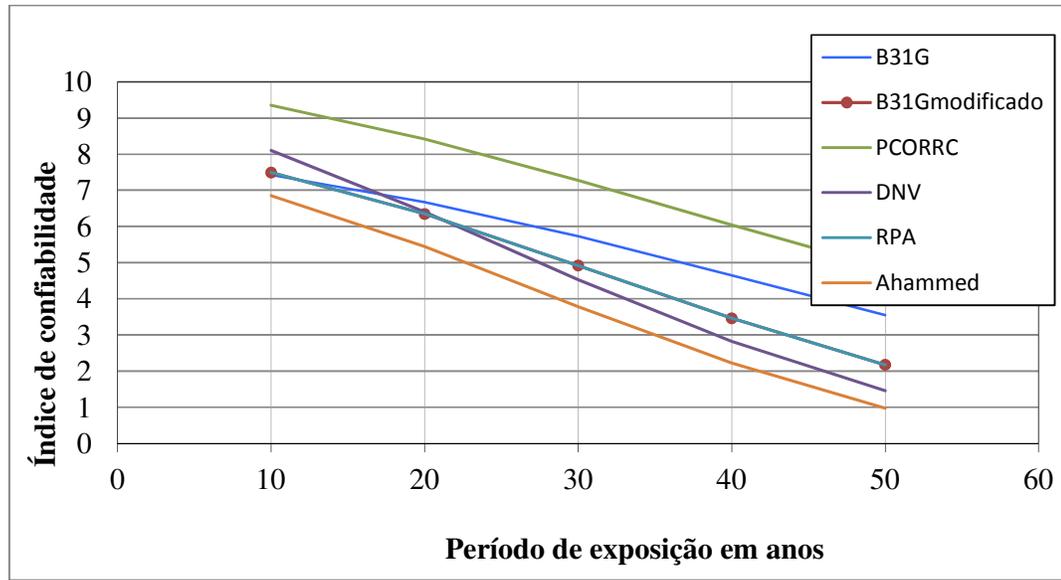


Figura 4.3 - Índice de confiabilidade versus o período de exposição dos métodos semi-empíricos para defeitos curtos.

Como as expressões para defeitos curtos é a mesma para o método B31G modificado e o método RPA os resultados são os mesmos. Pode-se verificar a variação do índice de confiabilidade entre os métodos semi-empíricos para defeitos curtos. Pode-se observar a influência de incertezas na análise de confiabilidade, que possui um maior impacto em alguns métodos como o DNV.

4.1.2.2 - Defeitos longos

Para realizar a análise comparativa entre os métodos para defeitos longos serão utilizados os mesmo dados utilizados para defeitos curtos, porém o comprimento inicial do defeito (a_0) é de 550 mm e a taxa de corrosão longitudinal (R_a) é de 2 mm/ano. Os resultados obtidos estão conforme a figura 4.4 para o índice de confiabilidade.

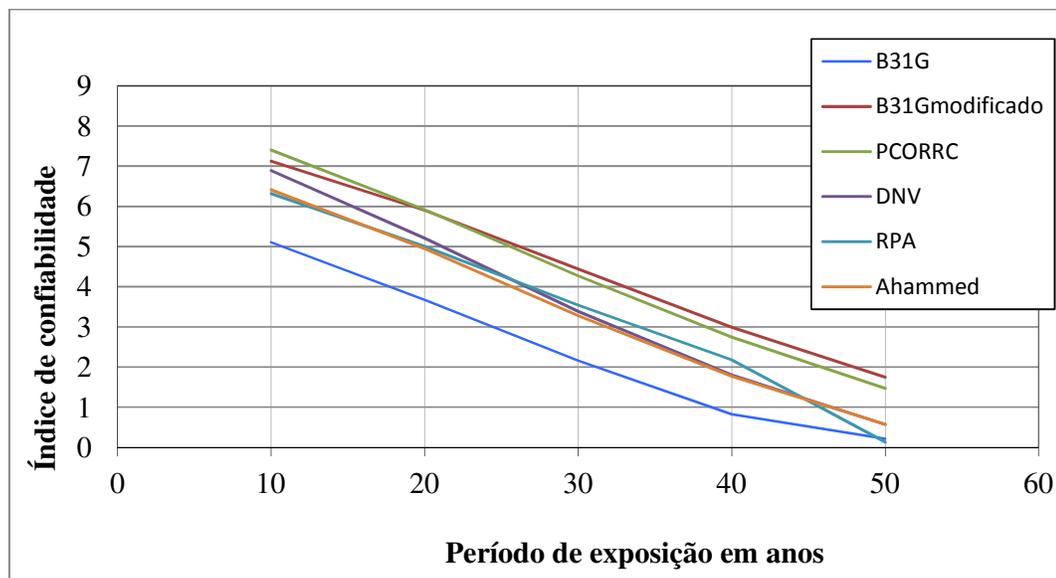


Figura 4.4 - Índice de confiabilidade versus o período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos.

Pode-se verificar na Figura 4.4 que os defeitos longos produziram maior variação de índice de confiabilidade entre os métodos semi-empíricos que para os defeitos curtos.

4.1.3- Influência do coeficiente de variação para diferentes valores para a formulação de Ahammed.

Nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 são apresentados os gráficos do índice de confiabilidade com valores diferentes de coeficiente de variação (cov) para os parâmetros analisados.

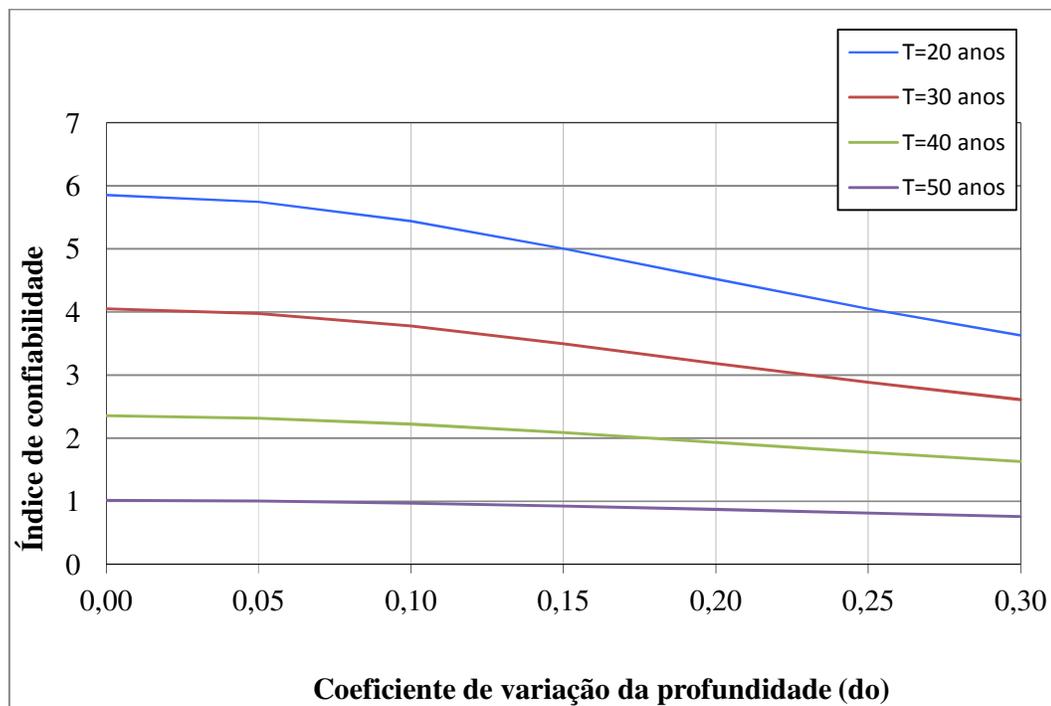


Figura 4.5 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da profundidade do defeito para vários períodos.

Pode ser observada na Figura 4.5 que a mudança no índice de confiabilidade é significativa, no entanto a sensibilidade diminui gradativamente com o período de exposição maior. A curva com T=50 anos é quase insensível a todos os valores de coeficiente de variação que foram considerados. Uma estimativa exata do valor do coeficiente de variação é necessário para períodos de exposição curtos (em comparação com o longo período de exposição), caso contrario, os índices de confiabilidade avaliados não seriam tão realistas. No entanto, para um longo período de exposição a estimativa de coeficiente de variação não afeta de modo significativo o índice de confiabilidade calculado.

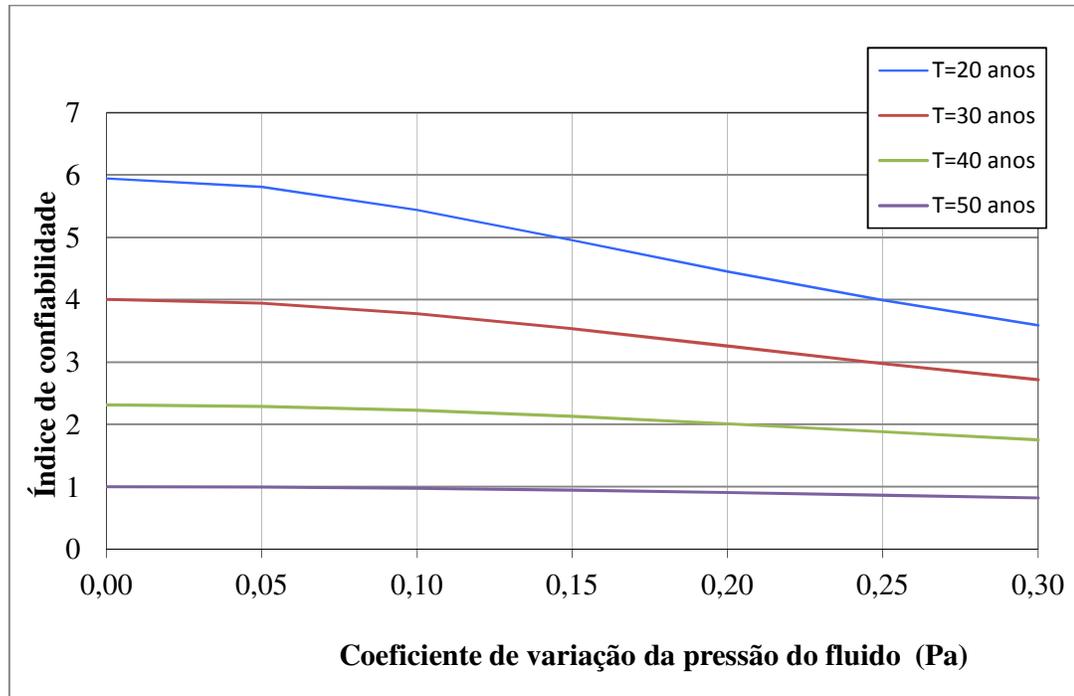


Figura 4.6 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da pressão do fluido para vários períodos.

Observando a Figura 4.6, vê-se que o efeito do coeficiente de variação para a variável aleatória pressão do fluido no índice de confiabilidade é mais ou menos semelhante ao caso anterior.

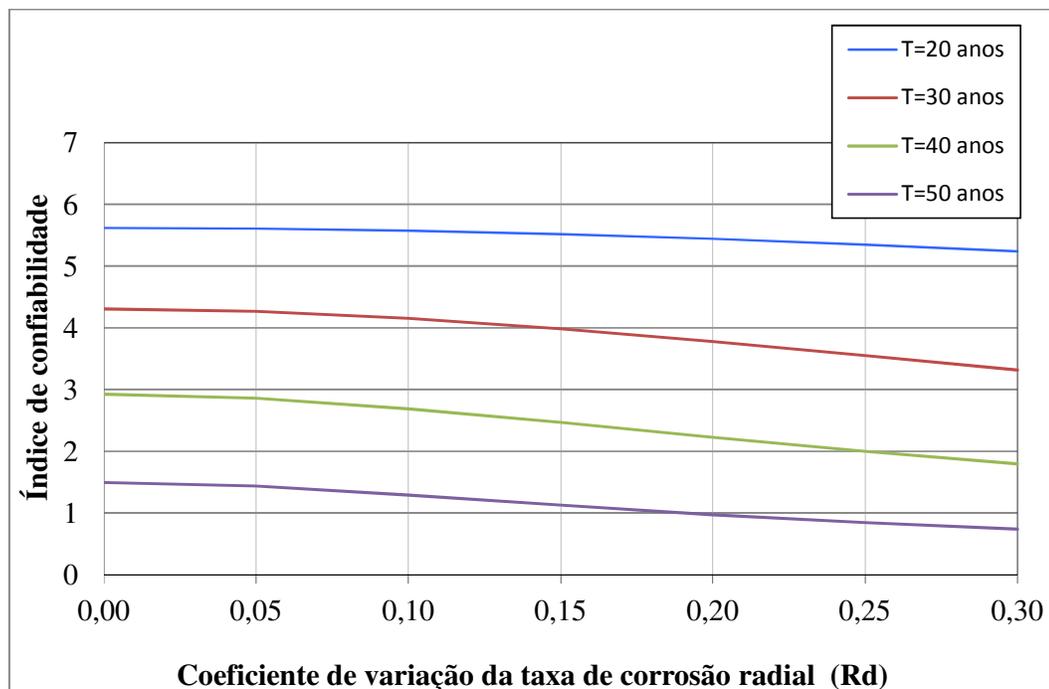


Figura 4.7 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da taxa de corrosão radial para vários períodos.

Na Figura 4.7 pode ser observado que em períodos de baixa exposição o índice de confiabilidade não é tão sensível a mudanças nos valores do coeficiente de variação para a variável aleatória taxa de corrosão radial (Rd). No entanto, o índice de confiabilidade sofre mais influência com o período de maior exposição. Isso significa que se o índice de confiabilidade é calculado para um período de longa exposição, um valor preciso do coeficiente de variação da taxa de corrosão radial deve ser usado para um resultado realista.

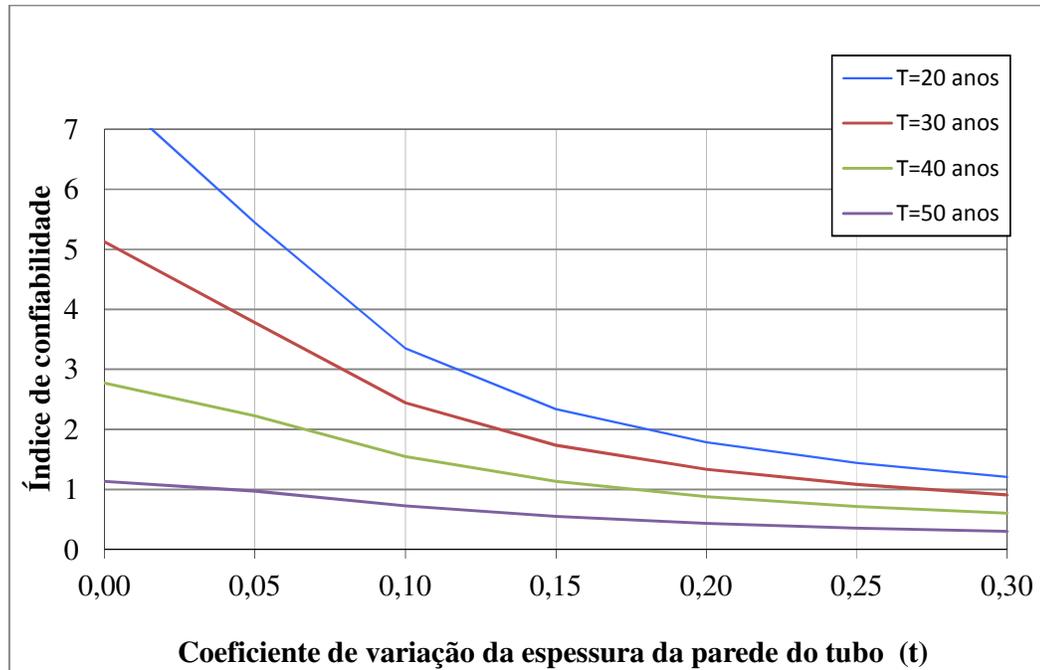


Figura 4.8 - Índice de confiabilidade versus o coeficiente de variação da espessura da parede do tubo para vários períodos.

Na Figura 4.8 podemos perceber que o índice de confiabilidade é muito sensível para baixos valores do coeficiente de variação da variável aleatória espessura da parede do tubo (t). A sensibilidade diminui gradativamente para o período de maior exposição, mesmo em períodos de alta exposição. Para um período de exposição de 20 anos a variável do índice de confiabilidade é muito dependente do coeficiente de variação, e em um período de exposição de 50 anos esta dependência diminui muito, mas continua significativa. Entretanto, para grandes valores do coeficiente de variação da espessura do duto, o índice de confiabilidade é bastante pequeno para todos os valores de período de exposição.

4.2- Exemplo 2 (Adaptado de Zhou)

Considerando um duto com defeito de corrosão, supõe-se neste exemplo que a pressão interna de carga sobre esses defeitos são idênticos. Esta suposição pode ser justificada porque a queda de pressão ao longo de um duto relativamente curto é geralmente pequena. A metodologia é apresentada neste trabalho para avaliar a confiabilidade do sistema em função do tempo de um segmento de oleoduto que contém defeitos de corrosão e é submetido a pressão interna.

Neste exemplo serão considerados defeitos curtos para diferentes métodos analíticos semi-empíricos. Na Tabela 4.3 são apresentadas todas as informações referentes ao duto, proposto por Zhou (2010).

Tabela 4.3- Características probabilísticas dos parâmetros de entrada

Variável	Descrição	Função Densidade de Probabilidade	Média	Coefficiente de Variação	Desvio Padrão
do	Profundidade do defeito inicial	Normal	1.59 mm	0.389	0.61851
D	Diâmetro do duto	Determinística	610 mm	0.03	18.3
ao	Comprimento do defeito inicial	Normal	50 mm	0.156	7.8
Pa	Pressão interna	Gumbel	7.056 MPa	0.05	0.3528
tensesc	Tensão de escoamento do material do duto	Normal	496 MPa	0.03	14.88
t	Espessura da parede do duto	Normal	7.925 mm	0.015	0.118875
Rd	Taxa de corrosão radial	Lognormal	0.15 mm/ano	0.6	0.09
Ra	Taxa de corrosão longitudinal	Lognormal	3 mm/ano	0.5	1.5

Mais uma vez os resultados foram obtidos num programa desenvolvido em ambiente MATLAB. Para este exemplo, utilizando o método semi-empírico B31G com defeitos curtos, precisou-se de 8 iterações para 5 anos, 5 iterações para 10, 15, 20 e 25 anos e 4 iterações para 30 anos de exposição. Para o método semi-empírico B31G modificado e também com defeitos curtos foram feitos 6 iterações para 5 anos, 5

iterações para 10, 15 e 20 anos, 4 iterações para 25 e 30 anos. Para o método semi-empírico PCORRC os resultados foram obtidos com 6 iterações para 5 e 10 anos, 5 iterações para 15, 20 e 25 anos e 4 iterações para 30 anos. Para o método semi-empírico DNV foram feitos 6 iterações para 5 e 10 anos, 5 iterações para 15, 20 e 25 anos e 4 iterações para 30 anos.

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados do índice de confiabilidade versus o período de exposição para os diferentes métodos e na Figura 4.10 os resultados da probabilidade de falha para diferentes períodos de exposição.

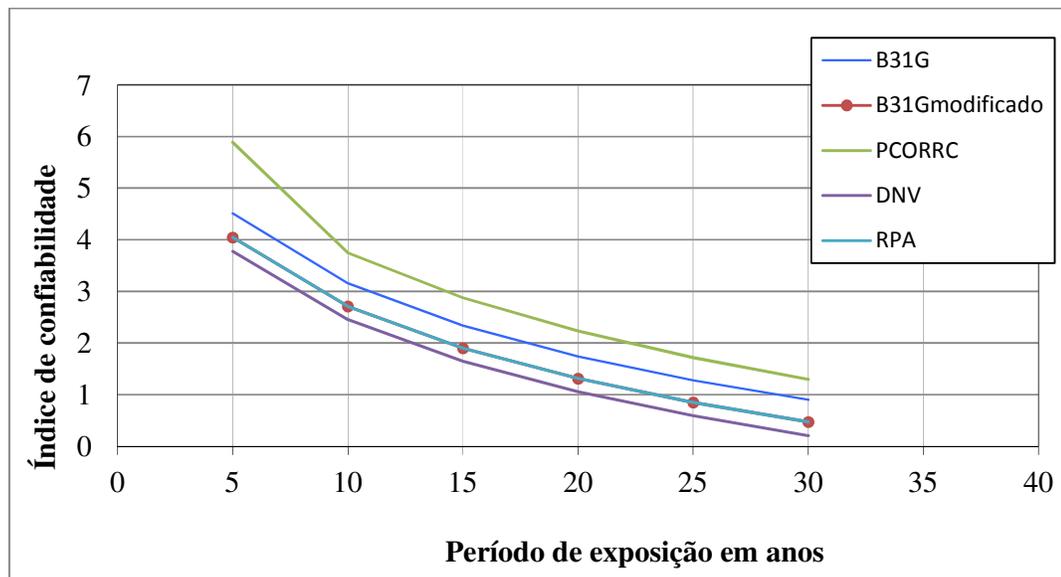


Figura 4.9 - Gráfico do índice de confiabilidade versus o período de exposição

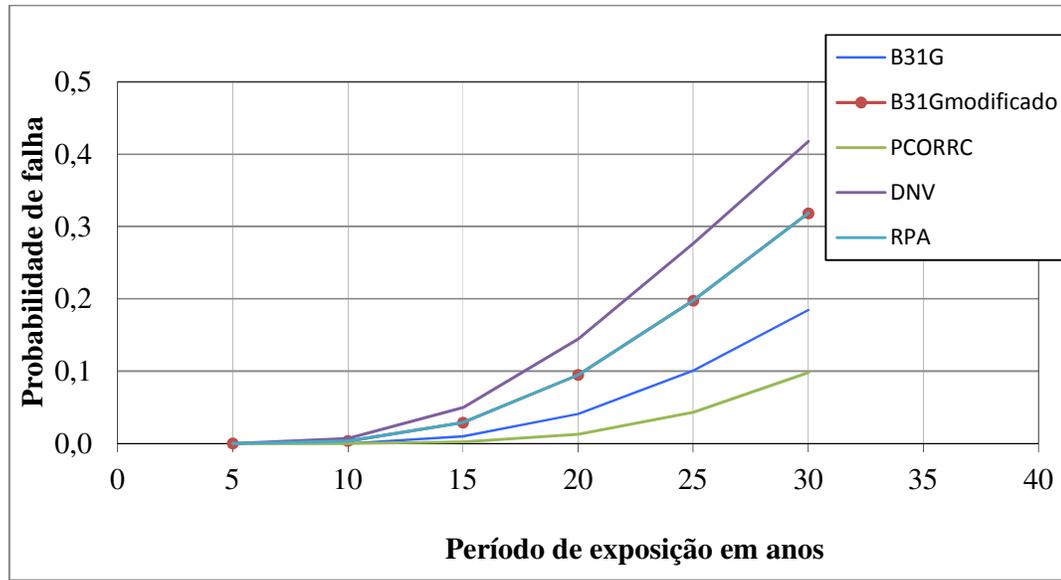


Figura 4.10 - Gráfico da probabilidade de falha versus o período de exposição

4.2.1- Cálculo da importância das variáveis

Através do cálculo da importância das medidas de sensibilidade, como o cálculo do fator de importância. A Tabela 4.4 mostra a contribuição de cada uma das variáveis aleatórias para o cálculo do índice de confiabilidade para diferentes tipos de distribuição. Foram feitas as importâncias para os dados apresentados por Zhou pelo método semi-empírico B31G modificado.

Tabela 4.4 – Cálculo do fator de importância de cada uma das variáveis dependendo do tempo de exposição.

Fator de importância							
Variável	Descrição	T=5 anos	T=10 anos	T=15 anos	T=20 anos	T=25 anos	T=30 anos
do	Profundidade do defeito inicial	0.0366	0.0386	0.0408	0.0429	0.0447	0.0463
D	Diâmetro do duto	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0008	0.0009
Lo	Comprimento do defeito inicial	0.0042	0.0032	0.0024	0.0018	0.0014	0.0011
Pa	Pressão interna	0.0013	0.0018	0.0023	0.0028	0.0031	0.0034
tensesc	Tensão de escoamento do material do duto	0.0004	0.0006	0.0008	0.0009	0.0010	0.0011
t	Espessura da parede do duto	0.0027	0.0029	0.0031	0.0032	0.0033	0.0034
Rd	Taxa de corrosão radial	0.9512	0.9416	0.9320	0.9246	0.9196	0.9162
Ra	Taxa de corrosão longitudinal	0.0034	0.0110	0.0182	0.0232	0.0261	0.0276

Pode-se notar que para os tempos de exposição para quase todas as variáveis, a não ser a taxa de corrosão radial, possuem contribuição baixa. A contribuição da variável de taxa de corrosão radial é elevada em período de baixa exposição, mas diminuem com o aumento da exposição.

CAPÍTULO V – Comentários finais

Este trabalho teve como objetivo o estudo da segurança de diferentes dutos metálicos com defeitos de corrosão. Foi apresentada uma metodologia probabilística para a estimativa da vida remanescente de um duto na presença de defeitos de corrosão. As variáveis que influenciam a confiabilidade foram tratadas como variáveis aleatórias e foram representadas por distribuições estatísticas. Esta metodologia permite também o cálculo do índice de confiabilidade, probabilidade de falha, a contribuição relativa das variáveis aleatórias e também permite o estudo efetivo da variação da variância das variáveis aleatórias. A aplicabilidade da metodologia foi demonstrada em exemplos com a análise de um duto.

Verificou-se com o estudo, que o índice de confiabilidade do duto diminui com o maior período de exposição, o que é esperado já que se trata de um defeito de corrosão ativa. Porém isso é de grande importância, pois pode auxiliar na determinação e no planejamento de inspeções e reparos no duto com defeito.

A taxa de corrosão radial pode tornar-se a mais importante para a falha do duto em longo prazo, embora a sua contribuição em curto prazo não seja tão significativa e a taxa de corrosão longitudinal continua a ser insignificante para todos os valores do período de exposição.

Algumas variáveis aleatórias possuem significativa contribuição, mas diminuem com o maior período de exposição. A confiabilidade do duto diminui com o maior valor da variância das variáveis aleatórias e a sensibilidade do duto depende da variável aleatória, do valor do coeficiente de variação e do tempo de exposição.

A partir do estudo numérico, verificou-se que a profundidade do defeito e a pressão interna do fluido têm influência significativa na confiabilidade do duto, já o comprimento não tem tanta influência, porém com defeitos de comprimentos mais curtos pode-se ter uma influência significativa na confiabilidade.

Outro ponto importante é que, entre os métodos semi-empíricos, a pressão de falha e o índice de confiabilidade apresentam variação não linear.

Através da análise do fator de importância foi possível identificar as variáveis aleatórias que apresentam maior importância e menor influência na caracterização de falha do duto.

Sugere-se continuar este trabalho avaliando-se outros exemplos com tamanhos de defeitos longos. A utilização de outros métodos para a avaliação da probabilidade de falha, tais como o método SORM e o método de Monte Carlo, também é relevante para a verificação dos resultados e da eficiência de cada um deles.

CAPÍTULO VI- Referências Bibliográficas

1. Abraco (2004) – <http://www.abraco.org.br/corros11.htm>
2. Ahammed, M., (1998) Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects, *Int. J. Pres. Ves. Piping*, v. 75, pp. 321-329.
3. ASME (1991), *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping*, the American Society of Mechanical Engineers, New York.
4. Ang, A.H-S. and Tang, W.H. (1984) *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. II, John Willey and Sons, New York.
5. Bubenik, T. A., (1992) Analyzing the pressure strength of corroded line pipe. *International Conderence on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, Volume V, Part A, 225-231.
6. Castro, L.A. (1997). *Análise de segurança no projeto de estruturas: método dos estados limites*, Dissertação de Mestrado – EESC/USP.
7. Der Kiureghian, A. and Liu, P.L. (1986) Structural Reliability Under Incomplete Probability Information, *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, Vol. 112, n^o1, pp. 85-104.
8. Ehlers, S. R. (2004) *Métodos Computacionalmente Intensivos em Estatística*, material didático, UFPR.
9. Evans, J., Olson, D., (1998) *Introduction to Simulation and Risk Analysis*, United Kingdom, Prentice Hall.
10. Galambos, T.V., et. al. (1982). Probability based load criteria: assessment of current design practice, *Journal of the Structural Division, ASCE*, vol. 108, 5, pp. 959-977.
11. Hasofer, A.M. and Lind, N.C. (1974) Exact and Invariant Second-Momenr Code Format, *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, Vol. 100, n^oEM1, 111-121.

12. Kiefner, J. F., Vieth, P.H., Roytman I., (1996) Continued Validation of RSTRENG, Contract PR 218-9304, Pipeline Research Commitee, Amercian Gas Association.
13. Laranja, R., Brito, J. (2003) Verificação Probabilística de Segurança das Estruturas, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
14. Law, A. G., Hou, Y. S., Wall, G. W., Trent, A., Kimball, B. A., Pinter, P. J., (2000) Free Air CO₂, Enrichment and Drought Stress Effects on Grain Filling Rate and Duration in Spring Weath, Crop Science, Madison, v. 40, n^o5, p. 1263-1270.
15. Lee, O.S., (2008) Reliability estimation for PVC pipe using probability theory and stress intensity factor.
16. Madsen, H. O., Krenk, S. e Lind, N.C. (2006). “Methods of Structural Safety”, Prentice-Hall, New Jersey, 403p.
17. Melchers, R. E., (1999) Structural Reliability: analysis and Prediction.
18. Matousek, M. e Schneider, J. (1976) Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken, Institut fur Baustatik und Konstruktion, ETH Zurich, bericht n. 59
19. NBR 8681 (2003). Ações e segurança nas estruturas. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
20. Pulido, J. E., Jacobs, T. L., Lima, E. C. P., (1992) Structural Reliability Using Monte Carlo Simulation with Variance Reduction Techniques on Elastic-Plastic Structures, Computer and Structures, p. 419-430.
21. Racwitz, R. and Fiessler, B. (1978) Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences, Computer and Structures, Vol. 9, pp. 489-494.
22. Rojas, K.E., (2008) Méthodologie d’Analyse de Fiabilité Basée sur des Techniques Heuristiques d’Optimisation et Madèles sans Maillage: Applications aux Systèmes Mécaniques. Tese de doutorado, INSA de Rouen.

23. Sagrilo, L.V.S. (1994) Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM e SORM, Tese de Doutorado, UFRJ.
24. Torres, J. V. S., Afonso, S. M. B. e Vaz, L. E. (2007) Metodologia probabilística para estudar dutos na presença de defeitos de corrosão, Anais da Rio Pipeline conference e exposition.
25. Tvedt, L. (1990) Distribution of Quadratic Forms in Normal Space – Application to Structural Reliability. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 116, n^o6, p. 1183-1197.
26. Vanhazebrouk, V. M. (2008) Análise de dutos corroídos por meio de método de confiabilidade estrutural. Dissertação de Mestrado, PUC-PR.
27. Zhou, W., (2010) System reliability of corroding pipelines, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*.