

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais - PPGEM

APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA A ESTIMATIVA DA
MENOR ESPESSURA PRESENTE EM TUBOS DE FEIXES TUBULARES
DE PERMUTADORES DE CALOR

Fábio Moreira Lima

Engenheiro Industrial Mecânico

Dissertação para obtenção de título de

Mestre em Engenharia

Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos

Porto Alegre - RS

2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais - PPGEM

APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA A ESTIMATIVA DA
MENOR ESPESSURA PRESENTE EM TUBOS DE FEIXES TUBULARES
DE PERMUTADORES DE CALOR

FÁBIO MOREIRA LIMA
Engenheiro Industrial Mecânico

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Rio de Janeiro - RJ

2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de *Mestre em Engenharia, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos* e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Dr. Eng. Rogério Fonseca Dias

Dr. Eng. Márcio Humberto Silva Siqueira

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Rio de Janeiro, Julho de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que me proporcionaram a possibilidade da realização de mais esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me proporcionado uma vida repleta de realizações.

A Minha família, pelo apoio, compreensão e dedicação.

A os colegas do Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos Inspeção, pela colaboração e amizade.

Aos coordenadores do Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos Inspeção pela disponibilização dos recursos necessários a realização deste trabalho.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIV
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - <i>Permutadores de Calor</i>	4
2.2 - <i>Corrosão</i>	9
2.2.1 - <i>Classificação dos danos por corrosão</i>	9
2.2.2 - <i>Corrosão por Pites</i>	11
2.2.3 - <i>Corrosão sob Depósito</i>	18
2.2.4 - <i>Tuberculação</i>	21
2.3 - <i>Ensaio IRIS</i>	23
2.3.1 - <i>Funcionamento do ensaio IRIS</i>	24
2.4 - <i>Estatística</i>	26
2.4.1 - <i>Contagem</i>	26
2.4.2 - <i>Probabilidade</i>	27
2.4.3 - <i>Modelagem Univariada de Extremos</i>	28

2.4.4 - Distribuição de Valores Extremos Generalizada	29
2.5 - <i>Confiabilidade</i>	32
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 - <i>Obtenção dos Dados</i>	35
3.2 - <i>Método de Cálculo I</i>	36
3.3 - <i>Método de Cálculo II</i>	39
3.3.1 - <i>Estimação de Máxima Verossimilhança</i>	41
3.3.2 - <i>Ajuste da Distribuição</i>	43
3.4 - <i>Programas utilizados</i>	44
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 - <i>Método de Cálculo I</i>	45
4.2 - <i>Método de Cálculo II</i>	53
4.2.1 - <i>Estimativa dos parâmetros da distribuição</i>	57
4.2.2 - <i>Ajuste da curva</i>	58
4.2.3 - <i>Avaliação da vida remanescente</i>	60
5 - CONCLUSÕES	63
6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	65
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Descrição dos componentes de permutadores de calor.....	7
Tabela 3.1	Número de elementos em diferentes amostras utilizadas nas simulações.	41
Tabela 4.1	Variação da probabilidade de obtenção com a variação do percentual de amostragem.	46
Tabela 4.2	Variação da probabilidade de obtenção com a variação do percentual de amostragem.	46
Tabela 4.3	Avaliação do erro relativo para as dez populações do feixe com 600 tubos.	55
Tabela 4.4	Erro cometido na estimativa para as diversas populações e tamanhos de amostragem, feixe com 1500 tubos.	57
Tabela 4.5	Erro cometido na estimativa para as diversas populações e tamanhos de amostragem, feixe com 1500 tubos.	57
Tabela 4.6	Determinação dos parâmetro de forma e locação pelo método da máxima verossimilhança.	58
Tabela 4.7:	Valores para o teste de χ^2 e P-valor. Populações utilizadas no feixe com 600 tubos.....	59
Tabela 4.8:	Valores para o teste de χ^2 e P-valor. Populações utilizadas no feixe com 1500 tubos.	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Permutador de calor com espelhos fixos. (TELLES, 2001).....	5
Figura 2.2	Permutador de calor com espelho flutuante. (TELLES, 2001).....	6
Figura 2.3	Permutador com feixe em U. (TELLES, 2001)	6
Figura 2.4	Nomenclatura de permutadores, classificação TEMA. (TELLES, 2001)8	
Figura 2.5	Diferentes tipos de corrosão. (SHE IR, 2000).....	10
Figura 2.6	Variação na forma de seções transversais de pites. (ASTM G46, 2005)	10
Figura 2.7	Classificação de processos corrosivos. (GENTIL, 1996).....	11
Figura 2.8	Corrente de potencial típico. (American Society for Metal, 2005)	12
Figura 2.9	Efeito da temperatura no potencial de pite, E_p , de aço inoxidável AISI 304 em solução de NaCl com diferentes percentuais de enxofre. (WILEY, 2000). ..	13
Figura 2.10:	Processo de propagação da Corrosão por pites. (American Society for Metal, 1992)	14
Figura 2.11:	Etapas sucessivas da formação da célula de concentração diferencial de oxigênio como consequência de depósito na superfície do aço imerso em água aerada. (Wiley, 2000)	20
Figura 2.12:	Tubulação de água de serviço apresentando severa tuberculação. (Harvey, 1993).....	21
Figura 2.13	Camada incipiente de óxido em aço imerso em água aerada. (Harvey, 1993).....	22
Figura 2.14	Tubérculo mostrando composição química e estrutura. (Harvey, 1993)	23
Figura 2.15	Sonda para ensaio IRIS. (Al-Qadeeb, 2005).....	23

Figura 2.16	Esquema de funcionamento de uma sonda (Al-Qadeeb, 2005)	24
Figura 2.17	Esquema de funcionamento de uma sonda para ensaio IRIS.	25
Figura 2.18	Modificação da distribuição de Gumbel com a variação do parâmetro de forma e locação.	30
Figura 3.1	Distribuição das menores espessuras presente no feixe tubular.	37
Figura 3.2	Distribuição de probabilidade de profundidade de pite, para pequena amostragem, em papel de distribuição de Gumbel. (WILEY, 2000)	40
Figura 4.1	Gráfico de correlação entre percentual de tubos e probabilidade de obtenção.....	47
Figura 4.2	Gráfico de correlação entre o número de tubos amostrados e a probabilidade de obtenção.	48
Figura 4.3	Esquema de espelho de feixe tubular com quatro passes.	51
Figura 4.4	Gráficos que mostram a variação da probabilidade de obtenção com o tamanho da amostra.....	50
Figura 4.5	Distribuição das máximas perda de espessura separadas por passe e generalizada.	52
Figura 4.6	Curva de distribuição da população cinco, feixe tubular com 600 tubos.	53
Figura 4.7	Curvas de probabilidade para as cinquenta amostras retiradas da população cinco do feixe tubular com 600 tubos.	53
Figura 4.8	Histograma das estimativas para as amostras da população cinco, feixe tubular com 600 tubos.....	54
Figura 4.9	Variação das curvas de distribuição das estimativas com a variação do tamanho da amostra.....	56
Figura 4.10	Gráfico PP-Plot para a população 2, feixe com 600 tubos.	59

Figura 4.11 Gráfico QQ-Plot para a população 2, feixe com 600 tubos.....59

RESUMO

O aumento da confiabilidade operacional é responsável pela elevação da segurança em plantas industriais assim como, pela redução de custos com manutenção. Engenheiros de inspeção, em muitos casos, utilizam métodos estatísticos que possibilitam a execução de inspeção por amostragem, nestes casos extrapolações dos resultados obtidos nos ensaios devem ser feitas para a partir daí estimar as condições físicas do equipamento como um todo. Propomos neste estudo dois métodos de cálculo que quando aplicados nos resultados de ensaio IRIS se possa estimar a menor espessura presente no feixe tubular. O primeiro método, designado como método de cálculo I, utiliza os conceitos de arranjo simples em conjunto com a delimitação do grupo de tubos de interesse na obtenção da estimativa da menor espessura presente no feixe tubular. O segundo método de cálculo, método de cálculo II, consiste em uma adaptação do método de cálculo proposto pela JSCE para a estimação da profundidade de pite no feixe, este método utiliza a distribuição dos valores de espessuras obtidos no ensaio, para através do conceito de período de retorno realizar cálculos que proporcionem obter uma estimativa da menor medida de espessura presente no feixe. Os métodos de cálculo estatísticos existentes utilizados na estimativa de menores espessuras em vasos e tubulações se baseia no ajuste dos valores de espessura obtidos por ensaios à curvas de distribuição previamente estabelecidas, verifica-se que este ajuste em geral não é encontrado para os dados utilizados no método de cálculo II, esta falta de aderência pode ser explicada quando são analisados vários aspectos no que se refere a operação e a atuação de mecanismos de corrosão em feixes tubulares de permutadores de calor: Intensidades diferenciadas de processos corrosivos em passes distintos, mecanismos de corrosão distintos que produzam taxas de desgaste semelhante externa e internamente aos tubos, variações no processo que proporcionem alterações nos fenômenos corrosivos. Para avaliar o ajuste dos valores medidos à curva de distribuição empregamos os métodos gráficos PP-Plot e QQ-plot e para determinar os parâmetros necessários a curva de distribuição utilizamos a estimação de máxima verossimilhança. No método de cálculo I o tamanho da amostragem necessária para a probabilidade de obtenção desejada varia de forma não linear com o número de tubos do feixe e com o percentual de tubos de interesse, em geral não há um aumento significativo na probabilidade de obtenção de uma medida em percentuais de interesse acima de 4% dos tubos presentes no feixe. O método de cálculo II possui aplicabilidade apenas em feixe com no mínimo 600 tubos e pode apresenta erro na estimativa de até $\pm 0,2\text{mm}$, para feixes com 1500

tubos o erro máximo varia com o período de retorno utilizado e pode alcançar valores entre $\pm 0,3$.

ABSTRACT

Increased operational reliability is responsible for security in lifting industrial plants as well as the reduction of costs with maintenance, inspection engineers, in many cases, using techniques of inspection and sampling by complementing these tests employ statistical methods to make extrapolations of the results from tests for the equipment as a whole. We propose in this study two methods of calculation that can be applied in the test results for IRIS that it is possible to estimate the maximum depth of pite in the tubular beam, the first method, designated as of calculation method I, use the concepts of permutation in together with the delineation of sets of tubes of interest in obtaining the estimate of the lower thickness in the bundles. The second calculation method, calculation method II, is an adaptation of the method of calculating proposed by JSCE to estimate the depth of pite in the bundles, this method uses the distribution of values of thickness obtained in the test for using the concept of time return to perform more calculations to provide an estimate of the lowest measure of thickness in the bundles. The existing statistical methods of calculation used to estimate the thickness in smaller vessels and pipes is based on the adjustment of the values of thickness obtained by testing the distribution curves of previously established, it appears that this adjustment generally is not found for the data used in Calculation Method II, this lack of adherence may be explained when they are examined several aspects as regards the operation and performance of mechanisms of corrosion of bundles in heat exchangers: corrosion processes with different intensities in different passes, different mechanisms of corrosion that produce similar wear rates of the external and internal tubes, which provide variations in changes in corrosive phenomena. To assess the fit of the measured values of the distribution curve of the methods employed graphic Plot and PP-and QQ-plot, to determine the parameters needed to use the curve of distribution of maximum likelihood estimation. In the method of calculating the size of the sample I needed for the likelihood of achieving desired changes in a non-linear with the number of tubes of the bundle and the percentage of tubes of interest, in general there is a significant increase in the probability of obtaining a measured in percentage of interest above 4% of the tubes in the bundle. The calculation method II has applicability only to bundles with at least 600 tubes and may make the estimation error of up to ± 0.2 mm for bundles with 1,500 pipes the maximum error varies with the period of return used and can reach values between ± 0.3 .

1 - INTRODUÇÃO

Uma das principais funções da inspeção de equipamentos é prever as taxas de acúmulo dos diferentes danos e, a partir daí, definir a vida remanescente do equipamento visando à elevação da confiabilidade operacional. No âmbito da integridade estrutural a correta determinação da espessura mínima presente no equipamento é decisiva para a avaliação da sua vida remanescente. Para aumentar a confiabilidade muitas vezes o engenheiro de inspeção utiliza técnicas baseadas em amostragem de determinadas regiões ou componentes do equipamento. Neste caso ele recorre a métodos estatísticos para possibilitar a extrapolação dos resultados obtidos para estimar as condições físicas do equipamento como um todo.

Este estudo tem como objetivo avaliar a aplicação de métodos estatísticos que possibilitem aplicar o ensaio IRIS por amostragem na inspeção de feixes tubulares de permutadores de calor. O objetivo dos métodos estatísticos é estimar a menor espessura de parede presente no feixe tubular contribuindo, assim, para a redução dos custos com manutenção. Esta redução é obtida através da diminuição da duração de paradas de manutenção.

Para alcançar o objetivo principal utilizaremos dois métodos de cálculo. O primeiro deles é baseado no conceito de arranjo simples e pressupõe a existência de um grupo de tubos previamente definido com as menores espessuras do feixe tubular. O segundo método aplica a teoria dos valores extremos, para através de uma extrapolação, estimar a espessura mínima presente nos tubos.

Espera-se que com o estudo destes métodos seja possível responder as seguintes perguntas:

Qual o tamanho de amostra que possibilita estimar a menor espessura do feixe de modo confiável?

As distribuições de valores extremos são largamente utilizadas para estimar a menor espessura em equipamentos e tubulações industriais. Sendo assim, a distribuição de valores extremos também representa adequadamente a distribuição de valores de espessura do feixe tubular?

Qual a influência da corrosão mais acentuada em determinados passes dos permutadores sobre a aplicação de métodos estatísticos para a estimativa de espessuras mínimas?

A partir da estimativa da menor espessura, é possível determinar a vida remanescente do feixe tubular, aumentando assim a confiabilidade do equipamento?

O texto está estruturado em seis capítulos. O presente capítulo contém os argumentos que justificam a elaboração do trabalho, seus objetivos e a metodologia empregada. O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica - aborda aspectos construtivos e classificatórios dos permutadores de calor, conceitos teóricos referentes aos principais mecanismos de corrosão possíveis de ocorrer em feixes tubulares de permutador de calor, fatores estatísticos envolvidos na avaliação da integridade do equipamento e conceitos referentes à confiabilidade.

No Capítulo 3 – Materiais e Métodos, expomos os dados utilizados no estudo, a metodologia proposta e as simulações utilizadas para a determinação da espessura mínima presente no feixe tubular.

No Capítulo 4 – Resultados e Discussão, descrevemos os principais resultados obtidos pela utilização das simulações e resultados de ensaio IRIS quando aplicado aos métodos de cálculo propostos no estudo. Ainda neste capítulo discutimos os resultados obtidos focando nos objetivos propostos no trabalho, avaliamos o tamanho da amostra necessária para a obtenção da probabilidade de obtenção desejada, os fatores que provocam o afastamento da curva de distribuição de espessura obtida pelo ensaio IRIS da curva de distribuição teórica do

mecanismo corrosivo dominante, o erro cometido ao se estimar a espessura mínima utilizando o método de cálculo proposto e avaliamos a aplicabilidade da estimativa obtida na determinação da vida remanescente do feixe tubular.

No capítulo 5 – Conclusão, mostramos os aspectos mais significativos no que se refere aos resultados obtidos dando uma maior ênfase na aplicabilidade dos métodos em conjunto com os ensaios não destrutivos

No Capítulo 6 – Sugestões para Trabalhos Futuros, sugerimos estudos e ensaios que podem ser realizados com o intuito de aprimorar os métodos de cálculo propostos, aumentando assim a aproximação entre estimativa e espessura mínima real.

No Capítulo 7 - Referências Bibliográficas utilizadas na elaboração do estudo.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo descrever os principais mecanismos de danos devido à corrosão que podem atuar em feixes tubulares de permutadores de calor pertencentes a plantas de refino de petróleo. Nesta revisão apresentaremos o ensaio não destrutivo IRIS objetivando, com isso, propiciar o entendimento de como foram obtidos os dados de medição de espessura utilizados nos capítulos posteriores. Uma abordagem sobre a teoria dos valores extremos está inserida no final do capítulo. Esta teoria servirá de base para a elaboração de um método de cálculo que possibilitará estimar a menor espessura presente no feixe tubular.

2.1 - Permutadores de Calor

Permutadores de Calor são equipamentos projetados para realizar a transferência de energia térmica entre dois fluidos, por condução, desde que estes possuam diferença de temperatura. Utilizando-se, geralmente, materiais metálicos como meio condutor. No processamento de uma Unidade Petroquímica o permutador de calor é empregado não só para economizar calor, mas também para atender as necessidades do processo.

Podemos classificar os trocadores de diversas maneiras, quanto ao modo de troca, quanto ao número de fluidos e tipo de construção. Abaixo temos de uma forma resumida essa classificação.

- De acordo com o processo de transferência
 - Contato direto
 - Contato Indireto
 - Transferência direta
 - Tipo armazenamento
- De acordo com o tipo de construção
 - Tubular
 - Casco e Tubo
 - Tubo Duplo
 - Serpentina
 - Placas

Neste trabalho abordaremos apenas os trocadores de calor tipo casco e tubo por serem os mais freqüentemente utilizados, devido ao baixo custo de fabricação, facilidade operacional e de aplicação bastante ampla. Estes equipamentos são vasos de pressão constituídos de um feixe de tubos paralelos envolvidos por um casco, por onde circula um dos fluidos da troca térmica. Fixados ao casco existem carretéis e cabeçotes para promoverem a entrada, retorno e saída do outro fluido circulante. Existem três tipos básicos de trocadores casco e tubos, em função do tipo de feixe tubular, conforme as figuras 2.1, 2.2 e 2.3.

- Com espelhos fixos, nos quais a expansão térmica diferencial entre os cascos e os tubos, devida a temperaturas diferentes para os dois circuitos de fluido, induzem tensões longitudinais adicionais, no casco e nos tubos;

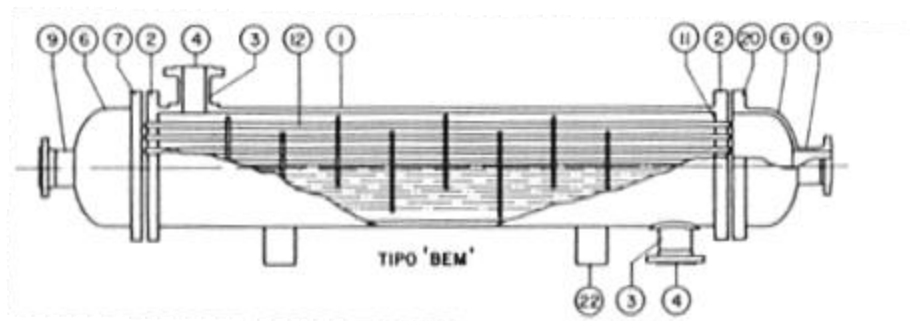


Figura 2.1 Permutador de calor com espelhos fixos. (TELLES, 2001)

- Com espelhos flutuantes nos quais o espelho mais próximo ao tampo do casco tem movimento livre para permitir a expansão térmica dos tubos;

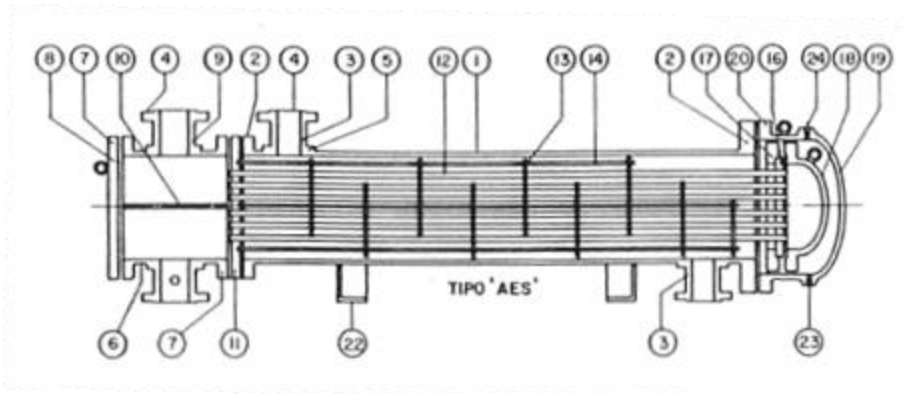


Figura 2.2 Permutador de calor com espelho flutuante. (TELLES, 2001)

- Com tubos em “U” onde o próprio tubo absorve a sua dilatação.

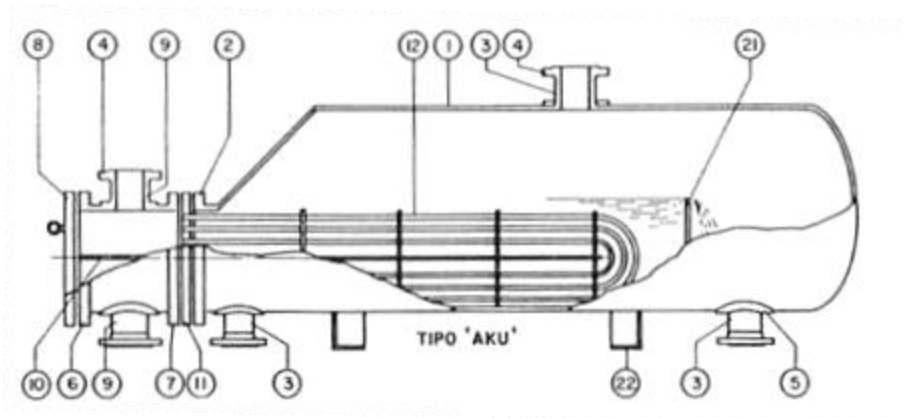


Figura 2.3 Permutador com feixe em U. (TELLES, 2001)

Os componentes principais do equipamento, com a nomenclatura usualmente adotada, podem ser vistos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Descrição dos componentes de permutadores de calor.

Cod.	Componente	Cod.	Componente
1	Casco	14	Tirantes
2	Flanges do casco	15	Quebra-jato
3	Bocais do casco	16	Espelho flutuante
4	Flanges dos bocais	17	Anel bipartido
5	Reforços dos bocais	18	Tampa flutuante
6	Carretel	19	Tampa do casco
7	Flanges do carretel	20	Flange da tampa do casco
8	Tampa do carretel	21	Vertedouro
9	Bocais do carretel	22	Berços
10	Chicana do carretel	23	Drenos
11	Espelho fixo	24	Respiro
12	Tubos	25	Junta de expansão no casco
13	Chicana do feixe tubular		

Normalmente, os trocadores de calor são projetados de acordo com a norma TEMA (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association), complementada pelo ASME Seção VIII, Divisão 1, que é exigida pelo próprio TEMA, como código para dimensionamento dos componentes típicos de vasos de pressão.

Além do dimensionamento mecânico, ou de sua complementação, o TEMA define aspectos de fabricação, tolerâncias, instalação, operação e manutenção e também parâmetros para troca térmica e mecânica dos fluidos. De acordo com esta norma os equipamentos podem ter diâmetro nominal do casco de 150 mm até 2540 mm e são classificados conforme o tipo de cabeçotes e cascos, com nomenclatura de acordo com a figura 2.4.

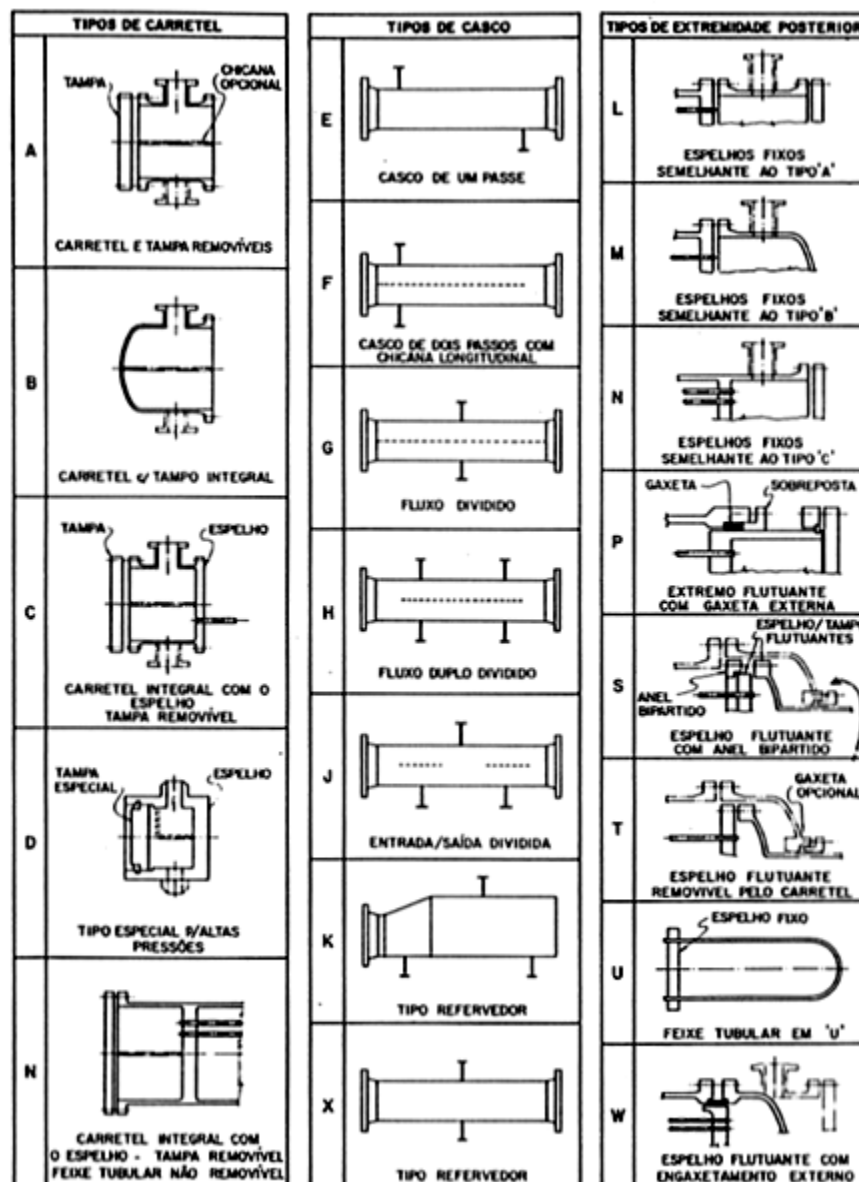


Figura 2.4 Nomenclatura de permutadores, classificação TEMA. (TELLES, 2001)

O TEMA ainda apresenta três classes para os trocadores de calor, em ordem crescente de exigências:

- Classe C: trocadores para serviços amenos ou serviços comerciais;
- Classe B: trocadores para serviços em indústria química;
- Classe R: trocadores para serviços severos, usados em refinarias de petróleo.

As principais diferenças de exigências entre as três classes são:

- Corrosão admissível;
- Passo dos tubos do feixe;
- Espessuras mínimas para cascos, carretéis, cabeçotes, chicanas, placas suporte e espelhos;
- Diâmetro mínimo para tirantes e parafusos de fixação das chicanas;
- Materiais de juntas de vedação;
- Fixação dos tubos nos espelhos: quantidade de ranhuras e comprimento de expansão de tubos.

2.2 - Corrosão

Descreveremos a seguir os principais mecanismos de corrosão, possíveis de serem detectados pelo ensaio IRIS, que ocorrerem em feixes tubulares de permutadores de calor pertencentes a unidades de refino.

2.2.1 - Classificação dos danos por corrosão

A norma API 571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, classifica os mecanismos de danos em quatro categorias, o presente estudo tratará apenas do mecanismo por perda de espessura localizada ou uniforme. Sheir (2000) classifica os pites de corrosão como mostrado na Figura 2.5, a norma ASTM G46 classifica-os conforme mostrado na Figura 2.6, Gentil(1996) tem sua classificação mostrada na Figura 2.7.

Uma avaliação correta do tipo de dano causado pela corrosão é um fator essencial na determinação da menor espessura presente no feixe tubular, da taxa de corrosão e da vida remanescente dos feixes.

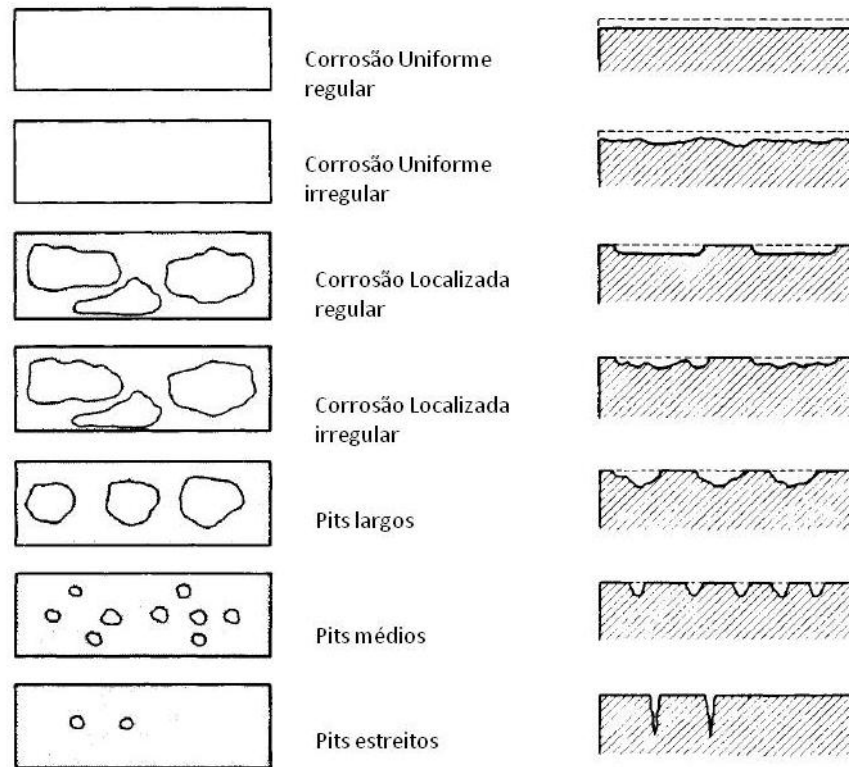


Figura 2.5 Diferentes tipos de corrosão. (SHEIR, 2000)

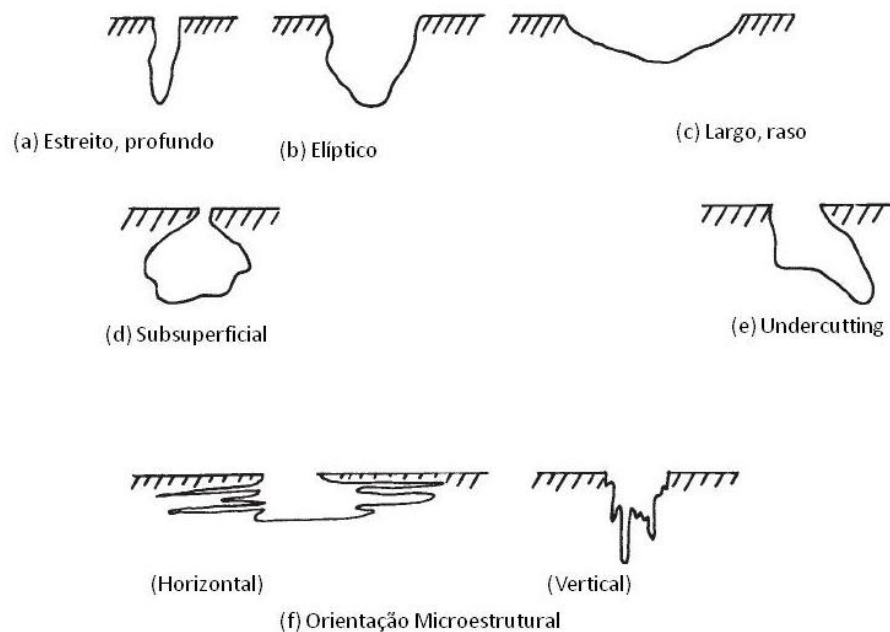


Figura 2.6 Variação na forma de seções transversais de pites. (ASTM G46, 2005)

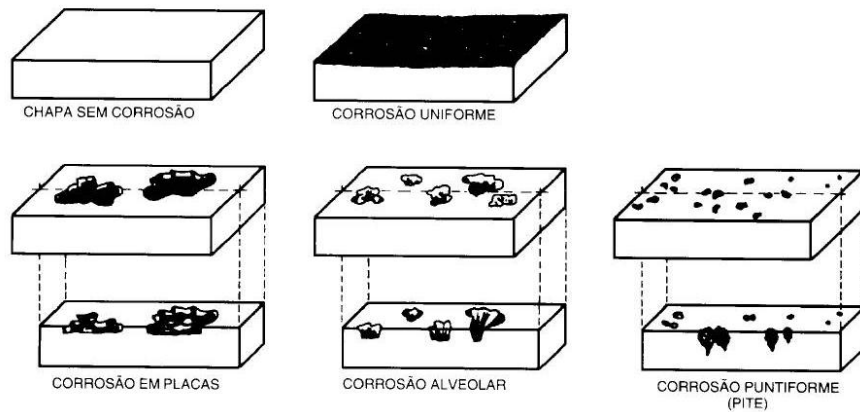


Figura 2.7 Classificação de processos corrosivos. (GENTIL, 1996)

2.2.2 - Corrosão por Pites

Durante a corrosão de metais e ligas passiváveis, ocorrem dissoluções locais que levam ao aparecimento de cavidades conhecidas como pite. Na prática, a corrosão por pites de metais passivos são mais comumente observados na presença de cloretos ou algum outro halogênio. Portanto, a questão é saber se estão presentes os chamados, ânions de corrosão localizada. Halóides são sempre necessários para iniciar-se o pite. Em todas as formas de corrosão localizada, superfícies ativas e passivas estão simultaneamente estabelecidas na mesma superfície do material após um determinado período, então pites locais podem se desenvolver até dimensões macroscópicas (WILEY, 2000).

Estudos eletroquímicos indicam que pites estáveis ocorrem apenas acima de um determinado potencial crítico ou em uma determinada faixa de potencial. A figura 2.8 mostra uma curva corrente de potencial típico exibindo transição ativa-passiva e um subsequente repentino aumento na corrente dentro da faixa do potencial de passivação.

A corrosão localizada de metais passiváveis quase sempre se inicia em heterogeneidades pontuais, tais como inclusões e precipitados de segunda fase, assim como contornos de grãos, falhas e danos mecânicos.

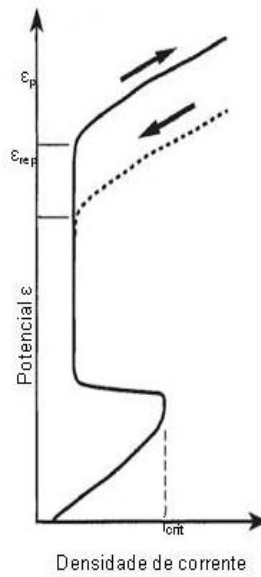


Figura 2.8 Corrente de potencial típico. (American Society for Metal, 2005)

O aumento da temperatura também promove um aumento na tendência à corrosão por pites nos metais. Em baixas temperaturas, não são observados altos potenciais de pites. A temperatura crítica de pites (tcp) foi determinada como aquela na qual abaixo dela um aço num meio agressivo contendo Cl⁻, geralmente FeCl₃, não apresenta pite independentemente do potencial e do tempo de exposição. Na figura 2.9 pode-se ver como varia o potencial de pite com a variação da temperatura.

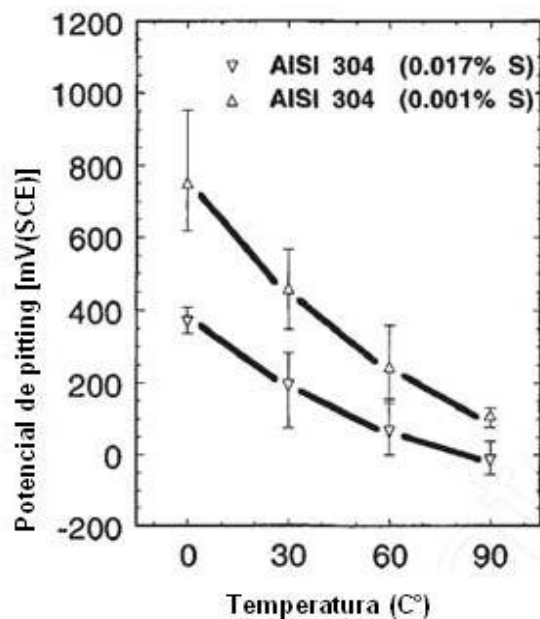


Figura 2.9 Efeito da temperatura no potencial de pite, E_p , de aço inoxidável AISI 304 em solução de NaCl com diferentes percentuais de enxofre. (WILEY, 2000).

A presença de agentes oxidantes em um ambiente contendo cloretos geralmente é extremamente prejudicial e reforçará a corrosão localizada. A maioria dos agentes oxidantes aumenta o risco de corrosão por pite fornecendo reações catódicas extras e aumentando assim o potencial local.

A remoção de agentes oxidantes, tais como a remoção de oxigênio dissolvido por desaeração, é uma poderosa abordagem para reduzir a susceptibilidade à corrosão localizada. A corrosão por Pites é considerada autocatalítica por natureza; logo que um pite começa a crescer, as condições locais são alteradas de tal forma que, juntamente com o crescimento do pite, há um aumento na taxa de corrosão provocando uma aceleração no aprofundamento do pite. As reações catódicas e anódicas se matem separadas espacialmente durante a corrosão por pites. O ambiente local do pite começa a ficar empobrecido em reagentes catódicos e enriquecido em cátions metálicos, como resultado do processo de dissolução no pite.

A concentração de um elemento aniônico dentro do pite também deve aumentar devido ao aumento de carga associado com a concentração de cátions de modo a manter a

neutralidade. Esse enriquecimento em ânions acontece devido à eletromigração através da solução em resposta ao gradiente de potencial que se desenvolve como resultado da queda de potencial ôhmico entre o interior do pite e as regiões catódicas adjacentes a este. O aspecto final do ambiente interior ao pite é o pH, o qual diminui com a hidrólise catiônica como mostrado na figura 2.10.

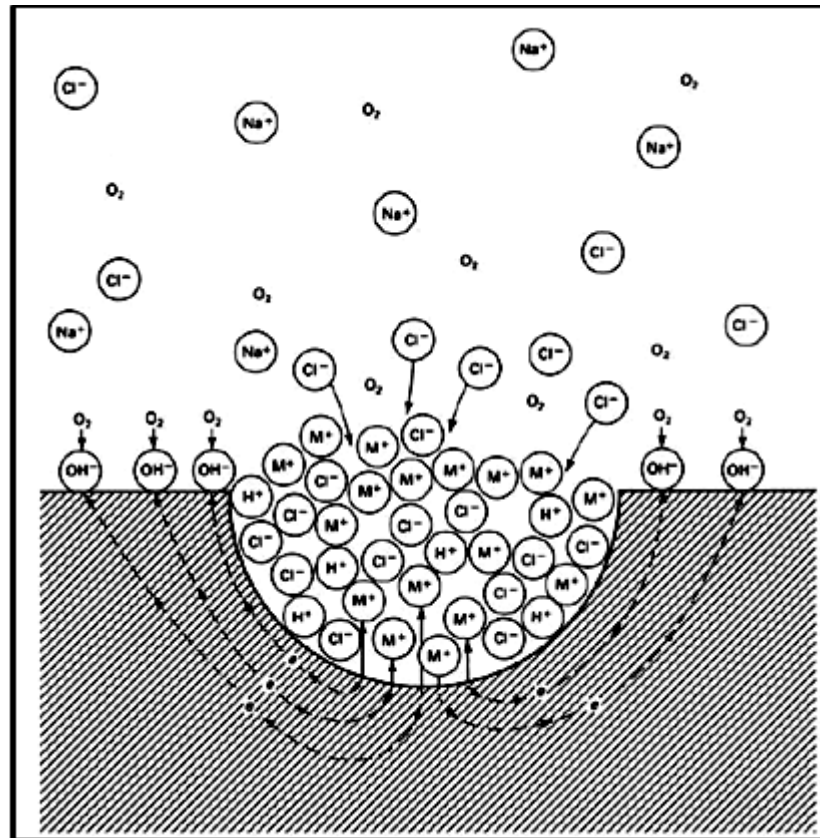


Figura 2.10: Processo de propagação da Corrosão por pites. (American Society for Metal, 1992)

As reações catódicas comuns que devem acompanhar a dissolução que ocorrem no pite, como a redução de oxigênio, resultará em um aumento do pH local nas áreas catódicas. A acidez desenvolvida no pite não é neutralizada pela reação catódica, devido à separação espacial das reações anódicas e catódicas. Em resumo, o meio ambiente local no interior do pite se empobrece em reagente catódico, tal como o oxigênio dissolvido e é enriquecido em

cátions metálicos e ânions acidificantes. Este ambiente ácido é agressivo para a maioria dos metais, tende a impedir a repassivação e promove uma contínua propagação do pite.

A corrosão por pites pode ser considerada como composta de várias etapas: Quebra da película apassivadora, pite metaestável, crescimento do pite e morte do pite. Qualquer uma destas fases pode ser considerada a mais crítica. Por exemplo, uma vez quebrada a camada apassivadora, há uma grande possibilidade de que um pite estável irá se desenvolver. Por outro lado, os pites não iram se iniciar se eles não puderem crescer pelo menos por um curto momento. Além disso, o crescimento crítico de pite é uma aplicação prática da previsão de falhas. Por último, a fase metaestável de pites pode ser considerada a mais importante, pois só sobrevivem pites que nesta fase se tornam pites estáveis e crescentes. Pites metaestáveis existem na borda de estabilidade. Estudos de pites metaestáveis podem prover conhecimento sobre aspectos fundamentais do pite, pois ambos, início e estabilidade são fatores-chave na metaestabilidade do pites.

1 - Iniciação do pite e quebra do filme passivo

A quebra do filme passivo e detalhes da iniciação do pite são os aspectos menos conhecidos do fenômeno de pites. A quebra é um fenômeno muito raro e quando acontece, é de uma forma muito rápida numa escala muito pequena, deste modo fazer observações diretas é muito difícil. O filme passivo sempre é representado esquematicamente como uma simples camada inerte cobrindo todo o metal de base e separando desta forma o ambiente do metal. O que acontece na realidade é muito mais complicado. Dependendo da composição da liga, do ambiente, do potencial e do histórico de exposição, este filme pode ter uma faixa de espessura, estrutura, composição e capacidade de proteção. As teoria para quebra de filme passivo e iniciação de pite foram categorizadas em três mecanismos principais os quais focam na penetração do filme passivo, quebra do filme e adsorção.

2 - Metaestabilidade de Pite

Pites metaestáveis são pites que crescem por um período antes de sofrerem repassivação. Pites grandes podem parar de crescer por várias razões, mas pites metaestáveis

são considerados como aqueles com tamanho microscópico, com tempo de vida na ordem de segundos, ou menor. Pites metaestáveis são importantes para a compreensão do porque, sobre certas condições, eles continuam crescendo para formarem pites grandes. Pites metaestáveis podem se formar em potenciais abaixo do potencial de pites e durante o tempo de indução antes do início dos pites estáveis no potencial acima do potencial de pites. Por alguma razão pites estáveis sobrevivem a etapa metaestável e continuam a crescer, enquanto que pites metaestáveis sofrem repassivação e param de crescer.

3 - Pites estável e crescimento de Pite

Pites crescem em uma taxa que depende do material, concentração de eletrólito no pite e do potencial do fundo do pite. O transporte de massa característico do pite influencia a cinética do crescimento através do eletrólito concentrado no interior do pite. A estabilidade do pite depende da manutenção da composição do eletrólito no interior do pite e do potencial do fundo do pite que é, pelo menos, severo o bastante para evitar a repassivação da superfície do fundo do pite. A fim de entender o crescimento e a estabilidade do pite, é essencial conhecer a taxa dos fatores determinantes. O crescimento do pite pode ser controlado pelos mesmos fatores que limitam qualquer reação eletroquímica: processo de transferência de carga, efeitos ôhmicos, transporte de massa ou qualquer combinação destes fatores. Em altos potenciais, o transporte de massa pode ser o controlador da taxa. Em última análise, porém, o transporte de massa determina a estabilidade dos pites mesmo em baixos potenciais, porque o ambiente local controla a passivação. A taxa de crescimento de pite decresce com o tempo para a corrosão por pites controlada por cada efeito, ôhmico ou transporte de massa. A taxa de crescimento de pite normalmente varia com t^{-n} , onde n é aproximadamente 0,5. Pites freqüentemente crescem com uma cobertura porosa, esta cobertura dificulta bastante a detecção visual de modo a impedir a avaliação correta da gravidade do ataque e a probabilidade de falha catastrófica é reforçada.

4 - Morte e Suspensão de Pite

A respeito da natureza autocatalítica da corrosão por pites, grandes pites, os quais podem ser considerados estáveis sobre alguns critérios, podem parar de crescer ou “morrer”. Como mencionado previamente, se as condições (ambiente e potencial) na superfície que sofre

dissolução do pite não são suficientemente agressivas, o pite irá repassar. O potencial no fundo do pite é menor que o potencial das superfícies externas ao pite, como resultado do salto de potencial ôhmico associado ao fluxo de corrente fora do pite. Com o aprofundamento do pite, o caminho ôhmico aumenta e, conseqüentemente, a resistência ôhmica aumenta. Devido a isso, há uma tendência no aumento na queda do potencial ôhmico, uma queda no potencial local e uma queda na densidade da corrente de pite. O ambiente tende a ser ácido e rico em cloreto, devido à hidrólise dos cátions metálicos dissolvidos e a migração eletrolítica de cloreto dentro do pite. A elevada concentração no interior do pite é diminuída devido ao transporte para fora do pite, mas a concentração é novamente restabelecida pela contínua dissolução do fundo do pite. Com o aprofundamento do pite, a taxa do transporte de massa para fora do pite decresce então, o pite pode se tornar estável. Como mencionado anteriormente, a densidade de corrente de pite tende a se tornar estável com o tempo devido ao aumento da profundidade de pite e a queda no potencial ôhmico. A repassivação pode ocorrer se um acontecimento súbito, tal como perda da cobertura do pite causado por uma repentina mudança no transporte e na diluição do ambiente interior ao pite na medida em que a taxa de dissolução no fundo do pite seja insuficiente para repor a perda do ambiente agressivo (American Society for Metals 1992).

Devido a sua ocorrência imprevisível os eventos de corrosão localizada, não podem ser explicados sem o uso de métodos estatísticos para a avaliação dos dados experimentais. Aspectos estocásticos dos pites de corrosão foram estudados no final da década de setenta do século passado, recentemente uma revisão estatística e uma convincente abordagem estocástica para a corrosão localizada foi publicada por Shibata (Wiley, 2000). Ele avaliou um grande número de valores de potenciais de pites usando uma distribuição gaussiana, enquanto a distribuição de Poisson foi a que apresentou uma melhor abordagem para a geração de pite. Os resultados indicam que as diferentes taxas de geração de pite podem ser observadas como uma função do tempo. Ele propôs dois grupos de modelos considerando isoladamente cada evento de geração de pite ou assumindo o processo de geração e subsequente repassivação (Wiley, 2000).

2.2.3 - Corrosão sob Depósito

Depósitos provocam corrosão tanto direta como indiretamente. Se os depósitos contiverem substâncias corrosivas, o ataque é direto. Quando o depósito simplesmente cobre a superfície o ataque é dito indireto. Ambos os tipos de ataque podem envolver células de corrosão por concentração, sendo que no ataque indireto, elas sempre estão presentes.

Células de corrosão por concentração são causadas pela concentração diferencial de determinados elementos químicos em diferentes áreas comunicantes do metal. Uma célula eletroquímica é estabelecida em virtude da diferença entre a composição química do eletrólito na região que sofre corrosão e a composição química da região adjacente.

A mais conhecida célula de corrosão por concentração é a célula de concentração de oxigênio, a qual envolve aeração diferencial. A concentração de oxigênio dissolvido inevitavelmente decresce abaixo do depósito, próximo às áreas ativas do metal devido ao consumo de oxigênio provocado pela corrosão abaixo do depósito. O depósito retarda a difusão do oxigênio para as regiões próximas as superfícies corroídas. Assim é estabelecida uma célula de oxigênio, o acúmulo de produto de corrosão também pode causar o aparecimento de células de corrosão por concentração.

Freqüentemente células de corrosão por aeração e por concentração de íons agressivos abaixo do depósito combinam-se para provocar um severo e localizado desgaste nos aços inoxidáveis e em outras ligas passiváveis. No entanto, na maioria dos casos, a célula de corrosão por aeração diferencial não é suficiente para dar início a um ataque. Quando da presença de íons cloretos, uma corrosão severa pode ocorrer. Pites também podem ocorrer devido a baixo pH. Sendo assim, depósitos ácidos podem contribuir para o ataque ao aço inoxidável (Herro, 1973).

Sempre ocorre ataque sob um depósito. Em sistemas de água de resfriamento, depósitos podem se formar em qualquer lugar. Depósitos podem ser gerados internamente como precipitados ou podem ser introduzidos no sistema por fontes externas. Por isso, corrosão sob depósito pode ser formada em qualquer local do sistema de água de resfriamento. Sistemas especialmente problemáticos são aqueles que contem sílica, areia, graxa, óleo, biomassa, precipitados, produtos de corrosão transportados e outros detritos. Depósitos, tais como metais, sulfetos, manganês dióxido de carbono, água e matérias permeáveis tendem a

produzir grave ataque. Permutadores de calor em que estes materiais estão presentes são muitas vezes gravemente danificados. Depósitos biológicos como camadas de limo são prejudiciais por proporcionarem uma intensificação do processo corrosivo.

Equipamentos onde o fluxo de água é baixo ou intermitente são sujeitos a depósito e a corrosão associada a este. Componentes onde a temperatura da água varia abruptamente com a distância, como os trocadores de calor, tendem a acumular precipitados. Superfícies de trocas também tendem a acumular precipitados se os elementos dissolvidos tem solubilidade inversamente proporcional ao aumento da temperatura. Sistemas onde há freqüente elevação de pH, podem acumular depósito devido ao processo de precipitação. Regiões de passagem plena e baixa vazão tendem a acumular depósito (Herro, 1973).

Os depósitos mais nocivos são aqueles permeáveis à água. Na verdade o depósito impermeável à água é protetor, sem contato da água com a superfície metálica a corrosão não pode acontecer. Severas células de corrosão por concentração envolvem segregação de ânions agressivos abaixo do depósito. A concentração de cloretos e sulfatos são particularmente deletérias. Um ambiente com pH ácido pode se forma sob o depósito quando os ânions agressivos migram para estas áreas.

Células de corrosão por concentração podem reduzir significativamente a vida útil do equipamento. Geralmente, este tipo de corrosão ocorre em qualquer lugar onde houver depósito, má concepção de projeto ou ambos. Permitindo assim, uma concentração localizada de uma determinada substância (i.e. NaCl e O₂), que é notadamente diferente da concentração desta substância na água adjacente ao depósito. Uma seqüência típica para a ocorrência de célula por concentração diferencial devido à existência de depósito é apresentada na figura 2.11. O depósito é formado na superfície do tubo do trocador pertencente ao sistema de água de resfriamento. Em pouco tempo, o oxigênio abaixo do depósito é consumido pela reação inicial de corrosão. Como a concentração de oxigênio abaixo do depósito se torna menor do que a concentração de oxigênio na água adjacente ao depósito, o oxigênio (O₂) é impedido de migrar através do depósito, a área sob o depósito se torna anódica em relação à área circundante.

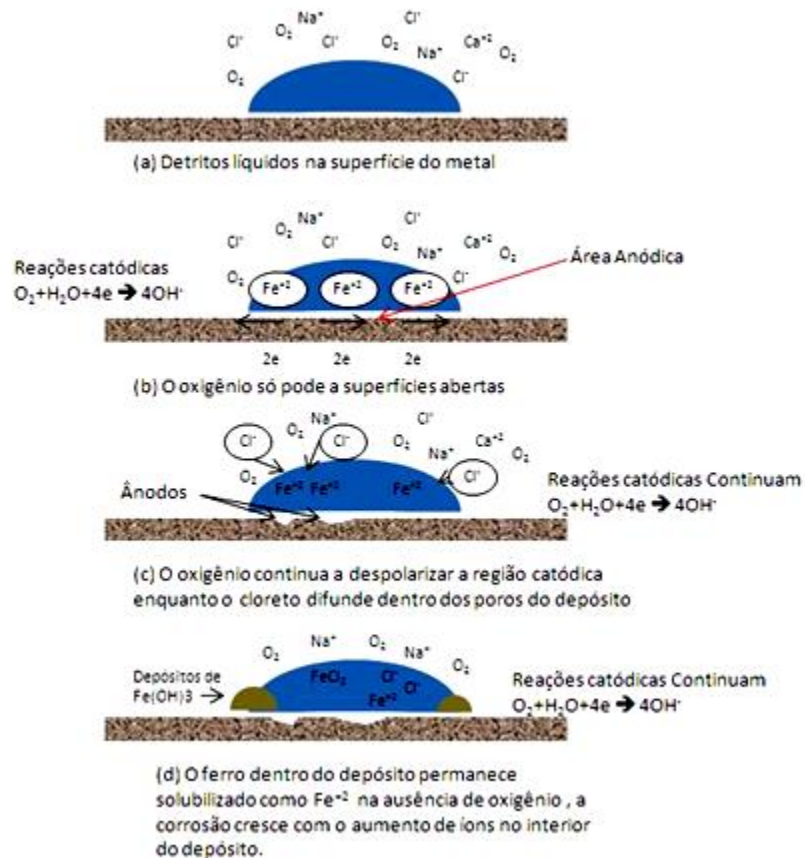


Figura 2.11: Etapas sucessivas da formação da célula de concentração diferencial de oxigênio como consequência de depósito na superfície do aço imerso em água aerada. (Wiley, 2000)

Quando da presença de depósito, com o consumo do oxigênio sob o depósito, a corrosão inicial é substituída por um mecanismo de corrosão por uma célula de concentração diferencial. A taxa da reação devido à célula por concentração diferencial é proporcional a diferença de concentração entre o oxigênio sob o depósito e aquele encontrado na água adjacente ao depósito. Em muitos casos, células de corrosão por concentração irá progredir mais, promovendo assim uma corrosão por pites.

Uma célula de corrosão por aeração diferencial raramente é a única causa de perda de massa sob o depósito. Coexistindo com a célula por aeração diferencial, há a correspondente célula por concentração de cloretos e sulfatos. Elas coexistem por que os íons de cloretos e sulfatos penetram no depósito ou na fresta e concentram. O depósito se comporta como uma

membrana semipermeável. Assim como os íons de Fe^+ deixam a superfície anódica, os íons Cl^- e SO_4^{-2} difundem através do depósito para manter a neutralidade resultando no aumento de eletrólito sob o depósito. Isto acelera o processo corrosivo devido à corrosão por aeração diferencial.

Micróbios anaeróbicos, os quais reduzem sulfato para sulfeto abaixo do depósito, criam uma condição muito agressiva que acentuam ainda mais a perda de material. Depósitos podem levar ao agravamento do ataque por pites iniciado por uma corrosão “normal”, este agravamento é devido ao surgimento de célula por concentração diferencial, podendo ainda ter a participação de microrganismos.

2.2.4 - Tuberculação

Tubérculo são amontoados de produtos de corrosão e materiais depositados que recobrem as regiões de perda de metal. Tubérculos podem obstruir tubos, levando a diminuição de fluxo e o aumento do custo com bombeio. Os tubérculos formam-se no aço e no ferro fundido quando estes são expostos à água aerada. Água com elevado teor de bicarbonato alcalino estimula a formação de tubérculos, tal como acontece com elevada concentração de sulfato, cloreto, e outros ânions agressivos. A figura 2.12 mostra um tubo com presença de tubérculos.



Figura 2.12: Tubulação de água de serviço apresentando severa tuberculação. (Harvey, 1993)

Mais formas de óxido reduzido estão presentes debaixo da camada de ferrugem. Óxido hidratado de ferro ($\text{FeO}\cdot n\text{H}_2\text{O}$), isto é, Hidróxido ferroso $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ está próximo a superfície do metal. Uma camada de ferrita negra, magnética, hidroferrosa ($\text{Fe}_3\text{O}_4\cdot n\text{H}_2\text{O}$) pode se formar entre os óxidos férrico e ferroso. Estas camadas estão esquematizadas na figura 2.13.

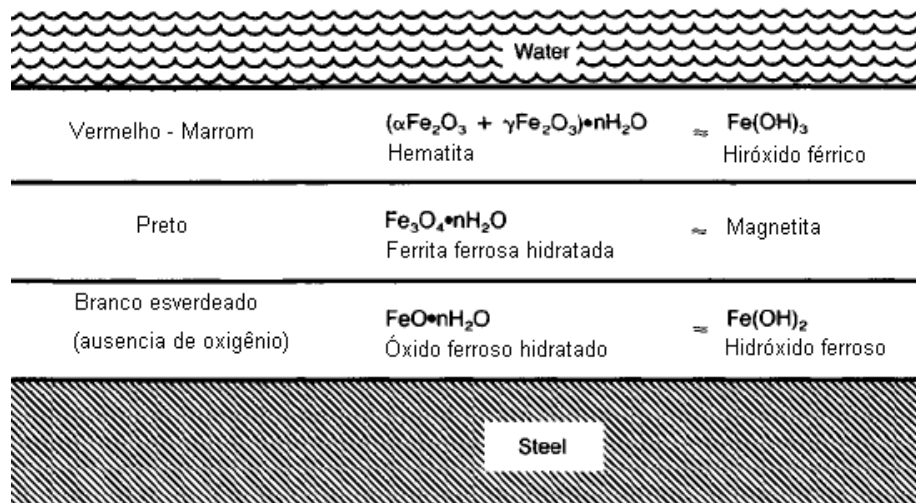


Figura 2.13 Camada incipiente de óxido em aço imerso em água aerada. (Harvey, 1993)

Com o acúmulo de óxido, a migração de oxigênio, através da camada de produto de corrosão, é reduzida. A região abaixo da camada de produto de corrosão se torna pobre em oxigênio então uma célula de corrosão por aeração diferencial se desenvolve. A corrosão torna-se naturalmente concentrada em pequenas regiões abaixo do óxido, dando início ao tubérculo. Todos os tubérculos têm cinco características estruturais em comum:

- Crosta externa
- Envelope interno
- Endocarpo
- Cavidade preenchida com fluido
- Superfície corroída

Estas características e suas respectivas áreas delimitadas estão representadas na figura 2.14.

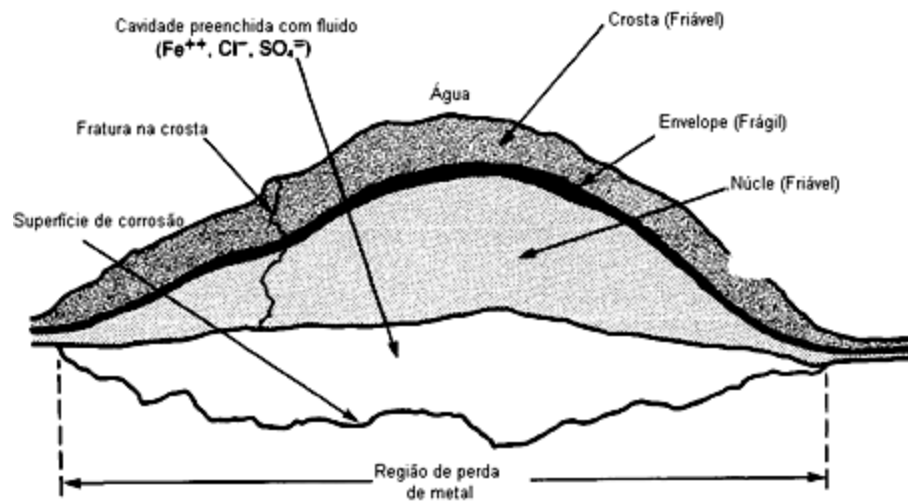


Figura 2.14 Tubérculo mostrando composição química e estrutura. (Harvey, 1993)

2.3 - Ensaio IRIS

Ultrasonic Internal Rotary Inspection System (IRIS) baseia-se no princípio de medição da espessura utilizando ondas ultra-sônicas. A sonda IRIS é constituída por um transdutor ultra-sônico que se alinham a linha de centro do tubo e um espelho rotativo, figuras 2.15 e 2.16. O espelho reflete o feixe na direção radial enquanto ele gira no interior do tubo. A sonda de IRIS varre toda a circunferência do tubo enquanto é puxada para fora do tubo (Al-Qadeeb, 2005).



Figura 2.15 Sonda para ensaio IRIS. (Al-Qadeeb, 2005)

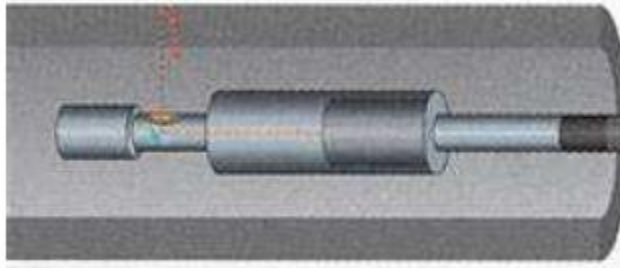


Figura 2.16 Esquema de funcionamento de uma sonda (Al-Qadeeb, 2005)

O ensaio IRIS é uma técnica ultra-sônica para inspeção aplicada a tubos de caldeiras e trocadores de calor. É empregado o princípio de pulso-eco para medição de espessuras. A técnica IRIS permite a visualização computadorizada das superfícies interna e externa de tubos, bem como medir a sua espessura remanescente. Todas as medições feitas durante a varredura circunferencial completa do tubo são mostradas na tela do computador, produzindo imagens retangulares (tubo aberto) ou circulares em tempo real.

Como alternativa pode-se também obter imagens nos sistemas C-Scan e D-Scan. Tubos de caldeiras e trocadores de calor estão sujeitos a fenômenos de corrosão, abrasão, corrosão por pites e furos durante a sua vida útil. O ensaio IRIS é uma ferramenta confiável para determinar e avaliar a qualidade desses equipamentos, sendo de extrema importância na tomada de decisões, cálculo da vida útil do equipamento e planejamento de paradas.

O método IRIS é utilizado principalmente para a inspeção de tubos de aço carbono e é por vezes utilizado em tubos não-ferromagnéticos para detectar a presença de possíveis defeitos. O método é muito preciso para medição de espessura, bem como detectar pites externos e internos ao tubo. O ensaio IRIS, no entanto, pode não detectar furos muito pequenos e trincas.

2.3.1 - Funcionamento do ensaio IRIS

Através do cabo flexível flui água a pressão de 50 psig. A pressão é regulada por meio de uma válvula reguladora. Dentro da turbina, a água faz com que um rolamento gire e com ele o rotor a 1800 r.p.m. Os pulsos ultra-sônicos são emitidos pelo transdutor excitado por

uma corrente pulsante, proveniente da placa de circuito impresso IRIS, através do cabo coaxial. Os pulsos ultra-sônicos são refletidos por um espelho instalado na turbina, mais precisamente no rotor. A figura 2.17 mostra esquematicamente o funcionamento de uma sonda.

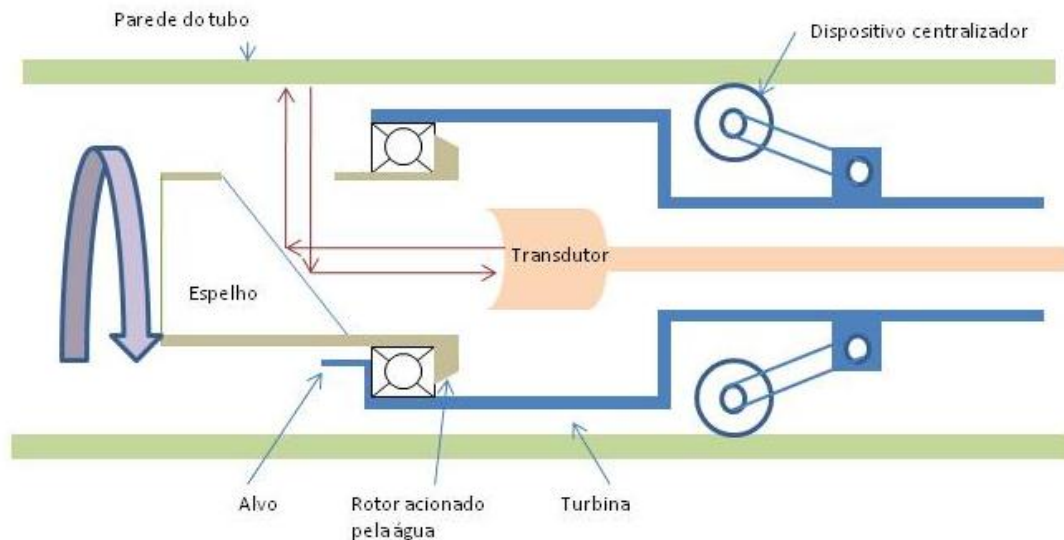


Figura 2.17 Esquema de funcionamento de uma sonda para ensaio IRIS.

O espelho encontra-se inclinado a 45° em relação ao eixo da turbina. Nessas condições, os pulsos ultra-sônicos são direcionados normalmente (90°) à parede interna do tubo em ensaio. As reflexões da parede interna e externa do tubo seguem a mesma trajetória de volta ao transdutor. O pulso ultra-sônico se propaga através da água até a parede do tubo, onde a maior parte da energia sônica é refletida de volta ao transdutor. Uma pequena parte de aproximadamente 10% é transmitida através da parede interna do tubo e é, praticamente, totalmente refletida na parede externa em direção à parede interna e novamente uma pequena parte da energia é transmitida para a água e retorna ao transdutor. Os dois pulsos refletidos de volta ao transdutor geram sinais elétricos, que são separados pelo tempo requerido para a propagação de ida e volta do pulso através da parede do tubo. Este tempo é proporcional à espessura da parede. A espessura da parede é obtida pela medição do tempo de retardamento entre as reflexões das paredes interna e externa. Essa medição é processada eletronicamente. Conforme o espelho gira, o ponto de incidência dos pulsos ultra-sônicos sucessivos avança ao

longo da circunferência (seção transversal) da parede do tubo, de tal forma que a circunferência toda é coberta em cada revolução do espelho.

2.4 - Estatística

A utilização da estatística aparece freqüentemente na solução de problemas de engenharia, ao longo do tempo a estatística vem sendo utilizada em várias áreas tais como: controle de qualidade, melhoria de processos produtivos, análise de falhas, etc. Daremos ênfase neste trabalho a aplicação dos conceitos da probabilidade e estatística na estimativa da menor espessura presente no feixe tubular, objetivando com isso o cálculo da vida remanescente e aumento da confiabilidade operacional do equipamento.

2.4.1 - Contagem

Em matemática, especialmente na álgebra abstrata e áreas relacionadas, uma permutação é uma bijeção, de um conjunto finito W nele mesmo. O conceito de permutação expressa a idéia de que objetos distintos podem ser arranjados em inúmeras ordens diferentes.

Matematicamente o número de permutações é definido como sendo,

$$P(n, r) = n \times (n - 1) \times \cdots \times (n - r + 1).$$

e como sendo o número de combinações,

$$C(n, r) = P(n, r) \div P(r, r)$$

onde n é o número total de elementos do conjunto universo e r é o número de elementos pertencente ao subconjunto referente a permutação ou a combinação.

Permutações e combinações são freqüentemente expressas utilizando a notação de fatorial. Onde temos

$$0! = 1$$

e

$$k! = k \times (k - 1)!$$

então

$$\begin{aligned}n! &= n \times (n - 1) \times \cdots \times (n - r + 1) \times (n - r) \times \cdots \times 1 = \\ &= P(n, r) \times (n - r)!\end{aligned}$$

podemos escrever assim

$$P(n, r) = \frac{n!}{(n - r)!}$$

e

$$C(n, r) = P(n, r) \div P(r, r) = \frac{n!}{(n - r)!} \div \frac{r!}{(r - r)!} = \frac{n!}{r!(n - r)!}$$

2.4.2 - Probabilidade

Montgomery (2008) define probabilidade como a chance de ocorrência de um resultado de um experimento aleatório, Meyer (1984) a define como sendo a frequência relativa com a qual um evento ocorre. Sendo S o espaço amostral o conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório e evento um subconjunto deste espaço.

Se realizarmos ensaio IRIS em todos os tubos de um feixe de permutador de calor, teremos um espaço amostral discreto a partir deste conjunto de medidas. Em espaços amostrais discretos a probabilidade de ocorrência de um determinado evento, $P(E)$, é igual a soma da probabilidade dos resultados em E . Como resultado destas afirmações temos:

$$P(S) = 1$$

$$0 \leq P(E) \leq 1$$

para dois eventos E_1 e E_2 com $E_1 \cap E_2 = \emptyset$, $P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2)$

2.4.3 - Modelagem Univariada de Extremos

Seja X uma variável aleatória, assumindo valores que são números reais. A frequência relativa com que estes valores ocorrem define a distribuição de frequência ou distribuição de probabilidade de X e é especificada pela função de distribuição acumulada dada por

$$F_X(x) = P(X \leq x),$$

Quando $P(A)$ denota a probabilidade do evento A ocorrer. $F_X(x)$ é uma função não-decrescente de x , e $0 \leq F_X(x) \leq 1$ para todo x . Em geral, estamos interessados em variáveis aleatórias contínuas, para o qual $P(X = x) = 0$ para todo x , isto é, a probabilidade de X assumir o valor x é zero. Neste caso, $F_X(\cdot)$ é uma função contínua e tem uma função inversa $x(\cdot)$ a função quantil de X . Dado qualquer valor u , $0 < u < 1$, $x(u)$ é o único valor que satisfaz

$$F_X(x(u)) = u.$$

Para uma probabilidade p , $x(p)$ é o quantil da probabilidade não excedente p , isto é, o valor tal que a probabilidade X não exceder $x(p)$ é p . O objetivo da análise de frequência é estimar corretamente os quantis da distribuição de uma variável aleatória.

Se $F_X(x)$ é diferenciável, sua derivada $f_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x)$ é a função densidade de probabilidade de X .

A esperança da variável aleatória X , denotada por $E(X)$, é definida por

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x dF_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx$$

desde que esta integral exista.

A dispersão dos valores assumidos pela variável aleatória X pode ser medida pela variância de X , denotada por $Var(X)$, e definida como

$$Var(X) = E \left[(X - E(X))^2 \right].$$

A abordagem clássica da teoria dos valores extremos consiste em caracterizar as caudas (superior e inferior) da distribuição de F_X a partir da distribuição do máximo. Assim, definimos $M_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$ como o máximo de um conjunto de n variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas. Para obter-se a distribuição do mínimo usa-se a relação

$$\min(X_1, X_2, \dots, X_n) = -\max(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Nas aplicações normalmente multiplica-se os dados por (-1) e analisa-se os máximos.

Na teoria a função de distribuição exata do máximo pode ser obtida para todos os valores de n , como

$$F_{M_n}(x) = P(M_n \leq x) = P(X_1 \leq x, \dots, X_n \leq x) = \prod_{i=1}^n P(X_i \leq x) = [F_X(x)]^n$$

para $x \in R$ e $n \in N$.

2.4.4 - Distribuição de Valores Extremos Generalizada

A distribuição de valores extremos generalizada (GEV) padrão, tem como função de distribuição acumulada de probabilidade

$$G(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^\xi \right\},$$

definida em $\{x: 1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0\}$, com $\mu, \xi \in R$ e $\sigma > 0$, sendo μ, σ e ξ os parâmetros de localização, escala e de forma, respectivamente. Temos que $\xi > 0$ para a família de tipo II (Fréchet) e $\xi < 0$ para a família de tipo III (Weibull). Como limite de $G(x)$ com $\xi \rightarrow 0$ tem-se que

$$H(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right],$$

que é a distribuição acumulada de Gumbel com parâmetros de localização e escala μ e σ , respectivamente, com $\sigma > 0$.

Derivando-se $H(x)$ em relação a x , obtém-se a função densidade de probabilidade da distribuição de valores extremos generalizada, dada por

$$g(x) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1}{\xi}\right)} \right\},$$

Definida em, $-\infty < x < (\mu - \sigma)/\xi$ para $\xi < 0$ e $(\mu - \sigma)/\xi < x < \infty$ para $\xi > 0$, cujo $\xi \rightarrow 0$, é

$$g(x) = \frac{1}{\sigma} \left\{ \exp \left(-\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \exp \left[-\exp \left(-\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\}, x \in R.$$

A figura 2.18 mostra a variação da distribuição de Gumbel com a variação dos parâmetros de forma e de locação

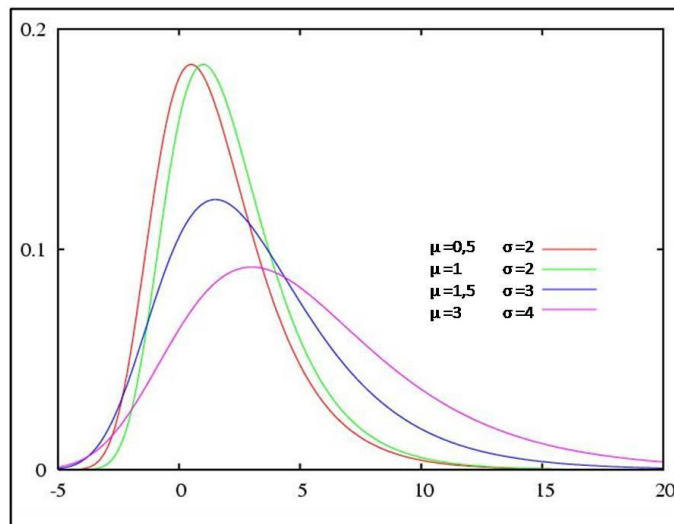


Figura 2.18 Modificação da distribuição de Gumbel com a variação do parâmetro de forma e locação.

No processo desenvolvido por Gumbel, a função de distribuição cumulativa F_j é definida como

$$F_j = \frac{j}{n+1}$$

onde n é o número total de observações e j é o j -ésimo observação quando as n observações são arranjadas em ordem crescente.

A variável reduzida y_j é relacionada com a equação anterior por

$$y_j = -\ln \left[-\ln \left(\frac{j}{n+1} \right) \right] = -\ln [-\ln(F_j)]$$

o que implica em

$$e^{-y_j} = -\ln \left(\frac{j}{n+1} \right)$$

e então

$$e^{-e^{-y_j}} = \frac{j}{n+1} = F_j$$

o que significa que a função de distribuição acumulada F_j é uma função de exponencial dupla.

Introduzindo o conceito de período de retorno, se um evento tem uma probabilidade p de ocorrer, então são necessários $1/p$ experimentos para que o evento ocorra uma vez. O período de retorno T_j é definido como

$$T_j = \frac{1}{p} = \frac{1}{1 - F_j}$$

o período de retorno T_j pode ainda ser expresso como

$$T_j = \frac{1}{1 - [j/(n+1)]}$$

temos então

$$j = \frac{(n+1)(T_j - 1)}{T_j}$$

Como resultado de substituições nas equações anteriores temos:

$$y_j = -\ln \left[-\ln \frac{(n+1)(T_j-1)}{(n+1)T_j} \right] = -\ln \left[-\ln \frac{T_j-1}{T_j} \right]$$

Se quisermos determinar a maior profundidade de pite em determinada área S_0 podemos modificar a equação do período de retorno, ficando da seguinte forma

$$T_j = \frac{n+1}{n+1-j} \frac{S_0}{S_0} = \frac{S+S_0}{S+S_0-jS_0}$$

Se $j = n$, o período de retorno para o pite mais profundo observado é

$$T_n = \frac{S+S_0}{S_0}$$

ou

$$T_n = (n+1)$$

e se $S \gg S_0$, então $T_n = S/S_0$. (Wiley, 2002)

Quanta às aplicações, a distribuição GEV tem sido utilizada na estimação dos extremos em engenharia de corrosão. Os pesquisadores dessa área buscam métodos para estimar a probabilidade dos eventos extremos de corrosão para grandes áreas de metal expostas por muitos anos, determinar o tempo esperado para a primeira perfuração e a área esperada de perfuração no tempo t . Na discussão dos resultados os autores encontram evidências para $\xi < 0$ para o ajuste da distribuição GEV no contexto das aplicações em corrosão. A norma ASTM G16 (2004) contem as diretrizes para a aplicação de métodos de análise estatística de testes de resultados de corrosão. A norma ASTM G46 (2005) estabelece as diretrizes para a avaliação de testes de resultado por corrosão por pites utilizando em sua avaliação a teoria dos valores extremos.

2.5 - Confiabilidade

A engenharia da confiabilidade depende fortemente da estatística, teoria da probabilidade, teoria da confiabilidade. Muitas técnicas de engenharia são utilizadas na engenharia da confiabilidade, tais como confiabilidade, previsão, análise Weibull, gestão

térmica, teste de confiabilidade e ensaios acelerados de vida. Devido ao grande número de técnicas de confiabilidade, as suas expensas, e os diferentes graus de confiabilidade necessários para diferentes situações, a maioria dos projetos desenvolver um plano de confiabilidade para especificar as tarefas de confiabilidade que serão realizadas para cada sistema específico.

O estudo da confiabilidade surgiu com a necessidade crescente da indústria. Em alguns campos da engenharia, a confiabilidade é vital: construções como usinas nucleares, aeroplanos, submarinos, são intoleráveis a falhas. Embora o conceito de confiabilidade tenha nascido para identificar defeitos em produção de larga escala, ultimamente a confiabilidade tem tido um grande avanço na função manutenção das empresas, com o intuito de aumentar a disponibilidade dos equipamentos.

Confiabilidade pode ser definida de várias maneiras:

A idéia de que algo está apto para o efeito com relação ao tempo;

A capacidade de um dispositivo ou sistema para realizar tal como concebido;

A resistência à falha de um dispositivo ou sistema;

A capacidade de um dispositivo ou sistema para executar uma função requerida sob condições declarou durante um determinado período de tempo;

A probabilidade de que uma unidade funcional irá executar sua função requerida por um determinado intervalo indicado sob condições.

Confiabilidade pode ser definida de uma forma mais generalizada como sendo a probabilidade de um item desempenhar uma função, sob condições específicas, de forma adequada, como previsto no projeto, durante um período de tempo pré-determinado.

O estudo de confiabilidade basicamente pode ser abordado de duas formas:

Qualitativa - pelo estudo dos modos de falha e suas conseqüências para o sistema. É a abordagem utilizada na manutenção centrada na confiabilidade.

Quantitativa - pela medição de número de falhas, tempo de parada e custos associados em manutenção e perda de produção. É a abordagem estatística, no qual o sistema é modelado por distribuição de probabilidade de falha, como exemplo a distribuição de Weibull.

A função densidade de falhas representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo. É representada graficamente por uma função, densidade de probabilidade. Sua expressão matemática é

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

onde $F(t)$ é a função acumulada de falhas.

Nossa maior preocupação quando tratamos de confiabilidade é a probabilidade que um item sobreviva a um dado intervalo estabelecido. A confiabilidade é dada pela função confiabilidade $C(x)$, expressa como

$$C(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t) dt = 1 - F(t)$$

sendo assim $F(t)$ é a probabilidade de falha do sistema, então

$$F(t) = 1 - C(t).$$

Em muitas situações estamos interessados nos valores extremos que podem levar o equipamento à falha. Muitas vezes se faz uma aproximação assumindo-se que valores extremos de uma população são bem representados pelos valores da função que representa bem a maioria dos valores da população. Este pode não ser um modelo muito apropriado para os valores extremos. Funções de valores extremos são obtidas através do tratamento dos maiores ou menores valores encontrados numa série de amostras (Lafraia, 2001).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho utilizamos os resultados de ensaios IRIS executados em permutadores da UN-REDUC (Refinaria Duque de Caxias) e da UN-RECAP (Refinaria de Capuava). Empregamos ainda simulações computacionais com o intuito de estimar a menor espessura presente no feixe tubular. Para alcançar este objetivo propomos a aplicação de dois métodos de cálculo. O primeiro deles, método de cálculo I, é baseado no conceito matemático de arranjo simples. O segundo, método de cálculo II, é uma adaptação do método utilizado para o cálculo da máxima profundidade de pite em cupons de corrosão pela JSCE, Japan Society of Civil Engineers.

3.1 - Obtenção dos Dados

Os resultados de ensaio IRIS utilizados neste trabalho foram obtidos de permutadores pertencentes à unidade de craqueamento catalítico (U-1250) da UN-REDUC, refinaria pertencente ao sistema Petrobras, inaugurada em 1961 no município de Duque de Caxias. Outros resultados de ensaios foram obtidos de permutadores da UN-RECAP, refinaria também pertencente ao sistema Petrobras, localizada em Mauá e inaugurada em 1954.

Nos ensaios IRIS realizados na UN-REDUC foi utilizada uma amostragem composta por 32 tubos, essa escolha não levou em consideração a quantidade de tubos que o feixe

possui. A escolha do tamanho da amostra empregada se justificou pela utilização do método de cálculo baseado na distribuição t de student, o método é empregado para estimar a menor espessura presente nos tubos do feixe e considera como uma amostragem representativa aquela com pelo menos 30 tubos. Nos ensaios realizados na UN-RECAP, foram utilizados tamanhos variáveis de amostra, visando com isso uma melhor avaliação quando correlacionado métodos estatísticos com fenômenos corrosivos.

Um total de 86 resultados de ensaio IRIS foram utilizados na elaboração deste trabalho, sendo 66 referentes a permutadores pertencentes a UN-REDUC e 20 pertencentes a UN-RECAP. Os permutadores destas unidades de refino possuem diferentes condições operacionais e diferentes fluidos de processo, essas condições propiciam a atuação de diferentes mecanismos corrosão.

3.2 - Método de Cálculo I

No método de cálculo I propomos correlacionar o conceito matemático para arranjo simples com a probabilidade de selecionar, dentro da amostragem, um tubo pertencente ao grupo de tubos com as menores espessuras presente no feixe tubular. Este grupo de tubos é definido como grupo de interesse, sendo ele composto por um percentual, estipulado previamente, dos tubos do permutador. A figura 3.1 mostra um esquema do espelho de um feixe tubular com a representação em cores das faixas de perda de espessura dos tubos. Neste caso particular foi adotado um percentual de 1% dos tubos como grupo de interesse, tubos em amarelo. O objetivo do método é a determinação do tamanho da amostra necessária para a aquisição da probabilidade desejada de selecionar um tubo dentro do grupo de interesse. Definimos probabilidade de obtenção como a frequência relativa com que uma amostra contém um dos tubos do grupo de interesse.

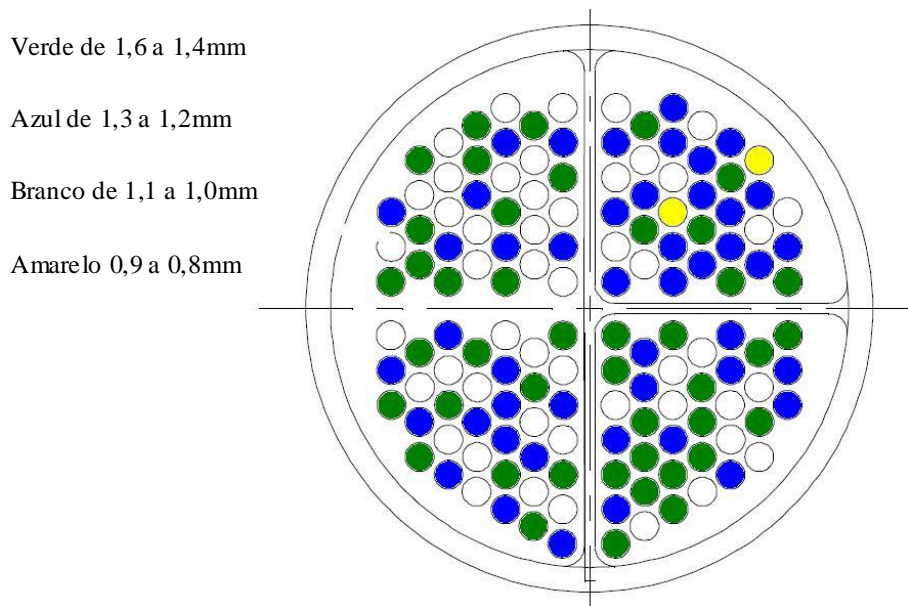


Figura 3.1 Distribuição das menores espessuras presente no feixe tubular.

O arranjo simples é definido em probabilidade como

$$A_b^a = \frac{a!}{(a-b)!}$$

onde, para o nosso trabalho, a é o número total de tubos presente no feixe (população) e b é o número de tubos a serem ensaiados (amostra), sendo $b \leq a \mid a \text{ e } b \in \mathbb{N}$. O arranjo simples, A_b^a , fornece o número de combinações possíveis dentro de um conjunto determinado, compostas por b elementos sem repetições.

A probabilidade de obtenção, P , de uma medida dentro do grupo de interesse é descrita aproximadamente como

$$P = 1 - \frac{A_b^c}{A_b^a}$$

$$P = 1 - \frac{\frac{c!}{(c-b)!}}{\frac{a!}{(a-b)!}}$$

Neste caso c representa o número de tubos presente no feixe excluindo os tubos pertencentes ao grupo de interesse. No caso do feixe representado na figura 4.1, a é igual a 140 tubos e c é igual a 138 tubos.

Na elaboração deste método de cálculo utilizamos programas computacionais para a estimativa da probabilidade de obtenção em feixes com diferentes quantidades de tubos. Simulamos a seleção da amostragem em feixes com 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 e 2000 tubos, para um percentual de 1% dos tubos como grupo de interesse. Tomamos diferentes tamanhos de amostras de tubos, essas amostras foram compostas por $b = 1$ até alcançar o número de tubos que promova uma probabilidade de obtenção de 99% ou um tamanho de amostra de 50% do total de tubos.

Com o objetivo de avaliar o comportamento da probabilidade de obtenção com a variação do número de tubos no grupo de interesse, simulamos a realização do método em feixe com 100, 200, 300 e 400 tubos. Variamos o tamanho do grupo de interesse de modo a abranger de 1 a 5% do total de tubos que compõe o feixe.

Fenômenos corrosivos tais como corrosão sob depósito e corrosão por pite podem ser mais acentuados em determinados passes do feixe tubular, isso é devido a variações consideráveis em aspectos operacionais. Essa condição diferenciada pode aumentar a probabilidade de se escolher um tamanho de amostra que acabe por não representar o real estado de degradação no qual o equipamento se encontra. Há ainda a possibilidade da escolha do tamanho correto da amostra, mas com uma incorreta seleção da localização dos tubos amostrados o que pode levar a não representatividade da amostra. Para se avaliar como os mecanismos de danos por corrosão, que atuam de forma diferenciada, podem influenciar nestes casos, utilizamos o permutador M-704 da UM-RECAP, este permutador possui 1432 tubos divididos em 4 passes. Sabidamente o feixe deste equipamento apresenta uma maior taxa de corrosão no passe de saída. Buscamos com isso avaliar a aplicabilidade do método quando utilizado em feixes que apresentam corrosão preferencial em determinado passe.

3.3 - Método de Cálculo II

A Japan Society of Civil Engineers JSCE desenvolveu um método estatístico de cálculo que utiliza os estudos de corrosão por pite em cupons para se estimar a máxima profundidade de pite possível de ocorrer em uma área muito superior a área das amostras medidas. O método de cálculo II consiste numa adaptação para feixes tubulares do método utilizado pela JCSE, este método proposto é um processo padronizado para a estimativa da distribuição máxima da profundidade de pites, sendo que para a realização desta estimativa a distribuição de Gumbel juntamente com o conceito de período de retorno são empregados. A função de probabilidade de Gumbel é construído com o objetivo de estimar a menor espessura para grandes áreas através da amostragem de pequenas áreas, a figura 3.2 mostra um exemplo de um gráfico traçado com essa distribuição. Os valores da variável reduzida, y , são dimensionados no eixo das ordenadas e associada com a probabilidade cumulativa, $F(y)$, no mesmo eixo. Os valores da variável de extremo, x , são dimensionados numa escala aritmética no eixo das abscissas.

A posição de plotagem da probabilidade acumulada pode ser calculada por

$$F(y) = 1 - \frac{i}{1 + N}$$

onde i é o i -ésimo termo dos valores ordenados de x , em ordem decrescente, e N é o tamanho da amostra. O período de retorno, T , é definido como

$$T = 1/[1 - F(y)]$$

e y pode ser correlacionada com T pela seguinte equação

$$y = -\ln\{-\ln[F(y)]\} = -\ln[-\ln(1 - 1/T)]$$

= $\ln(T)$, quando $T > 18$

O lado oposto ao eixo y é dimensionado como o eixo T . O valor de x para um dado T é a menor espessura para a área, S , T vezes maior, comparada com a pequena amostragem, s . A figura 3.2 mostra um exemplo de aplicação.

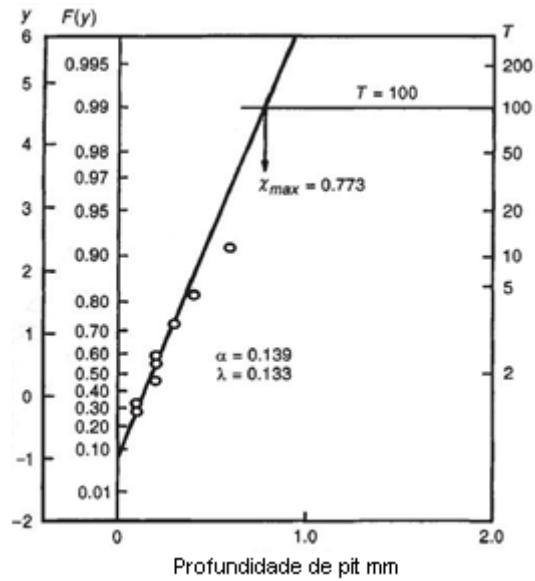


Figura 3.2 Distribuição de probabilidade de profundidade de pite, para pequena amostragem, em função da distribuição de Gumbel. (WILEY, 2000)

As modificações impostas ao método proposto pela JSCE consistem em considerar cada tubo como um elemento da amostragem e utilizar um período de retorno mínimo de 20. Determinamos que a menor amostra que pode ser empregada neste método é de 30 elementos. Sendo assim, o feixe tubular deve possuir no mínimo 600 tubos para que este método seja aplicável.

Simulações de resultados de ensaio IRIS foram realizadas tomando como base distribuições características de perda de espessura em feixes tubulares, para as simulações foram utilizados permutadores com 600 e 1500 tubos. De posse de curvas de distribuições reais, foram criadas medidas de espessura para cada um dos tubos dos dois feixes utilizados. A espessura de cada tubo do feixe preencheu uma célula de uma planilha do programa Excel, utilizando-se a função **índice** em conjunto com a função **aleatório** simulamos a escolha aleatória de um tubo para a realização do ensaio.

Do feixe composto por 600 tubos foi tomado apenas um tamanho de amostras já que o período de retorno máximo é obtido justamente com o tamanho de amostra mínimo. O feixe composto por 1500 tubos possuem tamanhos de amostra conforme a tabela 3.1, a seguir.

Tabela 3.1 Número de elementos em diferentes amostras utilizadas nas simulações.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
600	30	-----	-----	-----	-----	-----
1500	30	37	43	50	60	75

Para todo o feixe objeto do estudo foram tomadas cinquenta amostras distintas para cada tamanho preestabelecido na tabela acima, a partir das amostras obtêm-se os parâmetros de forma e locação, traça-se as curvas de distribuição de Gumbel, e então estima-se a menor espessura para cada amostra.

3.3.1 - Estimação de Máxima Verossimilhança

Para a realização deste método de cálculo é necessário a estimativa dos parâmetros de forma e de locação da GEV, neste trabalho utilizaremos a estimação de máxima verossimilhança com este objetivo.

Sejam M_1, M_2, \dots, M_m variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas representando os máximos coletados em blocos de tamanho n , com distribuição GEV e uma amostra de m máximos (m_1, m_2, \dots, m_m) . A função de Verossimilhança, neste caso, é dada por

$$L(\mu, \sigma, \xi) = \prod_{i=1}^m h(m_i) = \frac{1}{\sigma^m} \prod_{i=1}^m \left\{ \left[1 + \xi \left(\frac{m_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \right\} \times \\ \times \exp \left\{ \sum_{i=1}^m \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{m_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1}{\xi}\right)} \right\} \right\},$$

que para $\xi < 0$, assume valores diferentes de zero, se todos os valores de m_i , para todo $i = 1, 2, \dots, m$, forem menores do que $\mu - \sigma/\xi$, ou seja, se $\mu - \sigma/\xi > m_{(m)}$, sendo $m_{(m)}$ o maior valor da série de observações, e para $\xi > 0$, se todos os valores de m_i , para todo $i = 1, 2, \dots, m$, forem maiores do que $\mu - \sigma/\xi$, ou seja, se $\mu - \sigma/\xi > m_{(1)}$, sendo $m_{(1)}$ o menor valor da série de observações. Caso contrário, $L(\mu, \sigma, \xi) = 0$.

Assim, o algoritmo da Verossimilhança é dado por

$$l(\mu, \sigma, \xi) = \sum_{i=1}^m \left\{ -\ln \sigma - \left(\frac{1 + \xi}{\xi} \right) \ln \left[1 + \xi \left(\frac{m_i - \mu}{\sigma} \right) \right] - \left[1 + \xi \left(\frac{m_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1}{\xi} \right)} \right\}$$

para $\xi < 0$ e $(\mu - \sigma)/\xi > m_m$ ou $\xi > 0$ e $(\mu - \sigma)/\xi > m_1$.

No caso $\xi = 0$, obtemos

$$l(\mu, \sigma) = -m \ln \sigma - \sum_{i=1}^m \left(\frac{m_i - \mu}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^m \exp \left\{ -\left(\frac{m_i - \mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (4.2).$$

Os estimadores de máxima verossimilhança dos parâmetros ξ, μ e σ da distribuição $G(\mathbf{x})$ são obtidos pela solução do sistema de equações não lineares formado pelas derivadas de primeira ordem da equação (4.2), em relação a cada parâmetro, igualadas a zero, isto é, pela solução de

$$\frac{1}{\hat{\sigma}} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1 + \hat{\xi} - \omega_i^{-\frac{1}{\hat{\xi}}}}{\hat{\sigma}} \right) = 0$$

$$-\frac{m}{\hat{\sigma}} + \frac{1}{\hat{\sigma}^2} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{(m_i - \hat{\mu}) \left[(1 + \hat{\xi}) - \omega_i^{-\frac{1}{\hat{\xi}}} \right]}{\omega_i} \right\} = 0 \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^m \left\{ \left(1 - \omega_i^{-\frac{1}{\hat{\xi}}} \right) \left[\frac{1}{\hat{\xi}^2} \ln(\omega_i) - \frac{(m_i - \hat{\mu})}{\hat{\xi} \hat{\sigma} \omega_i} \right] - \frac{(m_i - \hat{\mu})}{\hat{\sigma} \omega_i} \right\} = 0,$$

sendo $\omega_i = 1 + \hat{\xi} \left(\frac{m_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right)$.

O sistema de equações acima não possui solução analítica. Para obtenção de uma solução numérica é necessário utilizar um método numérico. (CEREZER, 2000)

3.3.2 - Ajuste da Distribuição

Um dos fatores que mais influenciam no método de cálculo proposto pela JSCE é o ajuste dos valores obtidos à curva de distribuição. Utilizaremos neste trabalho dois métodos gráficos para verificar este ajuste: PP-plot, QQ-Plot. Estes modelos gráficos comparam a probabilidade da distribuição de GEV com a probabilidade da distribuição encontrada experimentalmente.

O teste de Anderson-Darling avalia se uma amostra provém de uma distribuição especificada. A fórmula para o resultado estatístico do ensaio A , para avaliar se os dados $\{x_1 < \dots < x_n\}$ seguem uma distribuição específica, é descrita abaixo. Note-se que os dados devem ser colocados em ordem.

$$A^2 = -n - S$$

onde

$$S = \sum_{k=1}^n \frac{2k-1}{n} [\ln F(x_k)] + \ln(1 - F(x_{n+1-k})).$$

BURY (1999) estabelece valores tabelados para o teste de Anderson-Darling, A .

Em testes de hipóteses estatísticos, p-valor é a probabilidade de obtenção de um resultado pelo menos tão extremo como quanto aquele efetivamente observado, assumindo que a hipótese nula é verdadeira. O fato de que o p-valor é baseado neste pressuposto é fundamental para sua correta interpretação.

Quanto menor o p-valor, menos provável o resultado assumir a hipótese nula, no sentido de significância estatística. Frequentemente utiliza-se p-valor de 0,01 ou 0,05, correspondente a 1% ou 5% de chance de que o resultado seja o extremo, dada a hipótese nula. Convém notar, porém, que a idéia de mais ou menos importante é utilizada apenas para fins ilustrativos. O resultado de um teste de significância ou é "estatisticamente significativo" ou "não é estatisticamente significativo".

Mais tecnicamente, um p-valor de um experimento é uma variável aleatória definida sobre o espaço amostra do experimento tal que a sua distribuição sob a hipótese nula é uniforme no intervalo [0,1]. Muitos p-valor podem ser definidos para a mesma experiência.

As hipóteses para o teste de Anderson-Darling são:

H_0 : Os dados seguem a distribuição específica

H_1 : Os dados não seguem a distribuição específica

Se o p-valor para o teste de Anderson-Darling for menor do que o nível de significância escolhido então, concluímos que os dados não seguem a distribuição especificada.

3.4 - Programas utilizados

Neste trabalho foram utilizados programas de computador com o objetivo estimar a espessura mínima presente no feixe tubular. Um dos programas empregados foi o Minitab que é um programa estatístico criado pela empresa Globaltech, através deste programa foram traçados os gráficos utilizados no método de cálculo II e por meio dele também foram obtidos os parâmetros de forma e locação necessários para a obtenção da estimativa. O Minitab é um programa fechado necessitando para a sua utilização da aquisição de uma licença de uso.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo abordaremos os resultados das simulações e dos ensaios realizados, as limitações encontradas para cada método e as possíveis causas que levam à curva de distribuição de frequência diferir da curva teórica do mecanismo de corrosão. A alta dependência dos métodos de cálculo com o tamanho da amostra se torna evidente no transcorrer do capítulo, isso levou a busca da melhor associação entre o menor tamanho de amostra possível com o maior percentual de probabilidade de detecção desejado.

4.1 - Método de Cálculo I

Os resultados das simulações e as análises dos ensaios IRIS realizados nos feixes tubulares utilizados no método de cálculo I são mostrados nesta seção. Os resultados das simulações para os diversos feixes, quando considerando um percentual de interesse de 1% dos tubos do feixe tubular, estão representados resumidamente abaixo nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 Variação da probabilidade de obtenção com a variação do percentual de amostragem.

Percentual da Amostragem	Número de Tubos no Feixe													
	200		300		400		500		600		700		800	
	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO
5%	10	0,09	15	0,13	20	0,18	25	0,22	30	0,26	35	0,3	40	0,33
10%	20	0,18	30	0,26	40	0,34	50	0,4	60	0,46	70	0,52	80	0,57
15%	30	0,27	45	0,38	60	0,47	75	0,55	90	0,62	105	0,68	120	0,73
20%	40	0,35	60	0,48	80	0,59	100	0,67	120	0,74	140	0,79	160	0,83
25%	50	0,43	75	0,57	100	0,68	125	0,76	150	0,82	175	0,87	200	0,9
30%	60	0,5	90	0,65	120	0,76	150	0,83	180	0,88	210	0,92	240	0,94
35%	70	0,57	105	0,72	140	0,82	175	0,88	210	0,92	245	0,95	280	0,97
40%	80	0,64	120	0,78	160	0,87	200	0,92	240	0,95	280	0,97	320	0,98
45%	90	0,69	135	0,83	180	0,91	225	0,95	270	0,97	315	0,98	360	0,99
50%	100	0,75	150	0,87	200	0,94	250	0,97	300	0,98	350	0,99	400	1

T- Número de tubos amostrados PO -Probabilidade de obtenção

Tabela 4.2 Variação da probabilidade de obtenção com a variação do percentual de amostragem.

Percentual da Amostragem	Número de Tubos no Feixe													
	900		1000		1200		1400		1600		1800		2000	
	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO	T	PO
5%	45	0,36	50	0,4	60	0,46	70	0,51	80	0,56	90	0,6	100	0,64
10%	90	0,61	100	0,65	120	0,72	140	0,77	160	0,81	180	0,85	200	0,88
15%	135	0,77	150	0,8	180	0,86	210	0,9	240	0,93	270	0,95	300	0,96
20%	180	0,87	200	0,89	240	0,93	280	0,96	320	0,97	360	0,98	400	0,99
25%	225	0,92	250	0,94	300	0,97	350	0,98	400	0,99	450	0,99	500	1
30%	270	0,96	300	0,97	360	0,99	420	0,99	480	1	540	1	600	1
35%	315	0,98	350	0,99	420	0,99	490	1	560	1	630	1	700	1
40%	360	0,99	400	0,99	480	1	560	1	640	1	720	1	800	1
45%	405	1	450	1	540	1	630	1	720	1	810	1	900	1
50%	450	1	500	1	600	1	700	1	800	1	900	1	1000	1

T- Número de tubos amostrados PO - Probabilidade de obtenção

A partir das tabelas 4.1 e 4.2 foi traçado o gráfico Percentual de tubos X Probabilidade de Obtenção, figura 4.1, onde é mostrada a variação da probabilidade de obtenção com a variação do percentual de tubos ensaiados para um grupo de interesse de 1% do total de tubos.

A análise dos dados obtidos e a interpretação das curvas traçadas no gráfico nos levam a concluir que a probabilidade de obtenção desejada, para os feixes com menores quantidades, tende a um comportamento linear. No caso destes feixes há uma proporção direta entre o percentual de tubos e probabilidade de obtenção. Para feixes com quantidades de tubos maiores, o tamanho da amostragem não mantém uma relação de proporcionalidade com a probabilidade de obtenção, neste caso, inicialmente uma pequena variação no percentual de tubos amostrados promove uma grande variação na probabilidade de obtenção, após este intervalo de amostragem inicial, uma grande variação no percentual de tubos amostrados produz pouca variação na probabilidade de obtenção. Feixes que possuem quantidades intermediárias de tubos têm o comportamento entre os feixes com grandes e feixes com pequenas quantidades de tubos.

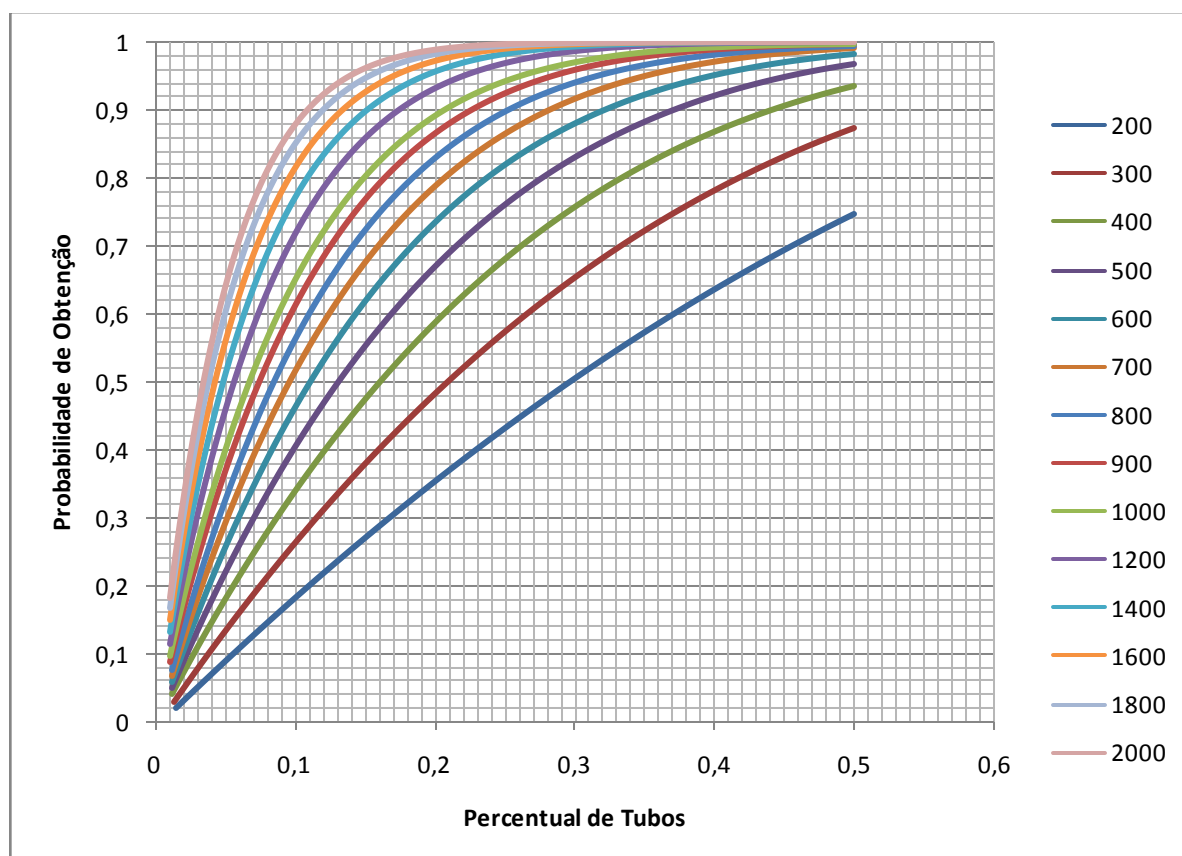


Figura 4.1 Gráfico de correlação entre percentual de tubos e probabilidade de obtenção.

Traçamos também, como resultado dos cálculos do método, o gráfico número de tubos ensaiados X Probabilidade de Obtenção, figura 4.2. Este gráfico, como o gráfico anterior, mostra a não linearidade entre número de tubos ensaiados e probabilidade de obtenção.

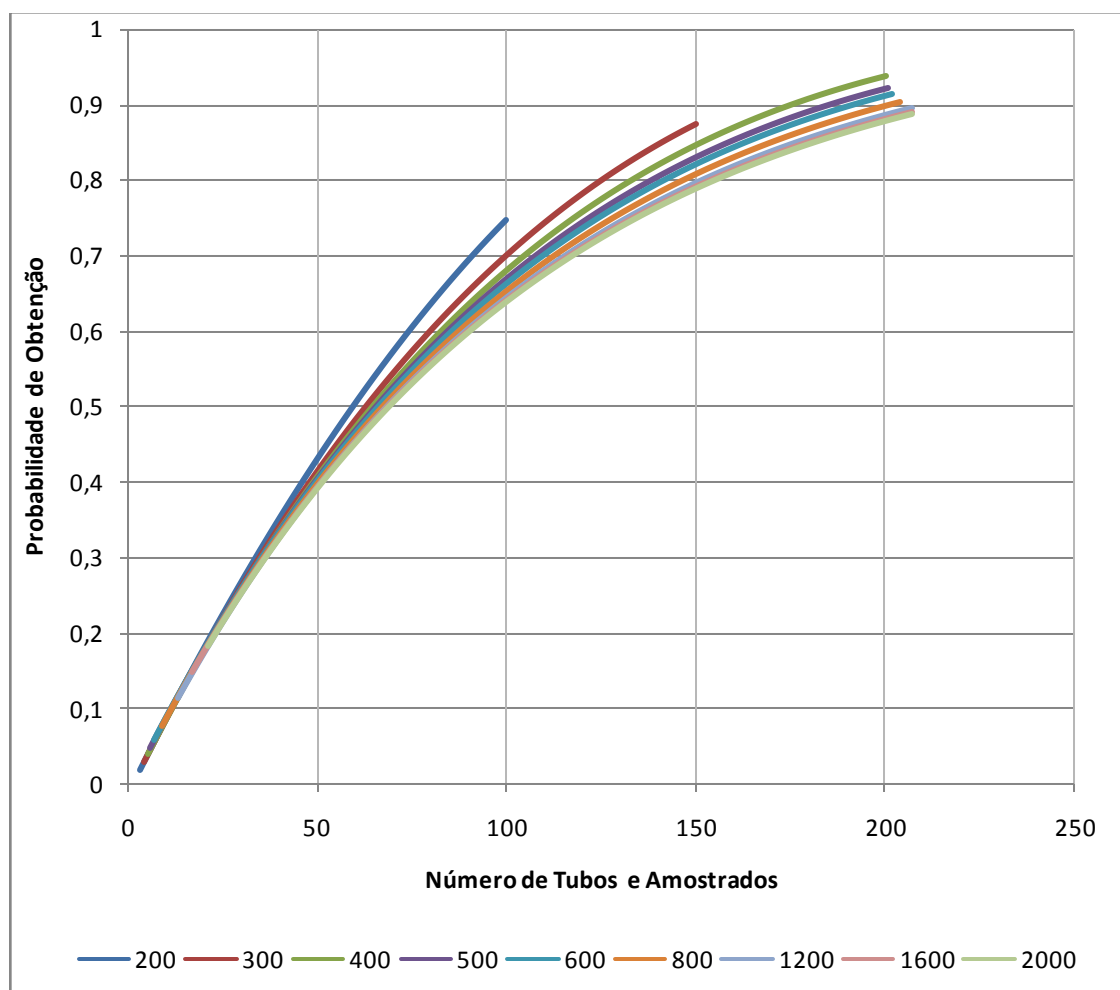
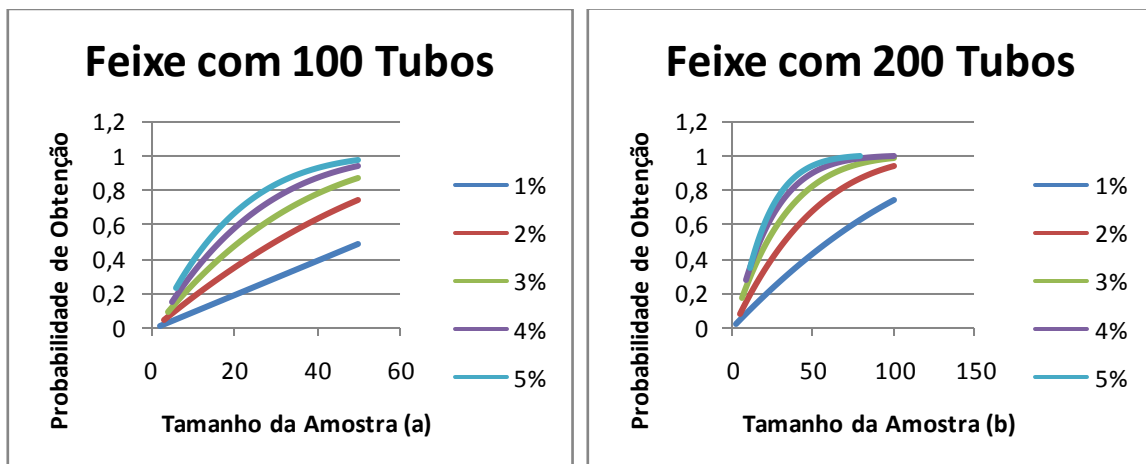


Figura 4.2 Gráfico de correlação entre o número de tubos amostrados e a probabilidade de obtenção.

Outro resultado importante relativo a este método de cálculo é a não linearidade para o mesmo percentual de tubos ensaiados, entre feixes que possuem número de tubos diferentes. Como exemplo disso tem os feixes com 200 e 600 tubos, os quais para um percentual de 20% dos tubos ensaiados possuem probabilidade de obtenção de 33% e 73% respectivamente. Sendo assim concluímos que mesmos percentuais de amostragem para feixes com diferentes números de tubos apresentam diferentes probabilidades de obtenção. A correta seleção do tamanho da amostra é essencial para alcançar a probabilidade de obtenção desejada, como

podemos observar nesses resultados a avaliação de um feixe tubular com uma menor quantidade de tubos requer, comparativamente a um feixe com maior número de tubos, um maior percentual de tubos ensaiados. Isso tem uma correlação direta com a incidência do processo corrosivo no feixe tubular, se um mesmo mecanismo de corrosão atua em dois feixes tubulares e um tem o dobro de tubos do outro, é de se esperar que a distribuição de perdas de espessura seja semelhante nos dois casos, assim sendo o grupo de interesse no feixe menor corresponde a metade do grupo de interesse do feixe maior.

A segunda parte da simulação utilizando o método de cálculo I consistia em avaliar a variação da probabilidade de obtenção considerando tamanhos diferenciados do grupo de interesse. Dos resultados encontrados foram traçados os gráficos incluídos na figura 4.4, essa figura mostra que ao aumentarmos os grupos de interesse, a probabilidade de obtenção aumenta, no entanto não verificamos um aumento linear da probabilidade de obtenção com o acréscimo do grupo de interesse. Para os feixes simulados só se justifica uma elevação no grupo de interesse até um percentual de 4%, já que o aumento da probabilidade de obtenção ao considerarmos um grupo maior que 4% não promove um acréscimo relevante na exatidão da estimativa da menor espessura presente no feixe.



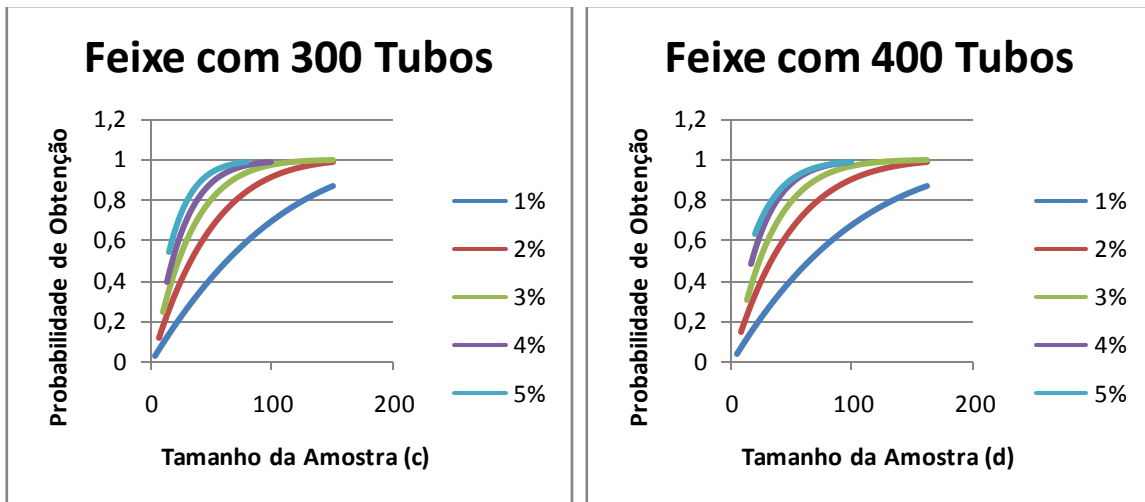


Figura 4.3 Gráficos que mostram a variação da probabilidade de obtenção com o tamanho da amostra.

Em feixes que possuam multipasses há a possibilidade de corrosão preferencial em determinado passe. Como em geral não há muita diferença no número de tubos por passe, baseando-se no gráfico contido na figura 4.1 podemos verificar que para igualar a probabilidade de obtenção em todos os passes devemos aplicar os mesmos percentuais de amostragem em todos eles. A figura 4.3 mostra um permutador com feixe tubular multipasses, os passes localizados nas extremidades possuem 188 tubos enquanto que os passes centrais possuem 214 tubos. Se determinarmos uma probabilidade de obtenção de 90% para este trocador, a amostragem total necessária será de 200 tubos, considerando um grupo interesse de 1% do número total de tubos. Dividindo igualmente a amostra entre os passes, teríamos 50 tubos amostrados em cada passe, o que daria uma probabilidade de obtenção de 40% para os passes localizados nos extremos do espelho e de 41% para os passes localizados no centro.

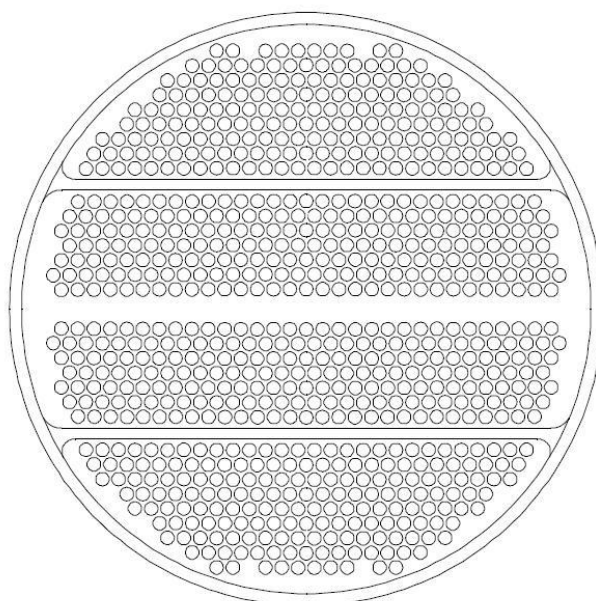


Figura 4.4 Esquema de espelho de feixe tubular com quatro passes.

No ensaio IRIS realizado no feixe tubular do M-704 da unidade da RECAP, foram ensaiados 260 tubos de um total de 1462. O ensaio foi realizado em 62 tubos no 1º passe, 68 tubos no 2º passe, 65 no 3º passe e 65 no 4º passe. Os tubos são construídos de latão SB C111-44500 e possuem diâmetro nominal de $\frac{3}{4}$ po1. A figura 4.5 mostra os histogramas individualizados por passe com as respectivas aproximações para a distribuição de Gumbel. Podemos visualizar também na figura 4.5 o gráfico com a distribuição geral com todos os valores encontrados para os tubos ensaiados. Analisando a distribuição para o primeiro passe pode-se supor a presença de dois processos corrosivo distintos, o primeiro processo apresenta profundidades máximas de pite entre 0,1mm e 0,5mm e o segundo processo com profundidades máximas entre 0,5mm e 1mm. Utilizando o método de cálculo I neste passe, observamos que a probabilidade de detecção é de 48% quando consideramos como grupo de interesse 1% dos tubos do feixe tubular. A distribuição para o segundo passe mostra também dois processos corrosivos distintos, apresentando um agravamento de perda de espessura promovido pelo segundo processo. Utilizando o método de cálculo número 1 neste passe, temos que a probabilidade de obtenção é de 48%. O terceiro passe apresenta a continuidade do agravamento da perda de espessura pelo segundo processo corrosivo. A probabilidade de detecção para este passe é de 50%. O estudo da distribuição do quarto passe mostra a predominância do segundo processo corrosivo sendo que a probabilidade de detecção para este passe é de 50%. O M-704 é um condensador de topo que trabalha com água de resfriamento

por dentro dos tubos, o resultado do ensaio IRIS analisado sem a separação por passe não representa de uma forma adequada os processos corrosivos atuantes no feixe tubular. Uma distribuição sem a separação por passes pode levar a interpretação de que o feixe está corroendo de forma semelhante em todos os passes, podendo promover com isso uma estimativa errônea para a menor espessura presente no feixe tubular. O mais correto neste caso seria o aumento da amostragem no quarto passe de modo a elevar a probabilidade de obtenção da menor espessura presente no feixe.

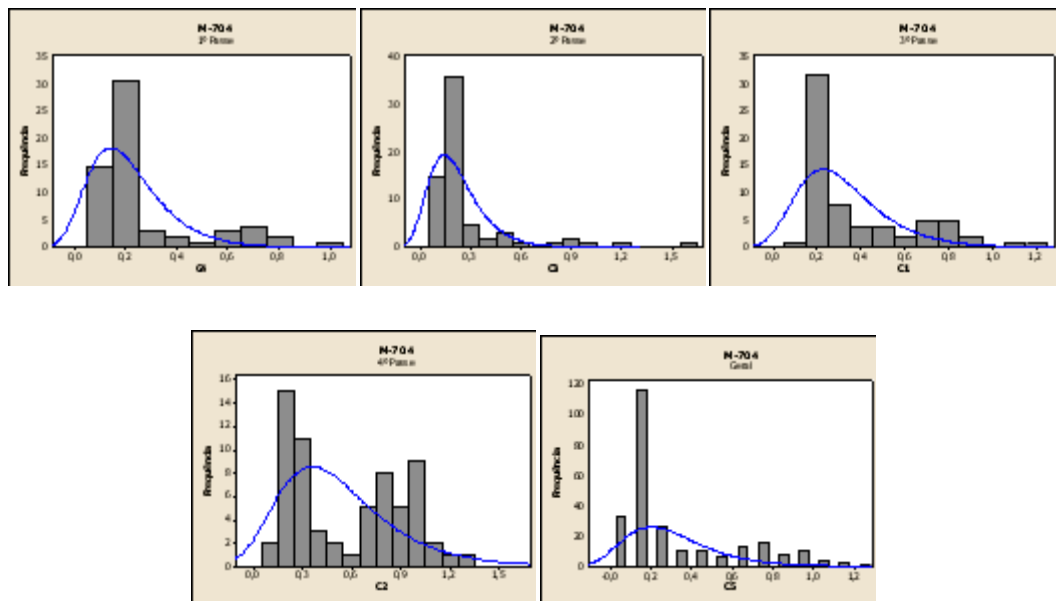


Figura 4.5 Distribuição das máximas perda de espessura separadas por passe e generalizada.

Na aplicação de métodos estatísticos para estimativa da menor espessura é essencial o conhecimento sobre os mecanismos de corrosão que atuam no equipamento. A correta seleção do tamanho da amostragem a partir da definição da probabilidade de obtenção desejada só é possível através da aplicação dos conhecimentos sobre os mecanismos de danos, da avaliação das condições operacionais e do histórico de falhas do equipamento. O melhor tamanho do grupo de interesse será aquele que proporcione uma maior confiabilidade ao equipamento, sendo necessário para isso um estudo sobre quão localizado espera-se que seja a corrosão.

Método de Cálculo II

As simulações utilizadas neste método de cálculo levaram a obtenção de estimativas das menores espessuras presentes nos feixes tubulares objetos do estudo. A figura 4.5 mostra a distribuição das espessuras da população número cinco, uma das dez distribuições utilizadas na simulação para o feixe com 600 tubos. Na figura 4.6 foi incluído o gráfico com todas as retas representantes das cinquenta amostras retiradas da população cinco, estas retas foram traçadas em um papel de Gumbel e seus parâmetros de forma e de locação foram utilizados para a estimativa da menor espessura presente no feixe. O histograma inserido na figura 4.7 representa a distribuição das estimativas para a menor espessura, obtidas através da aplicação do método de cálculo II.

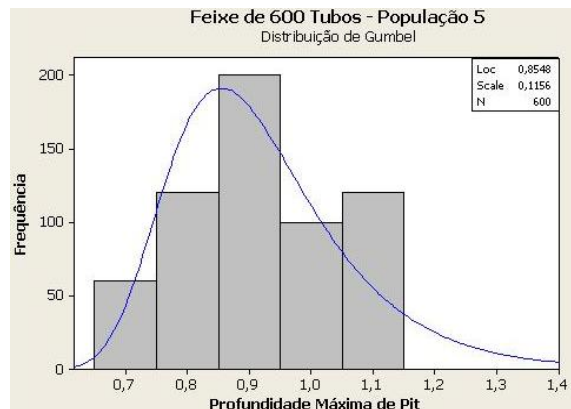


Figura 4.6 Curva de distribuição da população cinco, feixe tubular com 600 tubos.

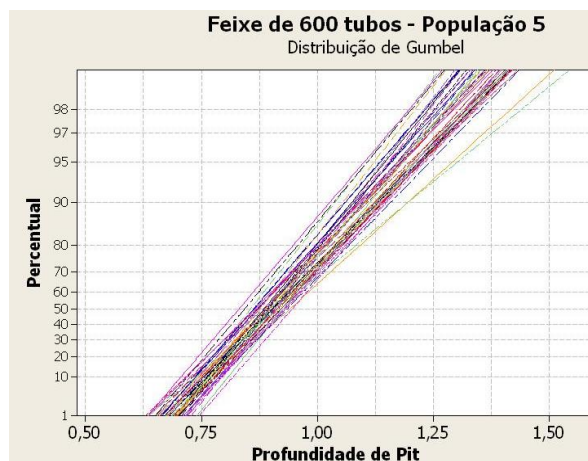


Figura 4.7 Curvas de probabilidade para as cinquenta amostras retiradas da população cinco do feixe tubular com 600 tubos.

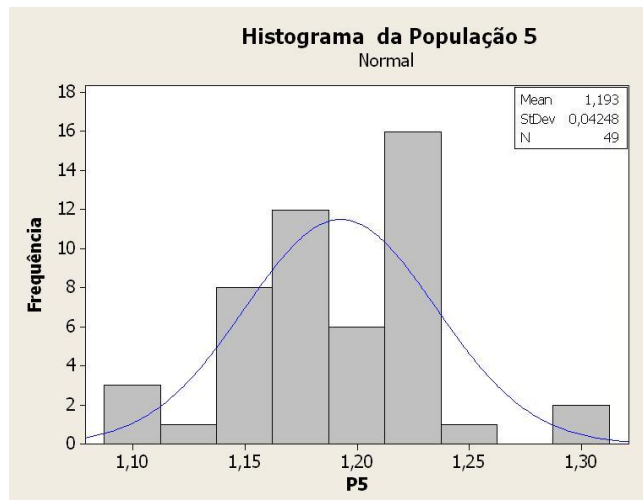


Figura 4.8 Histograma das estimativas para as amostras da população cinco, feixe tubular com 600 tubos.

A tabela 4.3 contém de uma forma resumida os resultados obtidos para as dez distribuições utilizadas na simulação do feixe com seiscentos tubos, as populações são nomeadas como P1 a P10, o que corresponde às populações de um a dez. Considerando 95% das estimativas para cada população, excluído os 2,5% relativos à cauda inferior e os 2,5% à cauda superior da distribuição, calculamos o erro que se pode cometer ao utilizar o método de cálculo II para as estimativas das menores espessuras dentro deste percentual. As populações P2 e P4 foram as que apresentaram uma maior variação do erro cometido, a estimativa no caso da P2 variou entre menos 0,1mm e mais 0,2mm do valor real, o erro encontrado para a estimativa da P4 foi de menos 0,2mm a mais 0,1mm do valor real. A população P6 não apresentou erro nas estimativas proporcionando uma perfeita correlação entre estimativa e menor espessura presente no feixe. De um modo geral, as estimativas obtidas das populações apresentaram um erro máximo de 0,2mm acima do valor real, como nas estimativas para as populações P2, P5 e P8. O erro máximo obtido para as medidas inferiores ao valor real foi de 0,2mm, como para as estimativas das populações P4, P9 e P10. Isso significa que ao obtermos uma estimativa da espessura mínima presente no feixe, para as diversas distribuições utilizadas, a estimativa para a menor espessura em 95% dos casos difere do valor real em no máximo 0,2mm para mais ou para menos.

Podemos propor uma avaliação mais aprofundada do método. Supondo que obtenhamos um valor X como estimativa do valor real para a menor espessura Y . Quando X é menor que Y , se houver uma medida x_i maior que X dentro da amostra, o valor da menor espessura que deverá ser considerada é x_i . Assim o erro máximo neste caso passa a ser de no máximo 0,1mm já que o erro encontrado nas simulações foi de 0,2mm e a resolução utilizada no ensaio IRIS é de 0,1mm. Caso X seja menor que Y e não exista uma medida maior que X dentro da amostragem, os erros máximos já relatados para as distribuições se aplicam integralmente. Uma outra possibilidade é de que X seja maior que Y , sendo assim, o erro máximo possível é de 0,2mm.

Tabela 4.3 Avaliação do erro relativo para as dez populações do feixe com 600 tubos.

	Média	Pit mais profundo	Calculada 95%	erro menos	erro mais
P1	0,7051	0,7	0,7-0,8	0	0,1
P2	1,201	1,2	1,1-1,4	0,1	0,2
P3	0,551	0,6	0,5-0,6	0,1	0
P4	1,802	1,9	1,7-2,0	0,2	0,1
P5	1,193	1,1	1,1-1,3	0	0,2
P6	0,8009	0,8	0,8	0	0
P7	1,079	1	1,0-1,1	0	0,1
P8	1,483	1,4	1,4-1,6	0	0,2
P9	0,6998	0,8	0,6-0,7	0,2	0
P10	0,5899	0,7	0,5-0,7	0,2	0

As simulações realizadas para o feixe contendo mil e quinhentos tubos produziram como resultado as estimativas para a menor espessura presente no feixe tubular. Diferentemente do feixe com seiscentos tubos, o qual possuiu amostragem com tamanho único, este feixe foi amostrado com seis tamanhos de amostras distintas, o objetivo disso é avaliar o comportamento da variação do erro cometido ao se realizar estimativas utilizando tamanhos diferentes de amostras. O gráfico presente na figura 4.9 mostra uma sobreposição de curvas que representam as distribuições de estimativas para os diferentes tamanhos de amostragem, população 1. Da avaliação deste gráfico infere-se que quando o tamanho da amostragem aumenta, a curva de distribuição tende a se concentrar próximo ao valor médio, existe a tendência que a média se desloque para a esquerda adquirindo-se valores mais baixos. O comportamento observado das curvas se deve ao fato que ao se utilizar amostras com maior número de elementos, reduzimos o período de retorno, isso provoca uma diminuição no valor

estimado quando utilizamos o método de cálculo. Outro motivo para este deslocamento é a representatividade da amostra, quanto maior o tamanho da amostra, maior a semelhança da sua distribuição com a distribuição da população.

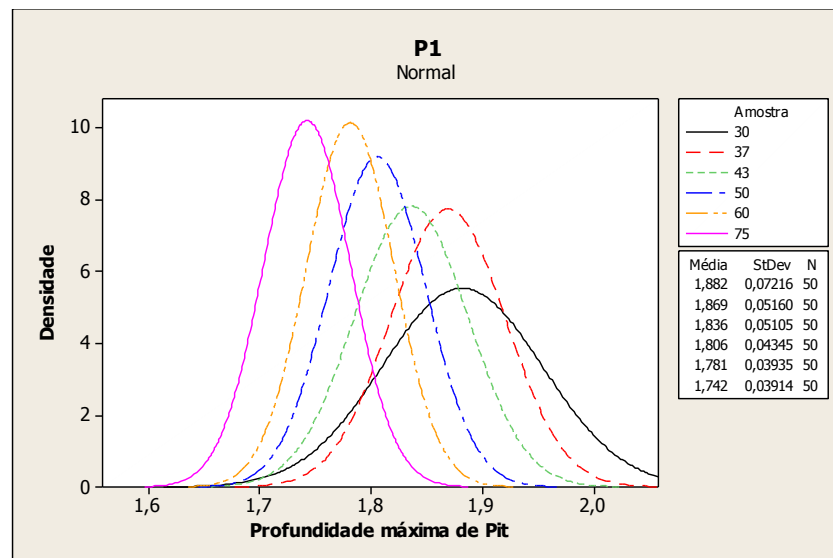


Figura 4.9 Variação das curvas de distribuição das estimativas com a variação do tamanho da amostra.

As tabelas 4.4 e 4.5 expõem os erros encontrados para as simulações do feixe com mil e quinhentos tubos, por meio da avaliação destas tabelas podemos verificar que há uma redução no erro à medida que aumentamos o tamanho da amostragem. A amostragem composta por 75 tubos foi que apresentou o menor erro para todas as populações empregadas, o erro máximo neste caso foi de 0,1mm para mais e 0,2mm para menos. A coluna mais a esquerda da tabela apresenta os diferentes tamanhos de amostras utilizados, no corpo central estão inseridos os erros relativos a cada população utilizada, na última linha estão as máximas profundidades de pite reais (PRP) para cada população. As duas colunas que representam os erros para cada população referem-se aos erros inferiores e superiores nas estimativas calculadas.

Tabela 4.4 Erro cometido na estimativa para as diversas populações e tamanhos de amostragem, feixe com 1500 tubos.

Tamanho da Amostra	Populações									
	P1		P2		P3		P4		P5	
30	0	0,3	0	0,2	0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
37	0,1	0,3	0	0,2	0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
43	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1
50	0	0,2	0	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
60	0	0,2	0	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
75	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0,2	0
PRP	1,7		1,2		1,2		1		1,6	

Tabela 4.5 Erro cometido na estimativa para as diversas populações e tamanhos de amostragem, feixe com 1500 tubos.

Tamanho da Amostra	Populações									
	P6		P7		P8		P9		P10	
30	0,1	0,2	0,1	0	0,1	0	0,1	0,3	0	0,2
37	0,1	0,2	0,1	0	0,1	0	0,1	0,3	0	0,2
43	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	0,1	0,3	0	0,1
50	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	0,1	0,2	0	0,1
60	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0	0,2	0	0,1
75	0,1	0	0,1	0	0,2	0	0	0,1	0	0,1
PRP	1,4		0,8		0,7		1,7		1,3	

Das estimativas realizadas para as dez populações estudadas, o erro máximo superior encontrado foi 0,3mm e o erro máximo inferior foi de 0,2mm.

4.2.1 - Estimativa dos parâmetros da distribuição

Para a determinação dos parâmetros das distribuições de Gumbel foi utilizado o programa Mnitab, o qual baseia-se na estimativa de verossimilhança para a determinação desses parâmetros da distribuição. A tabela 4.6 abaixo mostra resumidamente algumas

estimativas das distribuições de amostras tomadas para cada população do feixe com 600 tubos. Optamos por não inserir todos os parâmetros determinados para as distribuições contidas no estudo, por considerarmos que sua supressão acarretará em uma melhor continuidade do texto, sem perda de entendimento.

Tabela 4.6 Determinação dos parâmetro de forma e locação pelo método da máxima verossimilhança.

Determinação de parâmetros		
	Parâmetro de Locação	Parâmetro de Forma
	μ	σ
População 1	0,5492	0,05908
População 2	0,6878	0,1805
População 3	0,375	0,06893
População 4	1,328	0,1278
População 5	0,8605	0,1184
População 6	0,6668	0,04515
População 7	0,884	0,06923
População 8	0,9899	0,1575
População 9	0,547	0,04996
População 10	0,3622	0,0737

4.2.2 - Ajuste da curva

As amostras retiradas das populações empregadas nas simulações dos feixes de 600 e 1500 tubos não apresentaram em sua maioria um bom ajuste à distribuição de Gumbel. Abaixo nas figuras 4.10 e 4.11 estão os gráficos PP-Plot e QQ-Plot para a população 2 empregada no feixe de 600 tubos.

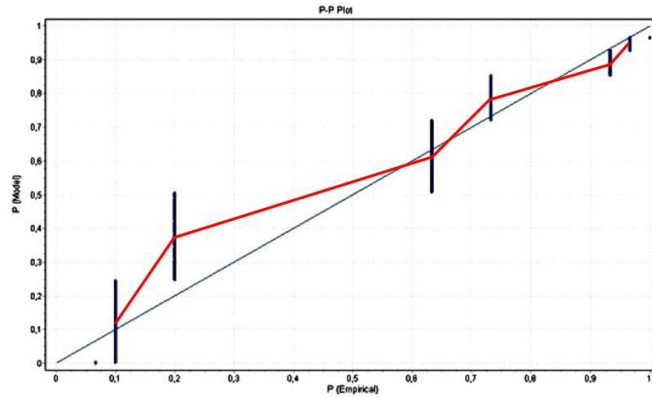


Figura 4.10 Gráfico PP-Plot para a população 2, feixe com 600 tubos.

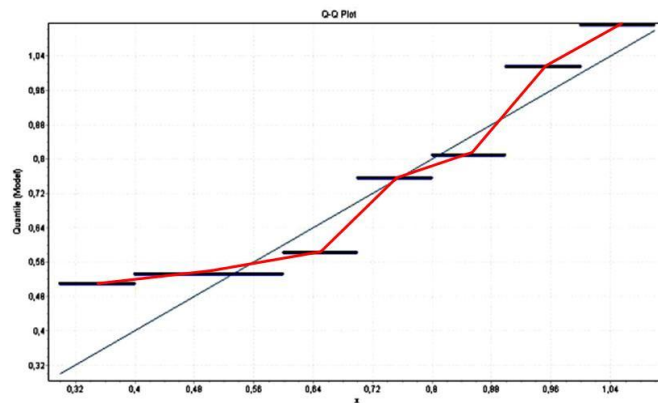


Figura 4.11 Gráfico QQ-Plot para a população 2, feixe com 600 tubos.

O teste de Anderson-Darling realizado para as populações empregadas nas simulações para os feixes de 600 e 1500 tubos são mostrados nas tabelas 4.7 e 4.8 abaixo.

Tabela 4.7 Valores para o teste de e P-valor. Populações utilizadas no feixe com 600 tubos.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
μ	0,5467	0,6334	0,362	1,267	0,8548	0,6676	0,8867	0,8433	0,5452	0,3741
σ	0,05343	0,1977	0,06612	0,183	0,1156	0,04607	0,0649	0,158	0,05281	0,07306
N	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
AD	80,674	45,665	50,114	17,587	21,395	155,439	57,338	23,183	82,561	43,748
P-Valor	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010

Tabela 4.8 Valores para o teste de μ e P-valor. Populações utilizadas no feixe com 1500 tubos.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
μ	1,271	1,082	0,8706	0,8794	1,04	0,8433	0,5508	0,3701	1,289	1,026
σ	0,1591	0,0978	0,1163	0,0651	0,1634	0,158	0,0557	0,0712	0,1625	0,09856
N	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
AD	66,532	67,465	47,538	137,2	37,633	57,958	186,68	112,53	59,148	88,209
P-Valor	<0,010	<0,005	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010

Os resultados mostram, tanto para os gráficos PP-Plot e QQ-Plot quanto para o teste de Anderson-Darling, que nenhuma das populações apresentaram aderência à curva de distribuição teórica, distribuição de Gumbel. Todas as populações apresentaram um P-valor menor que 0,010 rejeitando assim a hipótese nula que estabelecia a aderência dos dados à curva.

Suprimimos neste capítulo diversos resultados repetitivos obtidos para as várias populações empregadas, consideramos suficiente para o entendimento do método a exposição dos resultados de apenas uma população, quando possível. Consideramos que a inserção de todos os resultados dificultaria a leitura e não proporcionaria aumento relevante na compreensão do texto.

4.2 - Avaliação da vida remanescente

A avaliação da vida remanescente de um vaso é fundamental para a determinação dos prazos para inspeção. Diversos métodos de cálculo estão presentes na literatura e em normas de inspeção. A API 510, Pressure Vessel Inspection Code, estabelece que o intervalo entre inspeções deve ser o menor valor entre 10 anos ou metade da vida remanescente do equipamento. Sendo a vida remanescente é definida como

$$VR = (e_1 - e_2) / TC$$

onde e_1 é a menor espessura medida no ponto, e_2 é a espessura mínima no ponto e TC é a taxa de corrosão definida como

$$TC = (e_i - e_f) / t$$

sendo e_i espessura medida no início do tempo t , e_f espessura medida após ocorrido o tempo t e t é o tempo entre as medições.

Esta norma considera que a taxa de corrosão média para um determinado ponto permanece constante com o decorrer do tempo, os aspectos estocásticos da corrosão não são levados em consideração no cálculo. No caso de feixes tubulares de permutadores de calor o critério proposto pela norma americana é, na maioria dos casos, conservador, podendo levar a uma redução na vida remanescente calculada para o equipamento.

HandBiik discorre sobre o conceito de risco de falha para tubulações, o qual também pode ser aplicada a vasos de pressão. Ele relaciona a resistência à pressão que tubulações corroídas possuem com a probabilidade de falha destas áreas. A resistência a pressão fornecida pela tubulação, R , é definida como

$$R(\tau) = \frac{2,3T}{D} S \left[\frac{1 - H(\tau)/T}{1 - H(\tau)T} \right] + C$$

$$M(\tau) = \sqrt{1 + 0,6275 \frac{[L(\tau)]^2}{DT} - 0,003375 \frac{[L(\tau)]^4}{D^2 T^2}}$$

onde T é a espessura da parede, D é o diâmetro da tubulação, S é o limite de escoamento, $M(\tau)$ é um fator geométrico que leva em conta o abaulamento da tubulação antes da falha, L é o comprimento do defeito, C é um fator de incerteza do modelo e τ é o tempo. Assim temos que a resistência é uma função do tempo já que tanto o crescimento do comprimento quanto da profundidade do defeito é função do tempo. O crescimento do defeito pode ser expresso como

$$H(\tau) = H(0) + \tau G_H$$

$$L(\tau) = L(0) + \tau G_L$$

$H(0)$ e $L(0)$ são a profundidade e o comprimento do defeito no presente e G_H e G_L é a taxa de propagação da profundidade e do comprimento do defeito respectivamente.

Devido a muitas variáveis estarem relacionadas com o tamanho do defeito, taxa de propagação, limite de escoamento e erro do modelo; há uma incerteza ao calcularmos o tempo para a falha do equipamento para um defeito específico causado por corrosão. Sendo assim o tempo para a falha ou vida remanescente é melhor caracterizado em termos probabilísticos. A

probabilidade de falha no tempo τ , $p_f(\tau)$, é igual a probabilidade da resistência, $R(\tau)$, cair abaixo da pressão aplicada, A . Isso pode ser expresso como:

$$p_f = p[R(\tau) < A] = p[R(\tau) - A < 0]$$

Substituindo os valores de $R(\tau)$ nas equações acima teremos a probabilidade de falha com ocorrência de uma particular combinação entre tubulação e atributos do defeito, ou seja: espessura de parede, limite de escoamento, dimensões do defeito, taxa de propagação. Tudo isso provoca uma diminuição na resistência quando pressão é aplicada.

Os métodos propostos em normas para o cálculo da vida remanescente não tem grande aplicação para avaliar por quanto tempo o feixe do permutador poderá operar, estes cálculos não levam em consideração os aspectos estocásticos dos fenômenos corrosivos atuantes nos feixes tubulares. A melhor abordagem para a previsão da vida útil do equipamento nestes casos se dá pela utilização do conceito de probabilidade de falha, que tem o conceito de risco envolvido, devendo ser correlacionada com uma avaliação estatística dos mecanismos de danos. Uma maneira viável de realizar o cálculo da probabilidade de falhas para o feixe tubular seria empregando o conceito de RBI, Risk-based Inspection, fora do escopo deste trabalho.

5 - CONCLUSÕES

A análise dos resultados dos ensaios IRIS realizados na UN-REDUC e na UN-RECAP juntamente com as simulações utilizadas nos métodos de cálculo I e II, possibilitaram a alcançar-nos as seguintes conclusões:

- 1- Há uma profunda correlação entre o tamanho da amostra e a exatidão dos métodos de cálculo I e II. No caso do método I a elevação do tamanho da amostra sempre aumenta a probabilidade de obtenção de uma medida dentro do grupo de medidas desejado, com relação ao método de cálculo II um aumento da amostragem, apesar de sempre reduzir a dispersão de estimativas, nem sempre diminui o erro cometido.
- 2- A quantidade de tubos que o feixe possui juntamente com o conhecimento dos mecanismos corrosivos atuantes são fundamentais para a correta aplicação dos métodos de cálculo. O histórico de falhas do equipamento pode ser bastante útil na determinação da menor espessura presente no feixe tubular. O método de cálculo I, para a correta determinação da probabilidade de obtenção, necessita da determinação do percentual de tubos com menor espessura no feixe tubular, a melhor maneira de se obter este percentual é através do estudo do histórico do equipamento. O método de cálculo II ao utilizar a distribuição de Gumbel desconsidera a ocorrência de intensidades diferenciadas de processos corrosivos em passes distintos de feixes tubulares isso pode levar a uma falsa interpretação dos resultados, a consulta ao histórico do equipamento pode levar a uma melhora na seleção da amostragem proporcionando a diminuição do erro cometido na estimativa.

- 3- Em geral os valores medidos de espessuras não se ajustam bem na curva de distribuição de Gumbel. Existem vários fatores que podem influenciar nesta falta de ajuste das medidas com a curva, dentre eles estão: atuação de formas diferentes de corrosão no feixe, intensidades diferenciadas do mecanismo corrosivo em passes distintos, sobreposição das distribuições de perda de espessura provocadas pela corrosão externa e interna ao tubo, modificação da atuação do processo corrosivo com o decorrer do tempo.
- 4- Da avaliação do método de cálculo I obtemos a conclusão que a probabilidade de obtenção de uma medida dentro do grupo de interesse não é diretamente proporcional ao tamanho da amostra ensaiada, logo, um aumento linear no tamanho da amostragem não corresponde a um aumento linear na probabilidade de obtenção. Este é um importante resultado que tem implicações diretas na aplicação do método, a correta seleção do tamanho da amostragem depende diretamente da probabilidade de obtenção desejada, assim sendo, para se obter estimativas confiáveis da menor espessura é necessário o conhecimento da variabilidade da probabilidade de obtenção com o tamanho da amostra;

6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- 1 - Avaliar a aplicação de métodos estatísticos, para a estimativa da menor espessura presente no feixe tubular, em conjunto com a Inspeção Baseada em Risco de modo a determinar a vida remanescente dos feixes tubulares;
- 2 - Determinar o erro estatístico obtido quando utilizado o método de cálculo II;
- 3 - Realizar experimentos com outras técnicas de ensaio não destrutivos, visando a aplicabilidade dos métodos de cálculo quando empregados em conjunto com estas técnicas.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- AL-QADEEB F. E., **Tubing Inspection Using Multiple NDT Techniques**, Saudi Arabia, 2005.
- 2- AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNACIONAL. **Metals Handbook**, Vol 13, Corrosion, 9 ed. 1992.
- 3- AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNACIONAL. **Metals Handbook**, Vol 13A, Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection, 2003.
- 4- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data**, G16-95, 2004
- 5- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard Guide for Examination and Evaluation of Pites Corrosion**, G46-94, 2005.
- 6- FALCÃO C., **Vasos de Pressão Trocadores de calor Casco e Tubos**, 2002.
- 7- CEREZER S. M., **Uso da Teoria de Valores Extremos para Estimar Valores de Pressões Hidrodinâmicas em um Ressalto Hidraulico Formado a Jusante de um Vertedouro**, Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2008.
- 8- GENTIL, V., **Corrosão**, 3ª Edição, LTC Editora S.A, Rio de Janeiro, 1996.
- 9- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, **Guidelines for Use of Statistics for Analysis of Sample Inspection of Corrosion**, TWI Limited, 2002.

- 10-HERRO, H. M., PORT, R. D. **The Nalco Guide to Cooling Water System Failure Analysis**, McGraw-Hill, New York, p37-86, 1973.
- 11-WILEY J., **Uhlig's Corrosion Handbook**, The Electrochemical Society, New Jersey, 2000.
- 12-LAFRAIA J. R. B., **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**, Qualitymark, 2008.
- 13-MEYER P. L., **Probabilidade Aplicada a Estatística**, Livros Técnicos Científicos Editora, 1983.
- 14-MONTGOMERY D. C., **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**, LTC Editora S.A, Rio de Janeiro, 2003.
- 15-ROBERGE P. R., **Handbook of Corrosion Engineering**, McGraw-Hill, New York, 2000.
- 16-SHEIR L. L., **Corrosion Control**, Butterworth-Heinemann, 2000.
- 17-TELLES P. C. S., **Vasos de Pressão**, Livros Técnicos Científicos Editora, 2001.
- 18-BURY P. K. V., **Statistical Distributions in Engineering**, Cambridge University Press, 1999.