

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

**AVALIAÇÃO DA INSPEÇÃO NÃO INTRUSIVA REALIZADA EM
VASO SEPARADOR E SUAS IMPLICAÇÕES NO PROGRAMA DE
INSPEÇÃO DO EQUIPAMENTO**

ARTHUR TOMAS DE RESENDE

Engenheiro de Materiais

Dissertação para obtenção de título de

*Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, 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

**AVALIAÇÃO DA INSPEÇÃO NÃO INTRUSIVA REALIZADA EM
VASO SEPARADOR E SUAS IMPLICAÇÕES NO PROGRAMA DE
INSPEÇÃO DO EQUIPAMENTO**

ARTHUR TOMAS DE RESENDE

Engenheiro de Materiais

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

Porto Alegre - RS

2009

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

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Co-orientador: Dr. Marcio Humberto Silva Siqueira

Banca Examinadora:

Dsc. Sérgio Damasceno, Petrobras

Dsc. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues, Petrobras, UFERSA

Dsc. Romeu Ricardo, SENAI-RJ

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, Julho de 2009.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio e orientação de Afonso Reguly, Marcio Humberto Silva Siqueira, Ricardo Oliveira Carneval e Julio Vervloet para a realização da dissertação.

Agradeço a Universidade Petrobras e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul a oportunidade de realização do presente trabalho.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Objetivo.....	3
3. Revisão	4
3.1 Avaliação da Integridade.....	4
3.2 Inspeção Baseada em Risco.....	5
3.3 Guia de Inspeção Não Intrusiva.....	5
3.3.1 Guia do Processo Decisório.....	5
3.3.2 Planejamento da Inspeção.....	9
3.3.3 Realização da Inspeção.....	9
3.3.4 Avaliação da Inspeção.....	10
3.3.5 Intervalo da Inspeção.....	12
3.3.5.1 Intervalo de Inspeção Baseado na Inspeção Intrusiva.....	12
3.3.5.2 Intervalo de Inspeção Baseado na Análise de Probabilidade e na Avaliação da Integridade Estrutural.....	13
3.4. Simulação de Monte Carlo.....	14
3.4.1 Definição.....	14
3.4.2 Avaliação da Probabilidade de Detecção de Descontinuidades com Uso do Método de Monte Carlo.....	15
3.5. Probabilidade de Detecção das Técnicas de Inspeção.....	17
4. Materiais e Métodos.....	22
4.1. Características do Equipamento.	22
4.2. Avaliação da Integridade.	23
4.3. Planejamento de Inspeção.....	24
4.3.1. Inspeção da Região Inferior do Casco.....	24
4.3.2. Inspeção das Juntas soldadas.....	28
5. Resultados e Discussões.....	29
5.1 Avaliação do Fundo do Casco Exposto a Redução de Espessura Localizada.....	29
5.1.1. Histograma das Dimensões das Descontinuidades.	29
5.1.2. Simulação de Monte Carlo para Avaliação da Área Sujeita à Corrosão Localizada.....	30
5.2 Avaliação de Trincas nas Juntas Soldadas no Casco do Vaso.....	35
5.2.1 Probabilidade de Detecção de Diferentes Técnicas de Inspeção.....	35
6. Conclusões.....	39
7. Sugestões e Trabalhos futuros.....	40
8. Referências Bibliográficas.....	41
9. APÊNDICE A.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Procedimento de Seleção da INI (DNV-RP-G103).	7
Figura 2: Processo Decisório de Alto Nível (DNV-RP-G103).	8
Figura 3: Diagrama de Execução do Método de Monte Carlo. (Adaptado de Donatelli, 2005)	15
Figura 4: Malha de Pontos de Medição de Espessura, BWO Shepherd - Mitsui Babcock, HOIS Seminar, 2000.	16
Figura 5: Probabilidade de Detecção de Diferentes Técnicas de Inspeção (Zerbst, 2005).	18
Figura 6: POD da Técnica de ACFM (Carneval, 2007).	21
Figura 7: Diagrama esquemático do vaso separador.	23
Figura 8: Identificação de Descontinuidades nos Vasos Separadores A e B.	23
Figura 9: Desenho Esquemático das Regiões de Inspeção.	24
Figura 10: Malha de pontos de medição de espessura por ultra-som.	25
Figura 11: Detecção de Descontinuidades Tipo Perda de Espessura	26
Figura 12: Rotina dinâmica para a avaliação da probabilidade de falha do equipamento.	27
Figura 13: Distribuição Normal da Ocorrência de Descontinuidades Volumétricas Indicadas nos Vasos A e B.	30
Figura 14: Posicionamento Aleatório de Descontinuidades no Domínio de Inspeção e Malha de Pontos de Medição de Espessura.	31
Figura 15: Avaliação das Descontinuidades para a Tensão Circunferencial de Membrana do Casco do Vaso, segundo API-579	32
Figura 16: Avaliação das Descontinuidades para a Tensão Longitudinal de Membrana do Casco do Vaso.	32
Figura 17: Características Dimensionais de Descontinuidades do Tipo Perda de Espessura Localizada. API-579, Parte 5.	33
Figura 18: Diagrama FAD para Avaliação de Descontinuidades tipo Trinca.	33
Figura 19: POD e POF em função do Espaçamento da Malha de Inspeção.	34
Figura 20: Curva de Probabilidade de Detecção de Trincas pela Técnica de Phased Array, ...	35

Figura 21: Curva de Probabilidade de Detecção de Trincas pela Técnica de TOFD, (Adaptado de Carneval, 2007).....	36
Figura 22: Curva de Probabilidade de Detecção de Trincas pela Técnica de ACFM, (Adaptado de Carneval, 2007).....	36
Figura 23: Probabilidade de Detecção de Trincas em Função de sua Altura para Diferentes Técnicas de Inspeção. (Adaptado de Carneval, 2007).....	38
Figura 24: Dimensões gerais da perda localizada de espessura em um casco cilíndrico.	43
Figura 25: Dimensões das descontinuidades tipo perda localizada de espessura.....	44
Figura 26: Curva de avaliação da descontinuidade.	46
Figura 27: Fator de Folias.....	47
Figura 28: Dimensões gerais da perda localizada de espessura em um casco cilíndrico.	48
Figura 29: Curvas de avaliação da descontinuidade.....	49
Figura 30: Diagrama de avaliação de falha.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Inspeção (DNV-RP-G103).	10
Tabela 2: Aspectos de Avaliação de cada Tipo de Inspeção (DNV-RP-G103).....	11
Tabela 3: Categorias de Efetividade de Inspeção segundo API-581.....	17
Tabela 4: Identificação e Dimensões de Trincas de Fadiga. (Carneval, 2007).	19
Tabela 5: Identificação e Dimensionamento de descontinuidades de Diferentes Técnicas de Inspeção (Carneval, 2007).....	20
Tabela 6: Dimensão das Descontinuidades para Alta Probabilidade de Detecção.....	20
Tabela 7: Características do equipamento.	22
Tabela 8: Relação das descontinuidades identificadas.	23
Tabela 9: Dimensões das Descontinuidades Volumétricas Indicadas nos Vasos Separadores.	29
Tabela 10: Avaliação do Espaçamento da Malha de Pontos de Medição de Espessura por Ultra-Som.	34
Tabela 12: Média e Desvio Padrão da Distribuição Normal das Curvas POD.	37
Tabela 13: Tabela para a construção das curvas de TSF.	50
Tabela 14: Fatores de Segurança Conforme Categorias de Probabilidade de Falha, Trincas não Profundas.	51
Tabela 15: Fatores de Segurança Conforme Categorias de Probabilidade de Falha, Trincas Profundas.	52

RESUMO

O presente trabalho avalia a viabilidade de execução de técnicas não intrusivas de inspeção em dois vasos separadores de produção. Para tanto a guia de inspeção não intrusiva DNV-RP-G103 foi seguida para a realização do planejamento de inspeção dos equipamentos. Foi realizado um estudo dos mecanismos de deterioração atuantes a partir dos relatórios de inspeção visual interna.

A efetividade do plano de inspeção é avaliada pelo uso de um modelo matemático que utiliza a Simulação de Monte Carlo para a avaliação da probabilidade de detecção das descontinuidades e determinação da probabilidade de falha do equipamento antes e após a realização da inspeção.

Estudos de probabilidade de detecção de trincas de fadiga por técnicas de inspeção não intrusiva realizados são abordados na revisão bibliográfica. Esses dados são de relevância para a obtenção dos parâmetros necessários para avaliar a efetividade das técnicas de inspeção proposta.

ABSTRACT

The present work evaluates the viability of non invasive inspection technique of two production pressure vessel. The non invasive inspection guide DNV-RP-G103 was applied for equipment inspection plan realization. The equipment aging process study was done according to the inspections reports of internal visual inspection previously done.

The plan inspection affectivity is evaluated with a mathematic model that applies The Monte Carlo Simulation for calculate the discontinuity probability detection and determine the equipment failure probability before and after inspection realization.

Detection probability study of fatigue cracks by non invasive techniques is revised in bibliographic review. This data are pertinent for obtain the needed parameters to reach the required effectiveness of inspection technique planned.

1. Introdução.

A inspeção não intrusiva é a avaliação da integridade do equipamento pela utilização de técnicas de inspeção que possam ser executadas com o equipamento em operação.

Os equipamentos estáticos utilizados na indústria de petróleo estão sujeitos aos planos de inspeção, que periodicamente os submetem à inspeção interna para a avaliação de sua integridade estrutural e para que assim os mesmos operem em níveis aceitáveis de probabilidade de falha. A indústria e entidades reguladoras apontam a inspeção interna como necessária para garantir a operação segura do equipamento.

Com o desenvolvimento das técnicas de inspeção, tornou-se interessante para as companhias de petróleo o estudo da viabilidade de realização da inspeção não intrusiva substituindo a inspeção interna. Esses estudos teriam o objetivo de definir quando a inspeção não intrusiva poderia ou não ser aplicada, qual seria a forma apropriada de execução, e avaliar se sua aplicação é suficiente para garantir a integridade do equipamento.

A principal vantagem da aplicação da inspeção não intrusiva em um equipamento é a possibilidade de avaliação da integridade estrutural sem parar a produção. Assim, se evitaria perdas financeiras por lucros cessantes daqueles equipamentos em que a inspeção não intrusiva poderia ser aplicada.

As limitações físicas de uma planta *offshore* impõem a necessidade do uso de estruturas de apoio para a adequação da área de trabalho para abertura do equipamento. Com o uso racional da inspeção não intrusiva, estes recursos poderiam ser direcionados aos equipamentos críticos da unidade identificados por meio de um mapeamento de risco, aumentando assim a segurança de operação da unidade. Os processos de parada e abertura de equipamentos são demorados e mobilizam recurso técnico e pessoal qualificado para que esta atividade seja feita de forma segura. Além de que a entrada de um inspetor no equipamento é uma atividade de risco e deveria ser evitada sempre que possível. Mesmo que seja inevitável a abertura do equipamento, o tempo de parada pode ser abreviado pela realização de um planejamento de atividades baseado nas informações providas pela inspeção não intrusiva. Os locais e extensão do reparo, definição de estruturas internas e de pessoal qualificado para a realização das atividades de manutenção podem ser conhecidos previamente, evitando-se imprevistos na abertura do equipamento.

São diversas as técnicas de inspeção não intrusivas disponíveis para aplicação, como a medição de espessura por ultra-som, ultra-som convencional pulso-eco, ultra-som automatizado (*TOFD* e *Phased Array*), termografia e ensaios radiográficos (ASM Handbook V.17). Entretanto, o custo de aplicação destas técnicas de inspeção são maiores em relação às técnicas de inspeção convencionais, assim como o número de profissionais qualificados disponíveis no mercado para a realização das mesmas são muito menores. Quanto à probabilidade de detecção de descontinuidades, todas elas apresentam vantagens e limitações que dependem do tipo de descontinuidade a ser identificada e dimensionada. O conhecimento do mecanismo de deterioração ativo no equipamento é necessário para que o planejamento de da técnica de inspeção seja adequado.

O presente trabalho consiste em um estudo da efetividade de um plano de inspeção não intrusiva elaborado conforme a guia DNV-RP-G103. É utilizada a Simulação de Monte Carlo para a criação de um modelo computacional de estudo da integridade estrutural de dois vasos de pressão. Este modelo considera fatores de projeto obtido do prontuário, e das descontinuidades presentes conforme as informações contidas nos relatórios de inspeções. Através desta metodologia de estudo é possível concluir que a inspeção não intrusiva é capaz de avaliar a integridade estrutural do equipamento.

2. Objetivo.

Estudo da aplicabilidade da guia de inspeção não intrusiva DNV-RP-G103 na avaliação da viabilidade, planejamento e validação de resultados de inspeção de vasos separadores de produção.

Construir um modelo numérico que utilize a Simulação de Monte Carlo para planejamento e avaliação de procedimentos de inspeção não intrusiva.

Estudar a viabilidade técnica da realização da inspeção não intrusiva substituindo a inspeção interna de equipamentos estáticos, através da comparação da probabilidade de detecção de descontinuidades.

Estudo da garantia da integridade estrutural pela avaliação da probabilidade de falha após inspeção.

2. Revisão Bibliográfica.

2.1. Avaliação da Integridade.

A prática da inspeção não intrusiva necessita de um elaborado planejamento para que os resultados da inspeção executados sejam representativos e que realmente garantam a segurança de operação do equipamento. Para o adequado planejamento da inspeção deve ser feito um amplo trabalho de caracterização do equipamento por meio da consulta do prontuário e seu histórico de operação. No prontuário, encontram-se os desenhos onde podem ser identificadas as diversas regiões do equipamento, presença de elementos internos e barreiras externas que limitam a extensão da inspeção. No projeto do equipamento é obtida sua finalidade, os fluídos a que ele será exposto, os materiais utilizados para sua fabricação, suas dimensões, espessuras mínimas de operação e sobre espessura de corrosão. Ainda, os parâmetros de operação – temperatura de operação e pressão de trabalho devem ser obtidas durante a avaliação da integridade do equipamento.

Os desenhos permitem a identificação de elementos construtivos como soldas, reforços, selas, bocas de visita e conexões. A presença de isolantes térmicos externos ou revestimentos internos como refratários devem ser observados.

Informações de operação devem ser disponibilizadas pelo histórico de operação do equipamento - tipos de fluídos presentes, presença de contaminantes e operação momentânea fora dos parâmetros de projeto.

A existência de um projeto de alteração ou reparo assim como suas razões deve ser considerada. O tipo de descontinuidade de dimensão não aceitável que resultou no reparo e o mecanismo de deterioração que a gerou são importantes informações que direcionam a escolha da técnica de inspeção e a região onde deve ser executada, garantindo a eficácia da inspeção não intrusiva.

A existência de inspeções anteriores e a relevância das informações contidas em seus relatórios são de grande importância na identificação das diferentes regiões de deterioração do equipamento. Ainda, o monitoramento das dimensões das descontinuidades presentes promove o conhecimento da taxa de deterioração e avaliação da agressividade do mecanismo de deterioração.

A experiência obtida por inspeções realizadas em equipamentos similares são úteis na caracterização dos mecanismos de deterioração presentes no equipamento em questão.

3.2. Inspeção Baseada em Risco.

A Metodologia ou programa de Inspeção Baseada em Risco (IBR) tem por objetivo definir a frequência e extensão da inspeção baseado, sobretudo, na avaliação da probabilidade e consequência de falha no equipamento. A grande vantagem desta metodologia é a obtenção do direcionamento dos recursos de inspeção àqueles equipamentos da unidade de maior risco de operação. Desta forma, a inspeção passa a diminuir a probabilidade de falha em uma unidade e não apenas identificar uma deterioração em tal equipamento.

A IBR é uma metodologia integrada que evidencia o risco na tomada de decisão de inspeção e manutenção. Ela é considerada “integrada” porque é um processo qualitativo e quantitativo de combinar sistematicamente tanto a probabilidade quanto a consequência da falha para estabelecer uma lista priorizada de equipamento usando o risco total de uma base (Lafraia, 2001).

A prática recomendada de Inspeção Baseada em Risco é encontrada no API-580 e API-581 que foi feita pelo *American Petroleum Institute* (API) por encomenda de companhias petrolíferas patrocinadoras do projeto (Lafraia, 2001).

3.3. Guia de Inspeção Não Intrusiva.

O Clube HOIS (*Harwell Offshore Inspection R&D Service*), no ano de 2000, iniciou um projeto de estudos para o desenvolvimento da guia de inspeção não intrusiva, a DNV-RP-G103. Basicamente, esta guia tem por objetivo avaliar se é possível a prática da inspeção não intrusiva, identificar quais são as características que as técnicas de inspeção realizadas devem atender e validação dos resultados obtidos.

3.3.1. Guia do Processo Decisório.

O processo decisório encontrado nas guias de inspeção não intrusiva visa avaliar se é possível e oportuna a execução da inspeção baseada nas informações obtidas na etapa de avaliação da integridade e informações de características intrínsecas do equipamento. O

processo decisório é dividido em duas etapas: seleção de regiões e processo decisório de alto nível.

A etapa chamada seleção de regiões descarta os equipamentos que obviamente não são adequados a serem submetidos à inspeção não intrusiva. Por exemplo, o equipamento deve ser acessível do lado externo e sua temperatura externa deve ser baixa o suficiente para que permitam o uso dos sensores da técnica de inspeção escolhida. A existência de isolante térmico pode inviabilizar a prática da inspeção não intrusiva quando este não puder ser removido temporariamente ou não puder ser substituído.

O prontuário, relatórios de inspeção anteriores, e histórico de operação do equipamento devem ser consultados para a realização da inspeção não intrusiva.

Inspeções realizadas em equipamentos similares submetidos às mesmas condições operacionais podem ser consideradas no planejamento da inspeção não intrusiva do equipamento.

Caso o equipamento seja aberto regularmente por razões alheias à inspeção, como por exemplo, limpeza interna, não há razões para a prática de inspeção não intrusiva quando esta tem por objetivo adiar a abertura do equipamento. A Figura 1 apresenta o diagrama do processo de seleção de regiões.

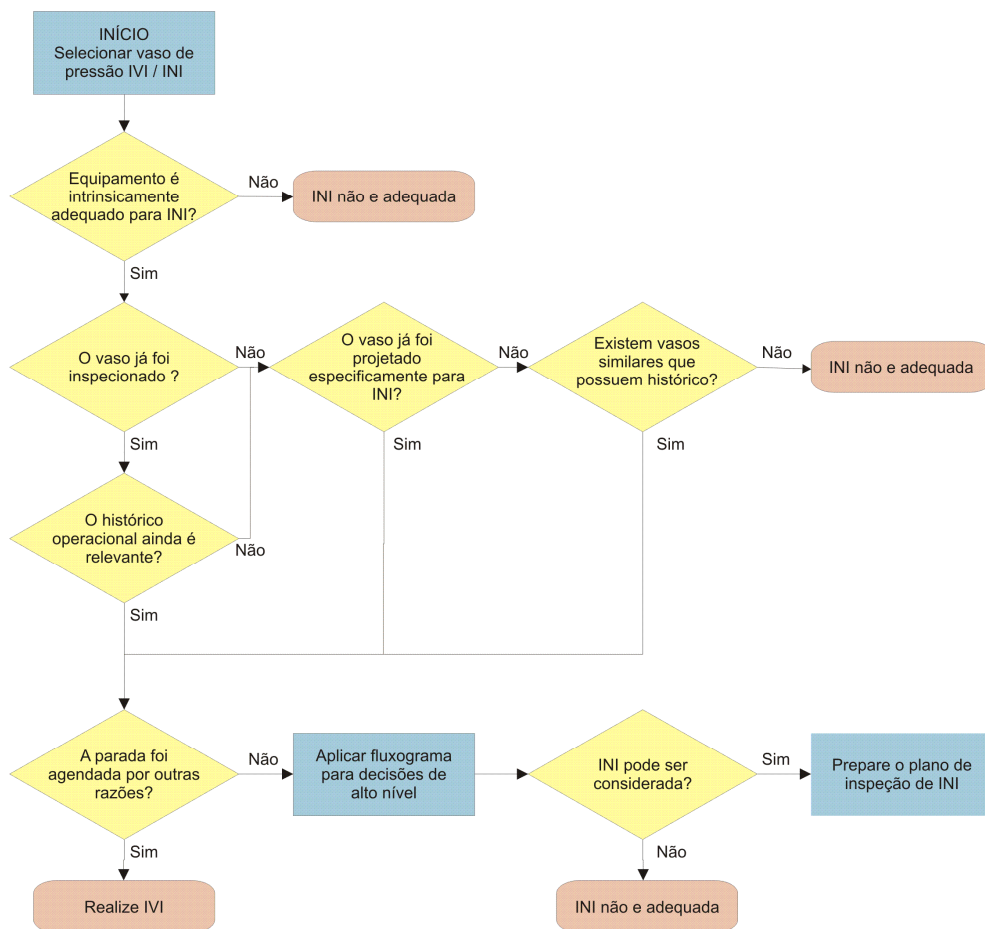


Figura 1: Procedimento de Seleção da INI (DNV-RP-G103).

O processo decisório de alto nível verifica a confiabilidade das informações disponíveis sobre o equipamento, mecanismos de deterioração presentes, taxa de degradação e resistência do equipamento ao mecanismo de deterioração ativo.

A existência do monitoramento das discontinuidades identificadas aumenta a confiabilidade sobre a severidade e a taxa do mecanismo de deterioração. A Figura 2 apresenta o diagrama do processo decisório de alto nível.

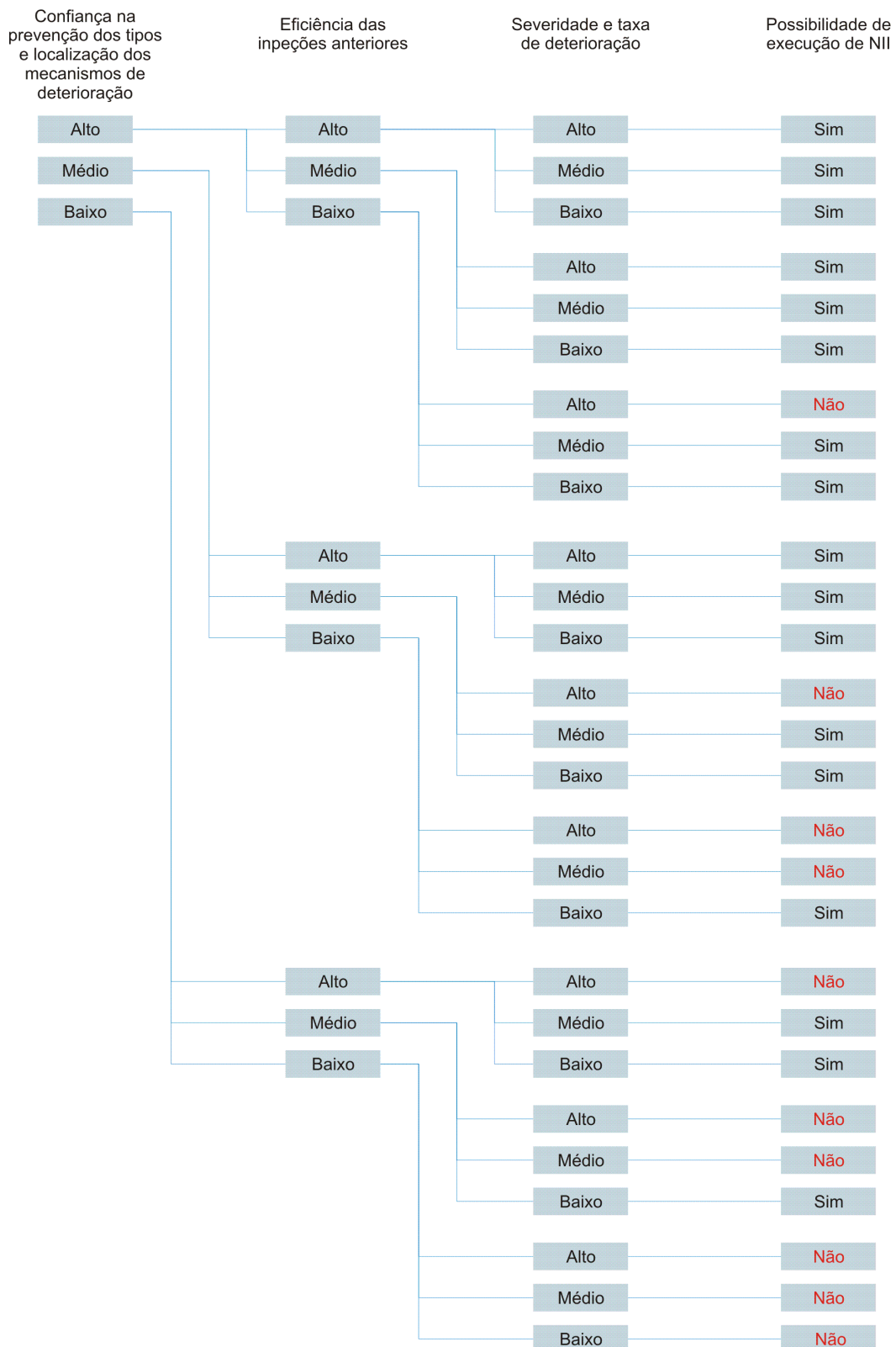


Figura 2: Processo Decisório de Alto Nível (DNV-RP-G103).

3.3.2. Planejamento da Inspeção.

A inspeção não intrusiva deve avaliar a integridade estrutural de forma equivalente a inspeção visual interna do equipamento. Para tanto, a probabilidade de detecção da técnica de inspeção escolhida junto à cobertura definida e o intervalo de inspeção devem garantir a operação segura do equipamento. Para o planejamento da inspeção é necessária avaliação das técnicas de ensaios não destrutivos disponíveis, materiais de construção do equipamento e sua integridade estrutural, assim como características do processo e mecanismos de deterioração ativos. Promovendo desta forma, a definição correta das técnicas de inspeção a serem realizadas e os critérios de aceitação de seus resultados.

Para o planejamento da inspeção deve ser feita a subdivisão do equipamento em regiões. Esta divisão depende do mecanismo de deterioração atuante, geometria interna, material, fluido de contato, etc. Consequentemente, diferentes serão as técnicas de inspeção definidas a cada uma destas regiões assim como a cobertura que poderá ser completa ou por amostragem. A eficácia do planejamento da inspeção não intrusiva depende da relevância das informações obtidas na etapa de avaliação de integridade. Uma vez que as regiões críticas e mecanismos de deterioração do equipamento estiverem bem definidos, as técnicas de inspeção serão direcionadas para estas regiões, maximizando-se a probabilidade de detecção de descontinuidades.

3.3.3. Realização da Inspeção.

A qualidade da execução da inspeção depende da disponibilidade dos recursos físicos e profissionais qualificados. A preparação da área próxima ao equipamento deve ser prevista para que o acesso às regiões de inspeção do equipamento seja adequado. Para tanto deve ser feita a construção de andaimes, sistema de iluminação auxiliar e remoção de isolamento térmico.

A execução da inspeção está sujeita a ocorrência de imprevistos durante sua realização. Estes devem ser imediatamente comunicados para que ações paliativas sejam tomadas prontamente e que assim seja garantido o resultado da inspeção. Exemplos de imprevistos que podem comprometer o resultado da inspeção são listados a seguir:

- Problemas de acesso à região a inspecionar.
- Isolamentos térmicos não removidos.
- Condição superficial inadequada para realização do ensaio.
- Baixa sensibilidade da técnica ou ruído excessivo devido a condições inconvenientes do material sob inspeção.
- Aparelhos com defeitos.
- Modificações no procedimento ou método empregado.

3.3.4. Avaliação da Inspeção.

A avaliação da inspeção tem por objetivo validar a relevância das informações obtidas na inspeção realizada. Isto significa verificar se a inspeção definida foi executada e se seu resultado é relevante. Os desvios identificados durante a execução da inspeção devem ser analisados, onde ações podem ser tomadas para a realização de inspeção adicional imediata ou através de monitoramento futuro.

A guia de inspeção DNV-RP-G103 distingue três tipos de inspeção os quais são apresentados na Tabela 1. A avaliação dos desvios é feita conforme aspectos metodológicos, de procedimento, de localização e cobertura conforme apresentado na Tabela 2. Esta avaliação também tem por objetivo quantificar o impacto dos desvios na execução da inspeção e sua efetividade.

Tabela 1: Tipos de Inspeção (DNV-RP-G103).

TIPO A	Inspeção requerida para confirmar a não existência do mecanismo de degradação.
TIPO B	Inspeção requerida para confirmar as definições de risco de corrosão previstas.
TIPO C	Inspeção requerida para confirmar inexistência de descontinuidades com tamanho crítico.

Tabela 2: Aspectos de Avaliação de cada Tipo de Inspeção (DNV-RP-G103).

MÉTODO	A técnica de inspeção executada deve ter sensibilidade suficiente para detectar sinais de início de degradação para inspeção Tipo A. Para Inspeção Tipo B e C a técnica empregada deve ser capaz de dimensionar as descontinuidades para que assim uma avaliação de adequação ao uso possa ser realizada.
PROCEDIMENTO	Para inspeção Tipo A, qualquer desvio no procedimento pode ser admitido, desde que não haja influência negativa na probabilidade de detecção da descontinuidade. Caso isto ocorra a inspeção deve ser reprovada.
LOCALIZAÇÃO	Se por problemas de acesso, a inspeção do Tipo A, B ou C for executada em uma região diferente da especificada, porém, for sujeita a condições similares, esta inspeção alternativa é validada. Caso contrário, esta deve ser reprovada ou avaliada.
COBERTURA	A cobertura da inspeção Tipo A é definida para a obtenção suficiente de amostras das regiões críticas do vaso para garantir nenhuma degradação ativa. Pequenos desvios são toleráveis. As inspeções Tipo C demandam de grande cobertura, tornando possíveis desvios de mais difícil admissão.

Quando desvios forem identificados na inspeção as seguintes ações podem ser tomadas:

- Repetição dos itens de inspeção relacionados às não conformidades.
- Realizar inspeção visual interna.
- Executar novamente total ou parcialmente os procedimentos da guia de inspeção.
- Executar técnica de inspeção alternativa.
- Executar monitoramento periódico da espessura de parede da área localizada.
- Dedicar esforços em mostrar que o processo está sob controle e as condições que levam ao processo de corrosão intensivo não estão presentes.

3.3.5. Intervalo da Inspeção.

Existem duas abordagens que podem ser aplicadas para demonstrar que a inspeção realizada pode ser considerada aceitável; a primeira é pela comparação com a inspeção visual interna, a segunda, pela avaliação estatística quantitativa ou semi quantitativa da probabilidade de falha (VERITAS, 2007).

3.3.5.1. Intervalo de Inspeção Baseado na Inspeção Intrusiva.

O intervalo de inspeção interna, relativo ao da inspeção intrusiva é obtido pela multiplicação de fatores que representam a efetividade da inspeção realizada, isto é, a probabilidade de detecção de descontinuidades e cobertura da área exposta ao mecanismo de deterioração.

$$\text{Intervalo}_{\text{INI}} = \text{RF}_{\text{qualidade}} \times \text{RF}_{\text{cobertura}} \times \text{Intervalo}_{\text{IVI}}$$

Onde **Intervalo_{INI}** é o intervalo da inspeção não intrusiva, **RF_{qualidade}** é o fator que depende da probabilidade de detecção da técnica aplicada, **RF_{cobertura}** é o fator que depende da cobertura de realização da técnica sobre a área de interesse, **Intervalo_{IVI}** é o intervalo da inspeção visual interna.

A determinação dos fatores de efetividade da inspeção será feita conforme as recomendações do guia quando for apontada uma não conformidade pela inspeção não intrusiva. Caso não ocorram não conformidades, estes fatores de efetividade terão o valor unitário, logo o intervalo da inspeção não intrusiva será equivalente ao da inspeção intrusiva.

Quando há não conformidades, os fatores de qualidade e cobertura podem diminuir dependendo respectivamente da probabilidade de detecção da técnica empregada e da relação entre a área inspecionada e a área de atividade de deterioração (VERITAS, 2007).

3.3.5.2. Intervalo de Inspeção Baseado na Análise de Probabilidade e na Avaliação da Integridade Estrutural.

O cálculo da vida residual, que define o intervalo de inspeção do equipamento pode ser feito baseado nas recomendações para adequação ao uso encontrado nos documentos API-579 e BS-7910. Desta forma o tamanho tolerável de descontinuidade pode ser encontrado junto a uma avaliação estatística da probabilidade de detecção da técnica de inspeção realizada sobre toda ou parte da área de interesse, permitindo encontrar a probabilidade de falha do equipamento.

Aliado as informações de corrosão e inspeção, a avaliação da Integridade estrutural torna possível determinar a probabilidade de existência de descontinuidades não identificadas durante a inspeção que comprometam a integridade estrutural do equipamento. Isto depende, entre outros fatores, do tamanho admissível de descontinuidade (definido por ferramentas de adequação ao uso) e da dimensão da descontinuidade que pode não ser identificada pela técnica de inspeção (VERITAS, 2007).

3.4. Simulação de Monte Carlo.

3.4.1. Definição.

A simulação de Monte Carlo é um método de avaliação iterativa de um modelo determinístico usando variáveis geradas por números aleatórios. Este método é frequentemente usado quando o modelo é complexo, não linear, ou envolve vários parâmetros não confiáveis.

Os matemáticos Enrico Fermi John Von Neumann e Stanislaw Ulam são considerados os principais autores da técnica de simulação de Monte Carlo. A técnica foi inicialmente aplicada no estudo da difusão de nêutrons no Projeto Manhattan durante a Segunda Guerra Mundial.

Ao contrário dos métodos probabilísticos, não se espera a obtenção de uma resposta exata da solução, porém o erro é facilmente reduzido pelo aumento do número de iterações. Uma simulação tipicamente excede o número de 10000 avaliações do modelo possibilitando que o erro atinja valores aceitáveis.

As variáveis aleatórias são representadas por funções de densidade de probabilidade (PDF), que por sua vez são obtidas de dados experimentais. A Figura 3 apresenta um diagrama de funcionamento da Simulação de Monte Carlo, com a múltipla avaliação de um modelo determinístico. Para cada avaliação, as variáveis são geradas por números aleatórios que dependem dos parâmetros de funções de distribuição estatísticas.

A Simulação de Monte Carlo é um dos vários métodos para análise da propagação de incertezas, onde a vantagem é determinar como variações aleatórias, falta de conhecimento, ou erros afetam a sensibilidade de desempenho, ou confiabilidade do sistema que está sendo modelado. O método de Monte Carlo é categorizado como um método de amostragem porque a entrada de dados é aleatoriamente gerada a partir de distribuições de probabilidades para simular o processo de amostragem a partir de uma população atual.

Os dados gerados a partir das simulações podem ser representados como distribuições de probabilidades, histogramas, ou convertidos para barras de erros, previsão de confiabilidade, zonas de tolerância e intervalos de confiança.

As técnicas de Monte Carlo são amplamente utilizadas na Engenharia de Avaliações, no estudo de cenários probabilísticos, na avaliação de empreendimentos imobiliários e

industrial. A simulação de Monte Carlo pode ser usada para examinar diferentes políticas de manutenção, soluções de projetos, sobressalentes necessários e diversos outros parâmetros, que afetam a confiabilidade, disponibilidade ou outra medida de eficácia (Lafraia, 2001).

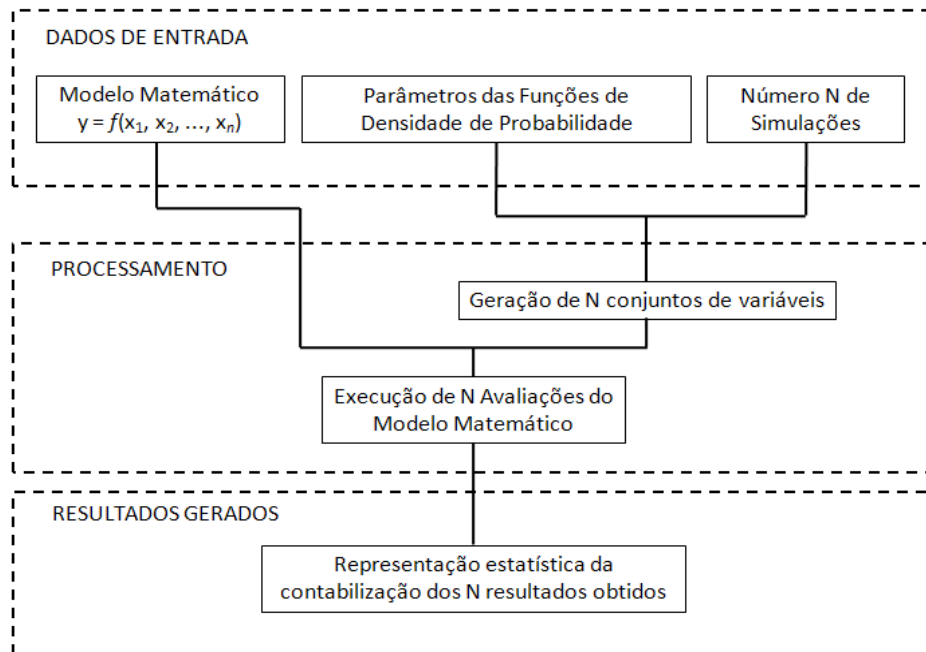


Figura 3: Diagrama de Execução do Método de Monte Carlo. (Adaptado de Donatelli, 2005)

3.4.2. Avaliação da Probabilidade de Detecção de Descontinuidades com Uso do Método de Monte Carlo.

A simulação de Monte Carlo pode ser utilizada para avaliar a efetividade de um procedimento de inspeção. Por exemplo, pode ser avaliada a efetividade de inspeção de um vaso de pressão sujeito a perda de espessura localizada.

Caracterizado o mecanismo de deterioração, é proposto um plano de inspeção de medição de espessura por ultra-som para localizar tais descontinuidades. É então proposta a marcação de uma malha de pontos de medição de espessura na região de interesse do equipamento conforme apresentado na Figura 4.



Figura 4: Malha de Pontos de Medição de Espessura, BWO Shepherd - Mitsui Babcock, HOIS Seminar, 2000.

Na região exposta ao processo corrosivo é considerada a malha de pontos de realização de medição de espessura. A Simulação de Monte Carlo é usada para calcular a probabilidade de detecção de descontinuidades da inspeção proposta.

Foi construído um aplicativo numérico que simula a incidência aleatória de descontinuidade sobre um domínio. Em cada iteração é verificado se a posição da incidência da descontinuidade coincide ou não com um ponto de medição de espessura, e se o tamanho da descontinuidade permite que o mesmo seja detectado. A probabilidade de detecção é a razão entre números de descontinuidades que “coincidiram” com algum ponto de medição de espessura e o número total de iterações.

A probabilidade de detecção obtida dependerá do espaçamento da malha de pontos de medição de espessura, do diâmetro do feixe de ultra-som e das dimensões das descontinuidades que são representadas por histogramas obtidos de dados experimentais de inspeções anteriores do equipamento ou equipamentos similares.

A eficiência do plano de inspeção pode ser avaliada pela probabilidade de detecção que se torna mais representativa com o aumento do número de iterações. Ainda, pode ser considerada em tal modelo a existência de regiões de impossibilidade de medição, como nas selas de suporte do equipamento ou regiões não acessíveis.

3.5. Probabilidade de Detecção das Técnicas de Inspeção.

A efetividade de uma técnica de inspeção é a capacidade de detecção e avaliação da integridade estrutural pela identificação dos tipos de discontinuidades oriundas do mecanismo de deterioração. A efetividade de uma técnica de inspeção depende da probabilidade de detecção (POD) e extensão da realização da técnica na região sujeita a deterioração. A Tabela 3 apresenta a divisão das categorias de efetividade de inspeção segundo o API-581.

Tabela 3: Categorias de Efetividade de Inspeção segundo API-581.

Categoria de Efetividade	Exemplo para Corrosão Generalizada
Alta Efetividade	O método identifica corretamente a deterioração antecipada em serviço em 90% dos casos. Avaliação da corrosão generalizada por inspeção visual interna aliada a medição de espessura por ultra-som.
Usualmente Efetivo	O método identifica corretamente a deterioração antecipada em serviço em 70% dos casos. Avaliação da corrosão generalizada por inspeção visual interna parcial aliada com medição de espessura por ultra-som.
Razoavelmente Efetivo	O método identifica corretamente o estado atual de deterioração em 50% das vezes. Avaliação de corrosão generalizada por medição de espessura por ultra-som pelo lado externo.
Pouco Efetivo	O método identifica corretamente o estado atual de deterioração em 40% das vezes. Avaliação da corrosão generalizada por martelamento.
Não Efetivo	O método identifica corretamente o estado atual de deterioração em 33% das vezes. Avaliação da corrosão generalizada interna por inspeção visual externa.

A efetividade de uma técnica de inspeção é função da probabilidade de detecção de descontinuidades (POD) e da cobertura de realização da inspeção (que é relação entre a área inspecionada e a área sujeita ao mecanismo de deterioração). A probabilidade de detecção (POD) pode ser expressa por uma Função de Densidade Probabilidade (PDF), que consiste na probabilidade de detecção acumulativa em função da dimensão da descontinuidade. Quando curvas POD são plotadas em um mesmo gráfico é possível comparar a efetividade de diferentes técnicas de inspeção, como é apresentado na Figura 5.

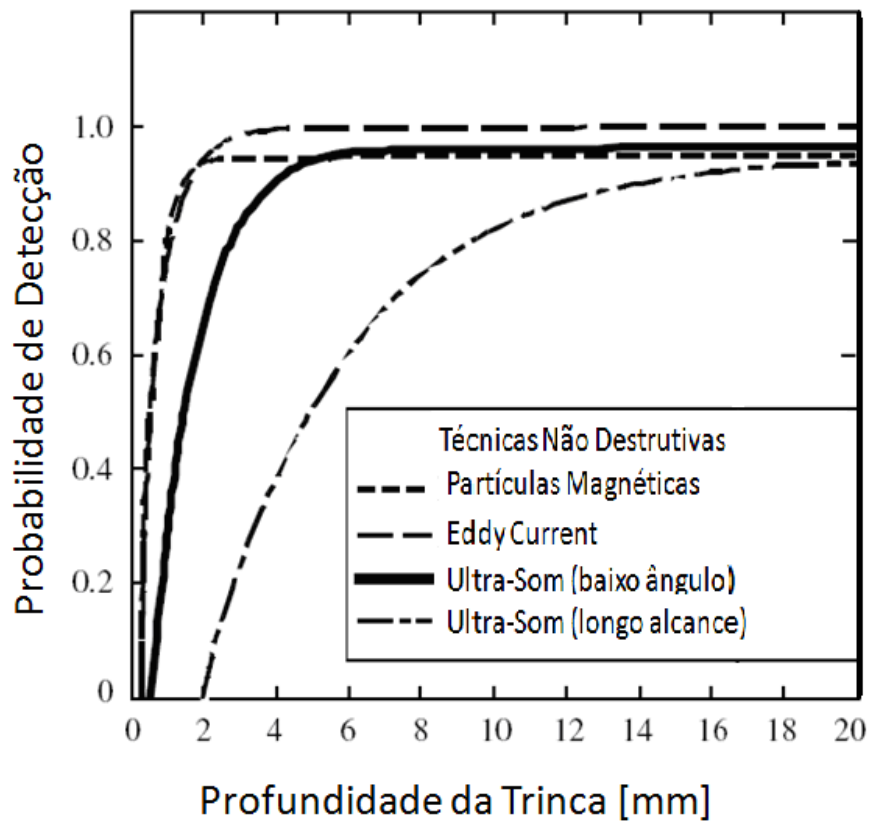


Figura 5: Probabilidade de Detecção de Diferentes Técnicas de Inspeção (Zerbst, 2005).

Trabalho realizado por (Carneval, 2007) avalia a efetividade de diferentes técnicas de inspeção na detecção e dimensionamento de trincas de fadiga. O objetivo daquele trabalho foi permitir a comparação das técnicas de inspeção intrusiva como ACFM (*Alternating Current Field Measurement*) e PM (Partículas Magnéticas) com as não intrusivas *Phased Array* e TOFD (*Time of Flight Diffraction*).

O estudo realizado consistiu na execução das diferentes técnicas de inspeção em juntas soldadas em placas de 12,5 mm de espessura contendo trincas de fadiga. Foram estudadas 22 trincas de fadiga com comprimentos entre 10.1 e 144.1, com altura entre 0.9 e 10.2 mm. A

Tabela 4 apresenta a localização e identificação das descontinuidades, onde i, c e p são respectivamente a posição, comprimento e altura da trinca de fadiga.

Tabela 4: Identificação e Dimensões de Trincas de Fadiga. (Carneval, 2007).

Chapa	Descontinuidade	Lado da Trinca	Trinca Número	i (mm)	c (mm)	p (mm)
14	NE*	NE	1	0	0	0
16	NE	NE	2	0	0	0
26	NE	NE	3	0	0	0
9	3	A	4	215,4	27,9	0,9
9	2	A	5	164,4	30,5	1
25	1	A	6	219,4	10,1	1,1
22	1	A	7	154,6	20,7	1,2
19	1	B	8	145,8	39,4	2,3
21	1	A	9	93,1	86	2,5
11	1	A	10	137,8	58,1	2,9
18	1	B	11	125	25,7	3
22	2	B	12	140,2	48	3,5
23	2	B	13	211,2	49,5	4
24	1	B	14	213,8	45,9	4,5
17	1	A	15	140	73	5
13	1	B	16	240,3	78,7	6,1
9	1	B	17	159,1	76,6	6,4
12	1	A	18	80,7	74,9	6,8
15	1	A	19	149,1	92,8	7,5
8	1	A	20	154,6	96	7,5
20	1	B	21	118	84,1	7,8
10	1	A	22	141,6	144,1	10,2

*NE = não existente.

A técnica de *Phased Array* foi realizada com o instrumento do lado oposto da descontinuidade, a técnica de TOFD foi realizada com instrumento em ambos os lados, simulando desta forma o uso destas técnicas na inspeção não intrusiva de equipamentos.

Para comparação da efetividade de inspeção com as técnicas intrusivas foram realizadas as técnicas de Partículas Magnéticas e ACFM. Estas consistem em técnicas de maior efetividade em relação à técnica de inspeção visual para a detecção de descontinuidades planares. A Tabela 5 apresenta o resultado de identificação e dimensionamento das trincas de fadiga obtidas pela realização de diferentes técnicas de inspeção.

Tabela 5: Identificação e Dimensionamento de descontinuidades de Diferentes Técnicas de Inspeção (Carneval, 2007).

Trinca	Phased Array				TOFD			ACFM			Partículas Magnéticas		Radiografia	
	i	c	P	p1	i	c	p	i	c	p	i	c	i	c
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	F*	F	F	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	F	F	F	0	0	0	0
4	X**	X	X	X	X	X	X	211	15,4	0,5	215	45	X	X
5	X	X	X	X	X	X	X	163	19,6	0,8	X	X	X	X
6	X	X	X	X	217	70	1,8	219	22,2	0,4	0	0	X	X
7	X	X	X	X	X	X	X	175	16	0,3	175	19	X	X
8	170	24,8	2	2,1	X	X	X	147	45,1	1,6	146	28	X	X
9	116	52,8	3,7	5,1	37,5	116	4,5	136	33	1	140	40	X	X
10	149	42,6	3,8	5,4	130	60	4,1	153	26,1	1	155	20	155	27
11	X	X	X	X	X	X	X	127	30,7	0,9	130	16	X	X
12	141	21,5	3,5	5	121	39	4,8	141	43,4	1,8	155	35	X	X
13	212	50,4	2,6	3,6	X	X	X	217	56,4	1,5	215	30	X	X
14	215	30,8	2,8	3,6	213	52	1,5	218	27	1,8	220	40	X	X
15	160	21,6	4	5,2	4	149	4,1	117	110	0,8	162	7	X	X
16	248	56,1	3,2	4,1	240	72	4,7	247	62,6	2,4	250	66	257	31
17	155	38,2	2,8	3,1	172	59,3	3,7	160	32,4	0,7	195	10	X	X
18	102	51,5	3,8	5,6	94,2	52,5	5,2	86	66,3	4,4	140	40	114	26
19	154	77,7	3	3	153	74,5	6,2	155	72,5	4,5	155	80	169	67
20	147	81,3	3,1	5,2	157	76,6	5,4	166	81,5	6	165	77	173	60
21	119	68,9	3,6	3,8	116	66,5	3,6	147	56,2	4,4	125	60	147	35
22	147	49,1	1,8	3,8	170	80,5	11,9	140	67,9	6,3	140	120	173	87

*F = A técnica aplicada indicou descontinuidade não existente.

**X = A técnica não indicou a descontinuidade.

Durante a inspeção pela técnica de TOFD observou-se nos resultados do ensaio uma maior facilidade de detecção quando os cabeçotes eram posicionados no mesmo lado da abertura da trinca. (Carneval, 2007).

Com as inspeções realizadas com as diferentes técnicas de inspeção foi possível estimar as alturas mínimas de descontinuidades que correspondem à probabilidade de detecção (POD) de aproximadamente 95%. Os resultados obtidos são expressos na Tabela 6.

Tabela 6: Dimensão das Descontinuidades para Alta Probabilidade de Detecção.

	Phased Array	TOFD	ACFM	PM	RADIOGRAFIA
Altura [mm]	3.0 a 3.5	4.0 a 4.5	0 a 0.9	1.0 a 1.1	6.4 a 6.8

A técnica de ACFM obteve menores valores de comprimento e altura para POD para alta probabilidade de detecção. No entanto, foi a mais sujeita as indicações falsas (Carneval, 2007).

Com os resultados obtidos pela técnica de ACFM foi possível a obtenção da curva de probabilidade de detecção em função da altura da trinca. Conforme Figura 6.

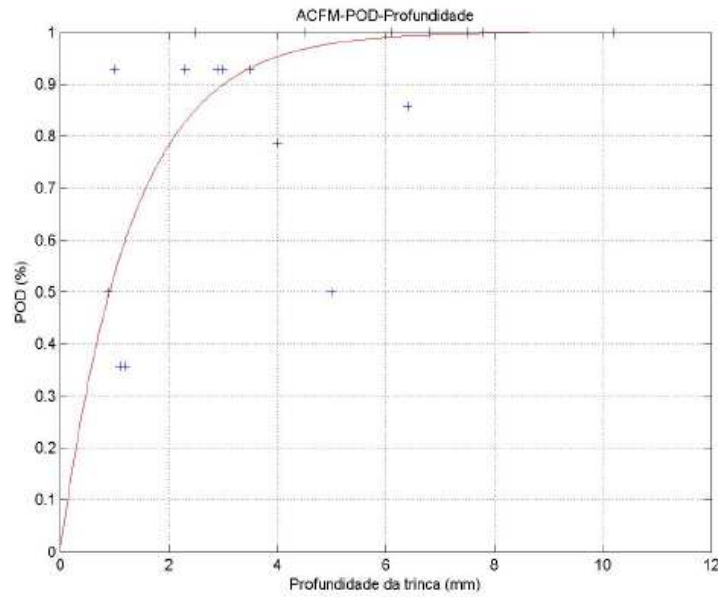


Figura 6: POD da Técnica de ACFM (Carneval, 2007).

4. Materiais e Métodos.

4.1. Características do Equipamento.

Os equipamentos objetos de estudo do presente trabalho são dois vasos separadores de produção. Ambos apresentam o mesmo projeto e foram expostos às mesmas condições operacionais, suas principais características são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Características do equipamento.

Vaso Separador A e B	
Norma de projeto:	ASME VIII DIV. 1
Fluido de trabalho:	Água, óleo e gás.
Classe de fluido:	Classe A
Categoria:	Categoria II
Fabricação:	1984
Temperatura de operação:	30-60 Celsius
Sobre espessura de corrosão:	3 mm.
Isolamento externo:	Não
Comprimento entre tangentes	6400 mm
Diâmetro interno	1830 mm
Espessura do Costado	25 mm
Pressão de projeto	1,56909 MPa (16 kgf/cm ²)
Pressão de operação	1,02971 MPa
Pressão de Teste hidrostático	2,35363 MPa (24 kgf/cm ²)

Na Figura 7 é apresentado um diagrama esquemático do equipamento no qual são identificadas suas estruturas, conexões e elementos internos.

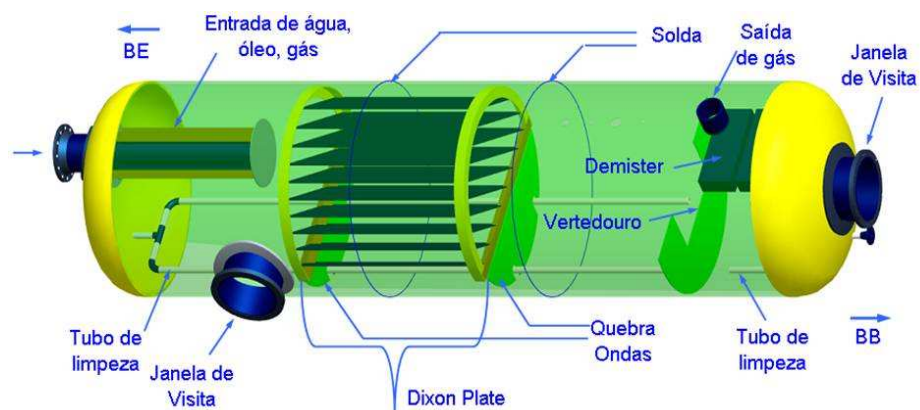


Figura 7: Diagrama esquemático do vaso separador.

4.2. Avaliação da Integridade.

Seguindo a guia para inspeção não intrusiva DNV-RP-G103 foi identificado nos vasos separadores A e B as descontinuidades discriminadas nos relatórios de inspeção interna realizados, conforme Figura 8 e Tabela 8.

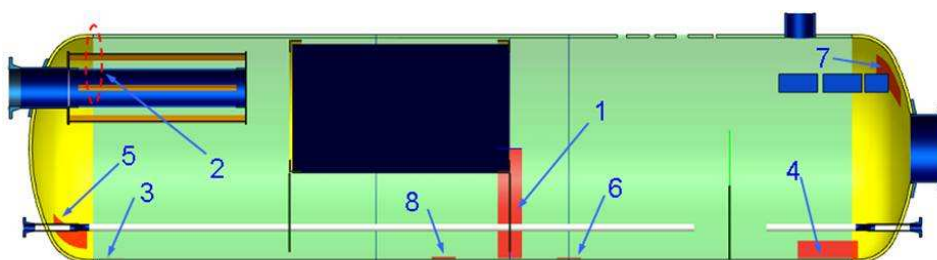


Figura 8: Identificação de Descontinuidades nos Vasos Separadores A e B.

Tabela 8: Relação das descontinuidades identificadas.

Identificação	Deterioração	Equipamento
1	Corrosão por fresta	A
2	Trinca na solda do casco	B
3	Alvéolo	A
4	Alvéolo	A
5	Desbaste	A
6	Alvéolo	A
7	Alvéolos múltiplos	B
8	Alvéolo	B

As trincas encontradas foram originadas durante o processo de fabricação, uma vez que, o histórico de operação do equipamento não aponta nenhum mecanismo de deterioração que produza descontinuidades do tipo trinca. Ainda, trincas não foram encontradas em nenhuma outra região senão a junta soldada. Portanto, o principal mecanismo de deterioração é a corrosão alveolar na região em contato com água no fundo do vaso.

4.3. Planejamento de Inspeção.

4.3.1. Inspeção da Região Inferior do Casco.

Com a avaliação de integridade realizada através da consulta dos relatórios de inspeção interna dos equipamentos foi identificado que o principal mecanismo de deterioração presente no equipamento é a corrosão alveolar no casco do vaso, na região do casco em contato com a água salgada. Esta região é identificada pela Região 1 da Figura 9.

As duas trincas citadas no relatório de inspeção foram associadas ao processo de fabricação do vaso, uma vez que não existem mecanismos de deterioração ativos que possam gerar descontinuidades tipo trinca. As trincas foram removidas por ação mecânica.

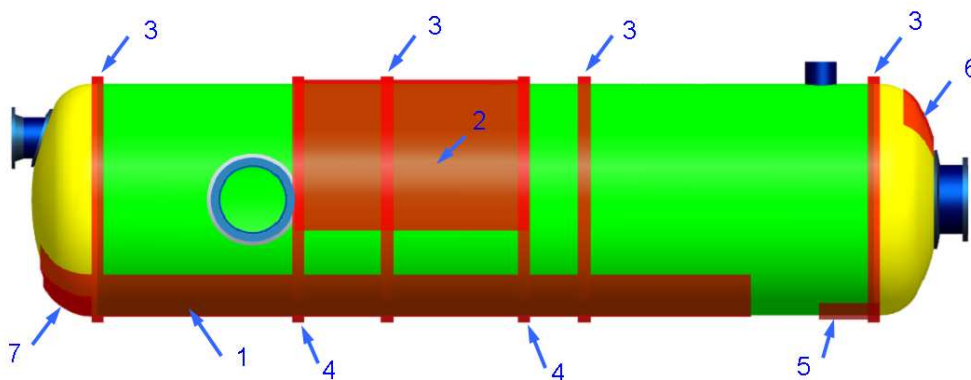


Figura 9: Desenho Esquemático das Regiões de Inspeção.

A técnica de inspeção definida para esta região é por a medição manual de espessura por ultra-som. A metodologia consiste na medição de espessura em diferentes pontos da região de interesse formando uma malha de pontos de medição de espessura conforme ilustração da Figura 10.

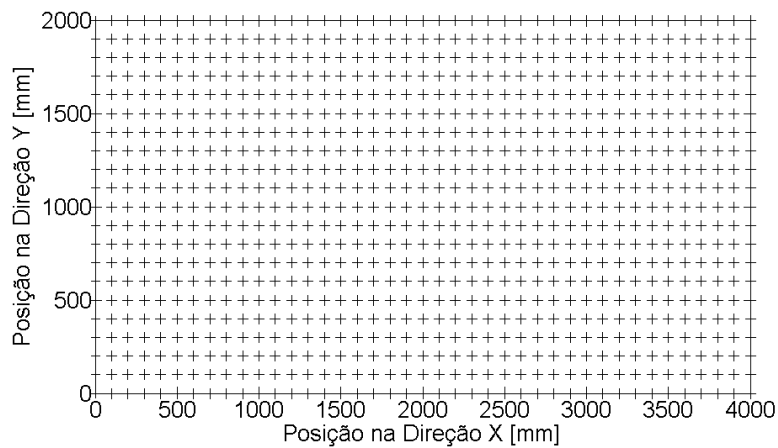


Figura 10: Malha de pontos de medição de espessura por ultra-som.

A simulação de Monte Carlo será usada para a determinação da probabilidade de detecção das descontinuidades para diferentes espaçamentos da malha de medição de espessura: 50 x 50, 100x100, 200x200 e 400x400 milímetros.

As dimensões de cada descontinuidade incidente serão obtidas por um gerador de números aleatórios que segue os valores das médias e desvios padrões das distribuições normais obtidas previamente da população de descontinuidades discriminadas nos relatórios de inspeção dos dois vasos separadores. A Simulação de Monte Carlo verifica, para todas as descontinuidades aleatórias geradas, se algum dos pontos de medição de espessura da malha de medição contém interferência geométrica com a descontinuidade em questão, conforme a Figura 11. Se houver interferência geométrica, a descontinuidade em questão será contabilizada como detectada, e a probabilidade de detecção será a razão entre o número de descontinuidades detectadas e o número total de descontinuidades aleatórias geradas pela Simulação de Monte Carlo.

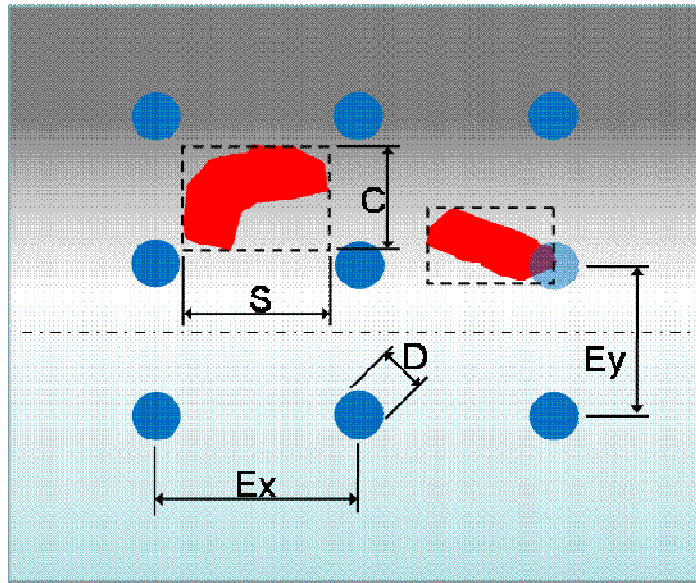


Figura 11: Detecção de Descontinuidades Tipo Perda de Espessura
Localizada com a Técnica de Medição de Espessura.

Através do Método de Monte Carlo é possível determinar a probabilidade de detecção das descontinuidades considerando a variabilidade dimensional da descontinuidade e o espaçamento da malha de medição de espessura. O objetivo é provar que a metodologia de inspeção proposta é eficaz na detecção de defeitos e assim comprovem a efetividade do plano de inspeção proposto.

Não apenas a probabilidade de detecção de descontinuidades pode ser avaliada com a utilização de modelos probabilísticos, mas também a evolução da probabilidade de falha do equipamento ao longo do tempo. Para tanto, é necessário o uso de um critério de aceitação de descontinuidade como os contidos no API-579 e das taxas de crescimento das descontinuidades. O apêndice A contém as equações do API-579 utilizadas na Simulação de Monte Carlo para avaliar se o tamanho das descontinuidades fictícias é admissível ou se este é maior que o tamanho crítico classificando-a como defeito.

Um diagrama da avaliação da probabilidade da falha no equipamento é apresentado na Figura 12. Uma vez alimentados por dados estatísticos de descontinuidades e defeitos encontrados em equipamentos similares, é possível a obtenção de previsões da probabilidade de falha do equipamento, assim como qual deve ser o período de inspeção adequado para garantir sua operação segura e confiável.

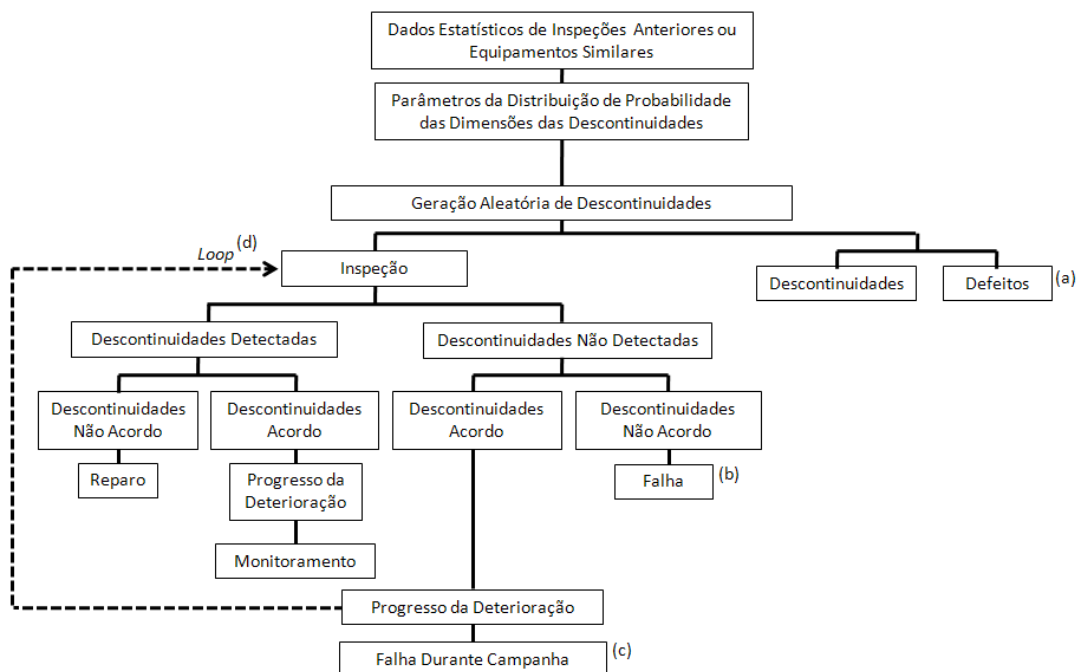


Figura 12: Rotina dinâmica para a avaliação da probabilidade de falha do equipamento.

- a) Número de defeitos antes da inspeção. A razão entre o número de defeitos, avaliados conforme API 579, e o número total de descontinuidades geradas, representam a probabilidade de falha do equipamento até o momento da realização da inspeção.
- b) A probabilidade de falha do equipamento após a inspeção é a razão entre o número de descontinuidades acima do tamanho crítico que não foram detectadas pela inspeção e o número total de descontinuidades geradas na Simulação de Monte Carlo.
- c) Parcela das descontinuidades fictícias que causam falha durante a campanha do equipamento após inspeção devido ao crescimento destas descontinuidades não detectadas até atingirem o tamanho crítico. A razão do número destas descontinuidades e o número total iterações é a probabilidade de falha durante campanha.
- d) Realização de uma segunda inspeção em outro momento. Desta forma é possível o estudo da influência do intervalo entre inspeções e da taxa de deterioração na probabilidade de detecção de descontinuidades e na probabilidade de falha do equipamento.

4.3.2. Inspeção das Juntas soldadas.

Será realizado o estudo da efetividade da inspeção utilizando as técnicas de ultra-som automatizado *Phased Array* e TOFD (*Time of Flight Diffraction*). Estas técnicas permitem identificar e dimensionar descontinuidades encontradas nas juntas soldadas: falta de fusão e penetração, trincas, inclusão de escória, erosão e corrosão.

A partir dos resultados obtidos por **(Carneval, 2007)** serão definidos os parâmetros das funções de distribuição de probabilidade acumulada de detecção de descontinuidades das técnicas de inspeção.

5. Resultados e Discussões.

5.1. Avaliação do Fundo do Casco Exposto a Redução de Espessura Localizada.

5.1.1. Histograma das Dimensões das Descontinuidades.

As descontinuidades do tipo redução de espessura localizada causada por corrosão nos vasos separadores A e B são tomados como referência para a obtenção das curvas de probabilidade de ocorrência de descontinuidade. Na Tabela 9 é apresentada a identificação, comprimento, largura e altura de cada uma das descontinuidades encontradas nos dois vasos separadores. As descontinuidades consideradas foram a de perda de espessura localizada na região inferior do casco em contato com água salgada.

As curvas da Figura 13 são as funções de densidade de probabilidade das dimensões das descontinuidades, que foram obtidas a partir dos dados da Tabela 9.

Tabela 9: Dimensões das Descontinuidades Volumétricas Indicadas nos Vasos Separadores.

EQUIPAMENTO	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Altura [mm]
A	30	23	12,5
A	19	15	7,1
A	20	8,5	3
B	24	18	4

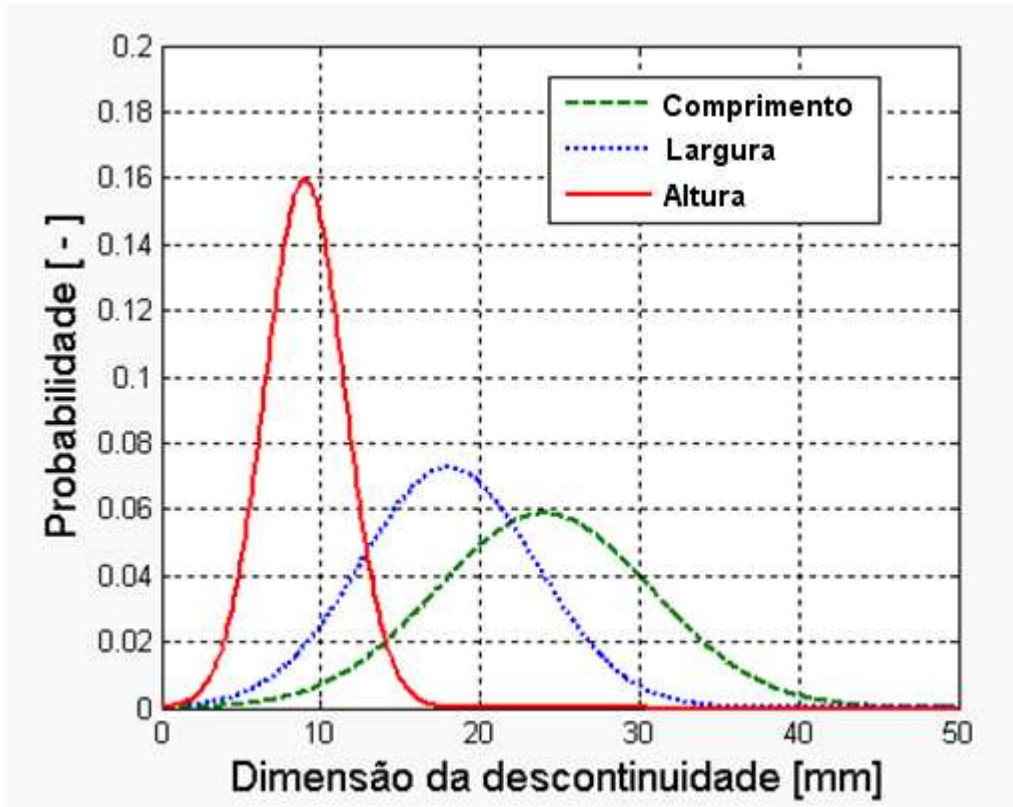


Figura 13: Distribuição Normal da Ocorrência de Descontinuidades Volumétricas Indicadas nos Vasos A e B.

5.1.2. Simulação de Monte Carlo para Avaliação da Área Sujeita à Corrosão Localizada.

Para a avaliação do plano de inspeção na região sujeita a redução de espessura localizada foi executada a rotina computacional que utiliza a Simulação de Monte Carlo para avaliar a probabilidade de detecção por Medição de Espessura e cálculo da probabilidade de falha após inspeção.

Na Figura 14 é apresentada a região planificada do casco cilíndrico exposta ao processo de deterioração, cuja dimensão é de 4000 mm de comprimento ao longo da geratriz inferior do vaso por 2000 mm na direção da circunferência. Nesta área, é marcada uma malha de pontos de medição de espessura por ultra-som cujos espaçamentos são de, 100x100 milímetros. Os pontos vermelhos são as incidências aleatórias das descontinuidades dentro do domínio de inspeção.

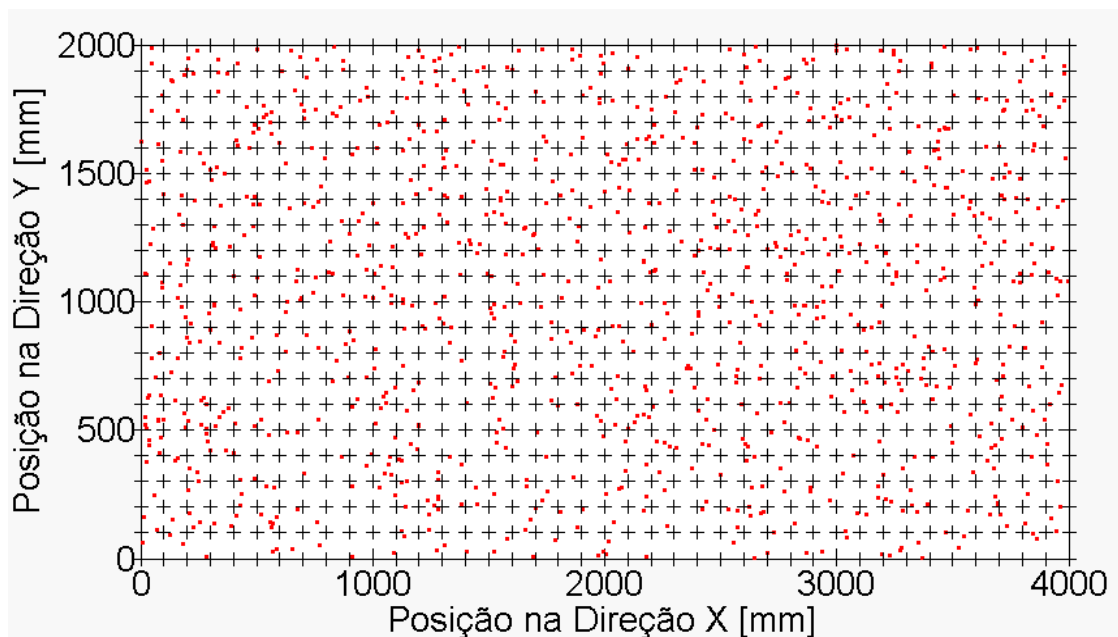


Figura 14: Posicionamento Aleatório de Descontinuidades no Domínio de Inspeção e Malha de Pontos de Medição de Espessura.

A primeira resposta da Simulação de Monte Carlo é a probabilidade de detecção da descontinuidade em função do espaçamento da malha de pontos de medição de espessura. A avaliação de cada uma das descontinuidades segundo os critérios de adequação ao uso apresentados no API-579 permite saber quantas das descontinuidades não identificadas não satisfazem os critérios de integridade estrutural. Portanto, é obtida desta forma a probabilidade de falha do equipamento que é a razão entre número de defeitos não identificados e número total de iterações da Simulação de Monte Carlo. As equações para avaliação das descontinuidades do API-579 são apresentadas no Apêndice A.

Na Figura 15 é apresentada a análise das descontinuidades aleatórias segundo a Parte 5 do API-579, que avalia descontinuidades do tipo redução de espessura localizada. Os pontos abaixo da curva indicam que a descontinuidade é crítica perante a tensão de membrana na direção circunferencial do casco cilíndrico. Da mesma forma, os efeitos da tensão de membrana longitudinal nas descontinuidades foram avaliados, os pontos plotados abaixo da superfície da Figura 16 representam as descontinuidades acima do tamanho crítico segundo a Parte 5 do API-579.

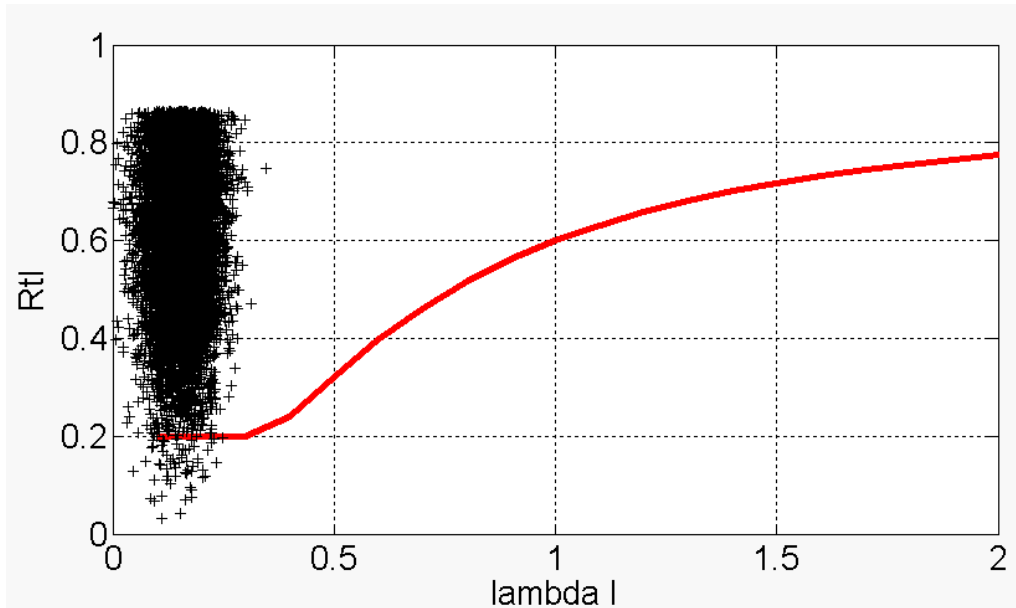


Figura 15: Avaliação das Descontinuidades para a Tensão Circunferencial de Membrana do Casco do Vaso, segundo API-579

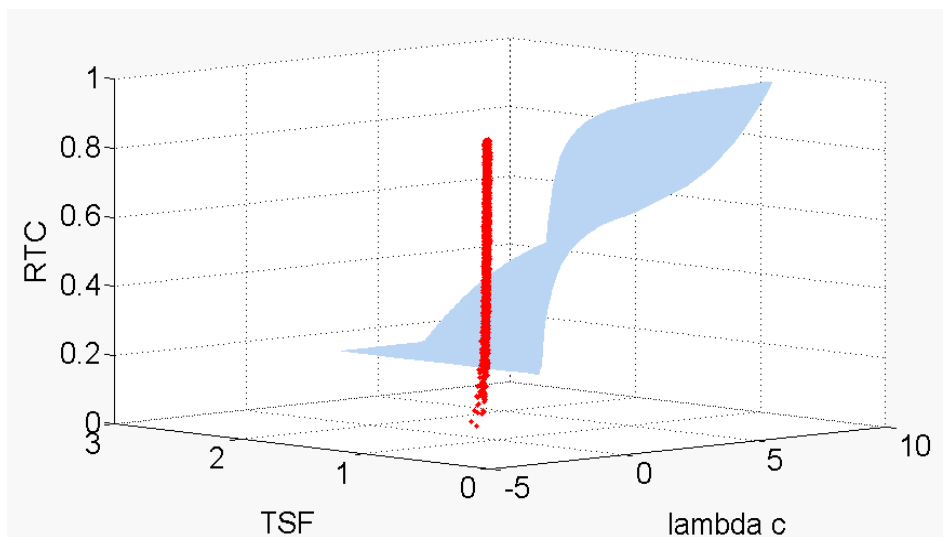


Figura 16: Avaliação das Descontinuidades para a Tensão Longitudinal de Membrana do Casco do Vaso.

A Parte 5 do API-579 é adequada para avaliar descontinuidades do tipo redução de espessura localizada, que apresentem um valor mínimo do raio de curvatura do fundo da

descontinuidade conforme apresentado na Figura 17. No entanto, aproximadamente metades das descontinuidades aleatórias geradas apresentam razão de aspecto geométrico que não satisfazem a premissa de raio mínimo de concordância interno. Assim, estas descontinuidades devem ser consideradas como do tipo trinca e assim avaliadas pela Parte 9 do API-579.

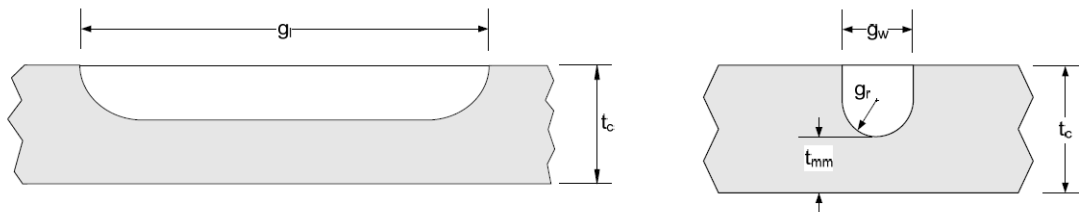


Figura 17: Características Dimensionais de Descontinuidades do Tipo Perda de Espessura Localizada. API-579, Parte 5.

A Figura 18 apresenta o diagrama FAD do API-579 Nível 2 para avaliação de descontinuidades do tipo trinca. As descontinuidades acima da curva apresentam tamanho maior que o tamanho crítico. O Apêndice A contém as equações do API-579 para avaliação das descontinuidades tipo trinca.

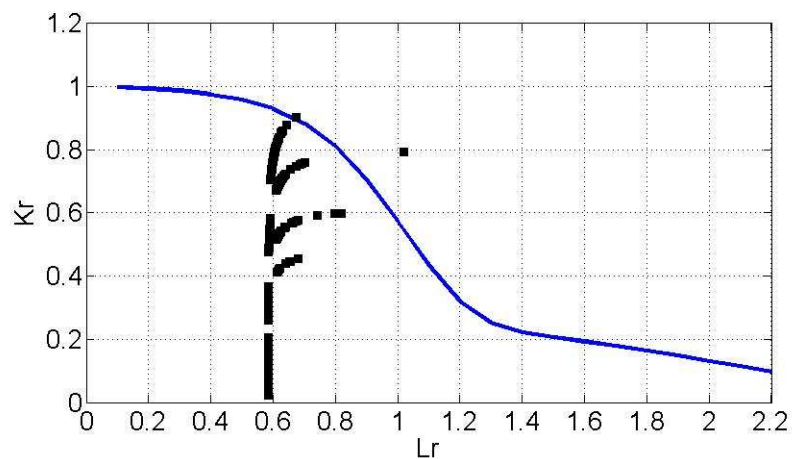


Figura 18: Diagrama FAD para Avaliação de Descontinuidades tipo Trinca.

Os pontos acima da curva do diagrama FAD são descontinuidades acima do tamanho crítico. A relação entre o número destas descontinuidades não admissíveis e o número total de iterações da Simulação de Monte Carlo é a probabilidade de falha do equipamento.

Os resultados das Simulações de Monte Carlo são apresentados na Tabela 10. A probabilidade de detecção de descontinuidades e a probabilidade de falha do equipamento após inspeção são apresentadas para cada um dos planos de inspeção. É possível observar que a probabilidade de falha do equipamento (POF) diminui com o aumento da probabilidade de detecção de descontinuidade (POD) devido à diminuição do espaçamento da malha de medição de espessura por ultra-som. A variação da POD e POF em função do espaçamento da malha de medição de espessura por ultra-som é apresentado na Figura 19.

Tabela 10: Avaliação do Espaçamento da Malha de Pontos de Medição de Espessura por Ultra-Som.

Espaçamento da Grade de Inspeção	Detectadas	POD [%]	PARTE 5 do API-579		PARTE 9 do API-579		Total de Descontinuidades Reprovadas não Identificadas	POF [%]
			Número de Descontinuidades Avaliadas	Número de Descontinuidades Reprovadas não Detectadas	Número de Descontinuidades Avaliadas	Número de Descontinuidades Reprovadas não Detectadas		
50 x 50	9660	96,6	5185	2	4815	1	3	0,03
100 x 100	6491	64,91	5174	17	4826	2	19	0,19
200 x 200	3760	37,6	5241	32	4759	2	34	0,34
400 x 400	1937	19,37	5228	48	4772	4	52	0,52

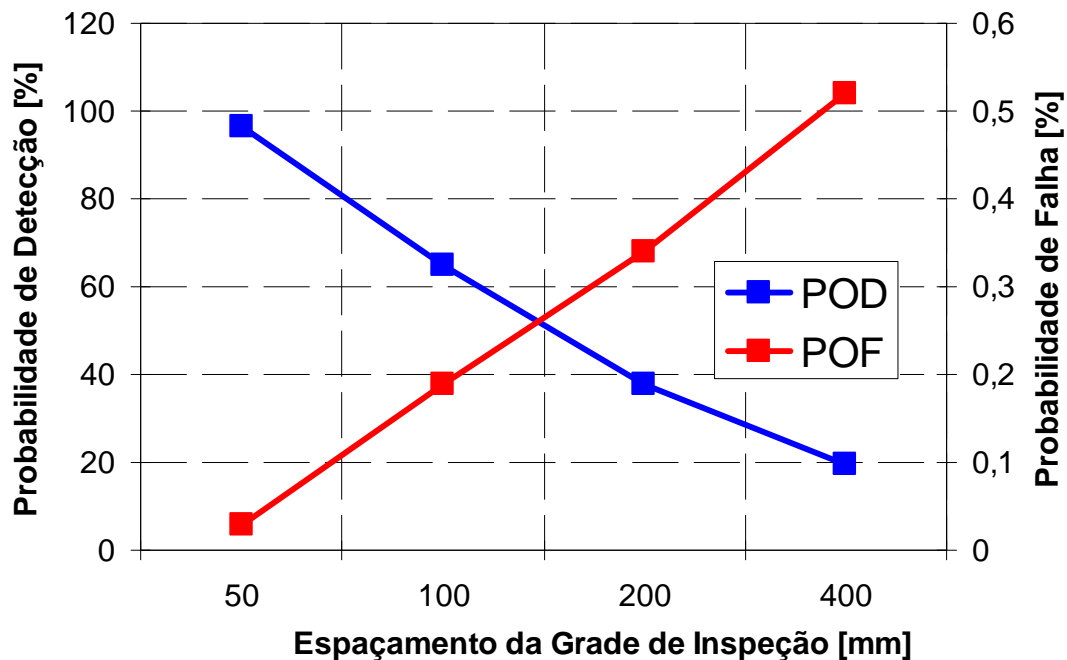


Figura 19: POD e POF em função do Espaçamento da Malha de Inspeção.

5.2. Avaliação de Trincas nas Juntas Soldadas no Casco do Vaso.

A eficácia do plano de inspeção não intrusiva nas juntas soldadas será avaliada pela comparação da efetividade das técnicas de ACFM aliada a Partículas Magnéticas (técnicas de inspeção interna) com as técnicas de Phased Array e TOFD (técnicas de inspeção não intrusivas).

5.2.1. Probabilidade de Detecção de Diferentes Técnicas de Inspeção.

Segundo dados obtidos de trabalho realizado por (Carneval, 2007) é possível a obtenção das curvas de probabilidade acumulativa de detecção em função da altura das trincas de fadiga. Os dados contidos na Tabela 5 foram utilizados para a construção das curvas POD das técnicas de Phased Array, TOFD e ACFM são apresentadas nas Figura 20 a 22, respectivamente.

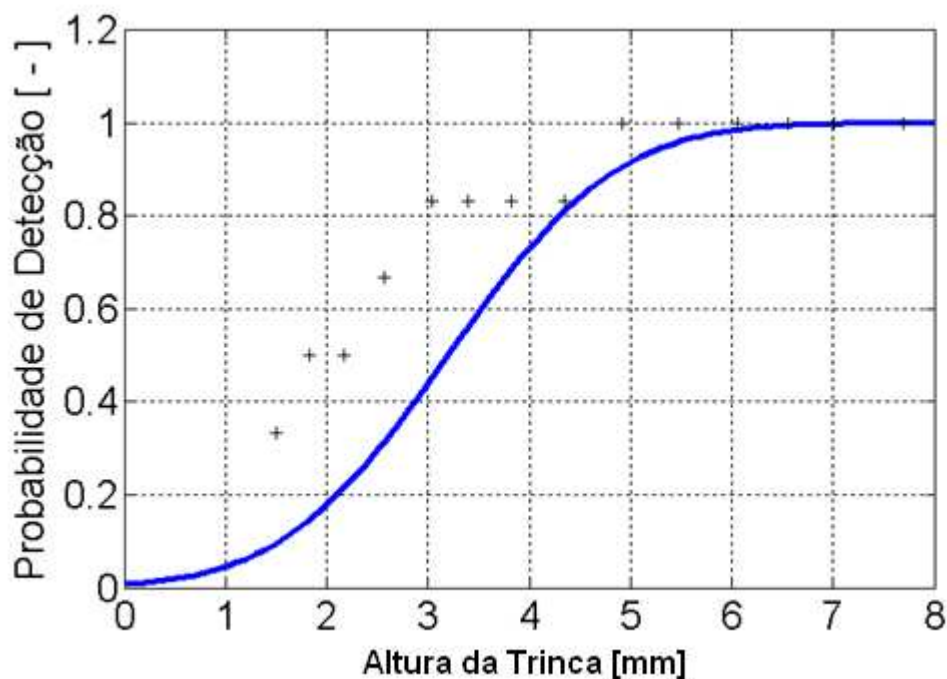


Figura 20: Curva de Probabilidade de Detecção de Trincas pela Técnica de Phased Array, (Adaptado de Carneval, 2007).

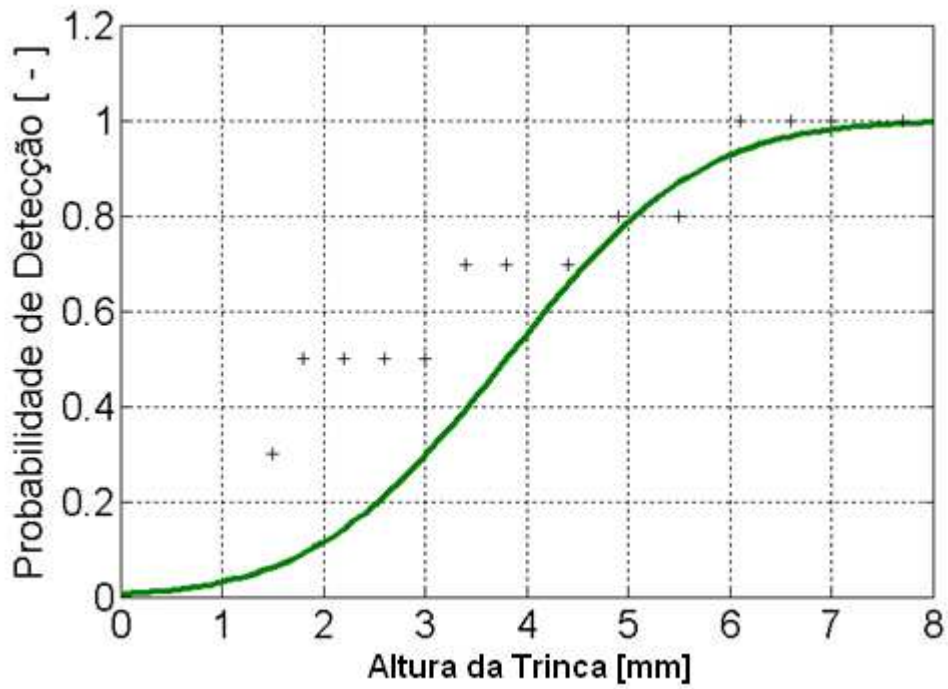


Figura 21: Curva de Probabilidade de Detecção de Trincas pela Técnica de TOFD, (Adaptado de Carneval, 2007).

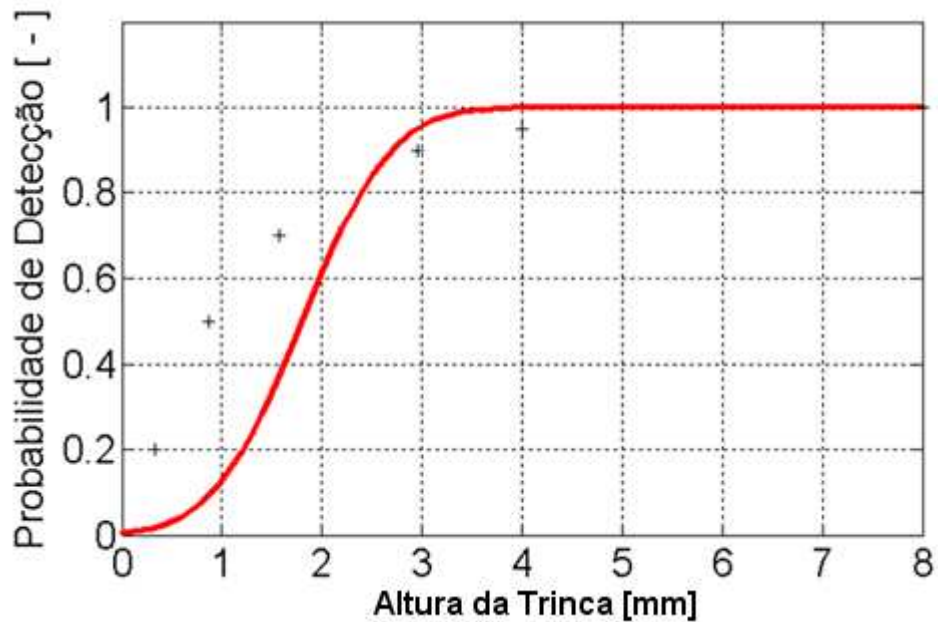


Figura 22: Curva de Probabilidade de Detecção de Trincas pela Técnica de ACFM, (Adaptado de Carneval, 2007).

A Tabela 11 apresenta os parâmetros das distribuições normais das curvas POD das diferentes técnicas de inspeção.

Tabela 11: Média e Desvio Padrão da Distribuição Normal das Curvas POD.

	Média [mm]	Desvio Padrão [-]
Phased Array	3.2	1.3
TOFD	3.8	1.5
ACFM	1.8	0.7

Na Figura 23 é possível a comparação direta da probabilidade de detecção das diferentes técnicas de inspeção. Podemos observar que a inspeção interna utilizando a técnica de ACFM é a de maior probabilidade de detecção de descontinuidades. Mesmo que a técnica de ACFM apresente alto índice de falso positivo (que é a indicação de uma descontinuidade inexistente) a utilização complementar da técnica de Partículas Magnéticas poderia confirmar a existência das indicações obtidas por ACFM.

A existência de estruturas internas no vaso de pressão pode dificultar de execução da inspeção interna em determinadas regiões do equipamento. Por esta razão, torna-se interessante o uso de técnicas de inspeção pelo lado de fora do equipamento.

A integridade estrutural do equipamento pode ser garantida pelas técnicas de inspeção não intrusivas de Phased Array e TOFD, mesmo estas técnicas apresentando valores de POD inferiores à da técnica de ACFM. Para tanto, basta que a dimensão crítica da trinca seja maior que o menor tamanho da trinca que apresente aproximadamente 100% de probabilidade de detecção. A linha tracejada da Figura 23 representa o tamanho crítico da trinca, nestas condições as três técnicas são igualmente eficazes na garantia da integridade estrutural do equipamento. Logo, a eficácia do plano de inspeção não intrusiva dependerá da curva POD, da cobertura de realização da técnica de inspeção e do tamanho crítico da trinca para as condições de operação do equipamento em questão.

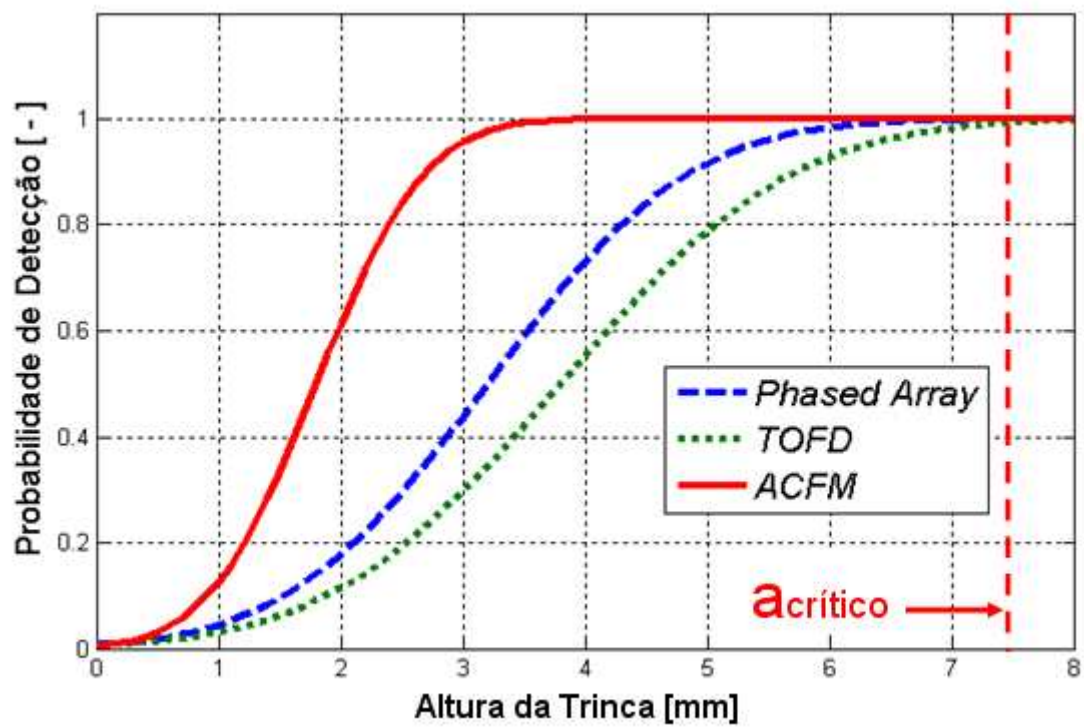


Figura 23: Probabilidade de Detecção de Trincas em Função de sua Altura para Diferentes Técnicas de Inspeção. (Adaptado de Carneval, 2007).

6. Conclusões.

A simulação de Monte Carlo apresenta-se como uma ferramenta valiosa para a avaliação da probabilidade de detecção de descontinuidades e cálculo da probabilidade de falha de equipamentos.

O modelo é adequado para avaliar a probabilidade de detecção de descontinuidades e cálculo da probabilidade de falha do equipamento.

Os resultados obtidos provam que o uso de técnicas de inspeção não intrusiva são quando orientado pela guia DNV-RP-G103, capazes de avaliar a integridade estrutural do equipamento garantindo níveis de confiabilidade equivalente à inspeção interna.

7. Sugestões e Trabalhos Futuros.

Estudo da probabilidade de falha do equipamento ao longo do tempo usando os modelos de Simulação de Monte Carlo a partir das taxas de corrosão obtidas de dados práticos e intervalos de inspeção não intrusiva.

Realização da inspeção não intrusiva nos vasos separadores objetos de estudo do presente trabalho.

Utilizar a metodologia da Simulação de Monte Carlo como ferramenta de validação de inspeções não intrusivas realizadas em equipamentos estáticos.

8. Referências.

- [1] Achenbach, J. D. (2000). Qualitative Nondestructive Evaluation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS and STRUCTURES* , pp. 13-27.
- [2] Carneval, R. d., & all, e. (2007). Uso das Técnicas de END: Ultra-som (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga, IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires.
- [3] Carvalho, A., Rebello, J., Souza, M., Sagrilo, L., & Soares, S. (2008). Reliability of non-destructive test techniques in the inspection of pipelines used in the oil industry. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* .
- [4] Heng, A., Tan, A. C., Mathew, J., Montgomery, N., Banjevic, D., & Jardine, A. K. (2009). Intelligent condition-based prediction of machinery reliability. *Mechanical Systems and Signal Processing* , pp. 1600-1614.
- [5] Lafraia, J. R. (2001). *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, Petrobras.
- [6] VERITAS, D. N. (2007). *Recommended Practice DNV-RP-G103*.
- [7] ASM Metal Handbook (1989), Nondestructive Evaluation and Quality Volume 17, 9a Edição, Editora ASM International.
- [8] American Petroleum Institute (2007), API 579, Fitness For Service, Editora API Publishing Services.
- [9] Carvalho, Nestor Ferreira de, (2008) Apostila de Inspeção de Vasos de Pressão, Petrobras, Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos Inspeção.
- [10] ASME Boiler and Pressure Vessel (2005), Nondestructive Examination Section V, Editora The American Society of Mechanical Engineers.
- [11] Nondestructive Testing Handbook (1987), Second Edition, volume 5, Acoustic Emission Testing, section 3, part 3, Microscopic Origins of Acoustic Emission, American Society for Nondestructive Testing.
- [12] Ravenscroft, F. e et al (1998), CHIME- A New Ultrasonic Method for Rapid Screening of Pipe, Plate and Inaccessible Geometries, In: European Conference on Non-destructive Testing , 7, Abingdon, The e-Journal of Nondestructive Testing, Editora NDT, 1998, v. 13, n. 10.
- [13] Dijkstra, F.H.(1998), NDT: Necessary Evil or Benefit, In: European Conference on Non-destructive Testing, 7, 1998, Abingdon, The e-Journal of Nondestructive Testing, Editora NDT , v. 3, n. 12.

- [14] Mustafa ,V., Chahbaz, A., Hay ,D. R., Brassard,M., Dubois, S.(1997), Imaging of Disbond in Adhesive Joints with Lamb Waves, NDT & International, vol.2, n.3, março de.
- [15] Ruzek, R.; Lohonka, R.; Jironc, J, (2006) .Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification, NDT & International, v. 39, n.2, 132-142.
- [16] American Petroleum Institute (2008), API 581, Risk-Based Inspection Technology, Editora API Publishing Services.
- [17] American Petroleum Institute (2002), API RP 580, Risk-Based Inspection, Editora API Publishing Services.
- [18] ASME PCC-3–(2007), Inspection Planning Using Risk-Based Methods, Editora American Society of Mechanical Engineers.
- [19] Fonseca, Bruno Montenegro da; Casamasso, Mauro Cesar; Wageck, Ruben (2003), Sistema de Gerenciamento de Inspeção – Um Exemplo da Interação do Gerenciamento do IBR com seu Serviço Próprio de Inspeção De Equipamentos – Spie, 7a COTEQ, Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos.
- [20]Eckstein, Carlos Bruno; Jatkoski, Edneu; Etter, José Ademar Nucci (2002), Inspeção Baseada em Risco Segundo API 581Aplicação do API-RBI Software, 6a COTEQ, Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos.
- [21]Ministério do Trabalho (1995), Norma Regulamentadora 13, Brasília.
- [22] Robert, Christian P., (2004), Monte Carlo statistical methods – 2nd ed, editora Springer.
- [23] Donatelli, Gustavo Daniel, (2005), Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição, Revista de Ciência & Tecnologia.

APÊNDICE A

O modelo de avaliação da probabilidade de falha através da Simulação de Monte Carlo segue os critérios de adequação ao uso contido no API-579.

A.1 Avaliação das descontinuidades do tipo perda localizada de espessura - API-579 parte 5.

A parte 5 do API-579 avalia as descontinuidades de perda de espessura localizada perante a tensão circunferencial e axial de membrana do casco cilíndrico respectivamente sobre a dimensão longitudinal e circunferencial da descontinuidade.

A.1.1 Avaliação da dimensão longitudinal da descontinuidade

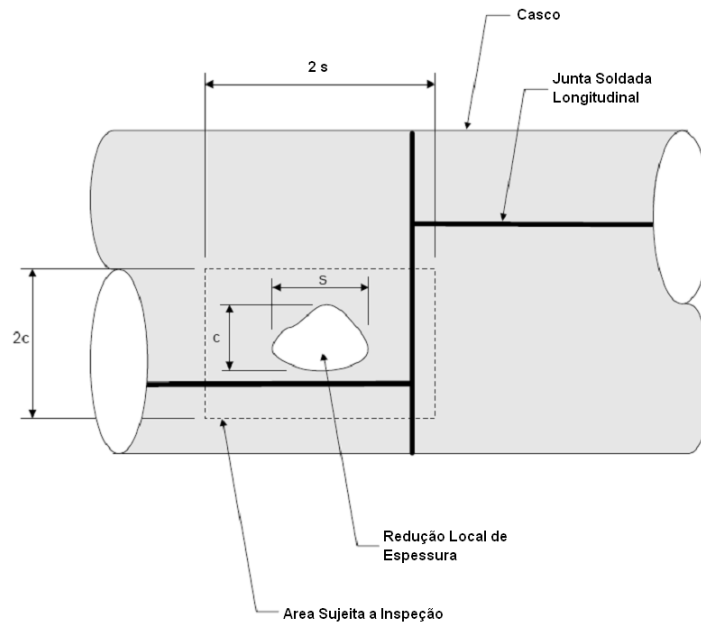


Figura 24: Dimensões gerais da perda localizada de espessura em um casco cilíndrico.

Determinar a espessura corroída de referência para a avaliação da integridade de uma perda localizada de espessura.

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA$$

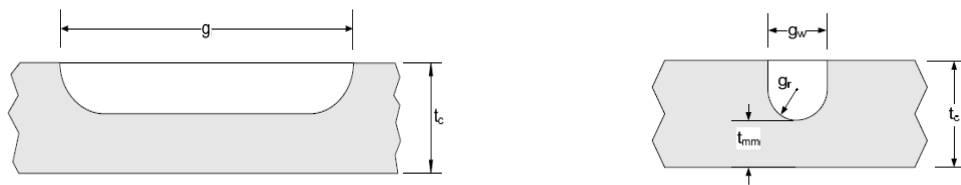
Onde:

t_c espessura corroída do casco, longe da perda localizada de espessura.

t_{nom} espessura nominal do casco.

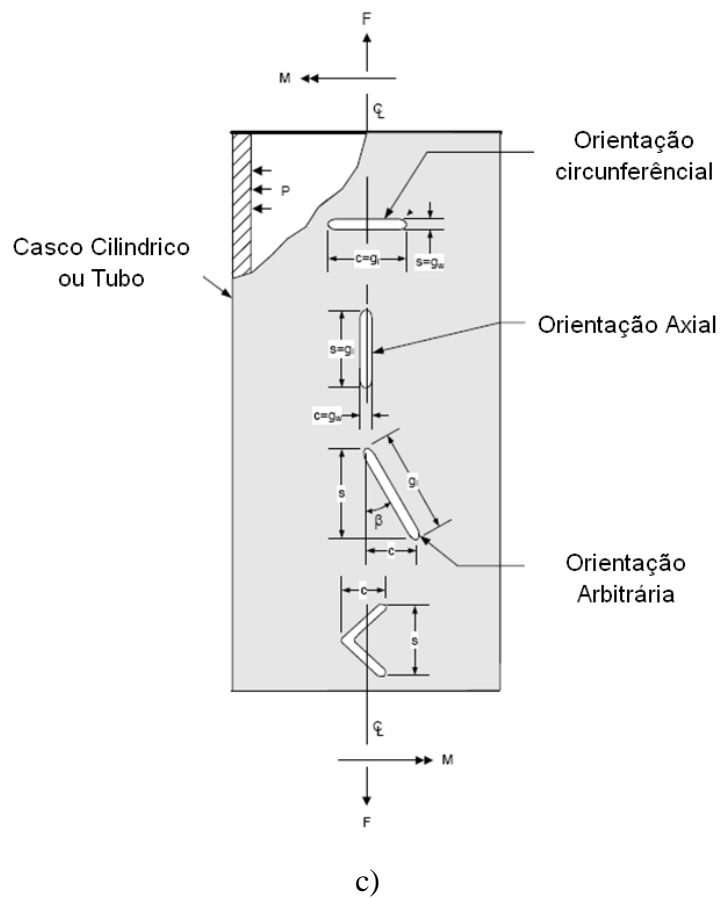
LOSS perda uniforme de espessura.

FCA corrosão futura permitida.



a)

b)



c)

Figura 25: Dimensões das discontinuidades tipo perda localizada de espessura.

Calcular R_t , a taxa de espessura remanescente.

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_c}$$

t_{mm} é a espessura mínima medida.

$$\lambda = \frac{1.285 \times s}{\sqrt{D \times t_c}}$$

λ parâmetro do comprimento da descontinuidade

s dimensão da descontinuidade na direção axial do casco cilíndrico.

D diâmetro interno do vaso.

Critérios de validade da avaliação:

$$R_t \geq 0.20$$

$$t_{mm} - FCA \geq 2.5mm(0.10 \text{ polegadas})$$

$$L_{msd} \geq 1.8\sqrt{D \times t_c}$$

$$g_r \geq (1 - R_t) \times t_c$$

L_{msd} menor distância até a próxima descontinuidade estrutural.

g_r raio do fundo da descontinuidade.

Se a condição de g_r não for satisfeito, a parte 9 do API-579 deve ser aplicado para avaliação da descontinuidade.

O ponto definido pelos valores de R_t e λ são marcadas no gráfico da Figura 26 para avaliação se a descontinuidade é admissível ou está acima do tamanho crítico.

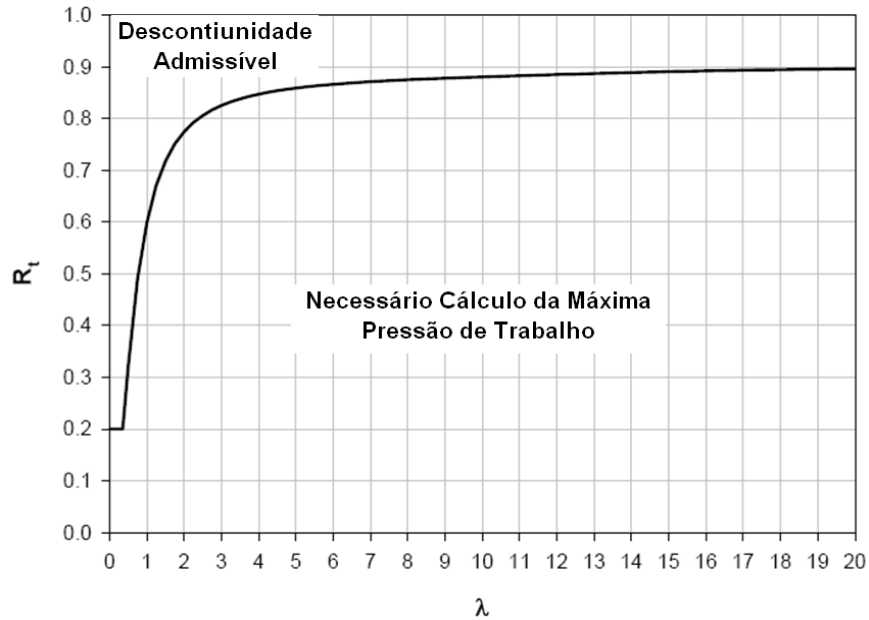


Figura 26: Curva de avaliação da descontinuidade.

$$R_t = 0.2 \text{ para } \lambda \leq 0.354$$

$$R_t = \left(RSF_a - \frac{RSF_a}{M_t} \right) \times \left(1.0 - \frac{RSF_a}{M_t} \right)^{-1} \text{ para } 0.354 \leq \lambda \leq 20$$

$$R_t = 0.9 \text{ para } R_t = 0.2$$

Se a descontinuidade é inadmissível, então o fator de resistência remanescente deve ser calculado RSF :

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t} \times (1 - R_t)}$$

$$M_r = \left(\begin{array}{l} 1.0010 - 0.014195\lambda + 0.29090\lambda^2 - 0.096420\lambda^3 + 0.020890\lambda^4 - \\ 0.0030540\lambda^5 + 2.9570(10^{-4})\lambda^6 - 1.8462(10^{-5})\lambda^7 + 7.1553(10^{-7})\lambda^8 - \\ 1.5631(10^{-8})\lambda^9 + 1.4656(10^{-10})\lambda^{10} \end{array} \right)$$

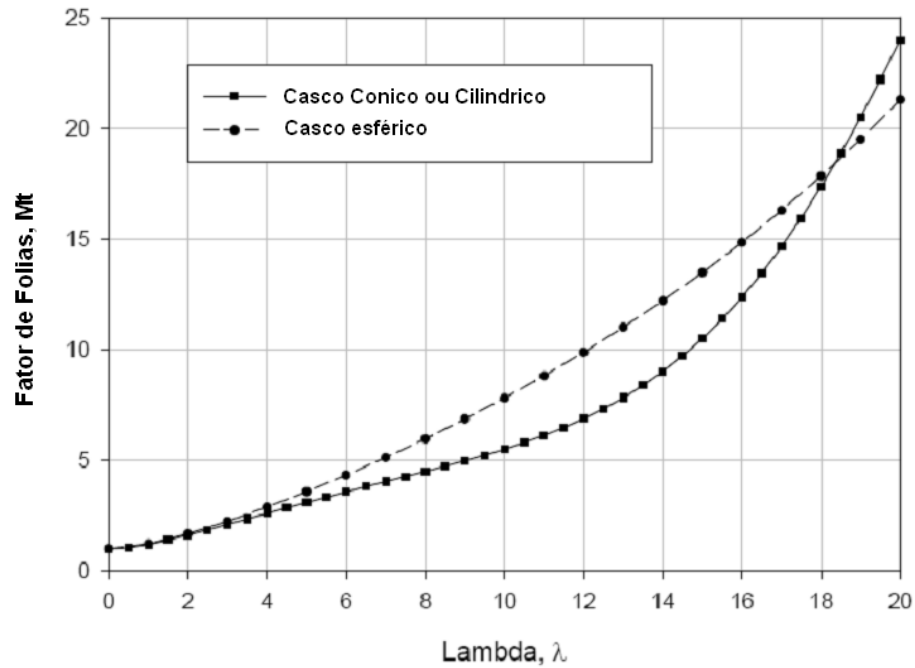


Figura 27: Fator de Folias.

Se $RSF \geq RSF_a$ a descontinuidade torna-se admissível a operar na condição máxima de operação recalculada $MAWP_r$.

$MAWP_r$, Máxima pressão de trabalho reduzida.

A.1.2 Avaliação da dimensão circunferencial da descontinuidade.

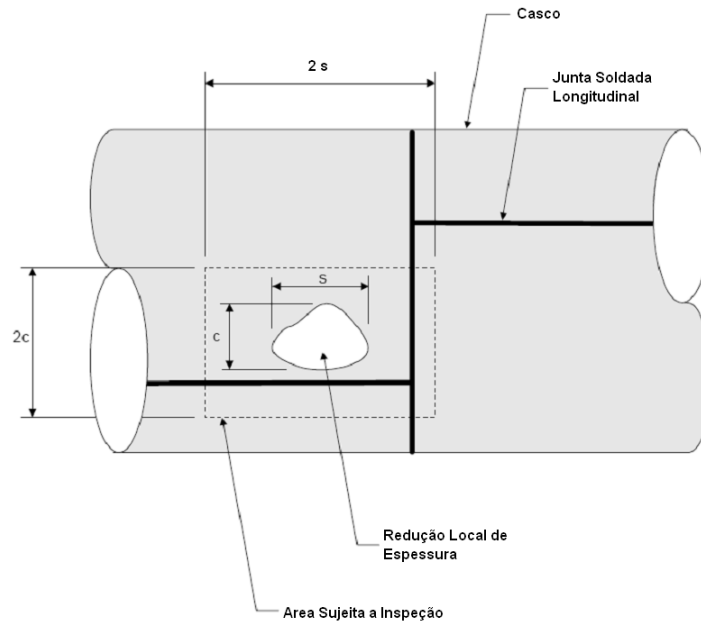


Figura 28: Dimensões gerais da perda localizada de espessura em um casco cilíndrico.

$$\lambda_c = \frac{1.285 \times c}{\sqrt{D \times t_c}}$$

λ_c parâmetro da dimensão na direção circunferencial da descontinuidade.

Os seguintes critérios devem ser verificados:

$$\lambda_c \leq 9$$

$$\frac{D}{t_c} \geq 20$$

$$0.7 \leq RSF \leq 1.0$$

$$0.7 \leq E_L \leq 1.0$$

$$0.7 \leq E_C \leq 1.0$$

E_L Parâmetro de eficiência de junta soldada longitudinal.

E_C Parâmetro de eficiência de junta soldada circunferencial.

Calcular o valor de TSF .

$$TSF = \frac{E_C}{2 \times RSF} \times \left(1 + \sqrt{4 - 3 \times E_L^2} \right)$$

TSF é o fator de resistência a tração.

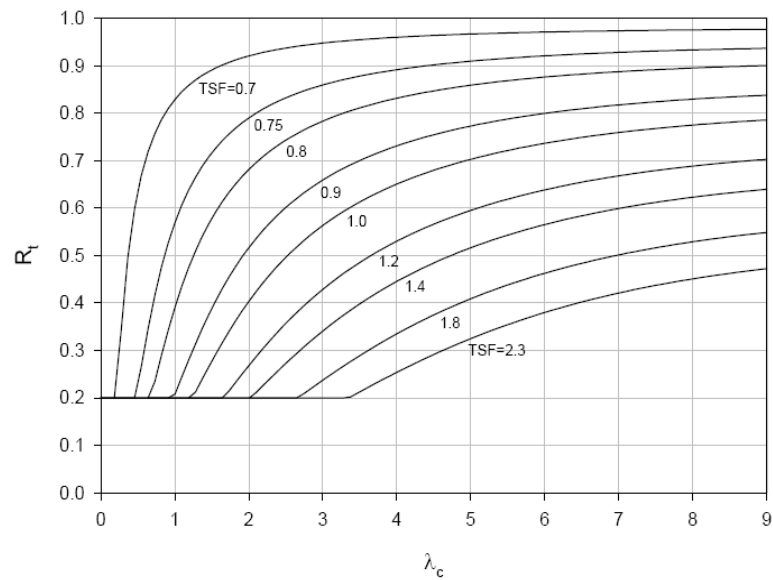


Figura 29: Curvas de avaliação da descontinuidade.

Tabela 12: Tabela para a construção das curvas de TSF.

<i>TSF</i>	$\lambda_{c-0.2}$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
0.7	0.21	9.9221E-01	-1.1959E-01	-5.7333E-02	1.6948E-02	-1.7978E-03	6.9114E-05
0.75	0.48	9.6801E-01	-2.3780E-01	-3.2678E-01	2.0684E-01	-4.6537E-02	3.9436E-03
0.8	0.67	9.4413E-01	-3.1256E-01	-6.9968E-01	6.5020E-01	-2.2102E-01	2.8799E-02
0.9	0.98	8.9962E-01	-3.8860E-01	-1.6485E+00	2.3445E+00	-1.2534E+00	2.5331E-01
1.0	1.23	8.5947E-01	-4.0012E-01	-2.7979E+00	5.0729E+00	-3.5217E+00	9.1877E-01
1.2	1.66	7.8654E-01	-2.5322E-01	-5.7982E+00	1.3858E+01	-1.3118E+01	4.6436E+00
1.4	2.03	7.2335E-01	1.1528E-02	-9.3536E+00	2.6031E+01	-2.9372E+01	1.2387E+01
1.8	2.66	6.0737E-01	9.3796E-01	-1.9239E+01	6.4267E+01	-9.1307E+01	4.8962E+01
2.3	3.35	4.9304E-01	2.1692E+00	-3.2459E+01	1.2245E+02	-2.0243E+02	1.2727E+02

Notas:

1. se $\lambda_c \leq \lambda_{c-0.2}$, então $R_t = 0.2$
2. se $\lambda_{c-0.2} < \lambda_c \leq 9$, então a equação para determinar R_t para um dado valor de *TSF* é mostrado abaixo. Os coeficientes são definidos acima.

$$R_t = C_1 + \frac{C_2}{\lambda_c} + \frac{C_3}{\lambda_c^2} + \frac{C_4}{\lambda_c^3} + \frac{C_5}{\lambda_c^4} + \frac{C_6}{\lambda_c^5}$$

A.2 Avaliação de Descontinuidades Tipo Trinca - Parte 9 do API-579.

σ_{ys} é o limite de escoamento do material

K_{mat} é a tenacidade a fratura do material

Determinação dos Fatores Parciais de Segurança.

Tabela 13: Fatores de Segurança Conforme Categorias de Probabilidade de Falha, Trincas não Profundas.

Trincas não Profundas: $a < 5 \text{ mm}$ (0.2 inches) (1)								
Categoria de Probabilidade de Falha (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{ky} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{ky} > R_c$ (5),(6)		
			PSF_s	PSF_k	PSF_a	PSF_s	PSF_k	PSF_a
$p_f = 2.3(10^{-2})$ ($\beta = 2.0$)	0.10	1.0	1.20	1.43	1.08	1.25	1.0	1.0
	0.20	1.0	1.30	1.43	1.08	1.50	1.0	1.0
	0.30	1.0	1.55	1.43	1.08	1.75	1.0	1.0
$p_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	0.10	1.4	1.40	1.43	1.20	1.50	1.0	1.0
	0.20	1.4	1.50	1.82	1.10	2.0	1.0	1.0
	0.30	1.4	2.00	2.0	1.05	2.50	1.0	1.0
$p_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	0.10	2.0	1.75	2.0	1.35	2.00	1.0	1.0
	0.20	2.0	2.50	2.0	1.50	3.10	1.0	1.0
	0.30	2.0	2.6	2.0	1.50	4.10	1.0	1.0

Tabela 14: Fatores de Segurança Conforme Categorias de Probabilidade de Falha, Trincas Profundas.

Trincas Profundas: $a \geq 5 \text{ mm}$ (0.2 inches) (1)								
Categoria de Probabilidade de Falha (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{ky} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{ky} > R_c$ (5),(6)		
			PSF_s	PSF_k	PSF_a	PSF_s	PSF_k	PSF_a
$p_f = 2.3(10^{-2})$ ($\beta = 2.0$)	0.10	1.8	1.20	1.33	1.10	1.25	1.0	1.0
	0.20	1.3	1.40	1.54	1.10	1.50	1.0	1.0
	0.30	1.1	1.60	1.67	1.10	1.75	1.0	1.0
$p_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	0.10	1.9	1.40	1.67	1.15	1.50	1.0	1.0
	0.20	1.5	1.80	1.43	1.10	2.0	1.0	1.0
	0.30	1.3	2.30	1.43	1.10	2.50	1.0	1.0
$p_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	0.10	1.8	1.70	2.0	1.25	2.00	1.0	1.0
	0.20	1.5	2.60	1.82	1.25	3.10	1.0	1.0
	0.30	1.5	3.50	1.67	1.25	4.10	1.0	1.0

$$P_m = P_m \times PSF_s$$

$$P_b = P_b \times PSF_s$$

P_m é a tensão primária de membrana.

P_b é a tensão primária de flexão.

$$K_{mat} = \frac{K_{mat}}{PSF_k}$$

$$a = a \times PSF_a$$

$2 \times a = 2 \times a \times PSF_a$ para trincas internas

$2 \times c = 2 \times c \times PSF_a$ para trincas internas

Calcular a tensão de referência primária σ_{ref}^P de acordo com o apêndice D do API-579.

Calcular a taxa de carregamento L_r^P .

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}}$$

Calcular K_I^P o fator de intensificação de tensão para as tensões primárias. O fator de intensificação de tensão para tensões residuais e secundárias K_I^{SR} são consideradas nulas uma vez que as juntas longitudinais do casco são posicionadas na parte superior do vaso. Conforme práticas recomendadas de construção.

Uma vez que $K_I^{SR} = 0$, o fator de interação de plasticidade é admitido como unitário.

$$\Phi = 1.0$$

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi \times K_I^{SR}}{K_{mat}}, \text{ ou seja:}$$

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{mat}}$$

Plotar o ponto determinado pelas coordenadas K_r e L_r^P no diagrama de avaliação.

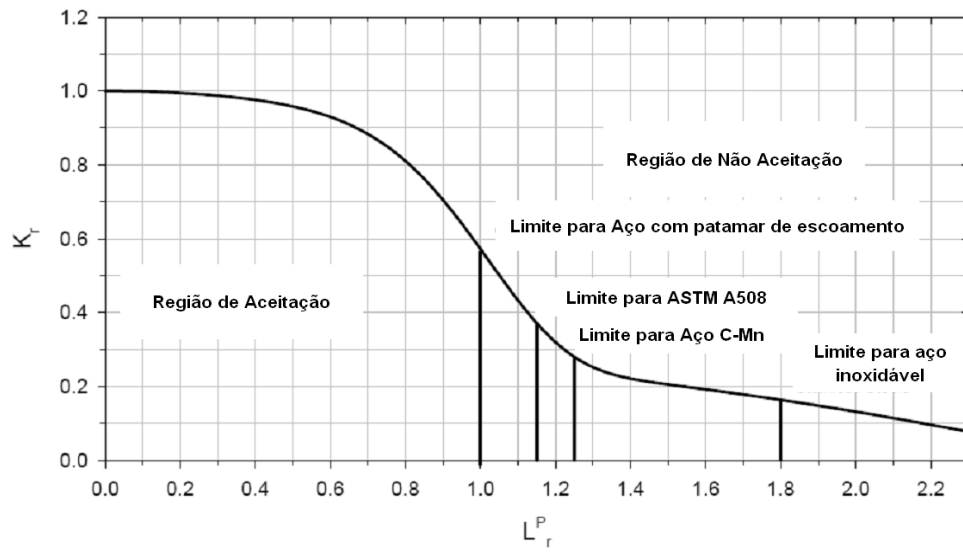


Figura 30: Diagrama de avaliação de falha.

$$K_r = \left(1 - 0.14 \times (L_r^P)^2\right) \times \left(0.3 + 0.7 \times \exp\left[-0.65 \times (L_r^P)^6\right]\right) \quad \text{para } L_r^P \leq L_{r(\max)}^P$$