



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Engenharia Naval e Oceânica



POLI/UFRJ

Projeto de Graduação

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO CRESCIMENTO DE TRINCAS EM TANQUES
DE FPSO'S UTILIZANDO INFERÊNCIA BAYESIANA**

Bruno Villar Pontes

DRE: 106052658

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA NAVAL E OCEÂNICA.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Rio de Janeiro

Abril, 2013

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**“ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO CRESCIMENTO DE TRINCAS EM TANQUES
DE FPSO’S UTILIZANDO INFERÊNCIA BAYESIANA”**

Bruno Villar Pontes

DRE: 106052658

Habilitação:

Engenharia Naval e Oceânica

Banca Examinadora:

Theodoro Antoun Netto, Ph.D. – Professor Orientador

Raad Yahya Qassim, Ph.D. – COPPE/UFRJ

Helio da Cunha Bisaggio , M.Sc. – COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro

Abril, 2013

**“ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO CRESCIMENTO DE TRINCAS EM TANQUES
DE FPSO’S UTILIZANDO INFERÊNCIA BAYESIANA”**

Bruno Villar Pontes

DRE: 106052658

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA NAVAL E OCEÂNICA.

Aprovado por:

Theodoro Antoun Netto, Ph.D. – COPPE/UFRJ

(ORIENTADOR)

Raad Yahya Qassim, Ph.D. – COPPE/UFRJ

Helio da Cunha Bisaggio , M.Sc. – COPPE/UFRJ

Rio de janeiro

Abril de 2013

À minha mãe, Sandra Maria Cavalcante Villar

Ao meu pai, Reinaldo Pontes Filho

Dedicatória

Agradecimentos

A Deus por tudo

Aos meus pais por todo o apoio em todos os momentos de dificuldade, pelo incentivo nos momentos de desânimo e por todo amor e carinho.

À minha família por todo o apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus amigos Bruno Mendes, Diego Bentes, Felipe Amaral, Fernando Carrapito, Pedro Nacif e Rafael Brasil por toda ajuda, apoio, consideração, compreensão e momentos de descontração.

Ao professor Theodoro pela excelente orientação, disponibilidade e compreensão.

Ao Engenheiro Naval Bruno Farias por toda ajuda e disponibilidade.

À equipe de engenharia do GIEN do ABS Group, pelos apoios diários e compreensão nos momentos de ausência.

Sumário

1.	Introdução	1
2.	Revisão Bibliográfica.....	2
2.1.	Planejamento Baseado em Risco de Inspeções	2
2.1.1.	Definição do Sistema.....	2
2.1.2.	Realização da Inspeção.....	3
2.1.3.	Método de Inspeção Otimizado	3
2.1.4.	Sistemas de dados	4
2.2.	Aplicação do RBI em FPSO's	5
2.3.	Identificação da evolução dos danos.....	7
2.4.	Identificação dos Modos de Falha	7
2.5.	Danos encontrados em FPSO's.....	8
2.5.1.	Tipos de Trinca mais recorrentes	8
3.	Objetivo.....	10
4.	Metodologia.....	11
4.1.	Conceitos Básicos de Mecânica da Fratura e Fadiga.....	11
4.1.1.	Conceito de Fator de Intensidade de Tensão	12
4.1.2.	Caracterização do Crescimento de Trinca por Fadiga.....	16
4.2.	Formulação do método bayesiano empírico.....	22
5.	Estudo de Caso	27
5.1.	Problema Proposto	27
5.2.	Estratégia de Solução	27
5.3.	Exemplo.....	29
5.3.1.	Região da Conexão de Longitudinais com o Fundo do Tanque	29
5.3.2.	Análise da Propagação da Trinca.....	29
5.3.3.	Aplicação da inferência	30

5.3.4. Resultados da Inferência.....	31
6. Conclusão.....	34
6.1. Propostas para Trabalhos Futuros.....	34
Referências Bibliográficas.....	35

Lista de Figuras

Figura 1 - Proporção dos defeitos mais recorrentes	8
Figura 2 - Tipos de trinca mais recorrentes	9
Figura 3 - Modos de Fratura	12
Figura 4 - Representação das Zonas Plásticas	15
Figura 5 - Definições do Fator de Intensidade de Tensão	16
Figura 6 - Curva de Crescimento de Trinca.....	17
Figura 7 - Curva Típica de Propagação de Trinca	18
Figura 8 - Método da Diferenciação da Secante	19
Figura 9 - Curva de Propagação de Trinca Aço AISI 4340.....	20
Figura 10 - Etapas para Obtenção de Curvas da/dN – K.....	21

Lista de Símbolos

a – Comprimento da Trinca
B - Espessura do corpo de prova
C e m - Constantes do material
dan/dN - Taxa de Propagação de Trinca
f(x) – Função de Probabilidade
i – Posição na Coluna da Matriz
j – Posição na Linha da Matriz
 $K_{m\acute{a}x}$, $K_{m\acute{i}n}$ - Fatores de intensidade de tensão máxima e mínima aplicado na estrutura
 K_{op} – Fator de intensidade de tensão de abertura de trinca
 K_{cl} - fator de intensidade de tensão de fechamento da trinca
m – Número de Elementos
M – Número de Elementos de Falha
n – Tamanho da Amostra
N - Número de Ciclos
S – tensão remota aplicada no corpo de prova
x – Número de Falhas
X – Variável ou Vetor Aleatório
Y – Variável ou Vetor Aleatório
 γ – Probabilidade de Presença da Trinca
 θ – Parâmetro de Interesse Desconhecido
 λ – Parâmetro de Interesse com Distribuição de Poisson
 μ_x – Média de x
v – Taxa de Cruzamento
W - Largura do corpo de prova

1. Introdução

Com a crescente exploração de petróleo dos oceanos, há um aumento na demanda de sistemas capazes de realizar essas operações e conseqüentemente um aumento na necessidade de garantir que essas operações sejam realizadas sem apresentar falhas.

Apesar do fato de que uma unidade de exploração de petróleo seja projetada para operar por um determinado tempo (vida útil) os processos de degradação estrutural estarão presentes durante esse período e dependendo das condições que essa unidade for submetida essa degradação pode ocorrer com uma maior ou menor intensidade em um determinado componente.

Em função dessa degradação existe uma necessidade de monitoramento dos elementos estruturais e avaliá-los a fim de garantir que não haja problemas nas operações. Na prática são realizadas inspeções periódicas para o acompanhamento da evolução dos processo de degradação dos elementos estruturais.

Dentre os tipos de unidade de produção de petróleo, as do tipo FPSO são as que podem apresentar uma incidência maior de falhas estruturais, visto que a maioria delas são convertidas, ou seja, eram navios do tipo petroleiro e foram convertidas para uma unidade de produção. E isso pode se tornar um problema, pois um navio petroleiro realiza operações de carga e descarga em intervalo de tempo superiores ao de um FPSO e com isso entende-se que para um FPSO os elementos estruturais são exigidos com mais frequência, logo a degradação de seus elementos estruturais ocorre em um período mais curto.

Então entende-se que há uma necessidade maior para realizações de inspeção em FPSO's, entretanto para tais inspeções é necessária uma preparação dos tanques a serem inspecionados e isso deve influenciar, por um determinado tempo, a capacidade de armazenamento e/ou produção da unidade. Dependendo do caso de falha encontrada é necessário realizar a docagem da unidade, comprometendo a operação e os custos associados a ela.

Visto que em certas regiões a inspeção é pouco necessária, outros métodos podem ser realizados e dentre eles os métodos baseados em métodos estatísticos e probabilísticos visando otimizar os esforços de inspeção, permite a utilização de resultados de inspeção para a redução das incertezas associadas e a identificação de possíveis falhas estruturais com antecedência.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. PLANEJAMENTO BASEADO EM RISCO DE INSPEÇÕES

O sistema de Planejamento em Risco de Inspeções é um modo de otimizar os esforços de inspeção, possibilitar a utilização de resultados de inspeção para a redução de incertezas associadas e identificar falhas decorrentes à deterioração estrutural por fadiga ou corrosão antes que as mesmas se tornem críticas (FABER, 2001).

Como as Sociedades Classificadoras já realizam um programa de inspeções, o IBR se torna um programa complementar.

O IBR pode ser utilizado em condições que uma estrutura tenha sofrido alguma avaria que impossibilite a realização de reparo do elemento e com isso poderiam ser feitas análises em áreas pré-determinadas em função do arranjo estrutural considerado e dados de análise estrutural na etapa de projeto. Outra possibilidade seria para avaliar o intervalo entre as inspeções para regiões da estrutura do casco onde tenham sido encontradas falhas e com isso prever possíveis avarias antes de uma próxima inspeção ou mostrar que pode ser reduzida a frequência das inspeções e conseqüentemente reduzir os custos envolvidos na operação para a realização de tais inspeções.

2.1.1. Definição do Sistema

Para a definição do sistema é necessário realizar uma avaliação quantitativa do risco de acordo com a experiência de especialistas, a identificação das causas e conseqüências. A aplicação dos métodos de análise de risco, considerando o comportamento da falha, modos, efeitos, análise de criticidade e tratamento das incertezas, direciona os esforços de inspeção em sistemas e componentes associados aos níveis de segurança, econômico e ambiental.

A execução do desenvolvimento do programa de inspeção para os componentes se inicia com dados iniciais de inspeção e finaliza com as atualizações dos resultados de inspeção seguintes. O programa começa identificando e agrupando os componentes, visto que dependendo da região é necessário considerar os riscos envolvidos de inspeção e com isso normalmente são agrupados em função do tipo e localização.

2.1.2. Realização da Inspeção

Em um sistema de inspeção otimizado deve conter registro, arquivo e análise de dados. Sendo a inspeção um modo de ajudar a descobrir a presença antecipada de defeitos, o registro e a compreensão das informações referentes a ela se tornam essenciais.

O desenvolvimento de programas de inspeção deve se dirigir à:

- Elemento a ser inspecionado
- Defeito, degradação e dano a ser descoberto
- Método a ser usado para inspecionar, registrar e arquivar
- Planejamento e programação
- Seleção, treinamento, resolução de conflito e responsabilidades
- Objetivo

A probabilidade e a consequência de defeitos são os parâmetros a serem baseados para a definição dos elementos a serem inspecionados. Os elementos que possuem uma maior influência na segurança do FPSO serão focados a partir das consequências que eles poderão causar. A intensidade de cada consequência deve ser baseada em dados históricos e análise para definir os elementos críticos para manter a integridade do FPSO. A avaliação da probabilidade tem o objetivo de definir os elementos que têm alta probabilidade de serem danificados. Experiência e análises são meios complementares de identificar estes elementos.

2.1.3. Método de Inspeção Otimizado

O objetivo do programa de inspeção otimizado é ser um meio de avaliar a condição geral da estrutura e descobrir falhas e danos dos elementos estruturais, permitindo que medidas apropriadas sejam tomadas para preservar a segurança e a integridade da estrutura.

O método de inspeção Otimizado pode ter o objetivo de prevenção ou de correção e deve:

- Avaliar a condição geral da estrutura industrial marítima em serviço;
- Confirmar hipóteses: indicar as avarias e defeitos previstos;
- Descobrir e indicar avarias e defeitos que não eram previstos;
- Controlar os danos previsíveis e imprevisíveis;
- Desenvolver um programa de manutenção e de reparo de alta qualidade.

O programa de inspeção otimizado deve começar com o projeto da estrutura e continuar durante a sua vida útil. O programa não deve considerar apenas a estrutura, mas seu equipamento e seu pessoal.

Um método de inspeção inclui:

- Desenvolvimento de uma lista padrão;
- Execução de vistorias globais;
- Inspeção de danos ou defeito de alta probabilidade ou consequência;
- Inspeções periódicas;
- Inspeção após acidentes;
- Implementação da manutenção e estratégias de reparo;
- Atualização do IMMR (Inspeção, Manutenção, Monitoração e Reparo);
- Execução de inspeções independente das circunstâncias de causa potencial;
- Serviço de inspetores qualificados e experientes.

2.1.4. Sistemas de dados

Os objetivos gerais de um sistema de dados de inspeção são:

- Coletar dados de inspeção;
- Armazenar os dados;
- Prover meios para inspeção e gerenciamento dos dados;
- Permitir a organização dos dados de inspeção em uma forma satisfatória;
- Analisar os dados;
- Mostrar as tendências da informação tais como avarias e defeitos associados;
- Comunicar e relatar os dados.

BAI (2003) conclui que uma vez que a estrutura esteja pronta para operar, uma campanha de inspeções deve ser planejada. O objetivo e a extensão das inspeções internas dos tanques são definidos. Os métodos de acesso e os métodos de registro dos dados são escolhidos e as inspeções executadas. Os resultados de inspeção incluem medição de espessura, trincas, estado do revestimento e de sistemas de proteção à corrosão. Com os dados de inspeção, estratégias de manutenção podem ser desenvolvidas e os reparos são finalmente conduzidos.

2.2. APLICAÇÃO DO RBI EM FPSO'S

Inicialmente é feito o detalhamento das características da unidade através dos desenhos de construção e conversão. Conhecendo as características dos materiais e as dimensões de cada elemento é feito um modelo numérico para análise global da unidade. No desenvolvimento do documento com os requisitos de inspeção para a estrutura são detalhados os requisitos de inspeção para cada região do tanque onde são focadas as estruturas como longitudinais, gigantes, chapas e reforçadores que são examinados quanto a danos estruturais, trincas, corrosão e condição de proteção. O plano contém o procedimento e informações do programa de inspeção em um único documento intitulado Manual de Inspeção do Casco que inclui as instruções, tabelas e desenhos para a inspeção de cada tanque de forma padronizada. A qualidade dos dados coletados garante a confiabilidade das análises e permite assim o uso adequado das ferramentas de análise estrutural, análise de risco, confiabilidade e estudo da degradação da estrutura. Na implantação da IBR o processo de inspeção é controlado e os dados são registrados com eficiência, já que o inspetor deve examinar cada área do tanque criteriosamente e registrar quaisquer anomalias detectadas.

Com isso, são preparados relatórios de inspeção que dinamizam o processo de análise ao reportar os resultados da vistoria, onde são registrados de uma maneira padronizada para fornecer dados mais consistentes e repetíveis para a tendência da deterioração. Com a melhoria do plano de inspeção é dada prioridade às partes que apresentam maior risco. Os resultados obtidos na análise irão direcionar as regiões a serem inspecionadas. O plano de inspeção indica os painéis que devem ser inspecionados com medição de espessura e quais regiões devem ser inspecionadas visualmente para encontrar anomalias que possam surgir com a solicitação dessas regiões.

Para fomentar a troca de informações e subsidiar a tomada de decisão, as ações devem ser definidas com a análise dos resultados de inspeção em uma reunião conjunta com representantes da Sociedade Classificadora, do grupo de análise da integridade estrutural e da equipe responsável pela operação da unidade. A análise numérica com modelos é feita também com as condições de contorno atualizadas através das informações coletadas dos boletins de operação, reuniões e entrevistas. As solicitações na estrutura provocam deformações e geram tensões estudadas nos resultados obtidos pela análise numérica.

O principal propósito da IBR é a definição dos três pontos básicos: onde, quando e como inspecionar. Para definição dos locais onde inspecionar é necessária a identificação das áreas

suscetíveis às falhas principalmente devido à corrosão e fadiga onde são feitos os monitoramentos de medição de espessura e ensaios não destrutivos. Análise qualitativa através de grupos de trabalho com participação de técnicos com experiência na operação e manutenção, engenheiros envolvidos na conversão, engenheiros com experiência em análise de risco e vistoriador da Sociedade Classificadora, com o suporte na documentação e nos detalhes das inspeções. Para definição de quando inspecionar é necessário o estabelecimento dos intervalos de inspeção através do estudo dos mecanismos de degradação (quantitativo) estimativa de quando um componente ou sistema atinge determinado estado limite com aplicação das taxas de corrosão, espessura mínima e análise dos ciclos de fadiga, vida útil e da experiência e julgamento de especialistas (qualitativo).

Com as análises de modelos de degradação da estrutura é possível prever quando um componente ou sistema atinge determinado estado limite. Com a escolha dos limiares e modelos de degradação apropriados, o intervalo de inspeção para cada componente ou sistema é determinado. O ideal é inspecionar o componente quando a deterioração atinge o índice de confiabilidade alvo que está relacionado à probabilidade de falha aceitável. Outra etapa é a avaliação da vida pregressa do navio petroleiro. Esses dados ajudarão na análise da vida à fadiga. Os resultados obtidos na análise de fadiga também direcionam as regiões a serem inspecionadas. Os resultados da análise de fadiga indicam a região crítica que deve receber especial atenção nos planos de inspeção. Uma vez identificados os detalhes estruturais críticos, bem como concluída a análise qualitativa de risco, as informações são cruzadas com os resultados das análises de degradação da estrutura para a definição do intervalo de inspeção.

O prazo para a próxima inspeção é definido ao serem considerados os pontos da estrutura que na inferência atingiram o nível máximo de degradação. Os resultados dos modelos de corrosão e fadiga e da análise qualitativa devem trabalhar juntos para definir as bases do ciclo de inspeção. À medida que a IBR é implementada e os resultados das inspeções são compilados, as prioridades podem mudar.

Na abordagem qualitativa para análise da IBR a experiência e o julgamento dos profissionais de inspeção são a base para a determinação da probabilidade de falha e consequência de falha. Os resultados típicos em termos qualitativos são índices como ALTO, MÉDIO ou BAIXO, entretanto, valores numéricos podem estar associados. A abordagem quantitativa para análise da IBR em geral é baseada em informações sobre o projeto das instalações, práticas e histórico operacional, confiabilidade de componentes, ações humanas, o progresso físico dos

acidentes e os efeitos potenciais na saúde e no meio ambiente. Este tipo de abordagem com modelos lógicos que descrevem combinações de eventos que resultam em acidentes severos e modelos físicos descrevem a progressão de acidentes e o vazamento de produtos perigosos para o meio ambiente.

As análises possibilitam julgar a condição dos elementos da estrutura e os intervalos podem ser ampliados, mantidos ou até mesmo reduzidos. Na maioria dos casos pode-se chegar à conclusão que a regra da inspeção prescritiva é conservadora e a análise permite a ampliação dos intervalos de inspeção.

A identificação dos potenciais modos de falha é uma parte essencial do gerenciamento da integridade e deve ser executada antes da análise de IBR. Toda a análise depende da identificação dos modos de falha. Numa análise estrutural padrão os modos de falha podem ser identificados e gerados automaticamente. Porém, como as estruturas podem ter muitos modos de falha é complicado enumerar todos os possíveis e considerar todas as combinações pode não ser computacionalmente viável. Deste modo, antes mesmo de enumerar os principais modos de falha é fundamental fazer um mapeamento dos mecanismos de falha a estes associados.

2.3. IDENTIFICAÇÃO DA EVOLUÇÃO DOS DANOS

Para a identificação dos processos de evolução dos danos é necessário conhecer os processos de desgaste atuantes na estrutura e observar os resultados de inspeção para identificar se estão atuantes. Os principais podem atuar isoladamente ou em conjunto e a intensidade de seus efeitos pode antecipar a ocorrência dos danos na estruturas das regiões do FPSO.

2.4. IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

O modo de falha caracteriza a falha ou perda de função de uma estrutura. Cada elemento pode ter diferentes modos de falha. Para se ter uma confiabilidade e um controle de manutenção maior, se faz necessário conhecer a relação entre os modos e a evolução das falhas, pois diferentes mecanismos de degradação podem apresentar o mesmo modo de falha.

A identificação dos modos de falha atuantes é obtida pela observação e análise dos dados. Os principais modos de falha podem ocorrer isoladamente ou em conjunto e a sua abrangência pode levar ao comprometimento local da estrutura do FPSO.

2.5. DANOS ENCONTRADOS EM FPSO'S

Como apresentado por Farias (2010), os tipos de falhas mais frequentes em 5 FPSO's entre os anos de 2003 e 2010 em operação na Bacia de Campos. Os tipos de falhas são classificadas de acordo com a região que se encontram ou o tipo de elemento estrutural. Os grupos foram divididos da seguinte forma: Enrijecedor, alma do enrijecedor, flange do enrijecedor, antepara, barra chata, barra vertical, solda, borboleta, chapa, chapa colar, chapa do fundo, passagem, teto ou topo do tanque.

Das 1040 anotações, como é mostrado na Figura 1, 505, ou 48%, estão relacionadas ao fenômeno de corrosão e 455, ou 44%, à presença de trincas ou descontinuidades. Além disso, 80 anotações, ou 8%, são de anomalias decorrentes de outros processos tais como amassamento e deformações causadas por abalroamento ou outros processos. Estão incluídos também demais itens encontrados como os provenientes da conversão e tanques inspecionados que não apresentaram defeito detectado.

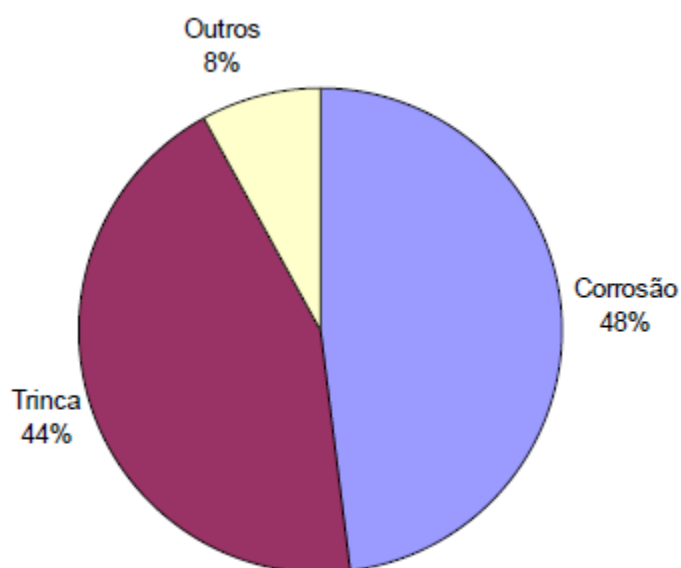


Figura 1 - Proporção dos defeitos mais recorrentes

Observa-se que, em termos quantitativos, as falhas decorrentes de trinca e de corrosão apresentam praticamente a mesma importância.

2.5.1. Tipos de Trinca mais recorrentes

Visto que a trinca é um dos tipos mais recorrentes de falha, Farias (2010) apresenta os tipos de trinca mais recorrentes nos FPSO's e elas são apresentadas a seguir. Dentre as 333 trincas mais recorrentes, 215 anotações ou 65% do total são as ocorridas na conexão de cavernas com

longitudinais de costado, longitudinais de fundo ou longitudinais de anteparas conforme mostra a Figura 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

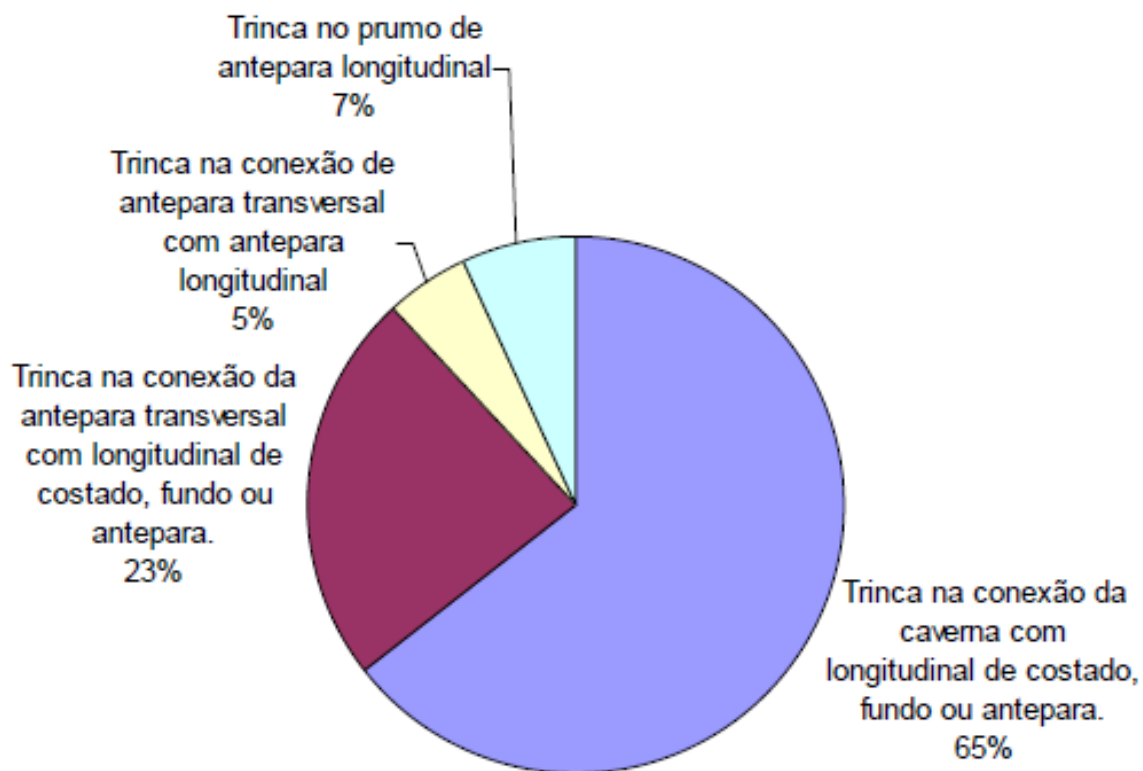


Figura 2 - Tipos de trinca mais recorrentes

Com base na quantidade de falhas causadas por trincas, ratificou-se a necessidade da criação de um modelo capaz de analisar tal problema.

3. Objetivo

O objetivo deste projeto de graduação é propor um modelo matemático preliminar complementar ao plano da inspeção definido pelas sociedades classificadoras capaz de diminuir a frequência de realização de inspeções, que tenha uma base estatística capaz de reduzir as incertezas associadas e identificar com antecedência possíveis falhas causadas por deterioração dos elementos estruturais oriundas de trincas. Os resultados servirão como auxílio na análise de decisões quanto ao impacto nos custos operacionais ou risco total da unidade devido uma possível mudança no plano de inspeções.

4. Metodologia

4.1. CONCEITOS BÁSICOS DE MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA

A Teoria da Mecânica da Fratura procura caracterizar o comportamento dos materiais e dos corpos que apresentam um defeito ou trinca. Isto é realizado através de um tratamento quantitativo a partir do relacionamento da resistência a fratura do material do corpo trincado com a sua geometria e carregamento aplicado. Os campos de tensão e deformação locais em torno dos defeitos podem ser avaliados em termos da tenacidade à fratura, que é uma propriedade do material que permite uma avaliação precisa do potencial de falha e vida útil remanente de uma estrutura ou componente contendo defeito.

O conceito básico empregado na mecânica da fratura é a relação entre as condições de carregamento aplicadas ao corpo trincado (estrutura) e a resistência do material ao crescimento da trinca e à fratura. Se a resistência do material à falha na presença de uma trinca aguda é menor que as condições de tensão-deformação na ponta da trinca, impostas pelas condições de carregamento e geometria, a falha estrutural ocorrerá. Portanto, para evitar a falha, a resistência do material deve exceder as condições aplicadas na ponta da trinca.

4.1.1. Conceito de Fator de Intensidade de Tensão

A Mecânica de Fratura Linear Elástica é baseada na análise de tensões elásticas de materiais. A intensidade do campo tensão-deformação elástico, localizado, nas vizinhanças da ponta da trinca é descrita em função de um termo singular chamado de fator intensidade de tensão, K . Frequentemente o parâmetro K inclui um subscrito, tal como I , II ou III . Estes subscritos referem-se aos três modos diferentes de carregamento de um corpo trincado, como ilustrado na Figura 3.

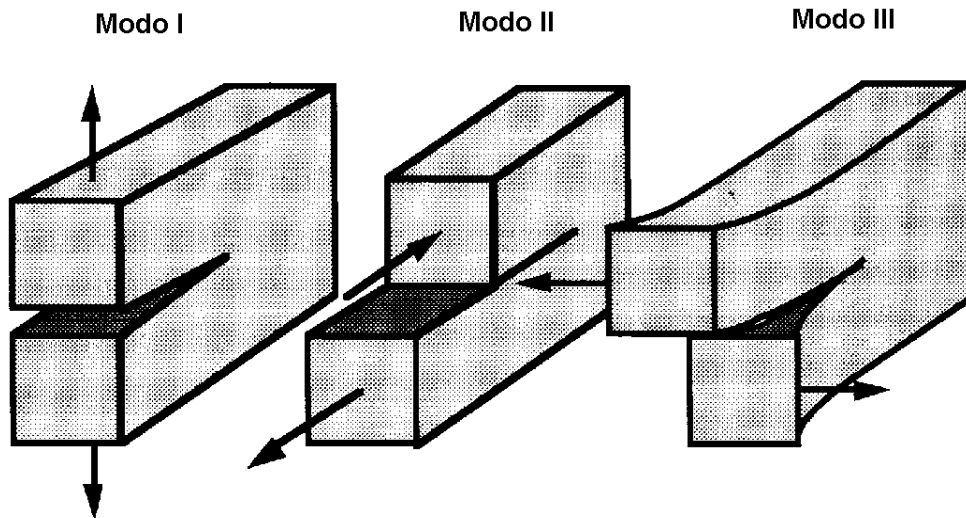


Figura 3 - Modos de Fratura

O Modo I é o modo de abertura onde o corpo trincado é carregado por tensões normais. Os deslocamentos das superfícies da trinca ocorrerão perpendiculares ao plano da trinca. O Modo II é o modo de deslizamento ou cisalhamento planar onde o deslocamento das superfícies da trinca se dá no plano da trinca e perpendicular à aresta frontal da trinca. O Modo III é o modo de rasgamento causado por um cisalhamento fora do plano da trinca. O deslocamento das superfícies da trinca se dá no plano da trinca e paralelo à aresta frontal da trinca.

Soluções pela mecânica do contínuo para carregamentos e geometrias aplicadas prescritas levam à caracterização dos campos de tensão (e deformação) próximos à ponta da trinca.

A forma funcional do campo assintótico local inclui um valor de amplitude escalar de K que pode ser expresso no carregamento pelo Modo I para abertura de trinca na direção- yy como:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi a)^{1/2}} \text{ quando } a \rightarrow 0$$

Portanto para condições elásticas lineares, os campos de tensão nas pontas das trincas podem ser caracterizados por um valor singular de K que também constitui um valor de parâmetro-único da força motriz da trinca.

A magnitude de K é uma função das cargas aplicadas externamente ou da tensão nominal (σ), do tamanho da trinca (a) e da geometria da trinca e do corpo. A magnitude do K aplicado pode ser calculada para diversas combinações de geometria, tamanho e formato da trinca, e do método de carregamento aplicado. A distribuição geral tensão-deformação nas vizinhanças da ponta da trinca pode ser determinada, independente da magnitude de K , ou da combinação das condições do corpo trincado. Portanto, a singularidade deste parâmetro caracterizador de valor-único K pode ser apreciada. Expressões para K tem sido determinadas para diferentes geometrias de corpos trincados, configurações de trinca, e situações de carregamento.

Cada expressão de K contém todos os termos requeridos para fornecer as relações necessárias entre tensão aplicada nominal, tamanho da trinca, e condições geométricas. K também pode ser comparado com a tenacidade a fratura.

Diversos métodos para estabelecer a expressão apropriada para K para uma situação específica estão disponíveis; são eles: programas de computadores de elementos finitos, calibrações de flexibilidade experimentais e técnicas fotoelásticas. Contudo, na prática, pode-se geralmente encontrar uma expressão apropriada num livro texto que aborda o assunto, como Anderson (1995), que se ajusta adequadamente à geometria do corpo trincado, ao tipo de trinca, e às condições de carregamento de interesse.

A essência da MFLE é relacionar o K aplicado (força motriz da trinca) às características de crescimento da trinca e de resistência à fratura de um dado material (que também pode ser expresso em termos de níveis críticos de K). Por exemplo, ao considerar fratura frágil em condições de carregamento elásticas lineares (deformação-plana), um determinado material pode tolerar somente certo nível de K aplicado (Fator de Intensidade de Tensão) antes que frature.

Reportando-se à Figura 3, para uma geometria fixa e tamanho de trinca (a), o K aplicado na região da ponta da trinca continuará a crescer conforme a carga aplicada (ou a tensão nominal, σ) é aumentada. Quando o K aplicado atinge um nível crítico (equivalente à resistência a fratura específica do material), a trinca ficará instável e ocorrerá uma fratura súbita e frágil. Este valor crítico de K é denominado K_{Ic} (tenacidade à fratura em deformação plana) e pode

ser considerado uma constante do material numa determinada condição metalúrgica e sob condições determinadas de temperatura e taxa de carregamento.

Portanto, para um dado material, a fratura ocorrerá quando o K aplicado atinge K_{Ic} independente da geometria, tamanho da trinca e modo de carregamento do corpo trincado em questão. Então, K_{Ic} para um determinado material pode ser medido no laboratório com uma geometria de corpo-de-prova relativamente simples. Subsequentemente, este valor de K_{Ic} pode ser usado para avaliar o potencial de fratura frágil de outras geometrias e estruturas contendo trincas do mesmo material.

Em resumo, a MFLE é aplicável àquelas situações de escoamento em pequena escala onde a quantidade de plasticidade localizada na ponta da trinca é bastante pequena. As condições nas quais a MFLE é geralmente aplicada são:

- resistência elevada
- materiais relativamente frágeis
- restrições mecânicas
- espessuras de seções pesadas
- temperaturas baixas
- taxas de carregamento extremamente elevadas

Naquelas situações onde há uma intensa plasticidade local na ponta da trinca para que a MFEL possa ser aplicada, torna-se necessário utilizar um parâmetro diferente para caracterizar a tensão-deformação na ponta da trinca que leve em conta a plasticidade. Tal parâmetro tem sido desenvolvido na conceituação da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP).

A falha por fadiga em materiais de engenharia consiste de três fases: iniciação, propagação e falha final. A região de transição entre iniciação e a propagação de uma trinca é de difícil definição. A hipótese tradicional usada em projetos de componentes ou estruturas é a de considerar a presença de um defeito a partir do qual se inicia o processo de propagação até a falha final.

Expressões para a descrição do fenômeno de propagação de trincas por fadiga, baseadas em conceitos de mecânica de fratura linear elástica, tornam-se imprecisas quando ocorre excessiva plastificação na ponta da trinca, nesse caso a MFLE não é mais aplicável.

4.1.1.1. Efeitos de Escoamento

Em uma estrutura trincada a tensão de escoamento é ultrapassada na região próxima à ponta da trinca, onde uma zona plástica é desenvolvida e cuja extensão pode ser estimada por um critério de escoamento que caracteriza o campo de tensão localizado nesta região.

O tamanho real e a forma do tamanho da zona plástica depende das propriedades do material, mas suas dimensões são proporcionais a $(K_I / \sigma_{YS})^2$. A relaxação das tensões causadas pelo escoamento dentro da zona plástica significa que, para manter o equilíbrio, as tensões fora da zona plástica precisam aumentar lentamente. A zona plástica aumenta com o aumento da trinca.

A figura a seguir ilustra as zonas plásticas no estado plano de deformação (a) e estado plano de tensão (b).

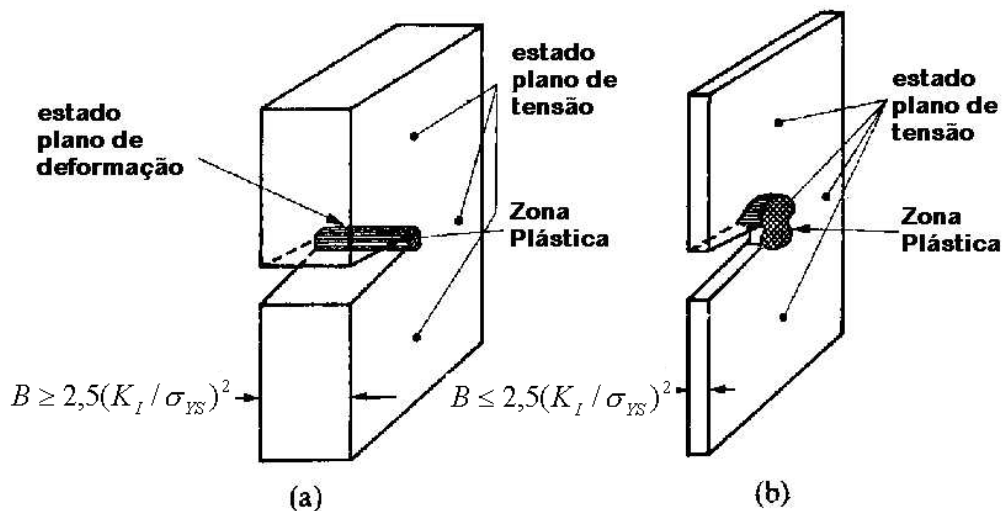


Figura 4 - Representação das Zonas Plásticas

São representados na Figura 5 Figura 4os principais fatores de intensidade de tensão utilizados para caracterizar a abertura e fechamento de trinca.

No gráfico, o $K_{\text{máx}}$ e $K_{\text{mín}}$ representam os fatores de tensão máximo e mínimo, K_{op} representa o fator de intensidade de tensão na abertura da trinca e K_{cl} o fator de intensidade de tensão no fechamento da trinca e é caracterizado pelo contato inicial entre as duas superfícies da trinca durante o descarregamento na estrutura.

O ΔK representa a variação do fator de intensidade de tensão máximo e mínimo aplicado e ΔK_{eff} é a variação do fator de intensidade de tensão máximo e o de abertura da trinca.

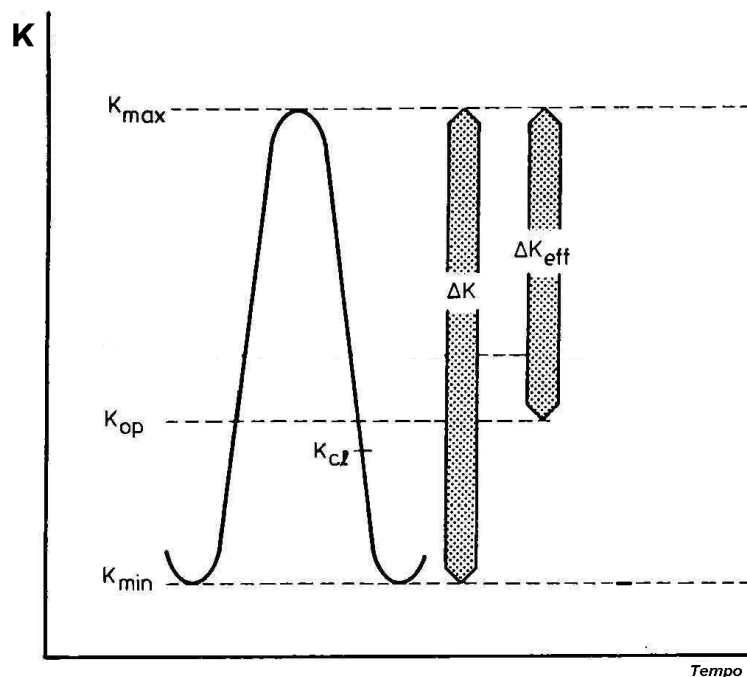


Figura 5 - Definições do Fator de Intensidade de Tensão

4.1.2. Caracterização do Crescimento de Trinca por Fadiga

A taxa de crescimento de uma trinca de fadiga sujeita a um carregamento de amplitude constante é expressa em termos do incremento do comprimento da trinca por ciclo, da/dN . Valores de da/dN para diferentes condições de carregamentos são determinados a partir da mudança do comprimento da trinca ao durante o ensaio. Quando a carga aplicada na estrutura ou corpo de prova é constante a taxa de propagação da trinca geralmente aumenta com o número de ciclos.

Paris et al. (1961) e Paris & Erdogan (1963) sugerem, para uma variação cíclica do campo de tensões aplicado na estrutura, a utilização da mecânica de fratura linear elástica para a

caracterização da taxa de crescimento da trinca baseada na variação do fator de intensidade de tensão.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

Onde, K_{\max} e K_{\min} são respectivamente fatores de intensidade máximo e mínimo de tensão, durante um ciclo de fadiga.

Em uma estrutura trincada,

$$K_{\max} = Y\sigma_{\max}\sqrt{\pi a}, K_{\min} = Y\sigma_{\min}\sqrt{\pi a}$$

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}, \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Onde, Y é um fator de correção de geometria que está relacionado com a razão do comprimento de trinca a com a largura do corpo de prova W e σ_{\max} e σ_{\min} são as tensões máximas e mínimas de um ciclo de fadiga. A Figura 6 ilustra uma curva típica de crescimento de trinca.

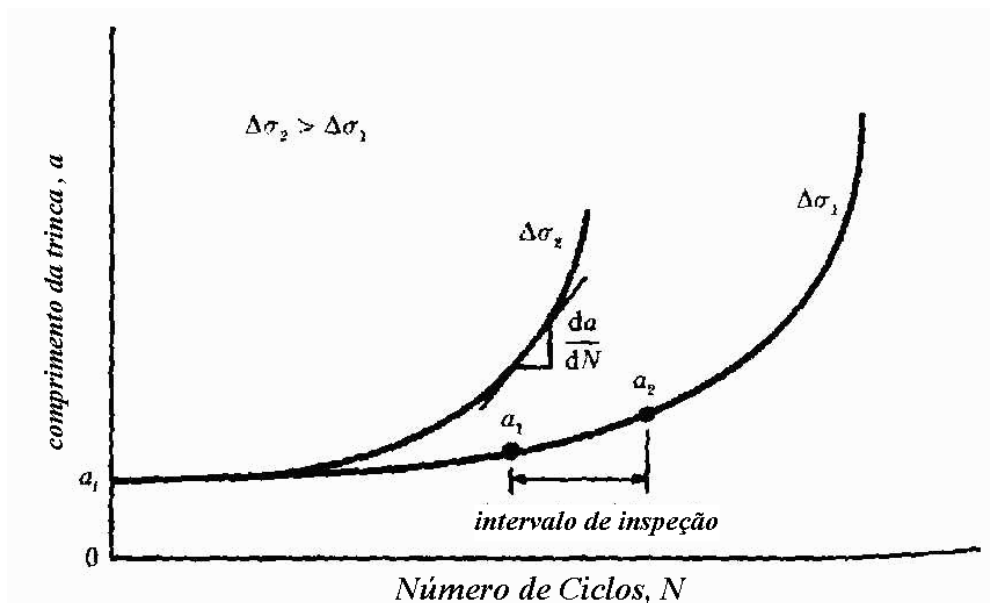


Figura 6 - Curva de Crescimento de Trinca

Paris et al. (1961) e Paris & Erdogan (1963) mostraram que o incremento de crescimento de uma trinca de fadiga da/dN é relacionado com a variação do fator de intensidade de tensão como segue,

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \text{ Onde, } C \text{ e } m \text{ são constantes do material.}$$

A Figura 7 ilustra uma curva típica de propagação de trinca ilustrando as três regiões, nucleação (a), propagação (b) e instabilidade da trinca (c).

O ensaio de propagação de trinca de fadiga fornece uma curva de tamanho de trinca a versus número de ciclos de fadiga N . A partir desta curva é obtido o gráfico de velocidade de propagação de trinca da/dN versus fator cíclico de intensidade de tensões ΔK .

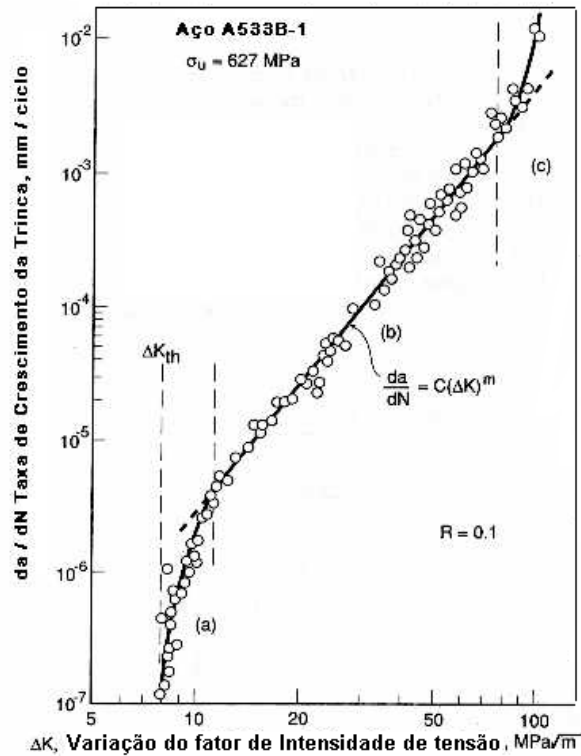


Figura 7 - Curva Típica de Propagação de Trinca

A medição do comprimento de trinca é realizada pelo método indireto da determinação da flexibilidade do corpo de prova. No lugar da observação visual, o comprimento da trinca é estimado, usando-se uma equação polinomial que correlaciona o comprimento da trinca com a rigidez do corpo de prova, ou melhor, o seu inverso – flexibilidade – para uma dada geometria do corpo de prova.

O cálculo da velocidade de propagação da trinca da/dN é realizado através do método de diferenciação da secante à curva tamanho de trinca versus número de ciclos, conforme ilustrado na Figura 8.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}$$

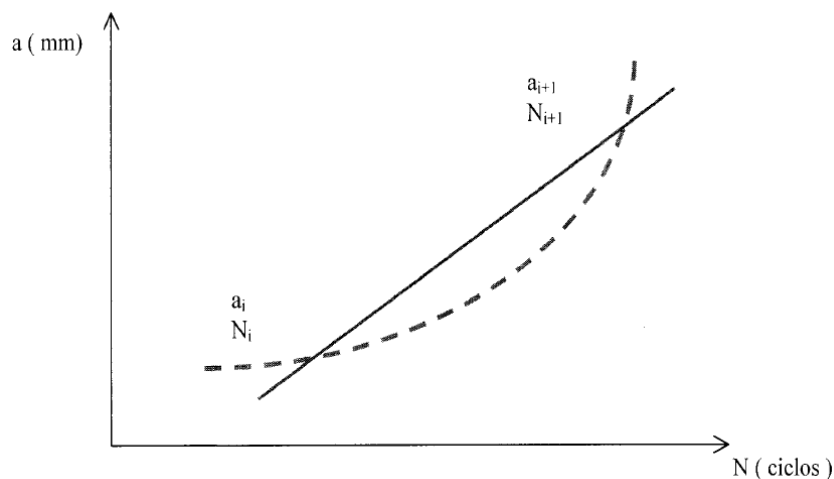


Figura 8 - Método da Diferenciação da Secante

Será mostrado a seguir como são obtidas as constantes do material C e m a partir de uma curva de propagação de trinca que esteja na escala logaritmica-logaritmica ou log-log. Para referência na ordem de grandeza a Tabela 1 ilustra alguns valores de C e m para alguns tipos de aços, uma vez que os parâmetros a serem extraídos também serão de um aço.

Tabela 1 - (Dowling (1999))

Tipo de aço	C $\frac{mm/ciclo}{(MPa\sqrt{MPa})^m}$	m
Ferrítico-Austenítico	6,89E-9	3,0
Martenstico	1,36E-7	2,25
Austenítico	5,61E-9	3,25

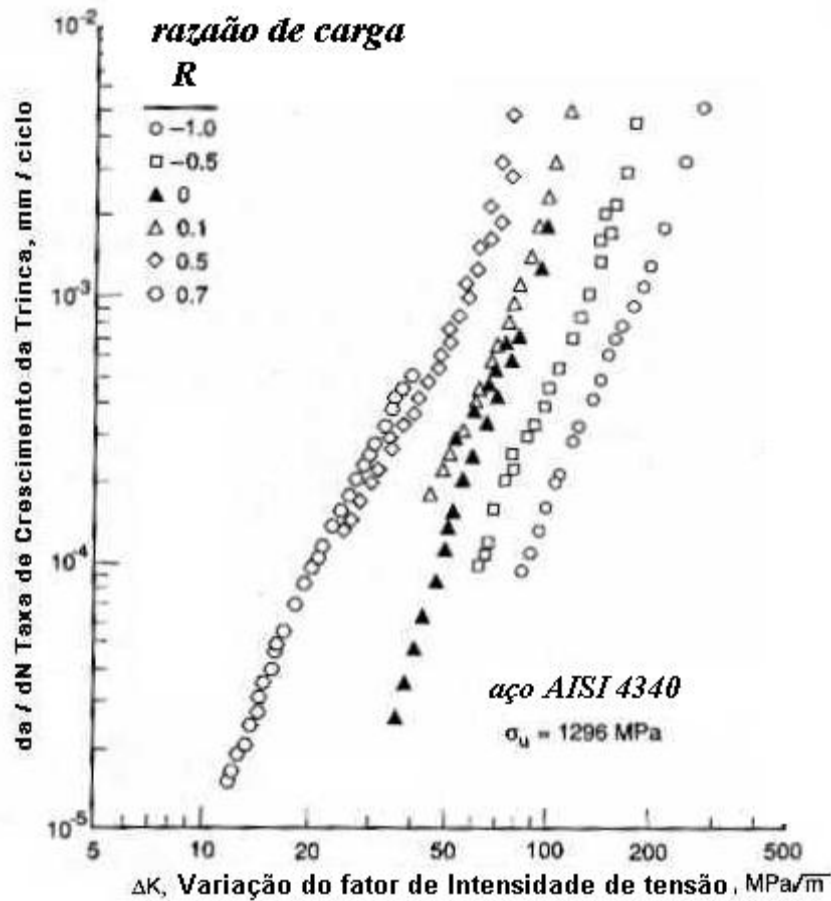


Figura 9 - Curva de Propagação de Trinca Aço AISI 4340

Será utilizado como exemplo a curva obtida para razão de carga $R=0,1$. O processo inicia-se com a escolha dos pares dos pontos $(\Delta K, da/dN)$, escolhendo os extremos da curva $(21; 1,0E-5)$ e $(155; 1,0E-2)$, denota-se os pontos da seguinte maneira,

$$\frac{da/dN_1}{da/dN_2} = \left(\frac{\Delta K_1}{\Delta K_2} \right)^m; \quad m = \frac{\log(da/dN_1) - \log(da/dN_2)}{\log(\Delta K_1) - \log(\Delta K_2)};$$

$$m = \frac{\log 1,0^{-5} - \log 1,0^{-2}}{\log 21 - \log 155}; \quad m = 3,46$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m; \quad 1,0E-5 = C(21)^{3,46}; \quad C = 2,66E-10 \frac{mm/ciclo}{(MPa\sqrt{m})^m};$$

Assim as constantes do aço AISI 4340 para $R=0,1$ são $C=2,66E-10$ e $m=3,46$.

A Figura 10 ilustra um resumo do procedimento a executar em um ensaio de propagação de trinca. É feito um ensaio em um corpo de prova submetidos a diferentes tipos de carregamentos obtendo-se, portanto uma variedade de taxas de propagação de trincas. De

posse dessas informações constrói-se a curva $da/dN - \Delta K$. Estas informações podem mais tarde serem utilizadas no desenvolvimento de componentes que admitam trincas fornecendo uma parâmetro de controle de desenvolvimento. O comprimento da trinca versus ciclos pode ajudar a estimar o comprimento crítico de uma trinca em uma estrutura mecânica além de orientar na elaboração de um programa de inspeção em estruturas como aeronaves ou plataformas marítimas.

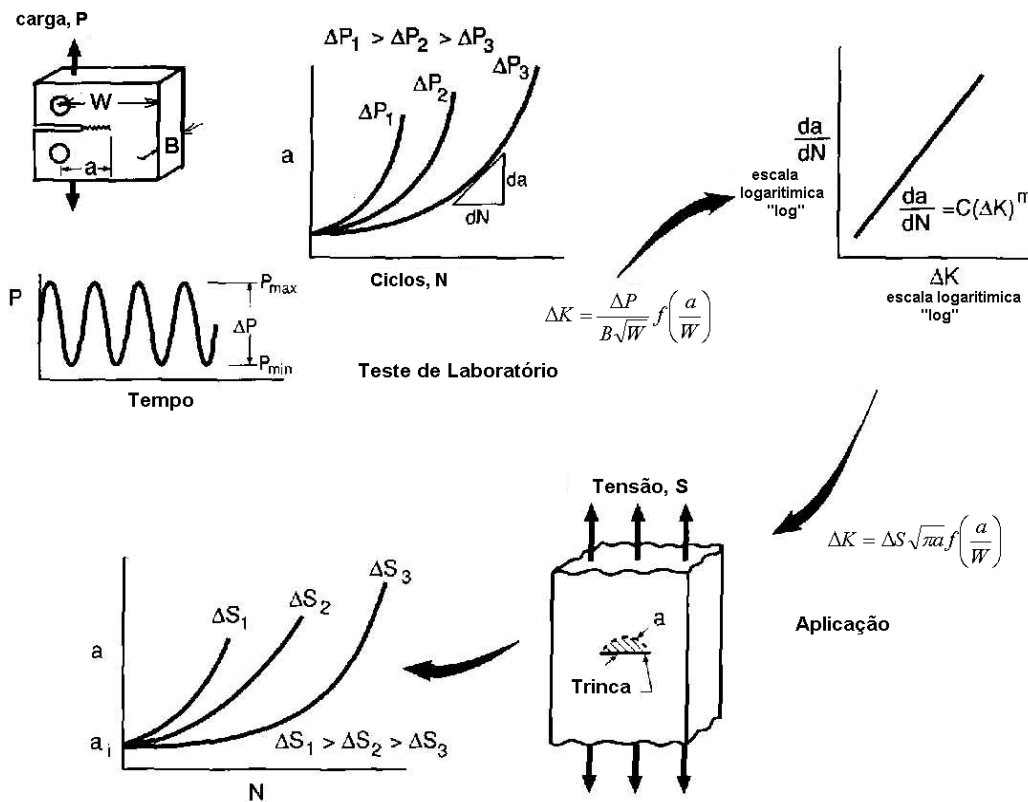


Figura 10 - Etapas para Obtenção de Curvas $da/dN - K$

4.2. FORMULAÇÃO DO MÉTODO BAYESIANO EMPÍRICO

Para uma análise de parâmetros de um modelo estocástico com poucos dados o modelo bayesiano empírico se mostra aplicável.

De acordo com LEHOCZKY (1990), uma possibilidade é combinar os dados disponíveis com dados de outros sistemas semelhantes. Por exemplo, em modelação de confiabilidade ou problemas de avaliação de risco, o analista calcula a taxa de falha de um sistema com os dados de falha do sistema em questão e de outros sistemas semelhantes. Em uma primeira análise pode parecer impróprio combinar dados de sistemas diferentes. Porém, geralmente, até mesmo sistemas idênticos exibirão características de falha diferentes. O processo estocástico de falhas, modelado por um processo de Poisson com parâmetro λ , pode ter diferentes valores de λ para sistemas diferentes. Cada sistema gera seu próprio processo estocástico de falhas e os processos estocásticos separados têm estruturas probabilísticas um pouco diferentes. A solução é tratar as características de falha de cada sistema como variáveis aleatórias. As variáveis aleatórias são tiradas de uma distribuição anterior. A natureza estocástica do processo de falha para qualquer sistema particular dá a variabilidade dentro de um sistema. Modelos de parâmetro hierárquicos ou aleatórios surgem em situações onde há variabilidade ao mesmo tempo entre unidades e dentro de unidades.

O resultado de interesse é calcular o conjunto de parâmetros para o i ésimo sistema, λ_i . Todos os elementos (n) do processo estocástico devem ser usados embora só X_i tenha λ_i para seus parâmetros. Os outros $n-1$ processos são úteis para estimar θ , o parâmetro da população anterior. Isto, em troca, permite estimativa mais precisa de λ_i .

Por conseguinte, todos os dados devem ser usados para calcular os parâmetros individuais e também calcular θ . Há duas aproximações para a estimativa: Bayes e Bayes Empírica. Na aproximação bayesiana, o analista atribui uma distribuição anterior ao parâmetro da população θ . A distribuição conjunta de θ , $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ e $X_1, \dots, X_1, \dots, X_n$ é escrita e a distribuição posterior de θ e $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ dado X_1, \dots, X_n determinada. Estimativas de θ ou $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ são conduzidas.

É importante notar que θ depende de todos os X_i , $1 \leq i \leq n$, por conseguinte λ_i dependerá de todo X_j , $1 \leq j \leq n$ por θ .

O Bayes Empírico tem um ponto de vista bayesiano mas não especifica a distribuição anterior de θ . Ao invés disso, um procedimento de dois passos é seguido. Primeiro, a distribuição condicional de θ dado X_1, \dots, X_n deve ser determinada. Isto requer integração fora dos

parâmetros $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Em certos casos especiais, isto é computado de forma fechada, mas frequentemente é calculado numericamente. Uma vez obtida a distribuição condicional, a estimativa de probabilidade máxima é determinada, ou seja, é calculado o valor de $\theta, \hat{\theta}$, que maximiza $f(X_1, \dots, X_n | \theta)$. A segunda fase considera $\hat{\theta}$ como o verdadeiro valor do parâmetro θ . Isto significa que $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ é tratado como uma amostra aleatória da distribuição anterior $F(\lambda|\theta)$. Deve ser computada a distribuição posterior para cada $\lambda_i | X_i$ e feitas as estimativas apropriadas de λ_i com uso do método padrão bayesiano.

Considere o simples exemplo de apenas parâmetros não variáveis. Suponha uma distribuição de n processos de Poisson aleatórios com parâmetros $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Os processos observados em $[\theta, T]$ e os parâmetros $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ são uma amostra aleatória de distribuição exponencial (θ) com média $1/\theta$:

$$\lambda_1, \dots, \lambda_n \stackrel{i.i.d.}{\sim} f(\lambda|\theta) = \exp(-\theta\lambda), \lambda > \theta$$

$$X_j | \lambda_j \sim \text{Poisson}(\lambda_j T), 1 \leq j \leq n$$

Na aproximação bayesiana empírica, o analista deve encontrar primeiro a distribuição de X_1, \dots, X_n dado θ . Isto requer escrever a distribuição conjunta de $(\lambda_1, \dots, \lambda_n, X_1, \dots, X_n)$ dado θ e integrar as variáveis $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Neste caso, a distribuição conjunta é:

$$\begin{aligned} & f(\lambda_1, \dots, \lambda_n, X_1, \dots, X_n | \theta) \\ &= \left(\prod_{i=1}^n \frac{\exp(-\lambda_i T) (\lambda_i T)^{X_i}}{X_i!} \right) \prod_{i=1}^n \theta \exp(-\theta / \lambda) \\ &= \left[\prod_{i=1}^n \left(\frac{\theta}{(\theta + T)} \left(\frac{T}{\theta + T} \right)^{X_i} \right) \right] \times \left[\prod_{i=1}^n (\theta + T)^{X_i + 1} \lambda_i^{X_i + 1} \exp(-(\theta + T)\lambda_i) / \Gamma(X_i + 1) \right] \end{aligned}$$

O segundo produto que envolve λ_i é o produto de distribuições independente gama ($X_i + 1, \theta + T$). Integrando o λ_i não desejado:

$$f(X_1, \dots, X_n | \theta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\theta}{\theta + T} \right) \left(\frac{T}{\theta + T} \right)^{X_i}$$

Um produto de distribuições geométricas independentes. Este produto é maximizado:

$$\theta = nT / \sum_{i=1}^n X_i$$

O parâmetro θ depende de todo o X_i . Onde λ_i é uma distribuição exponencial (θ):

$$f_{\lambda_i}(\lambda) = \theta \exp(-\theta\lambda), \lambda > 0$$

A distribuição posterior de λ_i dado X_i é gama ($X_i + 1, \theta + T$). É calculado λ_i ao considerar a média posterior para minimizar a função de perda quadrática:

$$\lambda_i = \frac{X_i + 1}{\theta + T} = \frac{X_i + 1}{T/\bar{X} + T}$$

As estimativas de λ_i são baseadas em todos os dados e não somente em X_i . Esta solução melhora a precisão da estimativa de $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. A aproximação bayesiana requer uma distribuição anterior de θ específica. Para ilustrar, é selecionado uma forma conjugada na qual θ tem uma distribuição gama (α, β). A distribuição conjunta de $\theta, \lambda_1, \dots, \lambda_n$, é determinada por:

$$f(\theta, \lambda_1, \dots, \lambda_n) = \beta^\alpha \theta^{n+\alpha-1} e^{-\theta(\sum_{i=1}^n \lambda_i + \beta)}, \lambda_i > 0, \theta > 0$$

A distribuição posterior conjunta ($\theta, \lambda_1, \dots, \lambda_n$) dado (X_1, \dots, X_n) é:

$$f(\theta, \lambda_1, \dots, \lambda_n | \theta, X_1, \dots, X_n) = k \theta^{n+\alpha-1} e^{-\theta(\sum_{i=1}^n \lambda_i + \beta)} e^{-T \sum_{i=1}^n \lambda_i} \prod_{i=1}^n \lambda_i^{X_i}$$

Assim, a estimativa bayesiana de θ e $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ é calculada diretamente desta distribuição posterior.

Visando esclarecer as etapas a serem executadas no processo, será apresentado um exemplo extraído do Handbooks in Operations Research and Management Science LEHOCZKY (1990), Capítulo 6, Vol. 2, Exemplo 6.1, Página 290 a 292.

O exemplo mostra uma simulação para o processo de Poisson com parâmetro aleatório. A partir de uma seleção de dez observações de uma distribuição exponencial com parâmetro θ , tem-se:

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10} \sim \{\theta \exp(-\theta \lambda), \lambda > 0\}$$

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10} \sim \{0, \lambda < 0\}$$

Cada observação é usada como parâmetro de um processo de Poisson, isto é, são criados dez processos de Poisson independentes com parâmetros $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}$. Cada processo gera cinco intervalos entre eventos, que correspondem a cinco observações independentes com a distribuição exponencial (λ_i) de um total de cinquenta dados pontuais. Seja $X_{i1}, \dots, X_{i5} | \lambda_i$ iid exponencial (λ_i). Os parâmetros $\theta, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}$ são não observáveis e devem ser estimados.

$$\hat{\lambda}_i = \frac{1}{\bar{X}_i} = \frac{5}{\sum_{j=1}^5 X_{ij}}$$

O método Bayesiano empírico deve encontrar a distribuição condicional de $X_{ij}, 1 \leq i \leq 10, 1 \leq j \leq 5$ e então o MLE de θ .

$$L(\theta | X_{ij}) = \prod_{i=1}^{10} \Gamma(6) \theta \left(\theta + \sum_{j=1}^5 X_{ij} \right)^{-6}$$

O MLE é a solução da equação:

$$\frac{10}{\theta} = 6 \sum_{j=1}^5 \left(\theta + \sum_{i=1}^{10} X_{ij} \right)^{-1}$$

Esta equação deve ser resolvida numericamente e fornece o valor de $\hat{\theta}$. Depois que $\hat{\theta}$ é encontrado, os parâmetros $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}$ são tratados como uma amostra aleatória da distribuição exponencial ($\hat{\theta}$). Dados dos valores $X_{i1}, \dots, X_{i5}, \lambda_i$ tem distribuição posterior gama $(6, \hat{\theta} + \sum_{j=1}^5 X_{ij})$. Por conseguinte, o estimador bayesiano de λ_i assume uma função de erro de perda quadrática dada pela média posterior:

$$\hat{\lambda}_i = \frac{6}{(\hat{\theta} + \sum_{j=1}^5 X_{ij})}$$

É observado que o estimador depende de todos os dados e não apenas de $X_{ij}, 1 \leq j \leq 5$. Uma simulação experimental é efetuada com $\theta = 1$. Abaixo encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 2 - Resultados obtidos da simulação

Case	λ_i	\hat{X}_i	mle	Empirical Bayes
1	0.931	1.075	0.930	0.941
2	0.070	7.800	0.128	0.150
3	0.485	2.724	0.367	0.411
4	0.102	3.767	0.266	0.303
5	0.296	1.355	0.738	0.772
6	0.172	3.904	0.256	0.292
7	2.010	0.248	4.033	2.679
8	2.172	0.254	3.931	2.641
9	0.108	7.900	0.127	0.148
10	1.630	0.775	1.290	1.231

A média geral do erro quadrático através do MLE é $\sum(\lambda_i - 1|\bar{X}_i)^2 = 7.549$. A mesma medida de precisão com o estimador empírico bayesiano é 1,122. Esta enorme redução é causada principalmente pelos estimadores dos casos 7 e 8. Este fenômeno é muito pronunciado para a redução de grandes discrepâncias. O estimador bayesiano empírico move o MLE de volta para a média geral.

5. Estudo de Caso

Com o objetivo de aplicar o método proposto neste tópico será apresentado a simulação de um problema apresentando as etapas executadas e os resultados obtidos.

5.1. PROBLEMA PROPOSTO

A partir de resultados de medição de comprimentos de trinca de uma campanha de inspeção, prever o resultado do valor do comprimento para essas mesmas regiões após um determinado número de ciclos.

Os dados que serão apresentados são valores estimados com base em valores reais de uma campanha de inspeção de elementos estruturais primários com o fundo do tanque de um FPSO. Conhecendo as características do material dos elementos a serem analisados e o carregamento imposto a eles é possível determinar o comprimento inicial da trinca e o número de ciclos os quais serão utilizados como parâmetros iniciais para a análise.

Os valores posteriores do comprimento de trinca das mesmas regiões analisadas devem ser previstos. As próximas campanhas de inspeção devem ser incorporadas, visto que os dados devem ser completados quando houver uma lacuna na disponibilidade de alguns valores. Os dados previstos devem se ajustar. A evolução global do processo deve ser coerente com a observação do fenômeno e obedecer o seu comportamento físico.

5.2. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Inicialmente foi necessário combinar as formulações do método bayesiano empírico e do comportamento da propagação de trinca na fase II, ou seja, região que o comportamento da propagação da trinca respeita a Lei de Paris.

A partir do método de inferência bayesiano são estimados os comprimentos de trinca de cada região em função das estimativas dos comprimentos iniciais de trinca em função do material e carregamento imposto.

Para a definição de θ , parâmetro de população, são utilizados os conceitos básicos de mecânica da fratura, apresentados no item 4.1 visando trazer para a solução o comportamento de propagação de trinca. Nesta solução um processo iterativo foi feito para que as soluções pudessem convergir numericamente e encontrar o valor de θ relacionado ao valor médio dos comprimentos de trinca analisados.

O comprimento de trinca de cada região é definido a partir da formulação de inferência bayesiana e para isso é necessário encontrar o valor de μ_j correspondente à média dos comprimentos de trinca de cada região para um número de ciclos N_0 .

$$\mu_j = \sum_{i=1}^n \frac{a_{ij}}{n}, \text{ onde } j = 1, 2, \dots, m$$

Sendo:

a_{ij} : o comprimento de trinca medido

j: Indica o elemento estrutural

i: Indica o ponto de medição

n: Número de pontos medidos

m: o número de elementos estruturais medidos

Determinado o valor de μ_j a inferência de cada elemento pode ser conduzida:

$$\hat{\lambda}_j = (n + 1) / (\theta + n \cdot \mu_j), \text{ onde } j = 1, 2, \dots, m$$

Então é obtida a média dos comprimentos de trinca inferidos em cada elemento para um número de ciclos N_1 .

$$\hat{\mu}_j = 1 / \hat{\lambda}_j$$

E a média geral dos comprimentos de trinca inferidos para cada elemento é determinada:

$$\hat{\mu} = \sum_{j=1}^m \frac{\mu_j}{m}$$

Para a definição do valor final de trinca de cada ponto i em um certo número de ciclos é necessário utilizar uma ferramenta computacional para geração de números aleatórios com a distribuição exponencial de parâmetro λ .

Através do modelo que descreve a propagação da trinca também é definida a média geral de comprimentos de trinca da região em função do número de ciclos.

Ao combinar os dois desenvolvimentos é possível encontrar o valor de θ que iguala os valores obtidos para a média geral $\hat{\mu} = \mu(N)$. Então, através de θ com a aplicação de um método numérico, converge-se ao valor de $\theta = f(\theta)$ que resolve o problema.

5.3. EXEMPLO

Como não há valores reais para comprimentos de trinca em regiões de um FPSO, valores foram estimados de acordo com conhecimentos de pessoas que estão envolvidas com esse tipo de problema.

5.3.1. Região da Conexão de Longitudinais com o Fundo do Tanque

Na tabela abaixo as regiões das conexões dos longitudinais com o fundo estão identificados por LBT e os números na horizontal indicam os pontos que representam os pontos de medição para cada elemento.

Sendo assim temos a seguinte tabela para uma suposta medição inicial:

Tabela 3 - Comprimentos de Trinca na Inspeção

Elemento	LBT1	LBT2	LBT3	LBT4	LBT5	LBT6	LBT7
1	114	112	122	125	127	118	112
2	127	111	122	127	128	114	118
3	118	114	123	117	126	111	124
4	117	118	126	118	128	118	126
5	112	121	110	126	115	128	119
6	121	128	123	127	115	116	127
7	110	113	119	127	128	119	116
8	111	120	125	114	115	112	129
9	126	110	129	116	115	126	113
10	128	110	125	111	123	122	124

5.3.2. Análise da Propagação da Trinca

Para realizar uma análise da propagação da trinca, é necessário conhecer parâmetros, vistos no item 4.1, que são necessários para determinar esse comportamento.

Dados iniciais:

- Constantes do material:

$$C = 4.2 E - 12 \frac{m}{(MPa\sqrt{m})^m}$$

$$m = 3$$

- Tensão máxima e mínima de um ciclo da fadiga:

$$\sigma_{mín} = 100 MPa$$

$$\sigma_{máx} = 200 MPa$$

- Comprimento inicial da trinca:

$$a_0 = 100 \text{ mm}$$

Através da seguinte fórmula é possível determinar o ΔK .

$$\Delta K = \Delta S \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Logo,

$$\Delta K = 56,04 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

Determinado ΔK , e a partir de intervalos de comprimentos de trinca (a_f e a_0) foram determinados os número de ciclos para cada interação utilizando as seguintes equações:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m}$$

Com isso foi possível determinar, para cada intervalo de comprimento, a propagação da trinca em função do número de ciclos.

Logo, com base nos dados de inspeção se inicia o tratamento dos dados para compreensão da informação contida.

5.3.3. Aplicação da inferência

Conforme apresentado no item 5.2, foram calculadas as médias dos comprimentos de trinca, a partir dos dados de inspeção, para cada região considerada considerando o método Bayesiano.

Visto que os valores de inspeção são valores reais, é possível calibrar a média dos comprimentos utilizando o parâmetro θ , a fim de ajustar a curva para um comportamento mais real do caso em questão. Em seguida, para a definição dos valores finais dos comprimentos de trinca foi necessário utilizar uma ferramenta para a geração de número aleatórios com distribuição exponencial de parâmetro λ .

Para os intervalos em função do número de ciclos foram obtidos os seguintes resultados:

- Para $N = 5.0 \text{ E } +5$

$$\theta = 351.006$$

$$\mu = 141.302 \text{ mm}$$

- Para $N = 7.0 \text{ E } +5$

$$\theta = 399.190$$

$$\mu = 165.454 \text{ mm}$$

- Para $N = 9.0 \text{ E } +5$

$$\theta = 496.121$$

$$\mu = 195.935 \text{ mm}$$

- Para $N = 11.0 \text{ E } +5$

$$\theta = 619.984$$

$$\mu = 235.803 \text{ mm}$$

5.3.4. Resultados da Inferência

O Gráfico 1 apresenta o resultado da propagação de trinca do modelo não linear calculado de acordo com os conceitos básicos de mecânica da fratura. O gráfico foi gerado considerando apenas a fase em que a trinca obedece a lei de Paris.

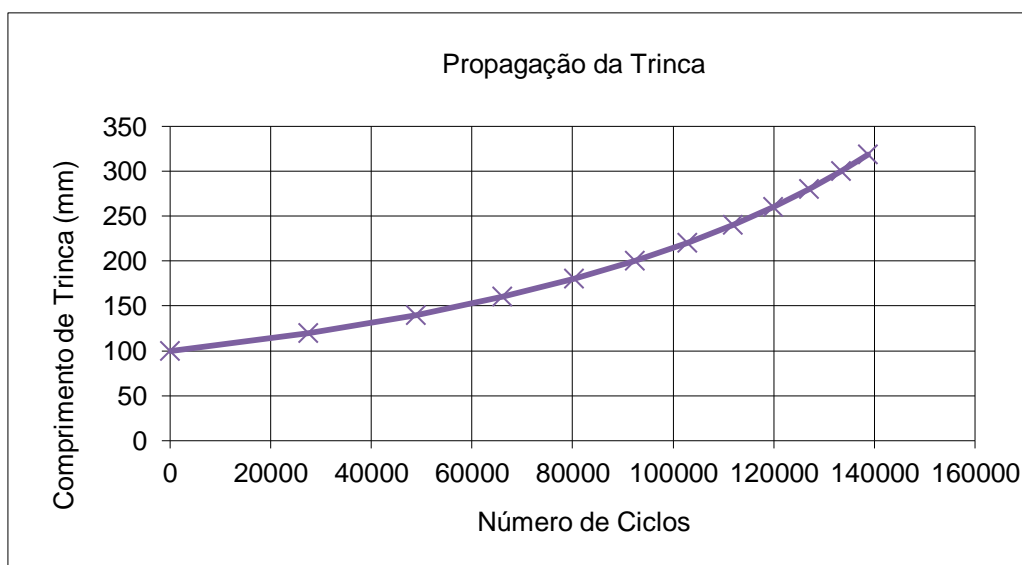


Gráfico 1 - Comprimento de Trinca X Número de Ciclo

O Gráfico 2 mostra os resultados da propagação da trinca para cada elemento através da inferência Bayesiana.

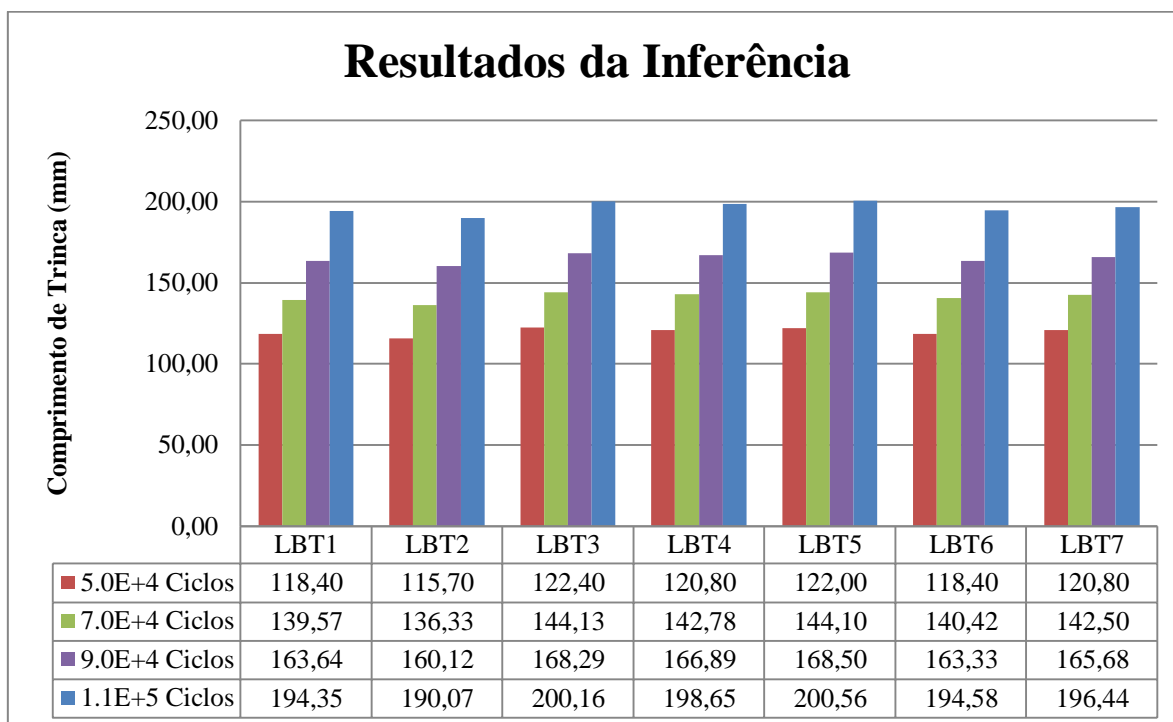


Gráfico 2 - Resultado da Inferência Bayesiana para cada Elemento

A partir do Gráfico 2 nota-se que o comportamento da propagação ocorre como o esperado, visto que as taxas de variação dos comprimentos de trinca para um mesmo intervalo de número de ciclos aumentam exponencialmente de acordo com o número de ciclos. Na Tabela 4, é possível verificar essa taxa de crescimento de trinca em função dos intervalos de ciclos.

Tabela 4 - Taxa de Crescimento de Trinca

Taxas 1-2	21,165	20,627	21,730	21,979	22,104	22,020	21,697
Taxas 2-3	24,075	23,797	24,156	24,106	24,392	22,909	23,181
Taxas 3-4	30,713	29,947	31,874	31,769	32,068	31,250	30,765

Com um objetivo comparativo, foi feito, para o mesmo caso, uma simulação utilizando o método determinístico. Utilizando o mesmo intervalo de comprimentos de trinca encontrados, o modelo determinístico se mostrou mais conservador, mostrando que o número de ciclos necessários para provocar o mesmo comprimento de trinca fosse menor do que o método probabilístico.

- Modelo Determinístico:

De forma análoga a realizada na primeira parte do método probabilístico, foram utilizadas as equações que envolvem parâmetros de característica dos materiais e de carregamento. Para cada intervalo de comprimento de trinca foi possível gerar o seguinte gráfico:

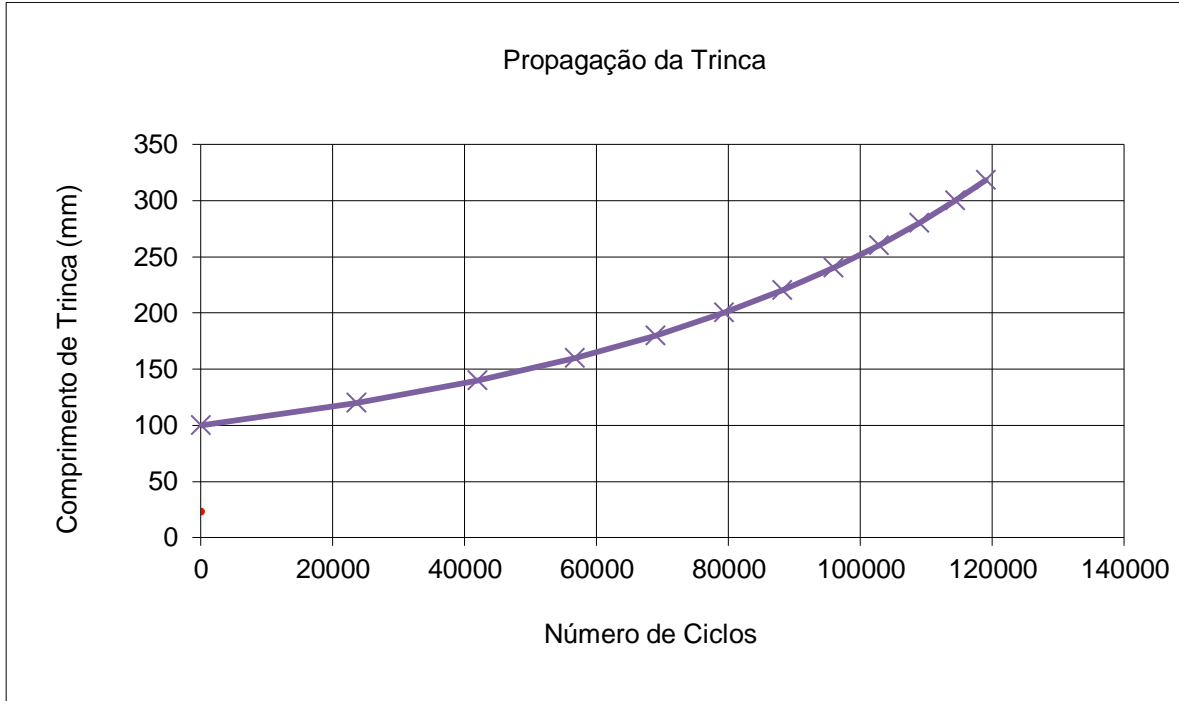


Gráfico 3 - Propagação (Método Determinístico)

Conhecidos os comprimentos inicial e final, os valores das constantes do material e o valor de ΔK (valores apresentados no item 5.3.2) e utilizando as seguintes equações, pode-se determinar o número de ciclos necessários para atingir tal comprimento de trinca.

$$a_0 = 100 \text{ mm}, a_f = 235.8 \text{ mm}$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m}$$

$$N = 9.44E + 4$$

Comparando os resultados encontrados para os números de ciclos encontrados para os dois casos, através do método determinístico foi necessário um menor número de ciclos que o apresentado pelo método probabilístico.

Modelo	Ciclos
Determinístico	9.44E+04
Probabilístico	1,1E+05

6. Conclusão

A realização da coleta de dados de falhas encontradas em FPSO's, através de inspeções, é necessária para que haja um controle da evolução desse problema. A partir desses valores é possível entender o comportamento estrutural e com isso ajuda gerar informações visando estimar os períodos de inspeções e reparos.

A abordagem não linear do processo de propagação da trinca conduz a resultados mais próximos ao fenômeno observado e fornece os parâmetros necessários à inferência bayesiana.

Considerando que o objetivo era a criação de um modelo teórico básico, o modelo proposto atendeu as expectativas quanto ao comportamento dos resultados a serem encontrados. Para os mesmos intervalos de ciclos as taxas de variação dos comprimentos de trinca aumentaram de acordo com o aumento do número de ciclos. A falta de resultados reais para confrontar valores deve ser levada em consideração, visto que os dados de inspeção são importantes para a conferência dos dados previstos e a calibração do modelo. A falta desses dados pode levar a estimativas que não correspondem aos comportamentos esperados para o caso em questão.

6.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar a inferência levando em consideração diferentes carregamentos aplicados para um mesmo elemento estrutural.

Considerar possíveis erros de medição, como uma possível falta de resultados, para aumentar a confiabilidade do modelo (Implementação do "Missing Data").

Procurar fazer um levantamento de dados reais para confrontar valores para uma calibração ou uma correção do modelo.

Referências Bibliográficas

Baik, J.M.; Herman, L. & Arsoro, R.J. “ *Mechanics of Fatigue*”, AMD, vol.47, ASTM, pp. 33-51, 1981

Dowling, N.E. “ *Mechanical Behavior of Materials* ”, Prentice Hall, USA, 1999

FARIAS, B. J., 2010, INFERÊNCIA BAYESIANA DE DADOS DE INSPEÇÃO DE ESTRUTURA DE CASCO DE NAVIO PLATAFORMA. Dissertação de M. Sc., Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

LEHOCZKY, J., 1990, Handbooks in Operations Research and Management Science Chapter 6 – Statistical Methods, Vol. 2, Department of Statistics, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, P.A., U.S.A., pp. 255–293.

MACHADO, J. M., 2002, Planejamento baseado em risco de inspeções à fadiga em unidades estacionárias de produção. Dissertação de M. Sc., Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Paris, P.C. & Erdogan F. “ *Critical Analysis of Crack Propagation Laws*”, Journal Basic Engineering, n.0 85, pp. 528 – 534, 1963

Park, S. J.; Earmme, Y. & Song, J. H. “ *Determination of The Most Appropriate Mesh Size for a 2-D Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure Behavior*”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, N.o 20, pp. 533-545, 1997

Suresh, S. & Ritchie, R. O. “ *A Geometric Model for Fatigue Crack Closure Induced by Fracture Surface Morphology* ”, Metallurgical Transactions, n.0 13^A, pp 1627 – 1631, 1982