



PRPG Pré-Reitoria de Pós-Graduação  
PIBIC/CNPq/UFPG-2009

## **“SIMULAÇÃO DE MODELOS COMPUTACIONAIS APLICADA À INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS METÁLICAS SOB EFEITO DE CORROSÃO-FADIGA”**

**Maximo Justino da Silva Neto<sup>1</sup>, Antonio Almeida Silva<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

O presente relatório tem como objetivo principal expor conhecimentos de Integridade estrutural, da mecânica do dano contínuo, da mecânica da fratura, e do estudo fenomenológico dos problemas de interesse em integridade de dutos com efeitos de ambiente. Esses conhecimentos são de suma importância para o projeto de pesquisa já que o mesmo tem como objetivo crucial o desenvolvimento de ferramentas computacionais que possibilitem a integração de modelos de análise estrutural via Método dos Elementos Finitos e Identificação Paramétrica através da análise inversa, para a solução de problemas que ocorrem em estruturas metálicas sujeitas a processos de corrosão-fadiga. Foi modelado o início e crescimento de uma trinca submetida à combinação de efeitos mecânicos e corrosivos. Essa simulação foi baseada nas sínteses da Mecânica da Fratura e da Mecânica do Dano Contínuo. Com essa modelagem conseguiu-se determinar as variações em função do tempo da concentração de agentes na ponta da trinca, do comprimento da trinca, do raio de curvatura da trinca e do acúmulo de dano na ponta da trinca.

**Palavras-chave:** dano, corrosão, falhas.

### **“COMPUTATIONAL SIMULATION OF MODELS APPLIED TO THE INTEGRITY OF METAL STRUCTURES UNDER EFFECT OF CORROSION-FATIGUE”**

### **ABSTRACT**

This report aims to expor knowledge upon all aspects of the continuous damage mechanics' Structural Integrity, the fracture mechanics, and the phenomenological study of interest problems on pipeline integrity with environmental effects. This knowledge is of great important for this research, since its aims are crucial for the development of computational tools, and allows the integration of models for structural analysis by Finite Element Method and Parametric identification through inverse analysis for the solution of problems that occur in metal structures subject to corrosion-fatigue processes. Was modeled and the top growth of a crack subjected to the combination of mechanical and corrosive effects. This simulation was based on summaries of the Mechanics of Fracture and Damage Mechanics of Continuous. With this model we were able to determine the variations depending on the time of the concentration of agents at the tip of the crack, the crack length, the radius of curvature of the crack and the accumulation of damage at the tip of the crack.

**Keywords:** damage, corrosion, failures.

### **INTRODUÇÃO**

A sofisticação dos problemas com que a humanidade tem se deparado nas últimas décadas, em áreas tão diversas como as megaestruturas, a mecânica do contínuo, a nanotecnologia, a genômica, a bioinformática, a computação quântica, a ecologia, a astrofísica e o desenvolvimento sustentado. A título de exemplo, nos apresenta exigência de respostas exponencialmente mais complexas com relação àquelas que precisamos gerar no passado, apresentando para a ciência e para a comunidade científica um desafio:

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Eng. Mecânica, Unidade Acad. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: [maximo.justino@gmail.com](mailto:maximo.justino@gmail.com)

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Prof. Doutor, Unidade Acad. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: [almeida@dem.ufcg.edu.br](mailto:almeida@dem.ufcg.edu.br)

a necessidade de obtenção de respostas cada vez mais sofisticadas, objetivando tratar aquela complexidade, em tempos sucessivamente menores, e por meio de solução de problemas complexos. E esta solução se dar apenas por observações do problema, de sua fenomenologia e a concepção do modelo físico e do modelo fenomenológico que antecede o desenvolvimento do modelo matemático.

Modelos matemáticos são estabelecidos a partir de modelos fenomenológicos, que recaem em sistemas de equações diferenciais parciais ou de equações diferenciais ordinárias de elevado número de incógnitas, demandando forte esforço computacional na sua solução. A aproximação das soluções dessas equações por procedimentos numéricos tornou-se necessária à medida que as ciências ambientais, engenharias, tecnológicas avançavam no sentido da satisfação das necessidades humanas.

No presente trabalho foi simulado um duto trincado submetido a carregamento e ação de fatores ambientais tais como ar, água, corrosão, etc. Essa análise foi baseada na síntese da Mecânica da Fratura e da Mecânica do Dano Contínuo. A propagação da trinca foi considerada como um resultado da interação entre o balanço de forças e energia global no sistema corpo-carga-trinca e o processo de acumulação de dano. Permanecendo numa aproximação fenomenológica pura para o dano, similar aquela da Mecânica do Dano Contínuo, descrevemos o dano através de funções contínuas de coordenadas e tempo.

Portanto o objetivo principal deste trabalho foi determinar a evolução de fenômenos que ocorrem na ponta de uma trinca com o tempo.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.0 – Estudo Fenomenológico

#### 1.1 - Integridade de Dutos.

Apesar dos dutos serem uma das formas mais seguras e confiáveis para o transporte de petróleo e derivados, as companhias do setor se preocupa constantemente com a segurança operacional dos dutos, pois sabem que um acidente de grande porte pode causar imensos danos econômicos, sociais e em termos da imagem da companhia. No Brasil, em particular, a malha dutoviária tem dezenas de milhares de quilômetros de extensão e uma vida operacional considerável. Esta malha deve ser monitorada continuamente e problemas encontrados devem ser avaliados de forma confiável, a fim de avaliar o comprometimento da integridade estrutural do duto e permitir que reparos necessários sejam feitos com segurança, antes que ocorra um acidente.

A integridade de dutos é a atividade responsável pela certificação de que um determinado duto esteja operando com alto grau de segurança e envolve vários aspectos e informações das áreas de projeto, operação, inspeção e manutenção. O Estudo fenomenológico junto com um programa de gerenciamento da integridade de dutos assume um papel fundamental para sistematizar as informações obtidas destas diversas áreas mantendo uma visão integrada do problema (Souza 2003).

Para manter a integridade de um duto temos que saber quais são as causas que levam um duto a falhar. Hopkins (2002) mostra que a maior causa de falhas em dutos (óleo e gás) nos EUA é devida a fatores externos (danos provocados por ação de terceiros) seguida de falhas devido à corrosão. A CETESB-SP (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo) realizou um estudo para apurar as causas de vazamentos em dutos, durante o período de 1980-2002. A classificação utilizada para causa dos acidentes envolvendo dutos foi:

- Causas Naturais: eventos associados com ação da natureza tais como erosão, deslizamentos de terra ou movimentação do solo;
- Ação de Terceiros: eventos associados com perfuração não intencional da linha, atos de vandalismo, entre outros;
- Falhas Mecânicas: eventos associados a defeitos ou mau funcionamento de válvulas, flanges, juntas, bem como desgaste ou fadiga do material;
- Falhas na Manutenção: eventos associados durante os trabalhos de manutenção das linhas;
- Corrosão: eventos associados à ação da corrosão.

De acordo com os dados obtidos, entre as causas que puderam ser apuradas, a maioria dos vazamentos dos dutos foram motivados por corrosão (17%) e pela ação de terceiros (11%), conforme ilustrado na Figura 1. Os resultados reforçam os argumentos de Hopkins de que para melhorar a segurança

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Eng. Mecânica, Unidade Acad. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: [maximo.justino@gmail.com](mailto:maximo.justino@gmail.com)

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Prof. Doutor, Unidade Acad. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: [almeida@dem.ufcg.edu.br](mailto:almeida@dem.ufcg.edu.br)

operacional de dutos é preciso manter um sistema de controle e gerenciamento da integridade do duto durante toda a sua vida útil. Isto significa que geralmente um duto não falha devido somente à corrosão, mas sim devido a uma falha do sistema de controle de corrosão por completo. A Figura 2 mostra um caso de oleoduto rompido devido corrosão no ano de 1990 na cidade de Campinas-SP.

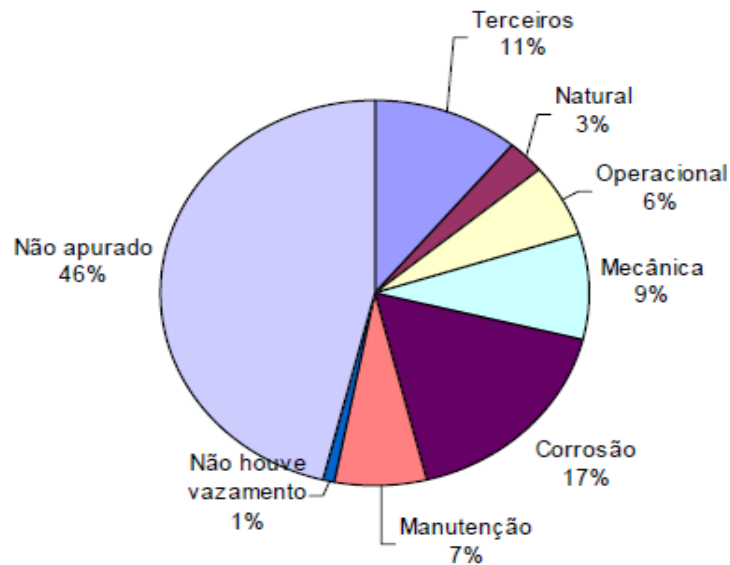


Figura 1 – Causas das ocorrências envolvendo acidentes com dutos no Estado de São Paulo: Total de 149 casos registrados pela CETESB.



Figura 2 – Oleoduto rompido por corrosão em Campinas-SP(CETESB).

## 1.2 - Definição e Tipos de Defeitos.

Um dos pré-requisitos para que um duto continue operando de forma segura é garantir um alto nível de confiabilidade da integridade estrutural do mesmo durante sua vida útil. Tal integridade pode ser ameaçada por defeitos introduzidos no duto durante o processo de fabricação, instalação ou operação.

Um defeito é uma descontinuidade ou irregularidade do material ou geométrica que é detectada por inspeção de acordo com o requerimento de vários códigos e normas que definem os limites de rejeição de defeitos.

Um defeito é considerado não aceitável quando sua magnitude for suficiente para garantir a rejeição baseada nos requerimentos de códigos, normas ou outros métodos usados para avaliação do defeito.

Os principais defeitos encontrados em dutos podem ser agrupados em três categorias de acordo com suas causas, conforme descrito logo abaixo.

### 1.2.1 - Defeitos de Corrosão.

- Trincamento sob Tensão em meio corrosivo: Acontece quando um material, submetido à tensões de tração (aplicadas ou residuais), é colocado em contato com um meio corrosivo específico.

- Corrosão Uniforme ou Generalizada: Perda uniforme ou gradual da espessura de parede do duto ao longo de uma extensa área.
- Corrosão por “Pite”: Corrosão localizada, com grandes profundidades que diminuem consideravelmente a espessura do duto.
- Fissuração por Hidrogênio: Ocorre quando o hidrogênio migra para o interior do material e acumula-se em falhas existentes, provocando falha a baixos níveis de tensão.

### 1.2.2 - Danos Mecânicos.

- Mossa ou amassamento (“Dent”): Mossa causada por um evento que produz uma variação visível na curvatura da parede do duto ou componente sem que ocorra variação na espessura de parede do duto.
- Rasgos Superficiais (“Gouge”): Imperfeição na superfície causada pela remoção mecânica de material ou deslocamento de material provocando a redução da espessura de parede do duto.
- Ranhuras (“Groove”): Uma ranhura pode causar concentração de tensões em um determinado ponto podendo assim ser considerado um defeito.
- Trincas Superficiais: Trincas geradas na superfície do duto.

### 1.2.3 - Defeitos de Soldagem.

- Penetração Incompleta: Quando a raiz da junta a ser soldada não é fundida e preenchida completamente.
- Fusão Incompleta: Refere-se à ausência da união por fusão entre passes adjacentes da solda e o metal de base.
- Inclusões de Impurezas (“Slag”): Ocorre quando partículas de óxido e outros sólidos não-metálicos ficam aprisionados entre passes de solda ou entre a solda e o metal de base.
- Porosidade: A porosidade é formada pela evolução de gases, na parte posterior da poça de fusão, durante a solidificação da solda.
- Mordedura (“Undercut”): São reentrâncias agudas formadas pela ação da fonte de calor do arco entre um passe de solda e o metal de base ou um outro passe adjacente.

A Figura 3 e a Figura 4 ilustram alguns exemplos de defeitos de corrosão, mecânicos e de soldagem comumente encontrados em dutos.

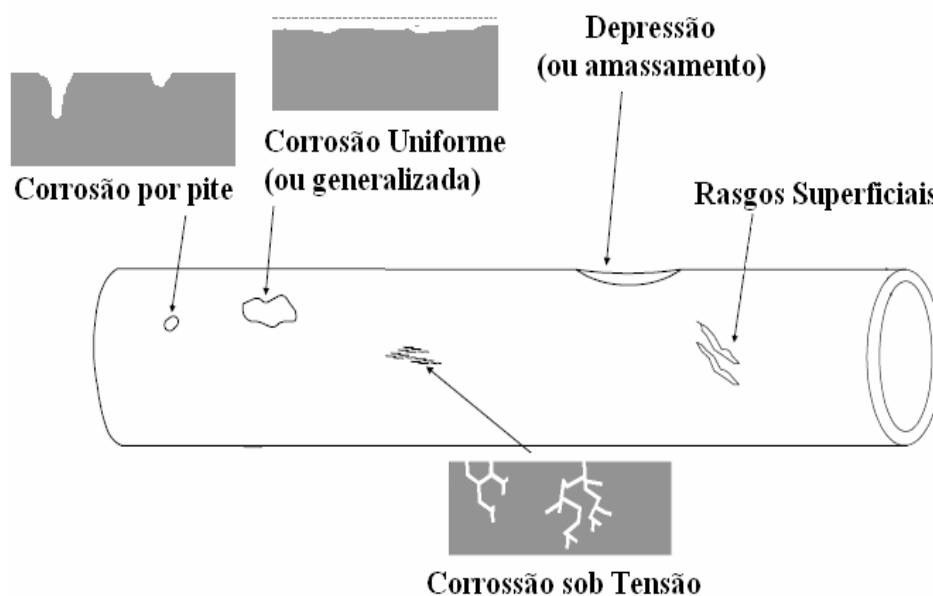


Figura 3 – Exemplos de tipos de defeitos de corrosão e danos mecânicos em dutos (CABRAL).

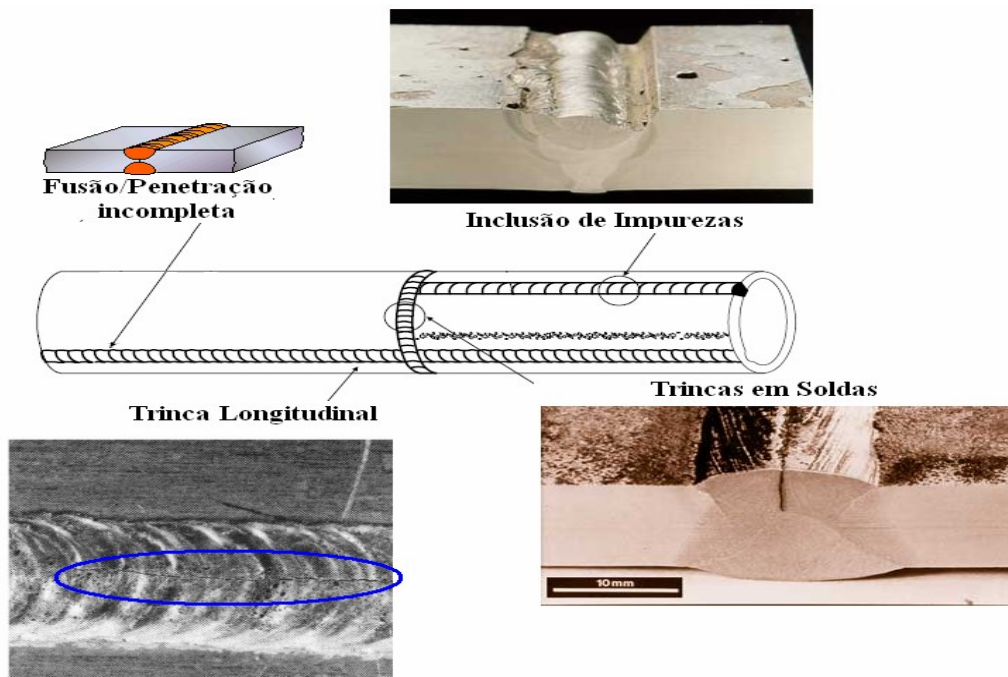


Figura 4 – Exemplos de defeitos de soldagem (CABRAL).

## 2.0 - Mecânica do Dano Contínuo.

### 2.1 – Conceito.

A mecânica do dano em meios contínuos leva em conta os efeitos da degradação em modo difuso e progressivo de sólidos, submetidos a ações de natureza mecânica ou não-mecânica, por meio de redução das propriedades de resistência e rigidez do material. É importante notar desde logo a diferença em relação à Mecânica da Fratura.

Enquanto que a mecânica da fratura lida com as condições de propagação de uma fissura macroscópica imersa num meio contínuo íntegro, a mecânica do dano se ocupa do efeito, sobre a resposta do material, de um processo de micro fissuração distribuída que se desenvolve numa etapa preliminar à formação da fissura discreta. A teoria permite descrever localmente, observando-se um 'volume representativo' do material em torno do ponto considerado, a evolução dos fenômenos que se desenvolvem entre um estado inicial, relativo a uma situação de material íntegro, e um estado final, caracterizado pela formação de uma fissura macroscópica que equivale à ruptura do elemento de volume.

Não se pode considerar que o dano seja mensurável diretamente, pois procedimentos voltados para tal fim não são viáveis. Porém é possível quantificá-lo de forma indireta medindo-se a redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como por exemplo, o módulo de elasticidade.

Em síntese, a diferença entre Mecânica do Dano e Mecânica da Fratura pode ser colocada, segundo JANSON & HULT (1977), da seguinte forma (v. figura 5):

- na Mecânica do Dano a resistência de uma estrutura carregada é determinada em função da evolução de um campo de defeitos (micro-fissuras ou poros) considerado continuamente distribuído;
- na Mecânica da Fratura a resistência de uma estrutura carregada é determinada em função da evolução de um único defeito, como uma fissura pontiaguda pré-definida, num meio mecanicamente intacto.

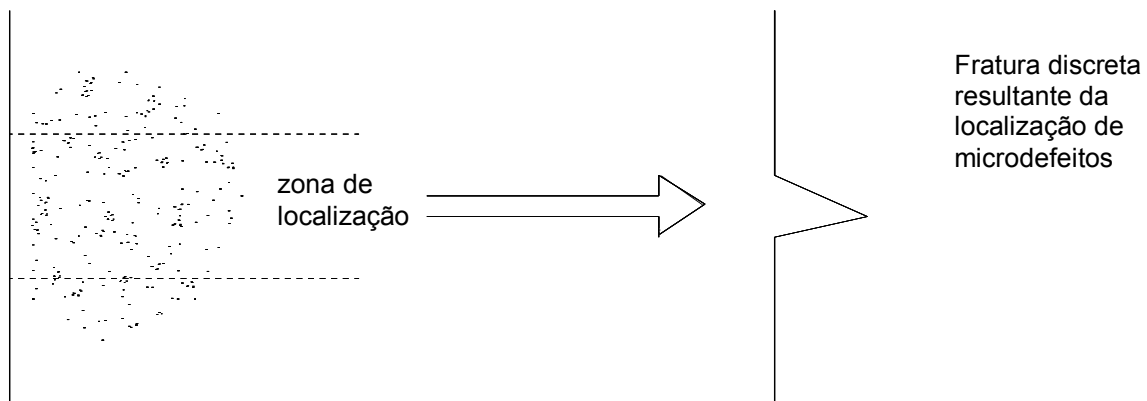


Figura 5 – Processo de transição entre Dano e Fratura. (DRIEMEIER (1995))

O trabalho pioneiro que introduziu o conceito de Dano foi elaborado por KACHANOV (1958). Nesse trabalho procura-se justificar a ruptura, precocemente observada em relação ao esperado em metais em regime de deformação lenta, como uma consequência da existência de defeitos no material. Para a consideração dos defeitos numa abordagem de meio contínuo, define-se uma variável escalar  $\psi$ , denominada então de continuidade, tal que apresenta localmente um valor unitário para um material completamente livre de defeitos, enquanto que  $\psi = 0$  caracteriza um material sem qualquer capacidade de carga. A quantidade complementar  $D = 1 - \psi$  é, por conseguinte, uma medida do estado local de deterioração ou dano. Para um material completamente livre de defeitos tem-se  $D = 0$ , enquanto  $D = 1$  corresponde a um estado de completa perda de integridade da estrutura interna do material.

Enquanto KACHANOV (1958) assumiu  $D$  como uma variável de natureza escalar, estudos posteriores levaram à proposição de quantidades tensoriais para descrever o dano. Um outro trabalho importante é o de RABOTNOV (1969), que propôs a utilização da variável de dano como um redutor da rigidez inicial do material.

Considere o volume representativo que possui dimensões suficientemente grandes para que se possa admitir homogeneidade para a distribuição dos defeitos nele contidos, mas ao mesmo tempo suficientemente pequenas para que se evitem gradientes elevados de grandezas locais de interesse, como a deformação. Dessa forma, pode-se admitir continuidade para as funções representativas dos fenômenos que ocorrem no elemento e as propriedades nele medidas são valores médios que podem ser associados a um ponto material. Na figura 6 ilustra-se o conceito de elemento representativo orientado por um versor normal de direção  $n$ , em torno de um ponto do meio.

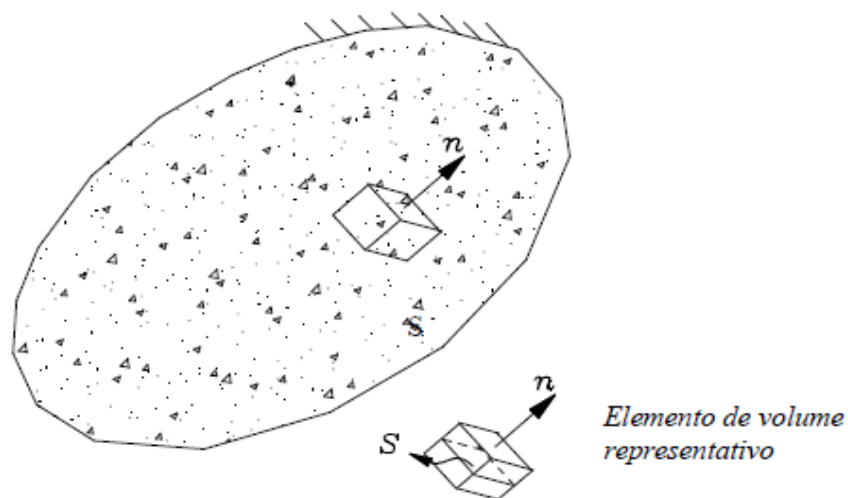


Figura 6 – Elemento de volume representativo de um sólido com dano. (Proença, 2000).

## 2.2 - Tensão Efetiva.

Considere-se uma situação de solitação uniaxial sobre o elemento de volume definido no item anterior, constituída por forças  $F$  aplicadas nas faces opostas orientadas pelo versor  $n$ . Seja ainda  $S$  é a

área total de uma seção genérica de normal  $n$  no interior do elemento (fig.6). Nessas condições,  $\sigma = F/S$  é a tensão normal nominal em qualquer ponto da seção genérica.

Admitindo-se que o conjunto de defeitos seja totalmente incapaz de transferir tensões, pode-se definir uma tensão dita efetiva levando-se em conta somente a parte íntegra da seção.

Nesse sentido, seja  $S_0$  a parcela íntegra da área total  $S$  da seção considerada. Então a diferença:

$$S_0 = S - \tilde{S} \quad (1)$$

define a área dos defeitos medidos.

Por definição, LEMAITRE & CHABOCHE (1985) e LEMAITRE (1984), o dano  $D_n$ , no caso associado a um plano de normal  $n$ , fica definido pela relação:

$$D_n = \tilde{S}/S \quad (2)$$

Nota-se que a variável de dano assume valores contidos no intervalo  $0 \leq D_n \leq 1$ , sendo que  $D_n = 0$  tem correspondência com a situação de material íntegro e  $D_n = 1$  indica um estado de total deterioração.

Assim sendo, a parcela de seção efetivamente resistente pode ser expressa em função da variável de dano como:

$$\tilde{S} = S - S_0 = S(1 - D_n) \quad (3)$$

Dessa forma, as tensões nominal  $\sigma$  e efetiva  $\tilde{\sigma}$  são definidas por:

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} = \frac{S \sigma}{S(1 - D_n)} = \frac{\sigma}{(1 - D_n)} \quad (4)$$

Como a área íntegra é menor do que a nominal, para uma mesma força aplicada a tensão efetiva num meio danificado resulta comparativamente maior do que a tensão nominal. Em particular, nota-se que:

$\tilde{\sigma} = \sigma$  Para material localmente íntegro;

$\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$  Para material totalmente danificado localmente.

### 2.3 - Deformações Efetivas

Considere o elemento de volume (fig. 6) orientado segundo uma certa direção definida pelo versor  $n$ . A medida de deformação linear nominal é definida pela relação:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \quad (5)$$

Entretanto, se o elemento de volume possui inicialmente defeitos ou descontinuidades internas, elas se abrem de uma certa quantidade, que em conjunto pode ser representada por  $\Delta d$ . Assim sendo, no processo de deformação (fig. 7), somente a parcela  $\Delta l - \Delta d$  é que efetivamente deve ser considerada numa medida da deformação.

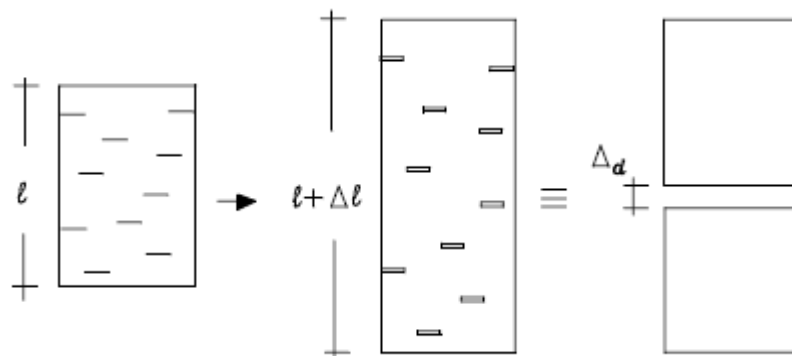


Figura 7 – Acréscimo de comprimento devido à abertura de defeitos. (DRIEMEIER, 1995).

Segue daí que a medida efetiva da deformação linear pode ser definida como:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta l - \Delta d}{l_0} \quad (6)$$

Uma segunda definição para uma variável de dano pode então ser proposta:

$$D_n = \frac{\Delta d}{\Delta l} \rightarrow \Delta d = D_n \Delta l \quad (7)$$

Nota-se que essa definição é também associada a uma certa direção  $n$ .

Levando-se em conta a nova variável de dano, segue que as medidas nominal e efetiva da deformação linear se relacionam por:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta l(1-D_n)}{l_0} = (1 - D_n)\varepsilon \quad (8)$$

## 2.4 - Princípios Gerais de Equivalências de Respostas Constitutivas

Os princípios descritos a seguir permitem que se formulem relações constitutivas para meios contínuos com dano, envolvendo medidas nominais de tensão e de deformação.

No âmbito dos meios contínuos, um axioma constitutivo fundamental é o da ação local, isto é: a resposta constitutiva num ponto não depende daquilo que ocorre nos elementos vizinhos.

Assim temos que:

A lei constitutiva do meio danificado é obtida da lei constitutiva do meio íntegro onde o tensor de tensões é substituído pelo tensor de tensão efetiva e o tensor linear de deformações pelo tensor de deformação efetiva.

Sendo o meio íntegro supostamente elástico linear, o princípio enunciado leva à seguinte relação:

$$\tilde{\sigma} = E \tilde{\varepsilon} \quad (9)$$

### 2.4.1 - Relação Constitutiva Envolvendo Equivalência de Energia

Substituindo-se na relação (9) as relações que definem  $\tilde{\sigma}$  e  $\tilde{\varepsilon}$ , (4) e (8) respectivamente, e já levando-se em conta a (10), segue que :

$$\sigma = (1 - D)^2 E \varepsilon \quad (10)$$

Essa última relação vale então para o meio contínuo equivalente e envolve quantidades nominais.

Nota-se, por outro lado, que:

$$\tilde{\sigma} \tilde{\varepsilon} = \sigma \varepsilon \quad (11)$$

Portanto, pode-se afirmar que o meio contínuo equivalente reproduz a mesma quantidade de energia do meio danificado.

Por outro lado, observando-se a relação (10), pode-se definir o módulo secante de rigidez elástica  $\tilde{E}$  do meio danificado como:

$$\tilde{E} = (1 - D)^2 E \quad (12)$$

A relação anterior coloca em evidência a degradação do módulo de rigidez elástico inicial do material causada pela danificação. Isolando-se a variável de dano, obtém-se:

$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Essa relação indica que é possível identificar os valores de dano com base em medidas experimentais do módulo secante de rigidez elástica em ensaios uniaxiais com deformação controlada (fig. 8).



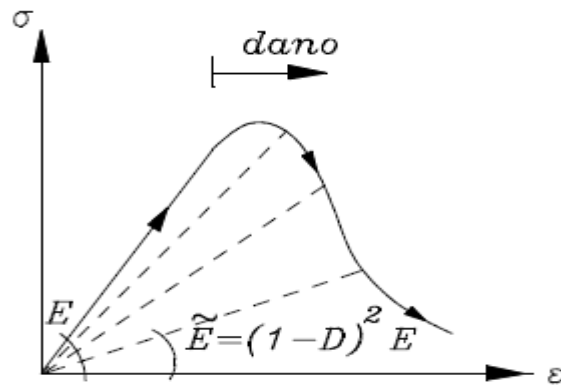


Figura 8 – Variação da rigidez secante do meio contínuo equivalente. (Proença (2000)).

### 2.4.2 - Relação Constitutiva Envolvendo Equivalência de Deformação.

O princípio da equivalência de deformação foi proposto por LEMAITRE & CHABOCHE (1985) e diz que a deformação do meio íntegro onde atua a tensão efetiva é a mesma do meio danificado, ou seja:  $\tilde{\epsilon} = \epsilon$ . A figura 9 dá uma interpretação ao princípio em questão.

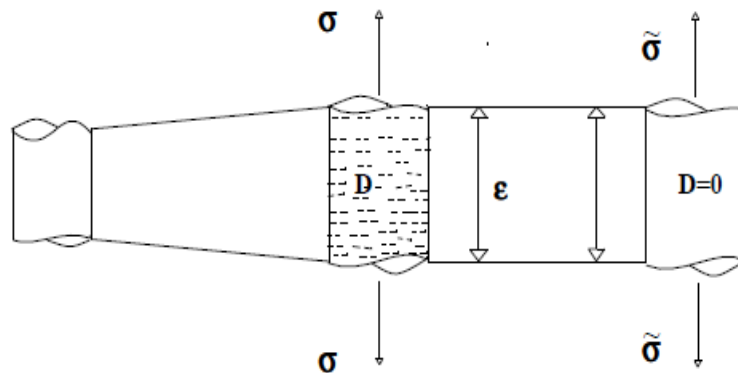


Figura 9 - Hipótese de deformação equivalente. (Proença, 2000).

Logo tendo este princípio em mente a relação (9) assume a seguinte forma:

$$\frac{\sigma}{(1-D)} = E\epsilon \rightarrow \sigma = (1-D)E\epsilon \quad (14)$$

Nessa forma, o módulo secante de rigidez elástica  $\tilde{E}$  para um meio contínuo de resposta equivalente ao meio deteriorado resulta:

$$\tilde{E} = (1-D)E \quad (15)$$

E a variável de dano pode ser identificada por:

$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E}\right) \quad (16)$$

### 2.4.3 - Relação Constitutiva Envolvendo Equivalência de Tensão

Consiste em admitir que a tensão do meio íntegro onde atua a deformação efetiva é a mesma do meio danificado, ou seja:  $\tilde{\sigma} = \sigma$ .

Com a nova hipótese de equivalência a relação (9) assume a forma:

$$\sigma = E\tilde{\epsilon} \rightarrow \sigma = (1-D)E\epsilon \quad (17)$$

Logo a variável de dano é a mesma da relação (16), ou seja :

$$D = 1 - \left(\frac{\sigma}{E}\right) \quad (18)$$

Observe que as três relações constitutivas determinam a valores aproximados para a obtenção da variável do dano em função módulo de rigidez elástica do material

### 3.0 – Mecânica da Fratura.

#### 3.1 - Mecanismo de Crescimento da Trinca

Um corpo trincado submetido a carregamento ação do ambiente é um tipo especial de sistema mecânico. Existem dois grupos de coordenadas que descrevem o estado corrente do sistema. Um grupo consiste de coordenadas Lagrangianas, que descrevem o campo de deslocamento no corpo. O outro grupo de coordenadas generalizadas descreve as variáveis de aguçamento, tamanho e posição das trincas. Estas coordenadas foram denominadas coordenadas Griffithinianas (G-coordenadas) em homenagem ao engenheiro A. Griffith.

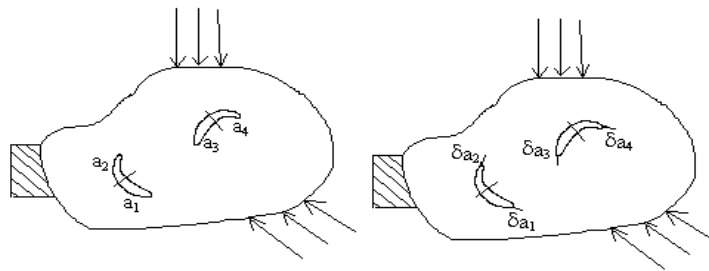


Figura 10: G-coordenadas e G-variações (Carrasco et al, 2007).

O princípio do trabalho virtual para este sistema requer para o equilíbrio a seguinte condição:

$$\delta_G W \leq 0 \quad (19)$$

Dependendo do sinal na Eq. 19, o estado do corpo pode ser estável ou instável com respeito a propagação da trinca (Bolotin, 1996). A trinca não se propagará quando  $\delta_G W > 0$  para todas as G-coordenadas. Então dizemos que o sistema está num estado de sub-equilíbrio referente às G-coordenadas. Se  $\delta_G W < 0$ , mesmo para uma das G-coordenadas, o estado do sistema é instável, e o denominamos de estado de não equilíbrio. O estado de equilíbrio  $\delta_G W = 0$  é o mais importante porque é caso típico de uma propagação lenta da trinca.

Considerando esta aproximação em termos de forças generalizadas, o trabalho virtual pode ser apresentado como segue:

$$\delta_G W = \sum_{j=1}^m G_j \delta a_j - \sum_{j=1}^m \Gamma_j \delta a_j \quad (20)$$

Onde  $\delta a_j$  são as variações das G-coordenadas  $a_j, \dots, a_m$ ;  $G_j$  e  $\Gamma_j$  são as forças generalizadas. Todos os fatores que contribuem para a propagação da trinca são incluídos no primeiro somatório onde  $G_j, \dots, G_m$  são as forças generalizadas de propagação. A resistência à fratura é incluída no segundo somatório onde  $\Gamma_j, \dots, \Gamma_m$  são as forças generalizadas de resistência à propagação da trinca.

Um estado de equilíbrio é designado quando

$$G_j < \Gamma_j, j = 1, \dots, m \quad (21)$$

Um estado de equilíbrio é solicitado quando

$$G_j = \Gamma_j, j = 1, \dots, \mu \quad (22)$$

$$G_K < \Gamma_{K1} K = \mu + 1, \dots, m$$

Este estado é estável quando a forma quadrática

$$\delta_G(\delta_G W) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{\partial H_j}{\partial a_k} \delta a_j \delta a_k \quad (23)$$

é definitivamente negativa.

As equações (19) a (23) são válidas para modelar o crescimento da trinca e fratura final para carregamento cíclico e estático incluindo a influência dos fatores ambientais tais como corrosão e fragilização por hidrogênio.

### 3.2 - TRANSPORTE DE MASSA EM TRINCAS

Fratura e fadiga também são controladas pelo transporte de massa dos agentes ativos da boca até a ponta da trinca. O transporte de massa é uma combinação de vários processos. Primeiro, é um processo de difusão devido ao gradiente de concentração de agentes na trinca. Segundo é um processo de migração de íons, que é controlado pelo potencial eletroquímico. E em terceiro um processo puramente hidrodinâmico pode ser significativo.

As concentrações dos agentes agressivos são geralmente muito pequenas. Então, para evitar essas pequenas magnitudes de concentrações, elas são normalizadas para uma certa concentração padrão. Sendo assim, a concentração normalizada varia de  $0 \leq c \leq 1$ .

Vamos considerar o caso mais simples quando efeitos eletroquímicos são desprezados. Com isso, a transferência de massa na trinca é governada pelo escoamento do fluido e difusão. O deslocamento da abertura da trinca é pequeno comparado com o comprimento da trinca. Portanto, podemos considerar o processo como sendo unidimensional. Isto significa que a difusão e o escoamento são direcionados no eixo  $x$ , da entrada da trinca em  $x = 0$  até a frente da trinca em  $x = x_t(y)$ , Fig 11.

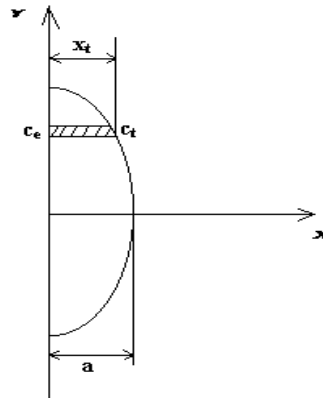


Figura 11: Superfície da trinca num ambiente fluido (Carrasco et al, 2007).

Seguindo essas simplificações, a equação do transporte dos agentes na trinca tem a forma:

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + v \frac{\partial(hc)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( hD \frac{\partial c}{\partial x} \right) + 2kf(c) \quad (24)$$

onde  $v$  é a velocidade do fluido na direção  $x$  para uma coordenada  $y$  fixa,  $D_i$  é o coeficiente de difusão,  $h$  é o deslocamento de abertura da trinca que está variando ao longo do comprimento da trinca. O último termo em (24) leva em conta a transferência de massa nas faces da trinca. A correspondente condição de contorno tem a forma.

$$\frac{\partial c}{\partial n} = kf(c) \quad (25)$$

Com o coeficiente de transferência de massa  $k$ . Por exemplo, no caso de uma reação de primeira ordem temos:

$$f(c) = c_s - c \quad (26)$$

onde  $c_s$  é uma concentração inicial correspondente a um estado de equilíbrio ou saturação.

A contribuição de cada processo no transporte de massa depende, em maior grau, da relação entre tempos característicos dos processos individuais. Entre estes tempos estão os tempos característicos para a difusão  $\tau_D$ , para a convecção  $\tau_a$  e  $\tau_r$  (definido para taxa de crescimento da trinca  $a' = da/dt$ ), e para reações cinéticas  $\tau_k$ .

$$\tau_{Di} = \frac{a^2}{Di} \quad \tau_a = \frac{a}{a'} \quad \tau_k = \frac{a}{k} \quad (27)$$

Onde  $a$  é comprimento característico da trinca.

Em publicações de Bolotin (1998) e Bolotin e Shipkov (1998) uma aproximação fenomenológica para a transferência de massa é usada. A equação simplificada para a concentração de agentes na ponta da trinca é a seguinte.

$$\frac{dc_t}{dt} = \frac{c_a - c_t}{\tau_{Di}} + \frac{c_b - c_t}{\lambda_{Di}} \frac{da}{dt} \quad (28)$$

O primeiro termo do lado direito da Eq. (28) representa o mecanismo de difusão, o segundo o efeito da propagação da trinca. E  $\lambda_{Di}$  é estimado como sendo  $\lambda_{Di} \approx Di/k$ .

#### 4. ACUMULAÇÃO DE DANO

Para modelar o processo de acumulação de dano, tomamos o modelo escalar de dano que é o mais simples, Como foi proposto na seção (2.1) por Kachanov (1958) e Rabotnov (1969). Mesmo quando somente ações mecânicas são consideradas, é importante distinguir as medidas  $D_s$  e  $D_c$  para o dano produzido por carregamento estático e corrosão pura, respectivamente.

Assumimos que as equações cinéticas para medidas de dano particulares sejam equações diferenciais temporais de primeira ordem. Logo temos as seguintes equações:

$$\frac{\partial D_s}{\partial t} = \frac{1}{t_c} \left( \frac{\sigma - \sigma_{th}}{\sigma_s} \right)^{ms}, \quad \frac{\partial D_c}{\partial t} = \frac{1}{t_c} \left( \frac{c - c_{th}}{c_d} \right)^{mc} \quad (29)$$

Onde  $\sigma$  é o valor médio desta tensão,  $c$  é a concentração neste ponto material. As expressões em (11) contêm um número de parâmetros materiais. Entre eles estão  $\sigma_s$  e  $c_d$  que caracterizam a resistência ao dano produzido pelo carregamento estático e ambiente;  $\sigma_{th}$  e  $c_{th}$  são os parâmetros de resistência inicial correspondente (quando  $\sigma < \sigma_{th}$ , e  $c < c_{th}$  os correspondentes termos do lado direito na equação (29) são iguais a zero).

A concentração de tensão na ponta da trinca está relacionada com o raio efetivo de curvatura da ponta  $\rho$ . A evolução de  $\rho$  é governada por vários processos tais como crescimento da trinca, acumulação de dano mecânico, e corrosão. A equação diferencial para uma trinca plana de comprimento  $a$  pode ser descrita como:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_s - \rho}{\lambda_a} \frac{da}{dt} + (\rho_b - \rho) \frac{d\psi_s}{dt} + (\rho_c - \rho) \frac{d\psi_c}{dt} \quad (30)$$

Esta equação descreve o "aguçamento" da ponta devido ao crescimento da trinca com a taxa  $da/dt$  até a magnitude  $\rho_s$ , e o "desaguçamento" devido à acumulação de dano até a magnitude  $\rho_s$  e  $\rho_c$ . Na ponta da trinca as magnitudes  $D_s$  e  $D_c$  são substituídas por  $\psi_s$ ,  $\psi_s$  e  $\psi_c$ , e  $\lambda_a$  é o parâmetro com dimensão de comprimento.

Para avaliar o dano mecânico, devemos conhecer os campos de tensão-deformação e de concentração no corpo durante todo o processo considerado. Isso necessita da aplicação de métodos numéricos. Entretanto, existem algumas aproximações. Por exemplo, o fator de concentração de tensão  $k$  na ponta de uma trinca plana para o modo I e a distribuição de tensão normal podem ser formulados como:

$$k = 1 + 2Y \left( \frac{a}{\rho} \right)^{1/2}, \quad \sigma = k\sigma_{\infty} \left[ 1 + \frac{4(x-a)}{\rho} \right]^{-1} \quad (31)$$

A primeira equação é apenas uma extensão da conhecida fórmula de Neuber levando em consideração o fator de forma  $Y$ . A segunda equação é a mais simples das equações empíricas discutidas no paper de Shin (1994)

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Vibrações e Instrumentações do Laboratório de Informática da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

A plataforma utilizada para obtenção dos pontos que descrevem a solução de cada equação diferencial que auxiliou no desenvolvimento dos modelos através de rotinas computacionais foi o MATLAB7. Além disso, a rotina se encontra no anexo.

Considerando a acumulação de dano e a propagação da trinca sujeitas a carregamento estático, deixemos a superfície da trinca estar em contato com um ambiente agressivo. A concentração normalizada na entrada da trinca  $c_e$  é constante. O carregamento mecânico é dado pela tensão aplicada  $\sigma_\infty$ . O material é elástico linear em todo o corpo exceto em pequenas zonas de processo nas faces da trinca. O corpo está em estado plano de deformação. O comprimento da trinca  $a$  é apenas uma G-coordenada neste caso. Com isso, podemos usar a equação de Irwin para a força de contribuição G

$$G = \frac{k^2(1-\nu^2)}{E} \quad (32)$$

Onde  $E$  é o módulo de Young,  $\nu$  é o módulo de Poisson,  $K$  é o fator de intensidade de tensão. Geralmente  $k = Y\sigma_\infty(\pi a)^{1/2}$ , onde o fator de geometria  $Y$ .

A força de resistência é dada como:

$$\Gamma = \gamma_0 [1 - \chi(\psi_s + \psi_c)^\alpha] \quad (33)$$

onde  $\gamma_0$  é o trabalho de fratura para um corpo não danificado,  $\alpha \geq 1$  e  $0 \leq \chi \leq 1$ .

As equações cinéticas da acumulação de dano são dadas na Eq. (29). Usamos elas na seguinte forma:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = \frac{1}{t_c} \left( \frac{\sigma - \sigma_{th}}{\sigma_s} \right)^{m_s}, \quad \frac{d\psi_c}{dt} = \frac{1}{t_c} \left( \frac{c - c_{th}}{c_d} \right)^{m_c} \quad (34)$$

Comparado com a Eq. (29), introduzimos neste caso o dano de corrosão na ponta da trinca, que é governado pela concentração  $c_t$ .

Logo a equação (30) será:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_s - \rho}{\lambda_a} \frac{da}{dt} + (\rho_b - \rho) \frac{d(\psi_s + \psi_c)}{dt} \quad (35)$$

é usada assumindo que  $\rho_c = \rho_s$ .

Durante o estágio inicial, as forças  $G$  e  $\Gamma$  satisfazem a condição  $G < \Gamma$ . A trinca se propagará quando a igualdade  $G = \Gamma$  for atingida. Para estimar os danos  $\psi_s$  e  $\psi_c$ , as expressões em (34) que requerem a avaliação de  $\sigma$  e  $c_t$  devem ser integradas. A primeira variável é computada usando as fórmulas aproximadas (31) juntamente com a integração de (35). A segunda variável é determinada da solução do problema da transferência de massa. Todos esses cálculos são multiconectados e juntamente condicionados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos há seguir descreve a solução para o problema do transporte de massa na ponta da trinca para carregamento estático. A superfície da trinca é aproximadamente elíptica, e a absorção nas faces é desprezada. Os seguintes dados numéricos foram usados:  $D = 10^{-8} m^2 / s$ ,  $k = 10^{-5} 1/s$ . A figura 12a corresponde a uma trinca de comprimento inicial de 1 mm. Os pontos que descrevem a curva representam a solução numérica para a condição inicial  $c_t(0) = c_e$ . Os pontos da figura 12b representam a solução para a condição inicial  $c_t(0) = 0$ . Ambas tendem a convergir rapidamente e tempo característico de convergência é de 100s.

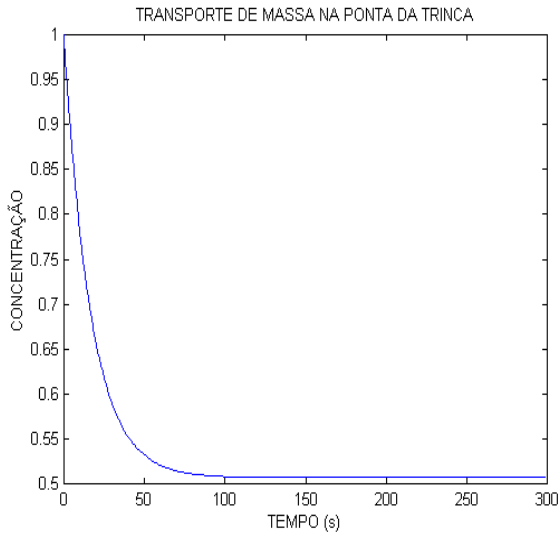


Figura 12a

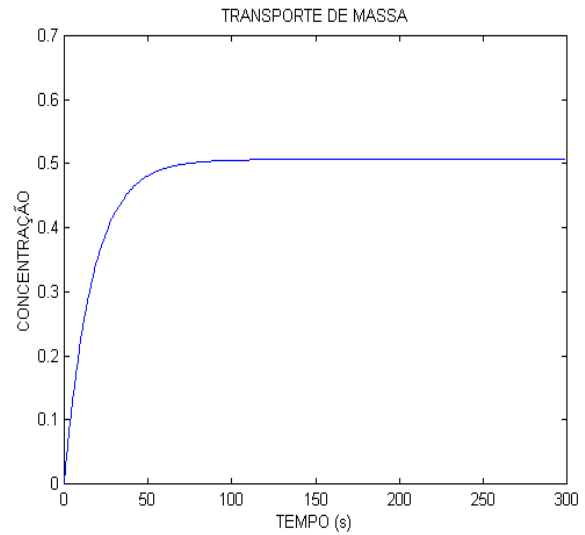


Figura 12b

Os dados seguintes foram usados para os próximos resultados:  $E = 200\text{GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\sigma_s = 5\text{GPa}$ ,  $\sigma_{th} = 250\text{MPa}$ ,  $c_{th} = 0$ ,  $m_s = m_c = 4$ ,  $t_c = 10^6\text{s}$ ,  $\gamma_0 = 10\text{kJ/m}^2$ ,  $\alpha = \chi = 1$ . Na equação (35), assumimos que  $\rho_s = 30\ \mu\text{m}$ ,  $\rho_b = \lambda a = 70\ \mu\text{m}$ . Os parâmetros de transferência de massa são  $D = 10^{-8}\text{m}^2/\text{s}$ ,  $k_0 = 10^{-5}\text{m/s}$ ,  $c_d = 4$ . A tensão aplicada  $\sigma_\infty$  é mantida constante durante toda a evolução da trinca incluindo o estágio inicial. Inicialmente não há dano na ponta da trinca, isto é  $D_s = D_c = 0$ . O tamanho inicial da trinca é  $1\text{mm}$ , o raio efetivo da ponta da trinca é  $\rho_0 = 50\ \mu\text{m}$ .

O crescimento da trinca é ilustrado nas figuras seguintes que são obtidas para  $\sigma_\infty = 500\text{MPa}$  e  $c_e = 0.5$  e  $0$  (figura 13a e 13b respectivamente). É natural que o ambiente agressivo acelere o crescimento da trinca.

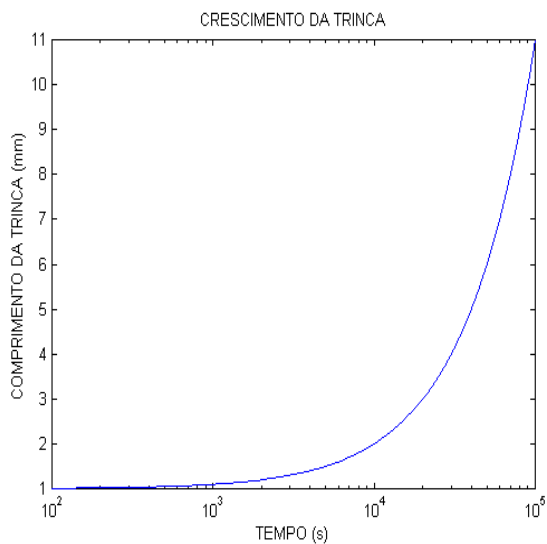


Figura 13a

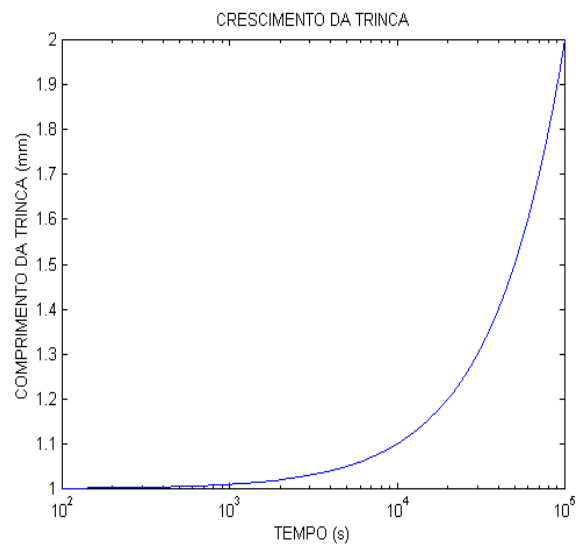


Figura 13b

Os próximos diagramas ilustram os fenômenos que são difíceis de serem observados diretamente. A figura 14 ilustra a história do raio efetivo da ponta da trinca. No início há um “desaguçamento” monótono da ponta, aumentando o raio de curvatura. Este processo prossegue até o início do crescimento da trinca. Então se tem início o “aguçamento” brusco da ponta, diminuindo o raio de curvatura. Muitos dos estágios finais da fadiga têm concentração de tensão na ponta correspondente ao raio “aguçado”  $\rho_s$ .

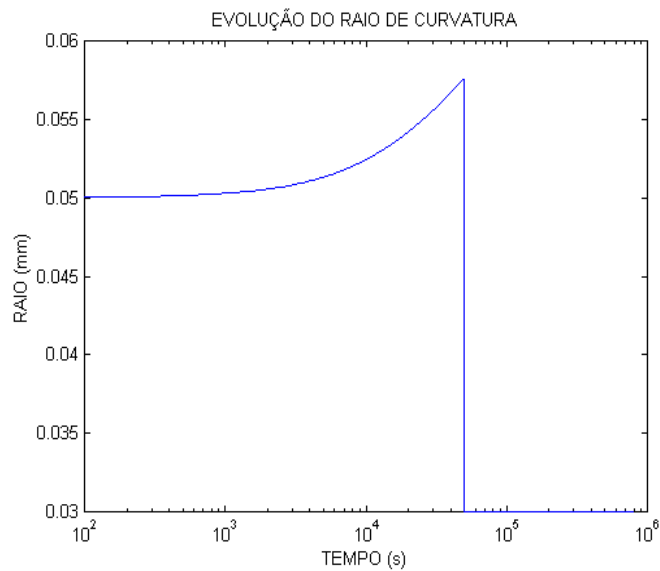


Figura14

A evolução dos danos é ilustrada na figura 15 que é plotada para  $c_e = 0.25$  e  $1$  (15a e 15b). Na figura 15a, a magnitude  $\Psi_s$  domina todo o processo. Essa magnitude assim como o dano de corrosão  $\Psi_c$  crescem monotonamente quando a trinca é fixa. Ambas decrescem bruscamente quando a trinca se propaga rapidamente. A fratura final ocorre com dano igual a zero. Na figura 15b, contrariamente à figura 15a, o dano de corrosão  $\Psi_c$  domina todo o processo.

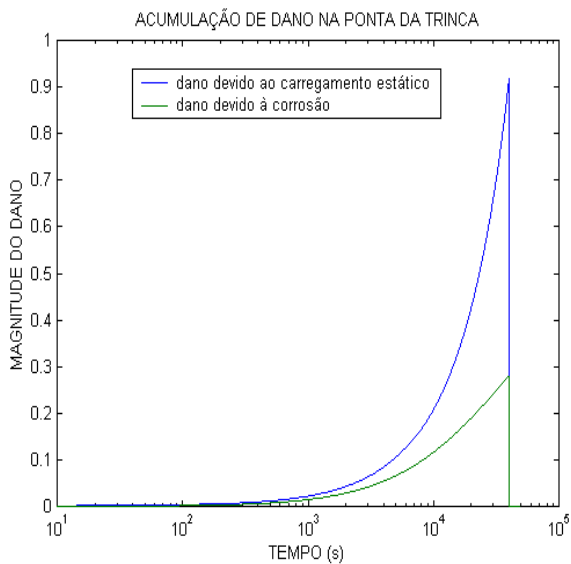


Figura 15a

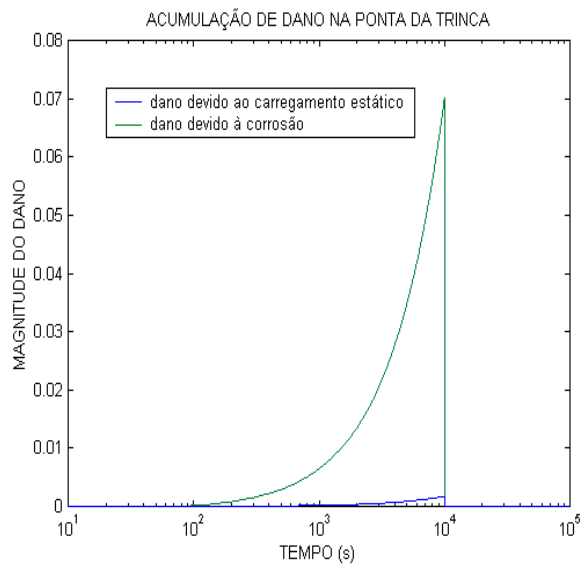


Figura 15b

O modelo de início e crescimento da trinca submetida à combinação da ação mecânica e ambiental foi proposto baseado nas sínteses da Mecânica da Fratura e da Mecânica do Dano Contínuo. Comparadas com estudos anteriores, várias medidas de dano foram introduzidas para descrever o dano para componentes de carregamento estático e também o dano como resultado da corrosão. O modelo inclui as equações cinéticas para a acumulação de cada tipo de dano, a equação descrevendo a evolução das condições na ponta da trinca em crescimento, e a equação da transferência de massa no interior dela. A equação posterior acompanhada das condições de contorno leva em consideração a difusão dos agentes assim como o escoamento do fluido num local de geometria permanente. Os resultados da simulação numérica foram apresentados para carregamento estático para várias concentrações. Além dos diagramas que mostram a história do tamanho da trinca e da taxa de crescimento, os diagramas que mostram a evolução do raio de curvatura da ponta também foram apresentados. Os diagramas da taxa de crescimento exibem uma coerência qualitativa com dados experimentais publicados na literatura. A coerência quantitativa pode ser obtida pela escolha apropriada dos parâmetros materiais. Algumas variáveis novas

introduzidas tais como medidas de dano são difíceis de avaliar através de uma observação direta. Entretanto, o uso destas variáveis oferece um caminho adicional para a perspicácia dentro dos aspectos mecânicos de dano de corrosão e fratura.

## CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados e simulações implementadas no ambiente Matlab, pode-se resumir às seguintes conclusões:

- O desenvolvimento de estudo dos fenômenos, assim como o monitoramento do crescimento e a determinação precisa do tamanho crítico dos defeitos tornam-se de fundamental importância para a operação segura de sistemas dutoviários modernos;
- A modelagem computacional utilizando relações da mecânica do dano contínuo e mecânica da fratura apresentam todos os requisitos e propriedades adequadas para identificação e monitoramento desses parâmetros;
- Nas aplicações de projeto de tubulações todo esse estudo é necessário, pois falhas nestas tubulações liberam grande quantidade de vazamento de óleo, gás e derivados e acarretam danos ambientais e humanos de grandes proporções;
- Além disso, o custo operacional envolvido na recuperação destas falhas é elevado, uma vez que o reparo e o condicionamento das linhas são complicados e normalmente requerem longos períodos de tempo para ser concluído.

## AGRADECIMENTOS

- Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.
- Ao DEM/UFMG através do uso do Laboratório de Vibrações-LVI.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Costa, F.A., 2004. **Geração Automática e Análise de Modelos de Dutos com Defeitos Causados por corrosão**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, Dissertação de Mestrado. CESTESB. Disponível em: <[http://www.cestesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/dutos/aa\\_causas.asp](http://www.cestesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/dutos/aa_causas.asp).> Acesso em 23 de maio de 2009.

Souza, R.D., 2003. **Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Reais**. Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, PUC - Rio, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 112f.

Hopkins, P. 2002. **The Challenge of Change in Engineering**. Journal of Pipeline Integrity, v.1, No.2, pp1-29.

Bolotin, V.V.; Shipkov, A.A. **Mechanical Aspects of Corrosion Fatigue and Stress Corrosion Cracking**. International Journal of Solids and Structures, v. 38, p. 7297 - 7318, 2001a.

PROENÇA, S.P.B. **Elementos de Mecânica de Dano em Meios Contínuos**. São Carlos, 2001b.

Carrasco, J.P.; Santos, N.C.; Silva, A.A. **Numerical Simulation of the Hydrogen Effect on the Deformations of Test Body Models Loaded Under Tensile Stress**. International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry, v.1, n. 1, p. 55-62, 2007.

Lemaitre, J. **A Course on Damage Mechanics**. Berlin: Springer-Verlag Press, 1992. 210p.



## ANEXOS

%PROGRAMA CORDANO  
%TRINCA SOB CARREGAMENTO ESTÁTICO EM MEIO CORROSIVO

```
clc;
clear all;
close all;
h=1;
interv=[0 610];          %% 1=>185; 0,75=>235; 0,50=>330; 0,25=>610%%
n=interv(1,2)/h;
a0=1e-3;                %%Comprimento inicial da trinca (m)%%
c0=0.25;                %%Concentração de entrada na boca da trinca, normalizada com cd
ksic=0;                 %%Dano inicial devido à corrosão%%
ksis=0;                 %%Dano inicial devido ao carregamento estático%%
ro0=50e-6;              %%Raio efetivo inicial da ponta da trinca (m)%%
y0=[a0 c0 ksic ksis ro0]; %%Vetor das condições iniciais%%
t0=0;                   %%Tempo inicial (t)%%
t1=0;                   %%Tempo de início do crescimento da trinca (s)%%
g0=zeros(n,5);
k1=zeros(1,5);
k2=zeros(1,5);
k3=zeros(1,5);
k4=zeros(1,5);
g0(1,:)=y0;
l=1;
q=1;
for i=1:n
    k1 = corrodano(y0,t0);
    k2 = corrodano(y0 + k1*h/2,t0 + h/2);
    k3 = corrodano(y0 + k2*h/2,t0 + h/2);
    k4 = corrodano(y0 + k3*h,t0 + h);
    g0(i,1)= y0(1);
    g0(i,2)= y0(2);
    g0(i,3)= y0(3);
    g0(i,4)= y0(4);
    g0(i,5)= y0(5);
    if k1(3)==0 & k1(4)==0
        g0(i,3)= 0;
        g0(i,4)= 0;
    end
    r0(i)=t0;
    y0 = y0 + (1/6)*h*(k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4);
    t0=t0+h;
    if y0(1)>a0 & l==1
        j=i;
        l=l+1;
    end
end
for m=j:n
    g1(q,1)=g0(m,1);
    r1(q)=t1;
    t1=t1+1;
    q=q+1;
end
semilogx(r1,g1.*1E3);
% title('EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO DA TRINCA')
xlabel('TEMPO (s)')
ylabel('TRINCA (mm)')
figure;
plot(r0,g0(:,2)./18);
% title('EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NA PONTA DA TRINCA')
xlabel('TEMPO (s)')
```

```
ylabel('CONCENTRAÇÃO')
figure;
semilogx(r0,g0(:,3),'r')%,r0,g0(:,4),'b');
% title('ACUMULAÇÃO DE DANO NA PONTA DA TRINCA')
xlabel('TEMPO (s)')
ylabel('MAGNITUDE DO DANO')
figure;
semilogx(r0,g0(:,5).*1e6);
H=[1e0 1e6 0 110];
axis(H);
% title('EVOLUÇÃO DO RAI0 DA PONTA DA TRINCA')
xlabel('TEMPO (s)')
ylabel('RAIO DA PONTA (um)')
M=[r1',g1];
save TC200_025,M;
MM=[r0',g0(:,5).*1e6];
save TP200_025,MM;
```