

Simulação da evolução de uma trinca sob efeito de carregamento mecânico estático em meio corrosivo

J. P. Carrasco^{1*}, B. A. Araújo¹, D. S. Diniz², J. M. A. Barbosa³, A. A. Silva²

¹Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-900, Campina Grande-PB

²Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-900, Campina Grande-PB

³Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco
Cidade Universitária, CEP 50670-901, Recife-PE

(Recebido em 07/01/2011; revisado em 02/03/2011; aceito em 10/03/2011)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Neste trabalho foi utilizado um modelo baseado numa síntese da mecânica do dano contínuo e da mecânica da fratura para simular a propagação de uma trinca sob efeito de um carregamento estático e de uma ação ambiental corrosiva, que caracterizam o fenômeno da corrosão sob tensão. A simulação foi realizada no regime elástico, num espécime retangular de aço com uma trinca de borda carregada no modo de abertura I, em deformação plana. A partir das simulações, foi possível visualizar o efeito do dano devido ao agente corrosivo sobre o tempo de início e propagação da trinca sob diferentes níveis de concentração. Também foi verificada a influência do fator de intensidade de tensões sobre a taxa de crescimento da trinca. Os resultados obtidos mostraram boa consistência com observações macroscópicas do fenômeno, possibilitaram um melhor entendimento dos processos envolvidos e permitiram validar o modelo para as condições e hipóteses adotadas no problema.

Palavras-chave: Mecânica do dano contínuo; mecânica da fratura; propagação de trincas; corrosão sob tensão.

Abstract:

In this work was used a model based on synthesis of the continuum damage and fracture mechanics to simulate the crack propagation under mechanical static loads and a corrosive media effect. This condition characterizes the stress corrosion cracking phenomenon. The simulation was performed in elastic regimen, in a rectangular steel specimen with an edge crack loaded in opening mode I, in plane strain state. Starting from the simulations, it was possible to observe the effect of the damage at the onset and crack propagation time under different concentration corrosive agent levels. Also was verified the stress intensity factor influence on crack growth rate. The results showed good consistency with macroscopic observations of phenomenon, allowing to obtain a better understanding of the process and to validate the model for the conditions and hypotheses adopted in the problem.

Keywords: Continuum damage mechanics; fracture mechanics; crack propagation; stress corrosion cracking.

1. Introdução

A Corrosão Sob Tensão - CST (Stress Corrosion Cracking - SCC) é uma forma da Fratura Assistida pelo Ambiente (Environmentally Assisted Cracking - EAC) que resulta da exposição de um material suscetível à ação combinada de um ambiente quimicamente agressivo e tensões mecânicas estáticas, aplicadas ou residuais, acima de um determinado valor limiar. As taxas de corrosão são geralmente baixas, e as tensões que causam CST, estão frequentemente abaixo do limite de escoamento do material. Este fenômeno

ocorre em materiais que apresentam boa resistência à corrosão generalizada, causando a perda da ductilidade não somente em ligas de alta resistência, como também em materiais dúcteis [1].

A CST é considerada como um dos mecanismos mais severos de degradação, caracterizando-se pela formação de colônias de trincas (Figura 1) que podem levar à ruptura do material, sendo reconhecida como uma das principais causas para a falha de componentes e estruturas de engenharia. Na indústria do petróleo é uma importante limitação para a utilização de aços [2], tendo-se verificado que praticamente

*Email: jorge_palma_c@yahoo.com.br. (J. P. Carrasco)

todos os aços inoxidáveis austeníticos e ligas de Ni são suscetíveis à CST quando dadas as condições ambientais específicas para o material [3].

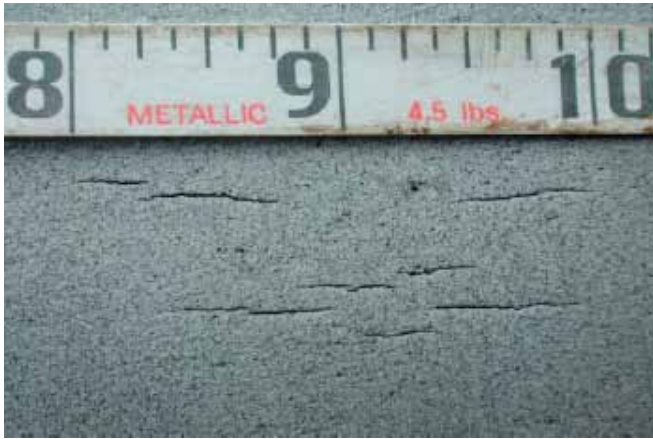


Figura 1: Trincas de CST na superfície do tubo de um duto de transporte de gás natural [4]

A CST muitas vezes ocorre sem qualquer deformação visível do material e é difícil, senão impossível, a sua detecção nos estágios iniciais, dado que o efeito combinado de corrosão e tensão mecânica impostas ao material é extremamente complexo, pois envolve a ação conjunta de processos mecânicos e eletroquímicos [5]. Esse é o motivo pelo qual os mecanismos propostos para explicar microscopicamente o início do trincamento e os processos de propagação de trincas, não são capazes de elucidar todos os aspectos deste fenômeno em diferentes sistemas metal/ambiente. Apesar dessa indefinição, a avaliação da susceptibilidade ao trincamento é um requisito básico para a operação segura de equipamentos e estruturas, sendo realizada através de testes de laboratório que simulam as condições da incidência da CST, porém, que não fornecem todos os parâmetros básicos que devem ser usados diretamente no projeto de engenharia ou na determinação da vida residual dos equipamentos [6].

Adicionalmente, como os testes de componentes em escala real são muito mais complicados e exigem uma grande quantidade de recursos técnicos e econômicos, e longos períodos de tempo, uma alternativa viável é o uso da modelagem computacional como uma ferramenta para a previsão do comportamento dos materiais na CST. Isto, em razão da possibilidade de serem estudados simultaneamente vários parâmetros com menor consumo de tempo e de recursos em comparação com os testes de laboratório, proporcionando também, uma melhor compreensão das características e mecanismos dos fenômenos estudados [7].

A modelagem da CST é realizada principalmente usando os arcabouços da Mecânica da Fratura e da Mecânica do Dano Contínuo [5-9]. Na abordagem da Mecânica do Dano

Contínuo, o dano é incorporado no modelo através de variáveis internas relacionadas com a perda da resistência mecânica do sistema pelo processo de degradação. Adicionalmente, a modelagem possibilita que sejam considerados mecanismos que se desenvolvem na escala microscópica, o que permite uma melhor aproximação do fenômeno estudado.

Neste artigo será utilizado o modelo baseado numa síntese da Mecânica do Dano e da Mecânica da Fratura proposto por Bolotin & Shipkov [10], para simular a evolução de uma trinca sob carregamento mecânico estático em meio corrosivo.

2. Modelo de Crescimento de Trincas sob Assistência do Ambiente

No modelo utilizado no presente trabalho [10], a propagação da trinca é considerada como o resultado das interações entre as condições de estabilidade do corpo trincado como um sistema mecânico e o processo de acúmulo de dano. O modelo inclui as equações cinéticas de evolução de cada tipo de dano, as equações que descrevem a evolução da ponta da trinca e a influência do acúmulo de dano sobre as forças de resistência à fratura e, por último, uma equação de transferência de massa.

O modelo incorpora, dos princípios da mecânica da fratura linear elástica, o conceito da taxa de liberação de energia de deformação elástica no modo I, G_I , que é associado com as forças generalizadas de propagação da trinca; do mesmo modo, as forças generalizadas de resistência são associadas com o fator de intensidade de tensões crítico, K_{IC} , cujo valor corresponde à tenacidade à fratura do material.

O acoplamento dessas equações, associado às condições de equilíbrio, estabilidade e propagação de trincas [11], possibilitam a modelagem do crescimento de uma trinca sob o efeito da CST e da relação existente entre a taxa de crescimento da trinca e o fator de intensidade de tensões.

2.1. Mecânica do Crescimento de Trincas

Um corpo trincado sob um carregamento e à ação do ambiente é um tipo especial de sistema mecânico, cujo estado corrente é descrito por um grupo de coordenadas-L (Lagrangianas) que descrevem o campo de deslocamentos no corpo, e outro de coordenadas-G (Griffithianas) que descrevem o aguçamento, o tamanho e a posição das trincas. As mudanças das coordenadas-G são as variações-G, representadas por δa_j .

Os estados do sistema corpo trincado-carregamentos podem ser classificados com respeito ao *equilíbrio* e à *estabilidade*. Os estados em que o trabalho virtual é negativo para toda $\delta a_j > 0$, são denominados *estados de sub-equilíbrio*. Os estados em que existem algumas δa_j onde o trabalho virtual é zero e nas restantes o trabalho virtual é negativo, são chamados de *estados de equilíbrio*. Se pelo menos para uma δa_j o trabalho virtual é positivo, se diz que o sistema está num *estado de não-equilíbrio*.

As condições de estabilidade também podem ser expressas em termos do trabalho virtual. Os *estados de sub-equilíbrio* são *estáveis*, pois quantidades adicionais de energia são necessárias para modificá-los, e não existem fontes de energia no sistema. Os *estados de não-equilíbrio* não são unidades de equilíbrio e, portanto, são *instáveis*. Os estados de equilíbrio podem ser *estáveis*, *neutros* ou *instáveis*.

O *estado de equilíbrio estável* é o mais importante na teoria da fratura e fadiga, pois é o caso típico da propagação lenta e estável da trinca. Uma trinca propagará de forma estável quando, para alguma coordenada-G, $\delta_G W = 0$ e $\delta_G(\delta_G W) < 0$ e quando, para as outras, $\delta_G W < 0$. Aqui, $\delta_G W$ é o trabalho virtual realizado por uma variação-G.

Em termos das forças generalizadas, o trabalho virtual das variações-G pode ser representado por:

$$d_G W = \sum_{j=1}^m G_j da_j - \sum_{j=1}^m \Gamma_j d\Gamma_j \quad (1)$$

onde G_j e Γ_j são as forças generalizadas de propagação e de resistência. Em termos dessas forças, a trinca não crescerá enquanto $G_j < \Gamma_j$. O início do seu crescimento se dará quando $G_j = \Gamma_j$, e tornar-se-á instável quando para alguma δa_k , $G_k > \Gamma_k$, e ocorrerá a fratura do componente.

2.2. Dano Assistido pelo Ambiente

Para modelar o acúmulo de dano num processo de CST, é introduzida uma medida especial para os danos devido ao carregamento mecânico e a corrosão, e as equações cinéticas que governam sua evolução no tempo. Portanto, o campo de dano introduzido simbolicamente por $\omega=(x,t)$, passa a ser representado por um conjunto de campos escalares de dano, $\omega_1(x,t)$, ..., $\omega_n(x,t)$, que variam entre zero (quando não existe dano) e a unidade (quando o material se encontra completamente danificado).

Na ponta da trinca, as evoluções dos danos mecânico, ψ_s , e por corrosão, ψ_c , são descritos por:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = \frac{1}{t_c} \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{th}} - s \right) \frac{\sigma_s^{m_s}}{\sigma_{th}^{m_s}} \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} = \frac{1}{t_c} \left(\frac{\sigma_c}{c_d} - c_{th} \right) \frac{\sigma_c^{m_c}}{c_d^{m_c}} \quad (3)$$

Nas Equações (2) e (3) σ_s e c_d caracterizam, respectivamente, a resistência ao dano produzido pelo carregamento estático e pelo ambiente; σ_{th} e c_{th} são parâmetros de resistência limiar. m_s e m_c são similares aos expoentes das equações para as curvas de fadiga e a taxa de crescimento de trincas, t_c é a constante do tempo, cuja magnitude pode depender dos parâmetros σ_s e c_d ou ser escolhida arbitrariamente. σ é o valor médio da tensão de tração que

atua no ponto material considerado e c é a concentração nesse ponto material.

A concentração de tensão na ponta da trinca está relacionada com o raio efetivo de curvatura da sua ponta, ρ . Sua evolução é governada por vários processos, tais como o crescimento da trinca, o acúmulo do dano mecânico e o de corrosão. A evolução do raio efetivo da ponta de uma trinca com comprimento a , é descrita por:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r_s - r}{l_a} \frac{da}{dt} + (r_b - r) \frac{d(y_s + y_c)}{dt} \quad (4)$$

O primeiro termo do lado direito da equação descreve o aguçamento da ponta devido ao crescimento da trinca com a taxa da/dt até a magnitude ρ_s . O segundo descreve o seu embotamento devido ao acúmulo dos danos até a magnitude ρ_b . λ_a é um parâmetro com dimensão de comprimento. ψ_s e ψ_c são as magnitudes do dano mecânico e do dano por corrosão na ponta da trinca. λ_s e λ_c são os comprimentos das zonas de evolução desses dois processos de degradação (Figura 2).

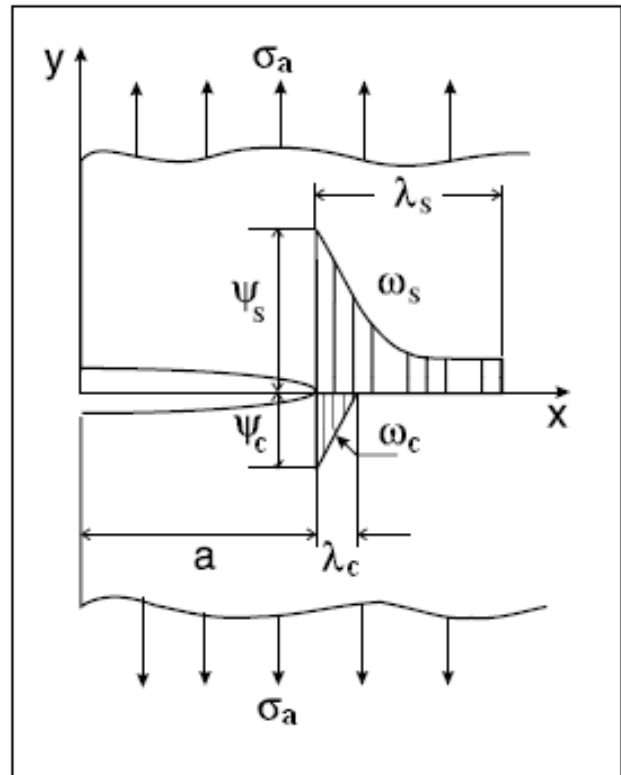


Figura 2: Distribuição dos danos mecânicos e por corrosão numa trinca superficial no modo I [10]

A última relação que fecha o conjunto de equações que governam o modelo, inter-relaciona as forças generalizadas de resistência com as medidas do dano à frente da ponta da trinca, sendo dada por:

$$\Gamma = \Gamma_0 [1 - c(\gamma_c + \gamma_s)^a] \tag{5}$$

onde Γ_0 é o trabalho específico de fratura para um corpo não danificado, χ caracteriza a Tenacidade à Fratura Residual e α é um parâmetro material.

2.3. Transporte de Massa Através das Trincas

A concentração de um agente ambiental ativo na vizinhança da ponta de uma trinca caracteriza-se com uma variável escalar que depende de um tempo físico e é denotado por $c(t)$. Quando o transporte do agente ocorre monotonicamente, são aceitos modelos quase-estacionários. Um deles é dado por:

$$\frac{dc_t}{dt} = \frac{c_a - c_t}{\tau_D} + \frac{c_b - c_t}{l_D} \frac{da}{dt} \tag{6}$$

onde o primeiro termo do lado direito representa o mecanismo de difusão e o segundo, o efeito da propagação da trinca. λ_D é o comprimento característico da zona de difusão, τ_D o tempo característico da difusão e c_t é a concentração na ponta da trinca. O parâmetro c_a caracteriza a concentração estacionária atingida para uma trinca estacionária num tempo $t \gg \tau_D$ e depende do comprimento da trinca e da concentração de entrada na sua boca, c_e . c_b é uma concentração característica para o rápido crescimento da trinca.

3. Formulação Numérica

O propósito na formulação deste problema é simular a propagação de uma trinca sob efeito de um carregamento mecânico estático e de uma ação ambiental corrosiva, que caracterizam a CST. A simulação é realizada no regime elástico-linear, num espécime de geometria retangular com uma trinca de borda no modo de abertura I, em estado plano de deformação. As equações de evolução da concentração, do dano, do comprimento da trinca, do raio da sua ponta e das forças generalizadas de resistência formam um sistema de equações diferenciais de 1ª ordem, que é resolvido pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem.

A concentração na boca da trinca é considerada constante durante todo o processo, e o carregamento mecânico é dado pela tensão σ_a . O comprimento da trinca é apenas uma coordenada-G, logo, a força generalizada de propagação pode ser calculada por:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \tag{7}$$

onde E é o módulo de Young, ν o coeficiente de Poisson e K_I o fator de intensidade de tensões.

Para avaliar o dano mecânico, os campos de tensão-deformação no corpo durante todo o processo devem ser conhecidos, podendo ser utilizadas algumas aproximações

baseadas em uma analogia entre o fator de concentração de tensões na ponta da trinca, K_t , e o fator de intensidade de tensões K_I . Esta analogia proporciona uma fórmula aproximada para K_t na ponta da trinca e a distribuição da tensão normal na sua frente, que podem ser calculados por:

$$K_t = 1 + 2Y \frac{\sigma_a \sqrt{a}}{\sqrt{r}} \tag{8}$$

$$s = K_t s_a \frac{e}{\xi} + \frac{4(x-a)}{r} \frac{\dot{u}}{\dot{u}_0}^{-1/2} \tag{9}$$

A Equação (8) é uma extensão da formula de Neuber, que calcula o fator de concentração de tensões considerando o fator de forma Y . A Equação (9) é a mais simples das equações empíricas de Shin, onde $(x-a) = \xi = 10\rho$.

4. Resultados e Discussão

Para a avaliação da aplicabilidade do modelo nas condições de estudo discutidas anteriormente, foi idealizado um corpo-de-prova de dimensões $l=120\text{mm}$, $w=80\text{mm}$ e $b=20\text{mm}$, com uma trinca de borda de comprimento $a=4\text{mm}$ e raio $\rho=50\mu\text{m}$ (Figura 3).

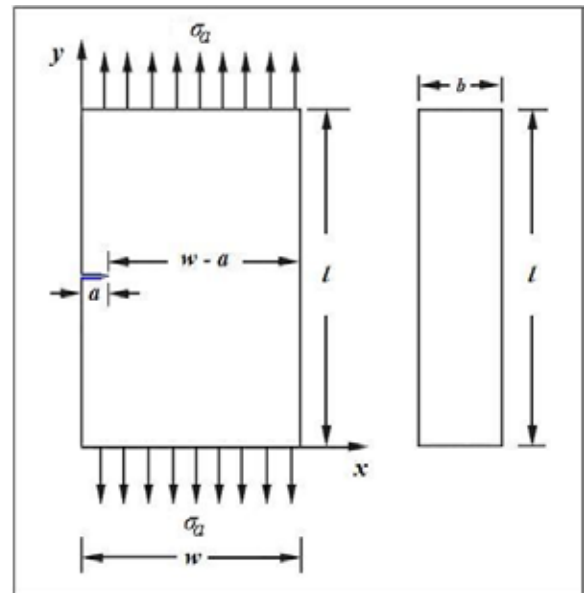


Figura 3: Corpo-de-prova idealizado com uma trinca de borda sob a tensão aplicada s_a

O material adotado foi um aço inoxidável supermartensítico 95 13Cr, cujas propriedades físicas e mecânicas estão mostradas na Tabela 1.

Na simulação foi assumido que o dano inicial e a concentração de entrada eram nulos. A tensão aplicada, $\sigma_a=300\text{ MPa}$, aproximadamente 48% de σ_y , foi mantida

constante durante todo o processo. O software utilizado para a solução do sistema de equações diferenciais foi o Matlab 7.0.

Os parâmetros materiais adotados para a simulação do problema, incluídos no modelo, estão mostrados na Tabela 2. Eles podem ser determinados indiretamente a partir dos resultados de experimentos macroscópicos e através de estimativas experimentais diretas. P. Ex., as medidas do dano podem ser achadas analisando a redução do trabalho específico de fratura em amostras com diferentes níveis de degradação, o que permite determinar os parâmetros das equações de evolução dos danos Γ_0 é obtido diretamente do valor da tenacidade à fratura do material; c_c é interpretado

como a máxima espessura do filme de corrosão e pode ser medido experimentalmente.

A escolha apropriada destes parâmetros permite uma boa convergência dos resultados do modelo com resultados obtidos experimentalmente. P. Ex., adota-se $\alpha \geq 1$ e $0 < \chi \leq 1$ para a simulação numérica da CST, sendo que na simulação da Fragilização por Hidrogênio - FPH são adotados $\alpha > 0$ e $\chi \geq 1$. Da mesma forma, o tempo característico t_c , é duas ordens de grandeza maior na CST que na FPH, uma vez que os processos corrosivos são muito mais lentos que os processos de fragilização [12].

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas do aço 95 13Cr [13,14]

σ_r (Pa)	σ_e (Pa)	E (Pa)	ν (a.d.)	K_{IC} (Pa√m)
7,24·E8	6,55·E8	2,01·E11	0,30	1,28·E8

Tabela 2: Parâmetros materiais [10]

c_a	c_b	c_d	c_{th}	τ_D	t_c	σ_s	σ_{th}	ρ_s	ρ_b	λ_D	λ_a	λ_c	λ_s	χ	Γ_0	m_s	m_c	α
(ad.)	(ad.)	(ad.)	(ad.)	(s)	(s)	(Pa)	(Pa)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(ad.)	(kJ/m ²)	(ad.)	(ad.)	(ad.)
1,0	0,5	4,0	0,0	1·E3	1·E5	5·E9	25·E7	10,0	100,0	10,0	100,0	100,0	100,0	1,0	74,2	2,0	2,0	1,0

A Figura 4 mostra a evolução da concentração do agente corrosivo na ponta da trinca após a aplicação do modelo completo, que inclui acúmulo do dano e taxa de crescimento da trinca. Na curva gerada pode-se observar que o transporte de massa na etapa inicial do processo é bastante rápido, respondendo à velocidade de difusão do agente corrosivo na trinca.

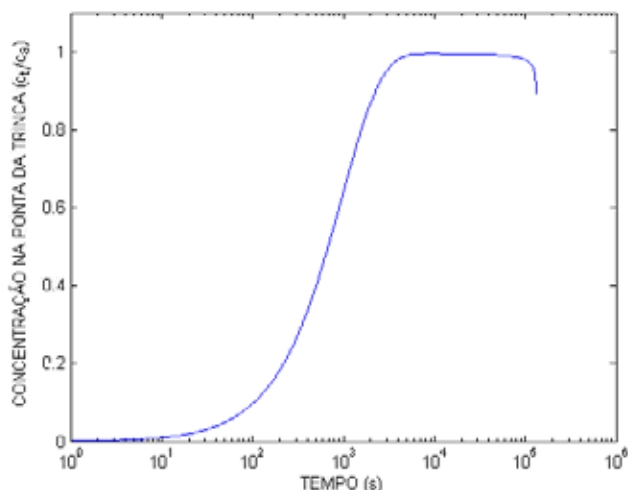


Figura 4: Evolução da concentração na ponta da trinca, c_t , normalizada com c_a

A segunda etapa, onde é atingida uma concentração estável, corresponde a um valor crítico da concentração e ao

início de propagação da trinca. Quando o crescimento fica mais intenso, o transporte do agente corrosivo até a ponta de trinca é dificultado, que pode ser observada na queda rápida de concentração no final da terceira etapa.

Nas Figuras 5 e 6 estão mostradas as curvas de evolução na ponta da trinca dos dois tipos de dano considerados, ψ_s e ψ_c .

A sua contribuição no dano total, onde predomina o dano por corrosão, está mostrada na Figura 7. Nela se pode observar que as duas magnitudes crescem monotonicamente quando a trinca está fixa e que decrescem bruscamente quando se inicia a propagação. Este comportamento é o resultado das condições de concentração e de carga adotados, e da elevada tenacidade do aço e da sua baixa resistência à CST.

A curva da Figura 8 mostra a evolução do raio efetivo da ponta da trinca e ilustra fenômenos que são difíceis de serem observados diretamente. A parte crescente da curva representa o embotamento da ponta da trinca devido ao processo de acúmulo de dano. Quando o processo de embotamento conclui, o raio efetivo da ponta da trinca decai e inicia-se o processo de aguçamento, que também corresponde ao início da propagação da trinca.

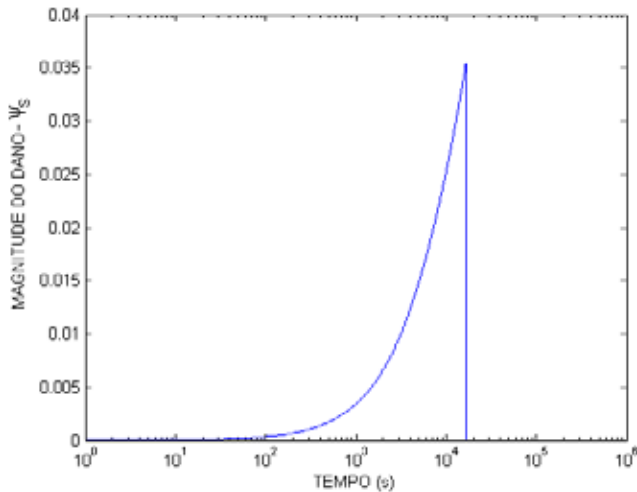


Figura 5: Evolução do dano mecânico

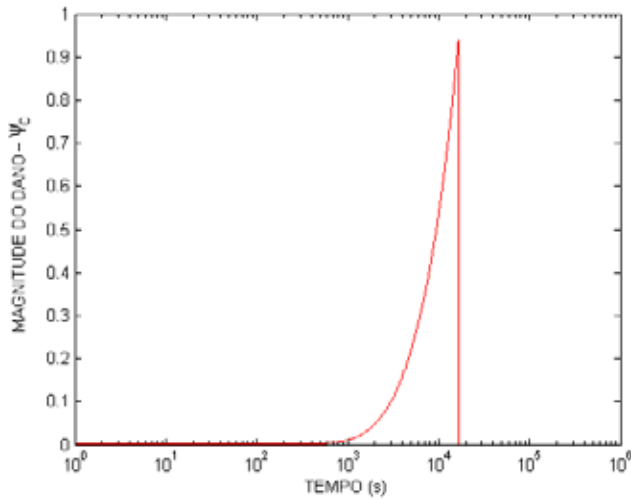


Figura 6: Evolução do dano por corrosão

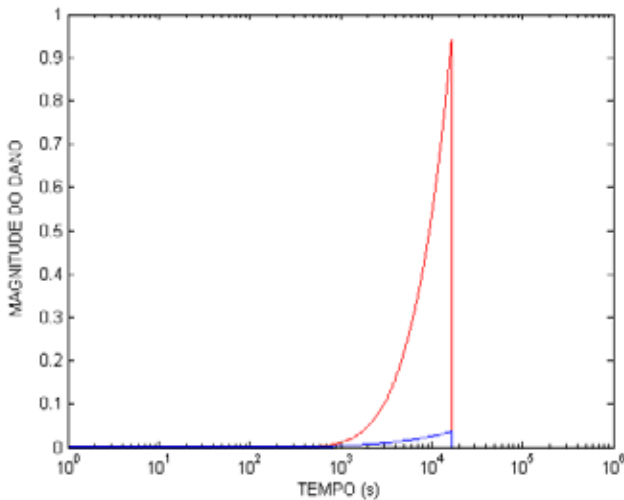


Figura 7: Contribuição dos danos mecânico e por corrosão no dano total

Na Figura 9 se mostram as curvas de evolução do crescimento da trinca sob o efeito da mesma tensão aplicada e de três diferentes concentrações de entrada, c_e , normalizadas com c_a . Nelas se observa que a evolução inicial da trinca é muito lenta e que, somente a partir de um determinado instante de tempo, inicia um crescimento suave com uma taxa progressivamente crescente. O ponto mais alto da curva representa o início da propagação instável, que resulta na fratura final do componente. Como era esperado, observa-se uma diminuição no tempo de início de crescimento da trinca e da fratura final na medida em que a concentração aumenta, o que promove um processo de degradação mais ativo.

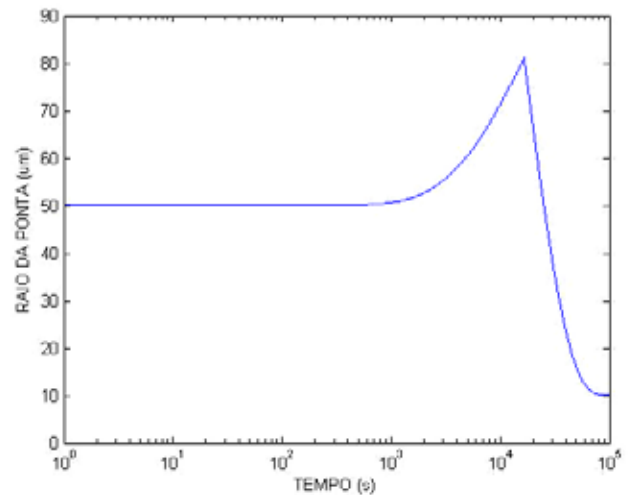


Figura 8: Evolução do raio da ponta da trinca

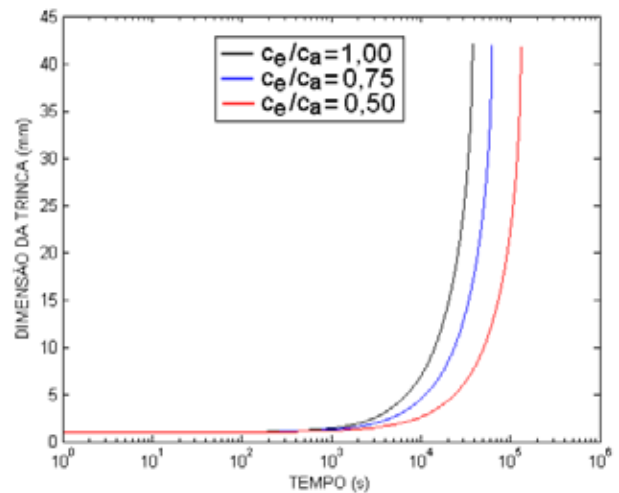


Figura 9: Evolução do crescimento da trinca para a mesma tensão e diferentes concentrações

Na Figura 10 é mostrado o gráfico da evolução do fator de intensidade de tensões com o tempo, devido ao crescimento da trinca. A tendência do comportamento da

curva é a de crescer até atingir o valor da tenacidade à fratura do material (linha vermelha), momento em que ocorre o colapso da estrutura. Essa tendência é consistente com a das curvas obtidas a partir de resultados experimentais e permite visualizar o processo da propagação de trincas quando submetidas à ação conjunta de um carregamento mecânico e um efeito ambiental, caracterizado neste caso, por um meio corrosivo.

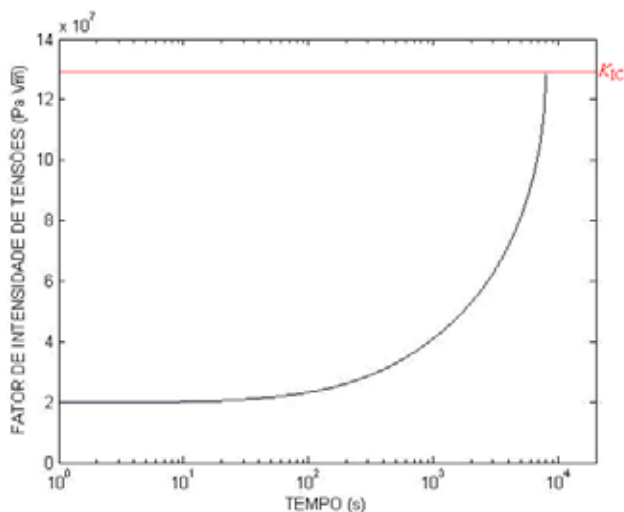


Figura 10: Evolução do fator de intensidade de tensões

A curva da Figura 11 mostra a relação existente entre a taxa de crescimento da trinca e o fator de intensidade de tensões, onde podem ser observadas claramente três regiões. Nas duas primeiras regiões o crescimento da trinca é controlado por um mecanismo ambiental complementado pela ruptura mecânica, estando o crescimento subcrítico da trinca limitado a estas regiões. Na terceira região a proporção da ruptura mecânica aumenta rapidamente com valores crescentes de K_I até que é atingido um valor crítico e ocorre a fratura final [8].

A curva obtida na simulação apresenta o mesmo comportamento de uma curva típica encontrada na literatura científica (Figura 12), onde o menor valor de K_I é denominado valor limiar da CST, K_{ISCC} , que caracteriza o nível de intensidade de tensão em que ocorre a primeira extensão mensurável da trinca. O significado prático da K_{ISCC} é que, abaixo desse nível de intensidade de tensão as taxas de crescimento de trincas na CST caem abaixo de um limite muito baixo, como 10^{-10} m/s, que corresponde a um crescimento de aproximadamente 3mm/ano [15].

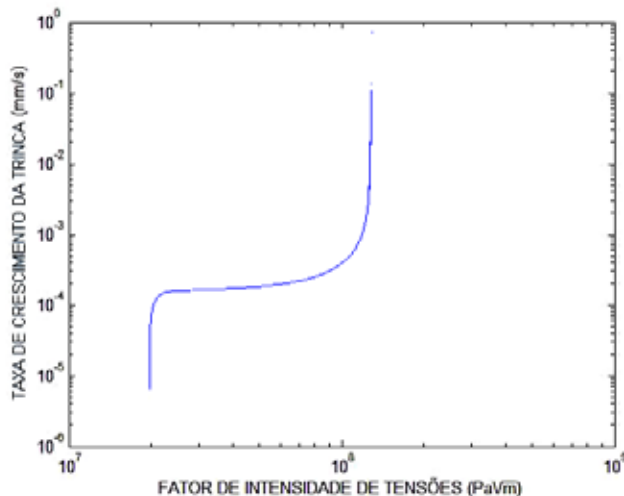


Figura 11: Relação da taxa de crescimento da trinca com o fator de intensidade de tensões

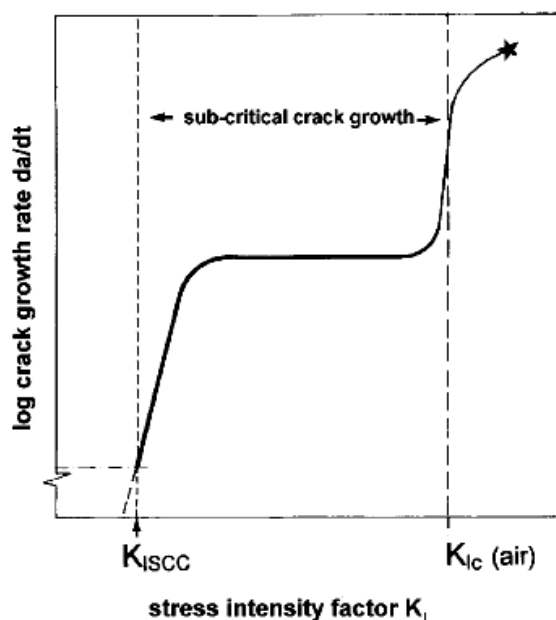


Figura 12: Curva típica da/dt Vs. K_I [15]

Variáveis ambientais como temperatura, pH, potencial eletroquímico, concentração, ou pressão parcial controlam a cinética do processo eletroquímico, que inicia e mantém o crescimento da trinca de corrosão. Estes parâmetros definem a taxa de crescimento da trinca e determinam se é formado um platô na curva da/dt Vs. K_I . Evidências experimentais têm mostrado que, para uma dada combinação material/ambiente, existe uma relação única entre K_I e da/dt , tal que pequenas mudanças em alguma das variáveis ambientais poderão aumentar ou inibir completamente a CST [15].

5. Conclusões

O modelo de dano mostra flexibilidade e boas possibilidades de acoplamento com outros modelos estudados na Mecânica da Fratura. As simulações dos processos de evolução da trinca mostraram que os tempos de início do crescimento e da fratura final diminuem quando o efeito da ação ambiental corrosiva é mais efetivo.

A curva de evolução do fator de intensidade de tensões com o tempo e a curva do seu efeito sobre a taxa de crescimento da trinca, mostraram comportamentos similares aos reportados na literatura científica.

As simulações mostraram boa consistência com observações experimentais da CST, bem descrita na literatura científica, possibilitando um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos no processo de início e crescimento de trincas sob efeito mecânico e corrosivo, e permitindo validar o modelo adotado para as condições e hipóteses delineadas no problema.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos órgãos FINEP, CTPETRO, CNPq, PETROBRAS, RPCMod e à ANP/UFCEG/PRH-25 por ter financiado o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Nomenclatura

a	Comprimento da trinca
b	Espessura do corpo-de-prova
c	Concentração num ponto material
c_a	Concentração estacionária para uma trinca estacionária
c_b	Concentração característica para o rápido crescimento da trinca
c_d	Parâmetro de resistência ao dano por corrosão
c_e	Concentração de entrada na boca da trinca
c_{th}	Concentração limiar
c_t	Concentração na ponta da trinca
E	Módulo de Young
G_I	Taxa de liberação de energia de deformação elástica no modo de fratura I
G_j	Força generalizada de propagação
K_I	Fator de intensidade de tensões no modo de fratura I
K_{IC}	Fator de intensidade de tensões crítico no modo de fratura I
K_t	Fator de concentração de tensões
l	Comprimento do corpo-de-prova
m_s	Expoente da equação do dano mecânico
m_c	Expoente da equação do dano por corrosão
t_c	Constante do tempo
w	Largura do corpo-de-prova
Y	Fator de forma
α	Parâmetro material
Γ_0	Trabalho específico de fratura para um corpo não danificado
Γ_j	Força generalizada de resistência
δa_i	Variações-G

δW_G	Trabalho virtual das variações-G
λ_a	Crescimento característico da trinca para obter um aguçamento representativo
λ_D	Comprimento característico da zona de difusão
λ_c	Comprimento da zona de evolução do dano por corrosão
λ_s	Comprimento da zona de evolução do dano mecânico
ρ	Raio de curvatura da ponta da trinca
ρ_s	Raio de curvatura da ponta aguçada
ρ_b	Raio de curvatura da ponta embotada
σ	Tensão num ponto material
σ_a	Tensão aplicada
σ_r	Limite de resistência à tração
σ_s	Parâmetro de resistência ao dano mecânico
σ_{th}	Tensão limiar
σ_Y	Limite de escoamento
ν	Módulo de Poisson
χ	Parâmetro que caracteriza a tenacidade á fratura residual
ψ_h	Dano por corrosão na ponta da trinca
ψ_s	Dano mecânico na ponta da trinca

Referências

- [1] Woodtli, J.; Kieselbach, R. Damage Due to Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking. *Engineering Failure Analysis*, v. 7, p. 427-450, 2000.
- [2] Fang, B. Y.; Atrens, A.; Wang, J. Q.; Han, E. H.; Zhu, Z. Y.; Ke, W. Review of Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in "Low" and "High" pH Solutions. *Journal of Materials Science*, v. 38, p. 127-132, 2003.
- [3] Andresson, P. L.; Morra, M. M. SCC of Stainless Steels and Ni Alloys in High-Temperature Water. *J. Sci. Eng. Corros.*, v. 64, n° 1, p. 15, 2008.
- [4] Elboujdaini, M.; Shehata, M. Stress Corrosion Cracking: A Canadian Prospective for Oil and Gas Pipeline. In: *XI International Conference on Fracture*, Turin, March 20-25, 2005.
- [5] Scheider, I; Pfuff, M.; Dietzel, W. Simulation of Hydrogen Assisted Stress Corrosion Cracking Using the Cohesive Model. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 75, n° 15, p. 4283-4291, 2008.
- [6] Bastos, I. N.; Vasconcellos, J. F. V.; Gomes, J. A. C. P.; Costa-Mattos, H. S. A Continuum Damage Model for the Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* v. 27, n°2, p. 186-191, 2005.
- [7] Vianit, E. *Numerical Simulation of Hydrogen Assisted Cracking in Supermartensitic Stainless Steel Welds*. These (Doctorate in Mechanical Engineering), Helmut Schmidt University, Hamburg, 2005.
- [8] McLaughlin, B. D. Stress Corrosion Cracking Simulation. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, v. 5, p. 129-147, 1997.

- [9] Choi, B-H.; Chudnovsky, A. Observation and Modeling of Stress Corrosion Cracking in High Pressure Gas Pipe Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 42, nº2, p. 383-395, 2010.
- [10] 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, 2001.
- [11] Bolotin, V. V. *Stability Problems in Fracture Mechanics*, John Wiley & Sons., New York, EUA, 188 p., 1996.
- [12] Bolotin, V. V. *Mechanics of Fatigue*, CRC Press. Boca Raton, EUA, 463p., 1999.
- [13] V&M tubes. V&M 13%Cr & Super 13%Cr steel grades. Catálogo do fabricante, 2010.
- [14] Dias, G.; Reguly, A.; Strohaecker, T. Fracture Toughness Evaluation of Supermartensitic Stainless Steel Submitted to Cathodic Protection in Seawater Environment. *Estudos Tecnológicos*, v. 4, nº 3, p. 146-156, 2008.
- [15] Dietzel, W. Fracture Mechanics Approach to Stress Corrosion Cracking. In: XVIII Encuentro del Grupo Español de Fractura, Marzo 28-30, 2001, Bayona, España. *Anales de Mecánica de la Fractura*, v. 18, p. 66.