

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS SOB EFEITOS DE CARREGAMENTOS CÍCLICOS EM MEIO DE AMBIENTE CORROSIVO

Guilherme Alves Costa, guilherme_a_c@hotmail.com¹
Diego Santos Medeiros, diego_sm99@hotmail.com¹
Diego David Silva Diniz, diego.diniz@ufersa.edu.br¹
Antonio Palma Carrasco, jorge_palma_c@yahoo.com.br²

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido, RN-233, Caraúbas - RN, 59780-000.

²Universidade Federal de Pernambuco, Tv. Prof. Moraes Rêgo, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901.

Resumo: Há inúmeros esforços para solucionar e entender os fenômenos existentes em problemas ocorridos em estruturas sujeitas a diversos tipos de carregamentos sob o efeito do ambiente. Essas ações negativas do ambiente sobre os materiais estruturais, como os aços de alta resistência, causam diversos fenômenos de degradação das propriedades mecânicas dos materiais estruturais, nos quais destacam-se as diferentes formas de corrosão e os processos de trincamento provocados pelo hidrogênio presente no ar úmido, na água do mar e em outros meios ambientais ativos. Deste modo, o presente trabalho propõe simular numericamente uma propagação de uma trinca num corpo de prova normatizado, em regime elástico, de uma trinca num corpo material em estado plano de deformação com carregamento no modo I (abertura ou modo trativo) e sob efeitos de uma carga mecânica cíclica e de ação negativa do ambiente, relacionando a mecânica da fratura, a fadiga e os parâmetros intrínsecos do material. O material adotado na simulação foi um aço de alta resistência classe MARAGING T-250, que tem grande utilização nos dutos para transporte de gás e petróleo e o software utilizado para a solução do sistema de equações diferenciais foi o MATLAB. Os resultados obtidos permitiram a caracterização das curvas de resistência à propagação de trinca no aço de estudo e avaliou a integridade estrutural dos mesmos. Tal caracterização e a avaliação foi possível por meio da obtenção de curvas de resistência à propagação estável de defeitos. Assim, os resultados mostraram boa consistência com observações macroscópicas do fenômeno e com curvas experimentais encontradas na literatura, validando o modelo para as condições e hipóteses adotadas no problema.

Palavras-chave: Mecânica da Fratura, Fadiga, Propagação de Trincas, Carregamentos Cíclicos.

1. INTRODUÇÃO

Há inúmeros estudos para solucionar e compreender os fenômenos existentes em problemas ocorridos nas estruturas sujeitas a diversos tipos de carregamentos e sob o efeito do ambiente. Essas ações negativas do ambiente sobre os materiais estruturais, como os aços de alta resistência, causam vários fenômenos de degradação das propriedades mecânicas dos materiais estruturais associados à ação de um efeito ambiental, nos quais destacam-se as diferentes formas de corrosão e os processos de trincamento provocados pelo hidrogênio presente no ar úmido, na água do mar e em outros meios ambientais ativos.

A fragilização por hidrogênio já é um efeito bem conhecido e estudado. Tendo em vista, que existe uma gama de artigos publicados que investigam esse efeito sobre as propriedades mecânicas dos aços e outras ligas ferrosas, por intermédio da simulação numérica aplicada e de experimentos controlados laboratoriais. Os materiais das tubulações de transporte de petróleo e gás, enterradas ou submersas, estão susceptíveis a sofrer fragilização por hidrogênio e por corrosão, devido ao ambiente em que os tubos estão inseridos.

Segundo Carrasco *et al.* (2011), a Corrosão Sob Tensão – CST (Stress Corrosion Cracking – SCC) ocorre quando o material fica susceptível à ação combinada de um ambiente quimicamente agressivo (meio corrosivo específico) e a tensões mecânicas (aplicadas e/ou residuais), acima de um determinado valor limiar. As trincas geradas na superfície, quando o material está na condição de CST, são perpendiculares à direção do esforço. A CST é apresentada como um dos mecanismos de maior severidade com relação à degradação, que forma um conjunto de trincas e.

consequentemente, levam o material a se romper. Na indústria, como a de petróleo, é uma importante limitação para a utilização de aços (Fang *et al.*, 2003), tendo-se verificado que praticamente todos os aços inoxidáveis austeníticos e ligas de Ni são suscetíveis à CST quando dadas as condições ambientais específicas para o material (Anderson & Morra, 2008).

A implementação do uso da modelagem computacional pode prever o comportamento dos materiais na CST. Sendo esse modelo preferivelmente adotado em virtude da pequena exigência de recursos técnicos e econômicos, e curtos períodos de tempos. Isto porque tem a possibilidade de estudar vários parâmetros de forma simultânea, com menor consumo de tempo e recursos comparado com testes de laboratório. A modelagem da CST com efeito de fadiga pode ser abordada dentro dos conceitos da Mecânica do Dano Contínuo e da Mecânica de Fratura, como é visto nos trabalhos de Broz (2003) e Lee (2009). Quando estas duas teorias trabalham em conjunto se torna possível descrever, com maior precisão, os fenômenos que se apresentam durante o processo de fraturamento do material (Pastoukhov, 1995).

A Mecânica do Dano Contínuo é uma alternativa para analisar a integridade das estruturas nos processos de microtrincamento causadas por efeitos do ambiente, a fim de resolver problemas que são oriundos da degradação das propriedades mecânicas dos materiais. O dano é associado no modelo através de variáveis internas associadas com a perda da resistência mecânica em razão do efeito causado pelo processo de degradação.

No presente artigo será apresentado um modelo de início e propagação de trincas sob efeitos do ambiente e também sob efeito de carregamentos cíclicos, fundamentado na Mecânica do Dano Contínuo e da Mecânica de Fratura, proposto por Bolotin & Shipkov (2001). A simulação numérica utiliza-se de um corpo de prova em regime elástico, com crescimento de uma trinca no modo de abertura I e com efeito da ação ambiental, de caráter corrosivo.

2. MODELO DE CRESCIMENTO DE TRINCAS DE FADIGA SOB EFEITO DO AMBIENTE

Neste artigo, o modelo utilizado, para análise da propagação da trinca, considera tal propagação como decorrência das interações entre as condições de estabilidade do corpo trincado na forma de um sistema mecânico e o processo de acumulação de dano dos referidos efeitos presentes na situação em análise. Dentro do modelo estão incluídas equações cinéticas que descrevem a acumulação de cada tipo de dano, as equações da evolução na ponta da trinca, a influência da concentração de dano sobre forças de resistência à fratura e, por fim, as equações clássicas da mecânica de fratura. Assim, o modelo inclui princípios da mecânica de fratura linear elástica e o estágio I do micromecanismo de crescimento de trinca por fadiga, que seria o estágio onde se inicia a propagação de trinca, com pequenas taxas de crescimento da trinca (Strohaecker, 2000).

A união de tais equações, agregado às condições de equilíbrio, propagação de trincas e estabilidade (Bolotin, 1996), viabiliza a modelagem do crescimento da trinca, relacionando taxa de crescimento da trinca e o fator cíclico de intensidade de tensões.

2.1. Mecânica do Crescimento de Trincas

Um corpo trincado que está sujeito a um carregamento e a ação do ambiente é uma condição especial de sistema mecânico, cujo estado corrente é caracterizado por um conjunto de coordenadas-L (Lagrangeanas) que descrevem o campo de deslocamentos no corpo, e por coordenadas-G (Griffithianas) que são responsáveis por retratar o aguçamento, o tamanho e a posição das trincas, com relação a energia superficial (Bolotin & Shipkov, 2001).

Segundo Carrasco (2013), o corpo pode ser caracterizado por seus estados dentro do sistema, quando se diz respeito ao estado de equilíbrio e à estabilidade, onde 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. Quando o trabalho virtual é negativo para toda $\delta a_j > 0$, são os estados de sub-equilíbrio. Se pelo menos para uma das variações o trabalho virtual é positivo, é possível dizer que é um estado não-equilíbrio.

O estado de equilíbrio estável é o mais relevante no estudo da fratura e fadiga, pois é a hipótese típica da propagação lenta e estável da trinca. Essa propagação da trinca só ocorre de forma estável quando para alguma coordenada-G, $\delta_G W = 0$ e $\delta_G(\delta_G W) < 0$ e ainda quando a condição $\delta_G W < 0$ seja satisfeita par as outras.

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

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

onde G_j e Γ_j são forças generalizadas de propagação e resistência; δa_j são as variações-G. O crescimento da trinca se dará quando $G_j = \Gamma_j$, e se torna instável quando para alguma δa_k , $G_k > \Gamma_k$, e ocorrerá a fratura do componente.

2.2. Modelagem do Dano Assistido Pelo Hidrogênio

Para modelar a acumulação de dano por fadiga no processo de CST, será inserida uma grandeza especial para cada dano, referente ao carregamento cíclico e a corrosão, e as equações cinéticas que conduzem a evolução no tempo. Portanto, o campo de dano é introduzido numericamente como $\omega = (x, t)$, tal que seja representado por um conjunto de

campos escalares de dano, $\omega_1 = (x, t), \dots, \omega_n(x, t)$, que tem variação entre zero (ausência de dano) e a unidade (quando o material se encontra completamente danificado). Tal modelo é proposto nos trabalhos de Kachanov (1986) e Rabotnov (1979).

As representações dadas na ponta da trinca são as seguintes: para dano por carregamento cíclico, e por corrosão, ψ_c , mostradas na Fig. 1 e são representados por:

$$\frac{d\psi_f}{dN} = \left(\frac{\Delta\sigma - \Delta\sigma_{th}}{\sigma_f} \right)^{m_f} \quad (2)$$

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

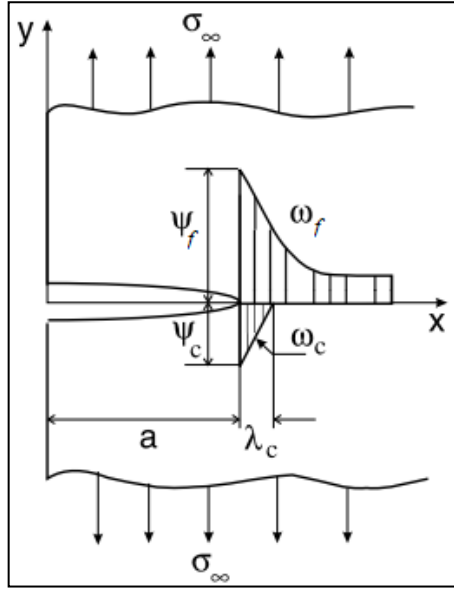


Figura 1. Distribuição dos danos mecânico cíclico e por corrosão numa trinca superficial no modo I (Adaptado de Bolotin & Shipkov, 2001).

Nas equações (2) e (3), σ_f e C_d representam, respectivamente, a resistência ao dano produzido pelo carregamento cíclico e pelo meio corrosivo; σ_{th} e C_{th} são parâmetros de resistência limiar. m_f 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 a magnitude pode ter dependência dos parâmetros σ_f e C_d ou ser escolhida aleatoriamente. σ é o valor médio da tensão referente ao carregamento, atuante no ponto material considerado e C é a concentração nesse ponto material. N é o número de ciclos.

A tensão que fica concentrada na ponta da trinca, tem relação com o raio efetivo de curvatura da sua ponta, ρ . O progresso do raio efetivo está governado por vários processos, tais como crescimento da trinca, o acúmulo do dano cíclico e o de corrosão. A evolução do raio efetivo da ponta de uma trinca com comprimento a , é descrita por:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_s - \rho}{\lambda_a} \frac{da}{dt} + (\rho_b - \rho) \frac{d(\psi_f + \psi_c)}{dt} \quad (4)$$

O termo que multiplica da/dt (taxa), descreve o aguçamento da ponta devido ao crescimento da trinca, que vai até a magnitude ρ_s . O segundo termo da direita, descreve o embotamento devido a acumulação dos danos até a magnitude ρ_b , que é o raio de curvatura da ponta embotada. ψ_f e ψ_c são as magnitudes do dano mecânico e do dano por corrosão na ponta da trinca. λ_a é um parâmetro com dimensão de comprimento.

Por fim, com a Eq. 5 conclui-se o conjunto de equações. Este é posto no modelo para relacionar as forças generalizadas de resistência com as medidas do dano na frente da ponta da trinca. Assim, o Trabalho Específico de Fratura é dado por:

$$\gamma = \gamma_0 [1 - x(\psi_f + \psi_c)^\alpha] \quad (5)$$

onde γ_0 é o trabalho específico de fratura para um corpo não danificado, x caracteriza a Tenacidade à Fratura Residual e α é um parâmetro do material.

3. TRANSPORTE DE MASSA ATRAVÉS DAS TRINCAS

A concentração de uma substância ativa na vizinhança da ponta da trinca é caracterizada por uma variável que depende de um tempo físico ou do número de ciclos e é denotada por $c(t)$ ou $c(N)$, respectivamente. O transporte desse agente ativo desde a “boca” até a ponta da trinca pode ser descrito por um modelo quase estacionário dado por:

$$\frac{dc_t}{dt} = \frac{c_a - c_t}{\tau_D} + \frac{c_b - c_t}{\lambda_D} \frac{da}{dt} \quad (6)$$

O primeiro termo do lado direito da Eq. (6) representa o mecanismo de difusão, o segundo o efeito da propagação da trinca. A concentração característica c_a é da ordem da concentração da entrada c_e . A concentração característica c_b e λ_D são conectados com a transferência de massa através na ponta da trinca, e, portanto, dependem das condições perto da ponta. Provavelmente, c_b é da ordem de c_s ; λ_D é estimado como sendo uma razão entre coeficiente de difusão e o coeficiente de transferência de massa.

A concentração na ponta da trinca, $c_t(t)$, geralmente não é a mesma do que na sua boca, denotada por $c_e(t)$, devido ao transporte do agente através dela. O parâmetro, c_a , que caracteriza a concentração estacionária atingida para uma trinca estacionária num tempo $t \gg \tau_D$, e depende da concentração de entrada e do comprimento da trinca, é dado por:

$$c_a = c_e \left(1 + \frac{a}{a_\infty} \right)^{-n_a} \quad (7)$$

Quando o carregamento mecânico é cíclico, devem ser feitas algumas considerações nas Eqs. (6) e (7): na Eq. (6) pode se interpretar $c_t(t)$ como uma concentração média na ponta da trinca durante um ciclo. Portanto, a frequência f entra como um parâmetro adicional de controle porque afeta a magnitude da concentração c_a , que varia na medida em que ocorre o *crack breathing* por efeito da carga cíclica e o hidrogênio é “bombeado” para a ponta.

4. FORMULAÇÃO NUMÉRICA

A finalidade da formulação deste problema é simular a propagação de uma trinca sobre o modelo de CST, e também submetido a um carregamento cíclico. O modelo matemático utilizado foi o de Bolotin & Shipkov (2001). A simulação é realizada em um corpo de prova de estudo que está no regime elástico-linear, de geometria retangular com uma trinca de borda passante no modo de abertura I, em um estado plano de deformação. O conjunto de equações de desenvolvimento da trinca depende de algumas variáveis, como: a concentração, dano, comprimento da trinca, raio da ponta e forças generalizadas de resistência, formando 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 c_e , é avaliada como sendo constante durante o processo e o carregamento mecânico é caracterizado pela tensão cíclica aplicada, $\sigma_\infty(f)$, cujo é dada por:

$$\sigma_\infty(t) = \sigma_{\infty,m} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_\infty \sin 2\pi f t \quad (8)$$

onde $\sigma_{\infty,m}$ é a tensão média, $\Delta\sigma_\infty$ é o intervalo de tensões e f é a frequência do carregamento, que se assumem constantes durante toda a vida em fadiga. O comprimento da trinca é apenas uma coordenada-G. Pode-se então calcular a força generalizada de propagação, G_I , por:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (9)$$

onde E é o módulo de Young, ν o coeficiente de Poisson e K_I é o fator de intensidade de tensões, calculado para o valor máximo da tensão cíclica aplicada, $\sigma_{\infty,max}$, dado por:

$$\sigma_{\infty,max} = \sigma_{\infty,m} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_\infty \quad (10)$$

Na caracterização matemática do dano mecânico, os campos de tensão-deformação e de concentração do corpo no processo considerado devem ser conhecidos, sendo, assim, utilizadas algumas aproximações baseadas numa analogia entre o fator de concentração de tensões na ponta da trinca, K_t , e o fator de intensidade de tensões K_I . Tal analogia fornece uma fórmula aproximada para o fator de concentração de tensões na ponta e a distribuição da tensão normal na frente da trinca, podendo ser calculados por:

$$k_t = 1 + 2Y \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$\sigma = k_t \sigma_\infty \left[1 + \frac{4(x-a)}{\rho} \right]^{-1/2} \quad (12)$$

A equação (11) é uma expansão da fórmula de Neuber, calculado pelo fator de concentração de tensões que considera um fator de forma Y. Assim, para o caso deste problema, o fator de forma utilizado foi $Y=1.16$. A equação (12) é a mais simples das equações empíricas de Shin, onde $(x-a) = \xi = 10\rho$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de testar a aplicabilidade do modelo de estudo nas condições já citadas, teve como base para as simulações um corpo de prova com as seguintes dimensões: $l = 120mm$, $w = 80mm$ e $b = 20mm$, com uma trinca inicial de dimensões $a = 1mm$ e $\rho = 50\mu m$, como mostrado na Figura 2. O material utilizado é um aço de alta resistência MARAGING T-250, cujas propriedades físicas e mecânicas são mostradas na Tabela 1. Outros parâmetros de simulação do referido problema aparecem na Tabela 2.

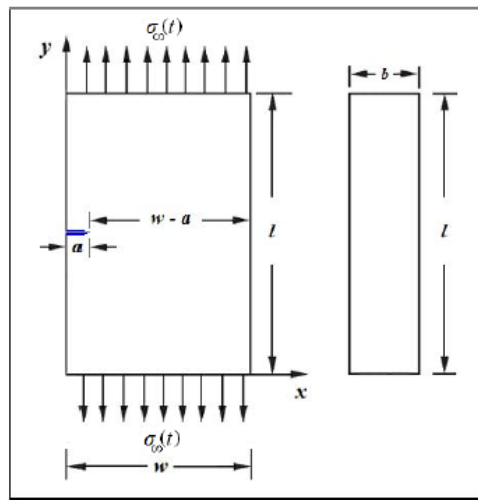


Figura 2. Corpo de prova utilizado para simulação.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas do aço MARAGING T-250 (Fonte: ALLVAC, 2000).

σ_r (Pa)	σ_e (Pa)	E (Pa)	μ (Pa)	ν (adim.)	K_{IC} (Pa* $\sqrt{m}$)
1,79E+09	1,76E+09	1,86E+11	7,16E+10	0,30	9,81E+07

Tabela 2. Parâmetros para simulação (Fonte: Bolotin, 1999 & Shipkov,2001).

a_∞ (mm)	a (adim.)	c_b (adim.)	τ_D (s)	$\Delta\sigma_{th}$ (MPa)	f_∞ (Hz)	σ_f (GPa)	ρ_s (μm)	ρ_b (μm)	λ_D (mm)	λ_a (μm)	λ_c (μm)	λ_f (μm)
100	1,0	0,5	1000	125	5e-3	5	10	100	10	100	10000	100

Tabela 2. Continuação.

χ (adim.)	T_c (s)	m_f (adim.)	m_c (adim.)	n_a (adim.)	n_f (adim.)	α	D (m ² /s)	c_{th}	c_e
0,8	5e3	2,5	3,5	1,0	1,0	10	1E-8	0.0	1

Os gráficos foram obtidos, aplicando os seguintes parâmetros para o carregamento: $\sigma_{\infty,m} = 500MPa$, $\Delta\sigma_\infty = 400MPa$ e com uma frequência de $f = 5mHz$, com esses parâmetros pode-se esboçar a curva de tensão aplicada como mostrado na Figura 3.

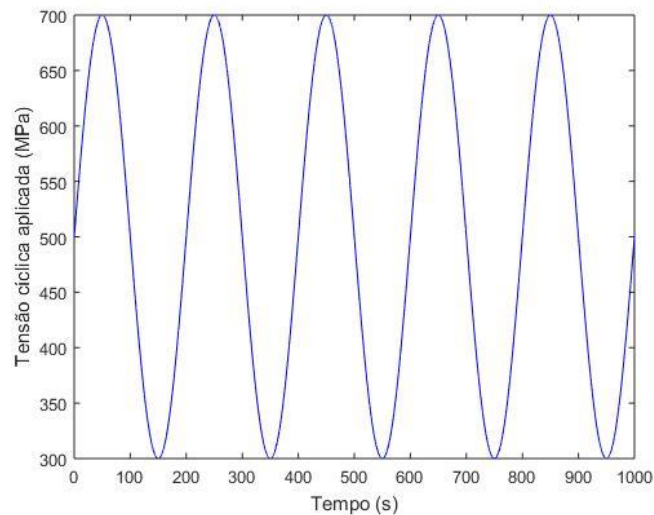


Figura 3. Tensão cíclica aplicada no modelo

Na Figura 4 são mostradas as curvas de evolução na ponta da trinca de dois tipos de danos considerados, ψ_f e ψ_c , obtidas durante a simulação. Pode-se observar uma evolução inicial lenta do dano, seguida por crescimento acelerado em função do tempo, estes comportamentos também foram relatados por Bolotin (2001) e Carrasco *et.al* (2012). Além disso, fica evidente as contribuições de cada dano sejam por corrosão ou por carregamento cíclico, o gráfico foi plotado justamente para tornar melhor a comparação direta dos dois danos, permitindo, assim, uma análise quantitativa mais eficiente. Por fim, percebe-se que a soma dos valores máximos de cada curva atinge o valor unitário, caracterizando a degradação do material, como considerado na literatura.

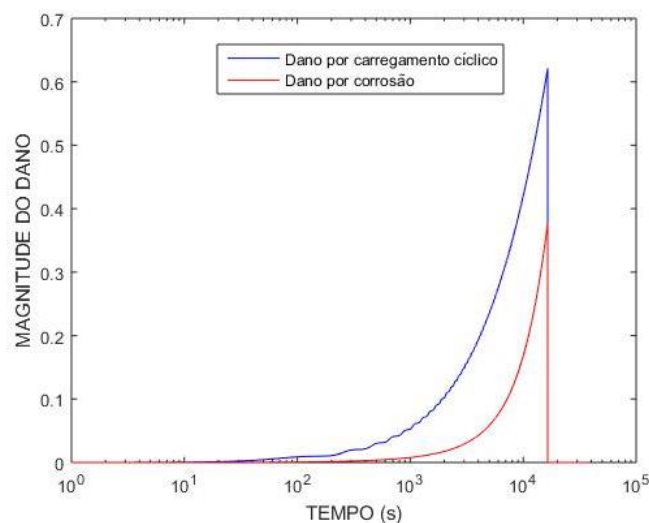


Figura 4. Magnitude dos danos

Na Figura 5a são mostradas duas curvas, a primeira, em preto, é o crescimento da trinca com a soma dos dois danos tanto corrosivo quanto carregamento cíclico, enquanto a segunda curva representa o crescimento da trinca somente com o carregamento cíclico. Nessas curvas se observa uma semelhança no comportamento evolutivo inicial da trinca, que é muito lenta e, além disso, a partir de um certo instante de tempo, inicia um crescimento suave, que depois aumenta-se progressivamente a taxa de propagação da trinca, que cresce mais rapidamente até atingir um determinado ponto, representando o início da propagação instável, consequentemente a fratura final do componente. Embora, as condições sejam diferentes nas curvas calculadas no modelo, é possível perceber que a ação do agente corrosivo influenciou número de ciclos, causando uma diminuição na quantidade de ciclos, quando comparado com a outra curva sem o efeito corrosivo. Outro ponto a destacar, na figura 5a, está no comprimento final da trinca, que apresentou o mesmo valor nas duas condições, constatando que o meio não tem influência na dimensão final da trinca. Nesse aspecto o modelo se aproximou com os resultados do modelo corrosivo com fadiga de Choi & Chudnovsky (2010) (Figura 5b) que utilizou aço X60, o qual é comparado, qualitativamente, como valores experimentais, confirmando a consistência do modelo.

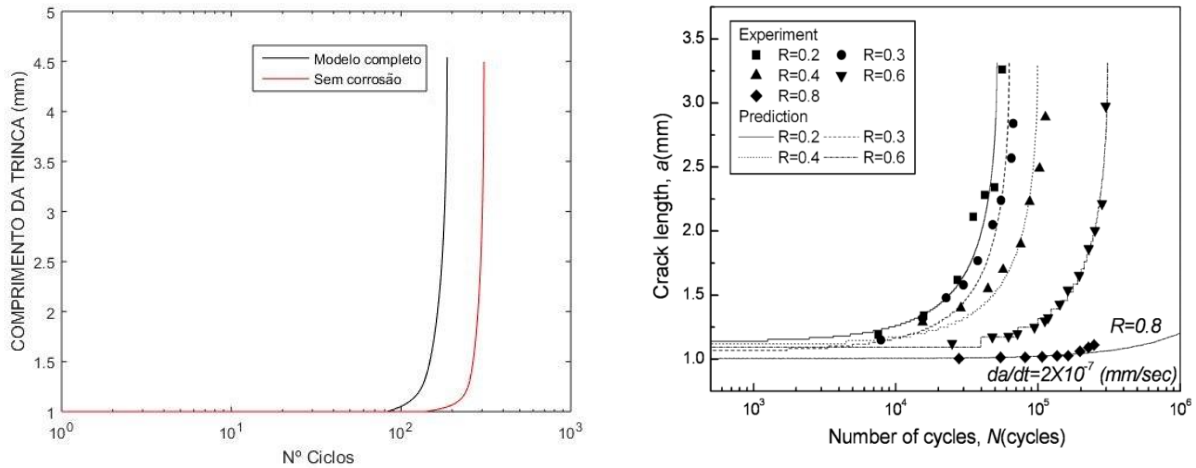


Figura 5. (a) Curva de crescimento da trinca modelo completo e curva sem agente corrosivo (b) Curva de crescimento de trinca por N° de ciclos (Fonte: Choi & Chudnovsky, 2010).

Pode ser visto, na Figura 6, uma comparação de três tipos de concentrações iniciais do agente corrosivo na ponta da trinca, onde independente de qual seja o seu valor inicial todas elas vão convergir para o mesmo valor de concentração final. A curva preta, a qual $c_0 = 0,5$, foi o valor de concentração padrão utilizada para gerar os demais gráficos. As curvas mostram inicialmente uma rápida velocidade de concentração do agente. Na parte intermediária da curva, mostra que as curvas tendem a se estabilizarem, pode-se ser concluído que esse estágio é o valor da solubilidade da corrosão para este material, correspondente a um valor crítico e ao início a propagação da trinca. Então o crescimento da trinca se intensifica e o transporte do agente corrosivo para a ponta de trinca é dificultado, causando a redução da sua concentração, mostrado no ultimo estágio da curva. A partir da segunda etapa é possível perceber o início de uma instabilidade, que se prolonga até o final da curva, que é decorrente do carregamento cíclico, que produz uma espécie de bombeamento do agente corrosivo na trinca.

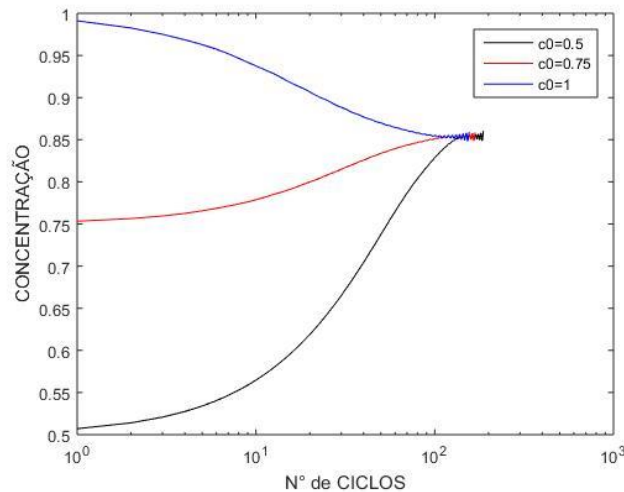


Figura 6 - Variação de concentração inicial

Logo, abaixo na Figura 7a, o gráfico mostra-se a evolução do raio da ponta da trinca com relação ao tempo. A parte crescente das curvas representa o fenômeno de embotamento da ponta da trinca, devido ao processo de acúmulo de dano. Depois que o processo de embotamento finaliza, o raio efetivo da ponta da trinca decai e começa caracterizar o processo de aguçamento, que corresponde ao início da propagação da trinca. Esse gráfico foi obtido na simulação feita no presente trabalho, pode-se ver semelhança com o a Figura 7b que foi um gráfico encontrado nos trabalhos de Bolotin & Shipkov (2001).

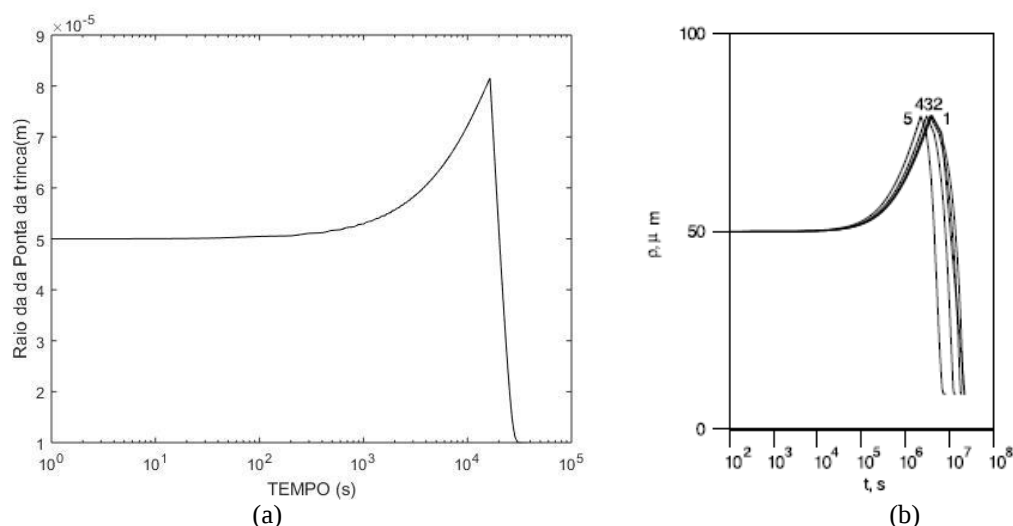


Figura 7 - (a) Raio da ponta da trinca calculado no referido trabalho (b) Raio da ponta da trinca (Fonte: Bolotin, 1999 & Shipkov, 2001).

6. CONCLUSÃO

O modelo aplicado mostrou-se eficiente e maleável quanto às modificações de variáveis para simular situações distintas de cargas, coeficientes, tempo, comparação de danos. Assim, podendo analisar rapidamente uma determinada situação que se queira compreender os fenômenos existentes. Esse modelo pode ser acoplado com estudos da mecânica de fratura, pois, já que usa alguns de seus parâmetros como a taxa de energia de deformação elástica e o fator de intensidade de tensões.

Na simulação, com relação aos gráficos, mostra uma interdependência dos fatores que ocasionam a trinca, fazendo com que a junção do carregamento cíclico e a corrosão levem a uma fratura mais prematura, do que se tivéssemos apenas a carga cíclica, mostrando que a corrosão é um fator que deve ser considerado quando se quer prolongar a vida de um material, tendo em vista que um cuidado maior com esse fenômeno leve a uma economia com a manutenção corretiva.

Com base nesses resultados, pode-se afirmar que o modelo utilizado expõe de forma qualitativa com os trabalhos de Choi & Chudnovsky (2010); Fang *et al* (2003), mostrando que o modelo numérico junto com o MATLAB consegue descrever os fenômenos presentes numa propagação de trinca submetido a fadiga e ao ambiente corrosivo.

7. REFERÊNCIAS

- Allvac, 2000, "Technical Data Sheet. Vascomax Nickel Maraging Alloys". Disponível em: www.allvac.com, data de acesso: 20/03/2007.
- 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.
- Atanzio filho, Nelson do Nascimento. Estudo da influência do meio corrosivo na resistência à fadiga do aço estrutural SAE 8620. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, 2006. Cap. 7.
- Bolotin, V. V. Mechanics of Fatigue, CRC Press. Boca Ratón, EUA, 463p., 1999.
- Bolotin, V. V. Stability Problems in Fracture Mechanics, John Wiley & Sons., New York, EUA, 188 p., 1996.
- 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.
- Brož, Petr. A Simulation of Corrosion Fatigue Crack Growth. 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), 2003.
- Carrasco, Jorge Antonio Palma et al. Simulação da evolução de uma trinca sob efeito de carregamento mecânico estático em meio corrosivo. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 6, p.39-47, 2011. Disponível em: <www.dema.ufcg.edu.br/revista>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- Carrasco, Jorge Antonio Palma et al. Simulação numérica do efeito dos carregamentos cíclicos e do hidrogênio na propagação de trincas em aços estruturais. in: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6., 2010, Campina Grande. p. 1 - 10.
- Carrasco, Jorge Antonio Palma. Acoplamento de modelos da mecânica do dano e da fratura para a avaliação da integridade de estruturas sob efeito do hidrogênio gerado em sistemas de proteção catódica. 2013. 190 f. Tese

- (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.
- Choi, Byoung-ho; Chudnovsky, Alexander. Observation and Modeling of Stress Corrosion Cracking in High Pressure Gas Pipe Steel. Metall And Mat Trans A, [s.l.], v. 42, n. 2, p.383-395, 13 ago. 2010. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-010-0384-2>.
- 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.
- Kachanov, L.M., 1986. Introduction to Continuum damage mechanics. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Lee, G.Y.; Bae, D. H. Assessment of the sulfide corrosion fatigue strength for a multi-pass welded A106 Gr B steel pipe below the low SSCC limit. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 23, p. 3191 – 3198, 2009.
- Palma Carrasco, J. ; Palma Carrasco, J. ; Silva Diniz, D. ; Andrade Barbosa, J. M. ; Almeida Silva, A. ; Silva Diniz, D. ; Almeida Silva, A. ; Andrade Barbosa, J. M. . Numerical modeling of hydrogen diffusion in structural steels under cathodic overprotection and its effects on fatigue crack propagation. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , v. 43, p. 392-398, 2012.
- Pastoukhov, Viktor, Introdução à mecânica da integridade estrutural, Editora UNESP, 1995.
- Rabotnov, Yu. N., 1979. Mechanics of deformable solids. Nauka, Moscow (in Russian).
- ROSA, Edison da. Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais. Santa Catarina. 2002. 407 p.
- Strohaecker, Telmo Roberto. Mecânica da fratura. 99 f. Laboratório de Metalurgia Física (lamef), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMBER OF CRACK SPREAD SIMULATION UNDER THE EFFECTS OF CYCLIC LOADS IN ENVIRONMENTAL MEDIA CORROSIVE

Guilherme Alves Costa, guilherme_a_c@hotmail.com¹
Diego Santos Medeiros, diego_sm99@hotmail.com¹
Diego David Silva Diniz, diego.diniz@ufersa.edu.br¹
Antonio Palma Carrasco, jorge_palma_c@yahoo.com.br²

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido, RN-233, Caraúbas - RN, 59780-000.

²Universidade Federal de Pernambuco, Tv. Prof. Moraes Rêgo, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901.

Abstract: *There are numerous efforts to address and understand the phenomena existing in problems occurring in structures subjected to various types of loads under the influence of environment. These environmental negative action on structural materials such as high strength steels, causing many phenomena of degradation of mechanical properties of structural materials in which there are the various forms of corrosion and cracking processes caused by hydrogen in the air wet, in seawater and other environmental assets. Thus, this paper proposes numerically simulate a propagation of a crack in a specimen standardized in the elastic range, a crack in a material body in a state loading with plane strain in mode I (opening or tensile mode) and under the effect of a cyclic mechanical load and negative environmental action, relating to fracture mechanics, fatigue and the intrinsic parameters of the material. The material adopted in the simulation was a high-strength steel grade maraging T-250, which has wide use in pipelines for gas and oil and the software used for the solution of differential equations was MATLAB. The results allowed the characterization of resistance to crack propagation curves in the study of steel and evaluated the structural integrity. Such characterization and evaluation was made possible by obtaining the resistance curves for stable propagation of defects. Thus, the results showed good consistency with macroscopic observations of the phenomenon and experimental data in the literature, validating the model for the conditions and assumptions made in the problem.*

Keywords: *Fracture Mechanics, Fatigue Cracks Propagation, Cyclic loads.*