

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DOS CARREGAMENTOS CÍCLICOS E DO HIDROGÊNIO NA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM AÇOS ESTRUTURAIS

J. Palma Carrasco, e-mail: jorge_palma_c@yahoo.com.br¹

D. Silva Diniz, e-mail: diego_leader@yahoo.com.br²

J. M. Andrade Barbosa, e-mail: jmab@ufpe.br³

A. Almeida Silva, e-mail: almeida@dem.ufcg.edu.br²

¹PPGCEMat/UFPG, Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, C. Grande, PB - Brasil. CEP:58109-970

²UAEM/UFPG, Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, C. Grande, PB - Brasil. CEP:58109-970

³DEMEC/UFPE, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE - Brasil. CEP: 50670- 901

Resumo: As formas de manifestação da ação negativa do ambiente de trabalho sobre os materiais estruturais como os aços de alta resistência são muito diversas, tendo sido identificados vários fenômenos de degradação das suas propriedades mecânicas associados à ação de um efeito ambiental, entre os que se encontram 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, quando é absorvido pelo material. A Fragilização por Hidrogênio é um processo de degradação que tem mostrado uma influência muito importante na intensificação do crescimento de trincas subcríticas e na diminuição da resistência à fratura e à fadiga desses materiais, e que quase inevitavelmente deriva em falhas inesperadas, a grande maioria catastrófica, em estruturas novas e com longo tempo em serviço. É por isso que é de grande importância determinar o comportamento mecânico dos materiais das estruturas que trabalham em ambientes que promovem ou facilitam a adsorção e absorção do hidrogênio, tanto na etapa de projeto quanto nas operações de avaliação da integridade estrutural. Neste trabalho apresenta-se uma formulação numérica baseada numa síntese da mecânica da fratura e da mecânica do dano contínuo para simular a propagação, em regime elástico, de uma trinca num corpo material em estado plano de deformação, carregada no modo de abertura I e sob os efeitos de uma carga mecânica cíclica e de uma ação ambiental, caracterizada pelo hidrogênio. Os resultados das simulações mostram que, nessas condições, o processo de evolução de trincas subcríticas é intensificado pela presença do hidrogênio no material e que o tempo de início da propagação diminui na medida em que a sua concentração aumenta. Estes resultados são consistentes com observações experimentais e possibilitam obter um melhor entendimento do processo de início e propagação de trincas em ambientes hidrogenados, permitindo inferir a validação do modelo adotado.

Palavras-chave: Mecânica do Dano Contínuo, Fragilização por Hidrogênio, Propagação de Trincas, Carregamentos Cíclicos.

1. INTRODUÇÃO

As formas de manifestação da ação negativa do ambiente de trabalho sobre os materiais estruturais como os aços de alta resistência são muito diversas, tendo sido identificados vários fenômenos de degradação das suas propriedades mecânicas associados à ação de um efeito ambiental, entre os que se encontram 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, quando é absorvido pelo material. Um fenômeno típico é a Fragilização por Hidrogênio, que está associado com a presença do hidrogênio atômico no material e a existência de tensões residuais ou aplicadas, que causa a diminuição da resistência à fratura e à fadiga de metais, ligas metálicas e da maioria dos aços estruturais, derivando quase inevitavelmente em falhas inesperadas, a grande maioria catastrófica, tanto em estruturas novas quanto em estruturas velhas e com longo tempo em serviço. É por isso que é de grande importância determinar o comportamento mecânico dos materiais das estruturas quando trabalham em ambientes que promovem a adsorção e absorção do hidrogênio, tanto na etapa de projeto quanto nas operações de avaliação da sua integridade estrutural.

Os efeitos da fragilização nos aços estruturais variam dependendo da natureza das tensões aplicadas na estrutura. Sob carregamentos estáticos os seus efeitos mais significativos são: a diminuição do tempo de início do microtrincamento, a intensificação do crescimento de trincas subcríticas, a redução da tenacidade à fratura, observada pela redução do fator de intensidade de tensões crítico (Gangloff, 2003; Gangloff, 2005) e a redução do fator de

intensidade de tensões limiar para a fratura assistida pelo hidrogênio (Yongwon & Ganfloff, 2007). Sob carregamentos cíclicos, os efeitos mais importantes são: a redução do limiar de propagação de trincas por fadiga (Bolotin, 2000; Capelle *et al.*, 2010), o aumento da taxa de crescimento de trincas (Oda & Noguchi, 2005; Murakami *et al.*, 2008), a redução da vida em fadiga do material (Nagumo *et al.*, 2003; Kuromoto *et al.*, 2004) e a diminuição da “tortuosidade” do caminho de crescimento das trincas de fadiga, tornando mais fácil a sua propagação. A Fig. (1) ilustra este efeito observado por Kanazaki *et al.* (2008) num aço inoxidável SUS304.

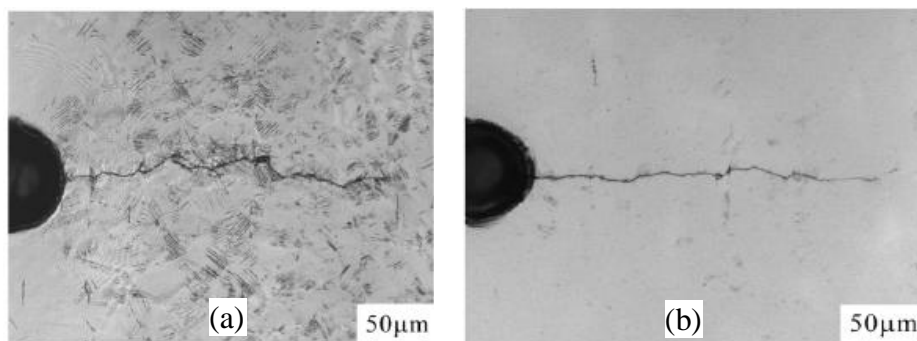


Figura 1. “Tortuosidade” do caminho de crescimento da trinca de fadiga no aço SUS304: (a) sem hidrogênio, (b) com hidrogênio (Fonte: Kanazaki *et al.*, 2008)

O processo de fragilização inclui o desenvolvimento de diversos subprocessos em vários níveis da microestrutura do material, que estão intimamente associados com a difusão de hidrogênio atômico na fase sólida. Entre eles estão, a absorção do hidrogênio atômico no reticulado, a sua interação com as discordâncias e a sua acumulação nos defeitos microestruturais. No entanto, também deve ser considerado que, junto com a “difusão clássica” em solução sólida, ocorre o transporte do hidrogênio gasoso entre a boca e a ponta da trinca e que, no caso da existência de carregamentos cíclicos, deve ser levado em conta o movimento cíclico convectivo de gases (Bolotin & Shipkov, 2001).

Uma alternativa viável para avaliar a integridade das estruturas que desenvolvem processos de microtrincamento atribuídos a efeitos ambientais é a Mecânica do Dano Contínuo, que vem registrando uma contínua evolução após a introdução do primeiro modelo proposto por Kachanov em 1958. Desde então, uma impressionante atividade de pesquisa foi dirigida para o desenvolvimento de modelos viáveis que possam descrever o dano em materiais como o aço (Celentano & Chaboche, 2007), a fim de resolver uma ampla gama de problemas conectados com a degradação das propriedades dos materiais, como efeitos térmicos e inerciais (Barbosa, 1998) e fatores ambientais (Duda *et al.*, 2007a; Barbosa *et al.*, 2007). Em 2007, Duda *et al.* (2007b) formularam um modelo unidimensional no contexto da mecânica dos meios contínuos para simular deformação, degradação e difusão de soluto em sólidos elásticos.

Neste artigo apresentar-se-á o modelo de início e crescimento de trincas sob efeitos do ambiente, baseado numa síntese da Mecânica do Dano Contínuo e da Mecânica da Fratura, proposto por Bolotin & Shipkov (2001), para simular em regime elástico, o crescimento de uma trinca submetida a um carregamento mecânico cíclico no modo de abertura I e ao efeito de uma ação ambiental, caracterizada pelo hidrogênio.

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

Neste modelo, 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 acumulação de dano. O modelo inclui as equações cinéticas para a acumulação de cada tipo de dano, as equações que descrevem as condições para a evolução da ponta da trinca e a influência do processo de acumulação de dano sobre as forças generalizadas de resistência à fratura.

Será apresentada a teoria geral para a propagação de trincas de fadiga desenvolvida por Bolotin (1999), logo, considerado um modelo de transferência de massa. O seu acoplamento com as equações cinéticas de acumulação de dano, associado às condições de equilíbrio, estabilidade e propagação de trincas, possibilitarão a modelagem do crescimento de uma trinca submetida a uma carga cíclica e a um efeito ambiental, caracterizado pelo hidrogênio.

2.1. Mecânica do Crescimento das Trincas

Um corpo trincado submetido a 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 denominadas variações-G e 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 chamados de *estados de sub-equilíbrio*. Os estados em que existem algumas variações-G onde o trabalho virtual é zero e nas restantes o trabalho virtual é negativo, são chamados de *estados de equilíbrio*; o estado de *sub-equilíbrio* é também um estado de equilíbrio

desde o ponto de vista da mecânica clássica. Se pelo menos para uma das variações 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* evidentemente são estáveis, pois quantidades adicionais de energia são necessárias para mudar o estado do sistema para qualquer estado vizinho e não existem essas fontes de energia dentro do sistema. Os *estados de não-equilíbrio* não podem ser percebidos como 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 ainda, quando a condição $\delta_G W < 0$ seja satisfeita para 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 δa_j são as variações-G. As forças generalizadas de propagação e de resistência são G_j e Γ_j respectivamente. Em termos dessas forças, a trinca não crescerá quando a condição $G_j < \Gamma_j$ for cumprida. O início do seu crescimento se dará quando $G_j = \Gamma_j$, e se tornará instável quando para alguma δa_k , $G_k > \Gamma_k$, ocorrendo finalmente, a fratura do componente (Bolotin & Shipkov, 2001b). Estas condições são válidas para modelar o crescimento de uma trinca e da fratura final para um carregamento cíclico incluindo o efeito de um fenômeno ambiental, como a fragilização por hidrogênio.

2.2. Fadiga Assistida pelo Hidrogênio

Para modelar o processo de acumulação de dano por fadiga em condições de assistência pelo hidrogênio, é introduzida uma medida especial para cada tipo de dano e a correspondente equação cinética que governa sua evolução no tempo, estabelecendo-se uma diferenciação do dano provocado pelos carregamentos estáticos, do dano devido a outros carregamentos mecânicos, como os cíclicos. A modelagem do dano por fragilização é distinguida do dano por corrosão através da introdução de uma equação cinética específica, diferente da utilizada num processo corrosivo. Portanto, o campo de dano introduzido simbolicamente por $\omega=(x,t)$, passa a ser representado por um conjunto de campos escalares de dano, $\omega_1(x,t), \dots, \omega_n(x,t)$, que são iguais a zero quando não existe dano e iguais à unidade quando o material se encontra completamente danificado.

O dano disperso produzido por um carregamento cíclico no modo I de abertura da trinca, ω_f , e o dano disperso causado pelo hidrogênio, ω_h , estão mostrados na Fig. (2). O dano por fragilização é um componente aditivo da medida do dano total e que *somente depende da concentração de hidrogênio na ponta da trinca*.

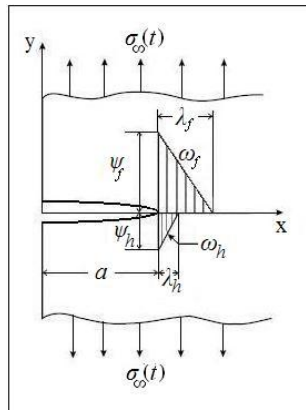


Figura 2. Distribuição dos danos mecânico cíclico e de fragilização numa trinca superficial no modo I (Adaptado de Bolotin & Shipkov, 2001).

A evolução do dano na ponta da trinca, devido ao hidrogênio, é descrita por:

$$\frac{d\psi_h}{dt} = \frac{\psi_h^\infty}{c_h} \exp\left(-\frac{c_t}{c_h}\right) \quad (2)$$

onde ψ_h^∞ é a medida do dano na ponta da trinca correspondente à saturação; c_t é a evolução da concentração na ponta da trinca e c_h é a concentração estacionária do hidrogênio, atingida para uma trinca estacionária.

A evolução do dano na ponta da trinca devido ao carregamento cíclico é dada por:

$$\frac{d\psi_f}{dN} = \left(\frac{\Delta\sigma - \Delta\sigma_{th}}{\sigma_f} \right)^{m_f} \quad (3)$$

onde N é o número de ciclos e $\Delta\sigma$ é a variação da tensão de tração que atua no ponto material considerado. σ_f , caracteriza a resistência ao dano produzido pelo carregamento cíclico e $\Delta\sigma_{th}$ é um parâmetro de resistência limiar. O expoente m_f é similar aos expoentes das equações das curvas de fadiga e taxa de crescimento da trinca (Bolotin, 1999).

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

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

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 , que é o raio de curvatura da ponta aguçada. O segundo descreve o seu embotamento devido à acumulação dos danos até a magnitude ρ_b , que é o raio de curvatura da ponta embotada. ψ_f e ψ_h são as magnitudes de ω_f e ω_h na ponta da trinca; λ_a é um parâmetro com dimensão de comprimento.

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 na frente ponta da trinca. O *Trabalho Específico de Fratura* é dado por:

$$\gamma = \gamma_0 [1 - \chi(\omega_f + \omega_h)^\alpha] \quad (5)$$

onde γ_0 é o Trabalho Específico de Fratura para um corpo não danificado, χ caracteriza a Tenacidade à Fratura Residual para o material danificado e α é um parâmetro material; portanto, $\gamma = \gamma_0(1-\chi)$ caracteriza o *Trabalho Específico de Fratura Residual* para um material completamente danificado.

Em fragilização por hidrogênio, $\alpha > 0$ e $\chi \geq 1$ (Bolotin, 1999, Bolotin & Shipkov, 2001). A partir da Eq. (6) e considerando $\Gamma_0 \equiv \gamma_0$, pode-se obter a força generalizada de resistência para uma trinca plana, dada por:

$$\Gamma = \Gamma_0 [1 - \chi(\psi_f + \psi_h)^\alpha] \quad (6)$$

onde ψ_f e ψ_h são as magnitudes dos danos na ponta da trinca provocados pelo carregamento cíclico e pelo hidrogênio.

2.3. Transporte de Massa Através das Trincas

O conteúdo de um agente ambiental ativo na vizinhança da ponta de uma trinca caracteriza-se com uma variável escalar que depende de um tempo físico (ou um número de ciclos), e é denotada por $c(t)$ ou $c(N)$. Em casos simples, como quando se trata da solução de uma substância ativa simples, esse conteúdo é a sua concentração. Quando o transporte do agente ocorre monotonicamente, modelos quase-estacionários podem ser aceitos. Um deles é dado por:

$$\frac{dc_t}{dt} = \frac{c_h - c_t}{\tau_D} + \frac{c_b - c_t}{\lambda_D} \frac{da}{dt} \quad (7)$$

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 e τ_D o tempo característico da difusão.

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_h , 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:

$$c_h = c_e \left(1 + \frac{a}{a_\infty} \right)^{-n_a} \quad (8)$$

onde $a_\infty > 0$ é um comprimento característico da trinca e $n_a \geq 0$ uma constante, que dependem das propriedades do material e do ambiente. O quarto parâmetro na Eq. (7), c_b , é uma concentração característica para o rápido crescimento da trinca, que junto ao comprimento λ_D , é conectado com a transferência de massa.

Quando o carregamento mecânico é cíclico, devem ser feitas algumas considerações nas Eqs. (7) e (8): na Eq. (7) 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_h , que varia na medida em que ocorre o *crack breathing* por efeito da carga cíclica e o hidrogênio é “bombeado” para a ponta (Fig. (3)).

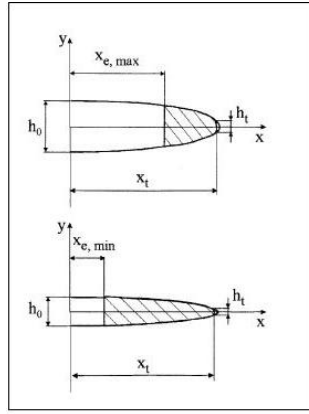


Figura 3. O efeito de “bombeamento” no carregamento cíclico (Fonte: Bolotin & Shipkov, 2001)

Esse efeito é incluído na Eq. (8) através da seguinte equação:

$$a_{\infty}(f) = a_{\infty}(0) \left(1 + \frac{f}{f_{\infty}} \right)^{n_f} \quad (9)$$

onde f_{∞} é uma frequência característica e n_f um parâmetro ≥ 0 .

3. FORMULAÇÃO NUMÉRICA

O propósito na formulação deste problema é o de simular o problema da propagação de uma trinca utilizando o modelo matemático de Bolotin & Shipkov (2001). A simulação é realizada num espécime elástico-linear de geometria retangular com uma trinca de borda no modo de abertura I, em estado plano de deformação e sob efeito de um carregamento cíclico e de uma ação ambiental caracterizada pelo hidrogênio. As equações de evolução das variáveis, *dano*, *comprimento da trinca*, *raio da ponta da trinca* e *forças generalizadas de resistência*, formam um sistema de equações diferenciais de 1ª ordem que é resolvido através do método de Runge-Kutta de 4ª ordem.

A concentração na boca da trinca, c_e , é considerada constante durante todo o processo e o carregamento mecânico é dado pela tensão cíclica aplicada, $\sigma_{\infty}(t)$, descrita por:

$$\sigma_{\infty}(t) = \sigma_{\infty,m} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_{\infty} \sin 2\pi f t \quad (10)$$

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

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (11)$$

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:

$$\sigma_{\infty,max} = \sigma_{\infty,m} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_{\infty} \quad (12)$$

Numa aproximação quase-estacionária estima-se a taxa de crescimento da trinca da/dt dentro de um intervalo de tempo pequeno o suficiente para que as outras variáveis variem muito lentamente, tratando-as como constantes nesse intervalo. Logo, utilizando as Eqs. (2) e (3) e a condição de equilíbrio dada na Eq. (6) com $\chi=1$ e $\Gamma=G$, tem-se:

$$\frac{da}{dt} = \left[f \lambda_f \left(\frac{\Delta\sigma - \Delta\sigma_{th}}{\sigma_f} \right)^{m_f} + \lambda_h \frac{\psi_h^{\infty}}{c_h} \exp\left(-\frac{c_r}{c_h} \right) \right] / \left(1 - \frac{G}{\Gamma_0} \right)^{1/\alpha} \quad (13)$$

onde λ_f e λ_h são os comprimentos das zonas de processo dos danos mecânico e ambiental, respectivamente.

Para avaliar o dano mecânico, os campos de tensão-deformação e de concentração no corpo durante todo o processo considerado 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 o fator de concentração de tensões na ponta e a distribuição da tensão normal na frente da trinca, que podem ser calculados por:

$$K_t = 1 + 2Y \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \quad (14)$$

$$\sigma = K_t \sigma_\infty \left[1 + \frac{4(x-a)}{\rho} \right]^{-1/2} \quad (15)$$

A Equação (14) é uma extensão da formula de Neuber, que calcula o fator de concentração de tensões que leva em consideração o fator de forma Y . A Equação (15) é a mais simples das equações empíricas de Shin, onde $(x-a) = \zeta = 10\rho$. Essa aproximação para a coordenada medida à frente da ponta da trinca proporciona bons resultados em problemas planos, pois essa distância usualmente é suficiente para estimar o campo do dano, especialmente quando os componentes distantes do campo podem ser desprezados (Bolotin, 1999).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a avaliação da aplicabilidade do modelo nas condições de estudo discutidas anteriormente, foi escolhido um corpo-de-prova com geometria mostrada na Fig. (4), de dimensões $l=120\text{mm}$, $w=80\text{mm}$, $b=20\text{mm}$, com uma trinca de borda com dimensões $a = 4\text{mm}$ e $\rho = 50\mu\text{m}$. O material é um aço de alta resistência classe MARAGING T-250, cujas propriedades físicas e mecânicas se mostram na Tab. (1). Os parâmetros materiais adotados para a simulação e solução deste problema, estão mostrados na Tab. (2).

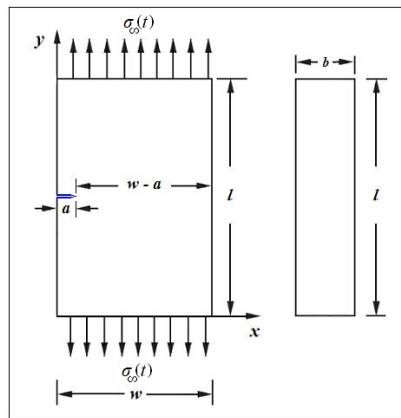


Figura 4. Corpo material com uma trinca de borda sob a tensão aplicada $\sigma_\infty(t)$.

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 $\cdot\sqrt{\text{m}}$)
1,79E+09	1,76E+09	1,86E+11	7,16E+10	0,30	9,81E+07

Tabela 2. Parâmetros materiais (Fonte: Bolotin, 1999; Bolotin & Shipkov, 2001).

a_∞ (mm)	α (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_h (μm)	λ_f (μm)	χ (adim.)	γ_0 (kJ/m 2)	m_f (adim.)	n_a (adim.)	n_f (adim.)	ψ_h^∞ (adim.)	D (m 2 /s)
100,0	1,0	0,5	100,0	125,00	1,0	5,0	10,0	100,0	10,0	100,0	10,0	100,0	1,0	47,1	4,0	1,0	1,0	0,5	1E-8

Os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo para $\sigma_{\infty,m} = 500\text{ MPa}$; $\Delta\sigma_\infty = 200\text{ MPa}$ e $f = 10^{-2}\text{ Hz}$, são mostrados nos gráficos a seguir:

A Figura (5) mostra duas curvas que descrevem as soluções numéricas do problema de transporte de massa até a ponta de uma trinca, dado pela Eq. (7), para as condições iniciais $c_t(0) = 0$ (trinca “seca”) e $c_t(0) = 1$ (trinca “molhada”). Na Fig. (6) se apresentam as soluções numéricas do mesmo problema e para as mesmas condições iniciais, desta vez,

com a incorporação do efeito *crack breathing* que ocorreria durante a aplicação de um carregamento cíclico. Na obtenção dessas soluções foi assumido que a trinca propaga com uma taxa constante, desprezando-se a absorção nas suas faces. As quatro curvas tendem a convergir rapidamente para uma concentração estacionária, c_h , sendo o tempo característico para essa convergência, diferente para os dois casos considerados: Como era de se esperar, o tempo de convergência é menor quando é tomado em conta o efeito *crack breathing*, devido a que o hidrogênio é “bombeado” para a ponta. Como também se esperava, a concentração estacionária em ambos os processos é atingida com mais rapidez quando a trinca é “molhada”, dada a facilidade para a difusão proporcionada pelo gradiente de concentrações gerado a partir da concentração inicial na boca da trinca.

Essa particularidade do transporte do agente ambiental quando a estrutura é afetada por um carregamento cíclico é um dos motivos pelos quais o processo de acumulação de dano é mais acentuado do que quando se tem apenas a ação do carregamento mecânico cíclico, sem nenhum efeito ambiental adicional. As conseqüências dessa condição são de grande relevância, pois têm um importante efeito sobre a velocidade de degradação das propriedades do material, que é mais rápida, com a conseqüente diminuição da sua resistência à fadiga.

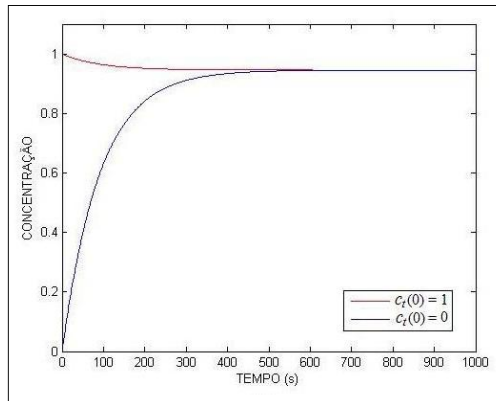


Figura 5. Transporte de hidrogênio na ponta da trinca. Solução da equação de transporte de massa sem o efeito *crack breathing*.

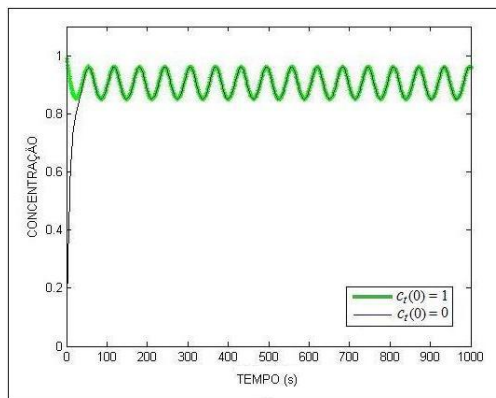


Figura 6. Transporte de hidrogênio na ponta da trinca. Solução da equação de transporte de massa com o efeito *crack breathing*.

A Figura (7) mostra a evolução da concentração do hidrogênio na ponta da trinca a partir da aplicação do modelo completo, que inclui transferência de massa, acumulação de dano e crescimento da trinca. Foi assumido que o dano inicial é nulo e que a trinca é inicialmente “seca”. Na curva gerada pode-se observar que o transporte do agente na etapa inicial do processo é bastante rápido, respondendo à velocidade de difusão do hidrogênio no metal. A segunda etapa, onde é atingida uma concentração estável, corresponde a um valor crítico dessa concentração e ao início de propagação da trinca. Quando o crescimento fica mais intenso, o transporte do hidrogênio para a ponta de trinca é dificultado, o que provoca a diminuição da sua concentração, observada no final da terceira etapa. A instabilidade observada, principalmente a partir da segunda etapa da curva, é devida ao efeito de bombeamento incluído no modelo pela equação de transporte que contém o efeito do carregamento cíclico, e revela a “não-estacionaridade” do processo de difusão.

A curva da Fig. (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 acumulação de dano, que é praticamente instantâneo, condicionado pela acumulação de dano que, por sua vez, está condicionado à rápida difusão do hidrogênio. O início do crescimento da trinca está representado pela pequena mudança de inclinação da porção crescente da curva. Quando o processo de embotamento da ponta da trinca é finalizado, dá-se início ao processo do seu aguçamento, que também corresponde ao início da propagação da trinca.

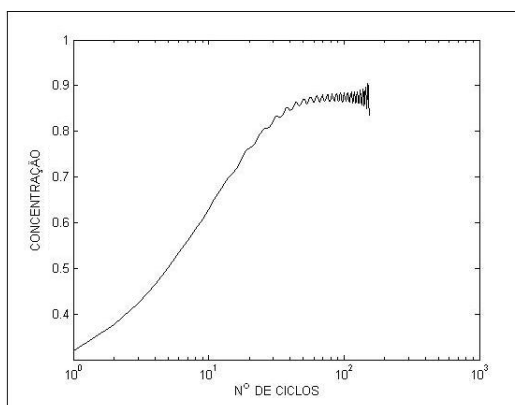


Figura 7. Evolução da concentração do agente na ponta da trinca. Aplicação do modelo completo.

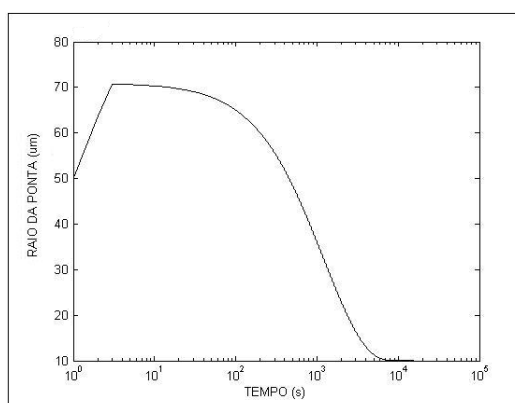


Figura 8. Evolução do raio efetivo da ponta da trinca.

Na Figura (9) se observam duas curvas que correspondem à evolução do crescimento da trinca para duas situações: a primeira, quando a estrutura está sob a ação do carregamento cíclico e do hidrogênio, e a segunda, quando sobre a estrutura atua unicamente a carga cíclica. Na primeira curva se observa que, apenas num pequeno intervalo de variação do número de ciclos, a evolução inicial da trinca é muito lenta e não sofre alterações importantes; somente a partir de um determinado nível ela inicia um crescimento suave até alcançar uma velocidade cada vez maior. Na segunda curva, o intervalo em que a trinca não sofre alteração é muito maior, no entanto o crescimento é mais brusco e as maiores velocidades de crescimento são alcançadas mais rapidamente. O ponto mais alto das duas curvas representa o início da propagação instável e a fratura final do componente. Como se esperava, quando a estrutura se encontra sob a ação do hidrogênio e a carga cíclica, o início do crescimento e de propagação estável da trinca ocorrem muito mais cedo do que quando só se aplica o carregamento cíclico. O resultado é a correspondente redução da vida em fadiga do material.

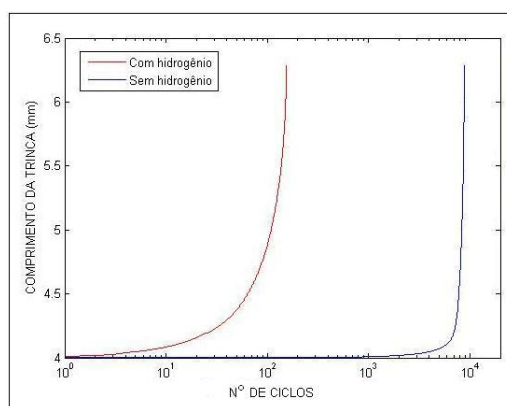


Figura 9. Evolução do crescimento da trinca de fadiga para corpos-de-prova sem hidrogênio e com hidrogênio, numa concentração normalizada $c_e/c_H=1,0$

5. CONCLUSÕES

O modelo de dano mostra flexibilidade e boas possibilidades de acoplamento com modelos estudados na Mecânica da Fratura, dado que também utiliza parâmetros empregados por ela, tais como a taxa de energia de deformação elástica e o fator de intensidade de tensões.

As simulações dos processos de crescimento da trinca mostraram que o tempo de início e crescimento das trincas diminui dramaticamente quando a estrutura se encontra sob o efeito do hidrogênio e do carregamento cíclico, em relação aos tempos registrados quando ela está unicamente sob o efeito da ação mecânica. Acredita-se que a diminuição nesse tempo seja devido à diminuição do fator de intensidade de tensões limiar para propagação de trincas por fadiga, muito influenciada pelo ambiente, tal como a literatura científica o afirma. As duas situações são, portanto, resultado da degradação do material devido à ação combinada do carregamento mecânico e à ação do hidrogênio, o que é consistente com observações macroscópicas do fenômeno da fadiga sob assistência do hidrogênio.

Os resultados mostraram boa consistência com observações do fenômeno, bem descritos na literatura científica, possibilitaram um melhor entendimento do processo de início e propagação das trincas de fadiga sob assistência do hidrogênio e permitiram inferir a validação do modelo para as condições e hipóteses delineadas no problema.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- ALLVAC, 2000, "Technical Data Sheet. Vascomax Nickel Maraging Alloys". Disponível em: www.allvac.com, data de acesso: 20/03/2007.
- Barbosa, J.M. "Análise do Acoplamento Termomecânico em Barras Elasto-viscoplásticas com Dano". Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio, Rio de Janeiro, 1998.
- Barbosa, J. M.; Souza, A. C.; Guimarães, L. J.; Duda, F.P., "Simulação da Evolução de Dano em Materiais Elásticos com Acoplamento de Deformação-Difusão". In: 8º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cibim 8, 2007, Cusco - Peru
- Bolotin, V.V., 2000, "Mechanical Aspects of Hydrogen Enhanced Fatigue-Crack Growth". Doklady Physics, v. 45, n. 6, p. 291-293.
- Bolotin, V.V., 1999, "Mechanics of Fatigue". CRC Press, New York, 463 p.
- Bolotin, V.V.; Shipkov, A.A., 2001, "Mechanical Aspects of Corrosion Fatigue and Stress Corrosion Cracking". International Journal of Solids and Structures, v. 38, p. 7297-7318.
- Capelle, J.; Gilgert, J.; Pluinage, G., 2010, "A fatigue Initiation Parameter for Gas Pipe Steel Submitted to Hydrogen Absorption". International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, p. 833-843.
- Celentano, D.; Chaboche, J.L., 2007, "Experimental and Numerical Characterization of Damage Evolution in Steels". Int. J. Plasticity, doi:10.1016/j.ijplas.2007.03.008.
- Duda, F.P.; Barbosa, J.M.; Guimarães, L.J.; Souza A.C., 2007a, "Modeling of Coupled Deformation-Diffusion-Damage in Elastic Solids". International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry, v.1, n. 1, p. 85-93.
- Duda, F.P.; Souza A.C.; Guimarães, L.J.; Barbosa, J.M., 2007b, "An One Dimensional Coupled Model for Deformation, Degradation and Solute Diffusion in Elastic Solids". Mechanics of Solids in Brazil, v 1, p. 199-213.
- Gangloff, R.P., 2003, "Hydrogen Assisted Cracking of High Strength Alloys". Comprehensive Structural Integrity, v. 6, Elsevier Science, New York.
- Gangloff, R.P., 2005, "Critical Issues in Hydrogen Assisted Cracking of Structural Alloys", in Environment Induced Cracking of Metals (EICM-2), Sergei Shipilov, ed., Elsevier Science, Oxford, UK.
- Kanezaki, T.; Narazaki, C.; Mine, Y., Matsuoka, S., Murakami, Y., 2008, "Effects of Hydrogen on Fatigue Crack Growth Behavior of Austenitic Stainless Steels". International Journal of Hydrogen Energy, v. 33, p. 2604-2619.
- Kuromoto, N.K.; Guimarães, A.S.; Lepienski, C.M., 2004, "Superficial and Internal Hydrogenation Effects on the Fatigue life of Austenitic Steels". Materials Science and Engineering A, v. 381, p. 216-222.
- Murakami, Y.; Kanezaki, T.; Mine, Y.; Matsuoka, S., 2008, "Hydrogen Embrittlement Mechanism in Fatigue of Austenitic Stainless Steels". Metallurgical and Materials Transactions A, v. 39^a, p. 1327-1339.
- Nagumo, M.; Shimura, H.; Chaya, T.; Hayashi, H.; Ochiai, I., 2003, "Fatigue Damage and its Interaction with Hydrogen in Martensitic Steels". Materials Science and Engineering A, v. 348, p.192-200.
- Oda, Y.; Noguchi, H., 2005, "Observation of Hydrogen Effects on Fatigue Crack Growth Behaviour in an 18Cr-8Ni Austenitic Stainless Steel". International Journal of Fracture, v. 132, p. 99-113.
- Yongwon, L. & Gangloff, R.P., 2007, "Measurement and Modeling of Hydrogen Environment Assisted Cracking of Ultra High-Strength Steel". Metallurgical and Materials Transactions-A, v. 38A, p. 2174-2190

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF CYCLIC LOADS AND HYDROGEN ON CRACK PROPAGATION IN STRUCTURAL STEELS

J. Palma Carrasco, e-mail: jorge_palma_c@yahoo.com.br¹

D. Silva Diniz, e-mail: diego_leader@yahoo.com.br²

J. M. Andrade Barbosa, e-mail: jmab@ufpe.br³

A. Almeida Silva, e-mail: almeida@dem.ufcg.edu.br²

¹PPGCEMat/UFCG, Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, C. Grande, PB - Brasil. CEP:58109-970

²UAEM/UFCG, Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, C. Grande, PB - Brasil. CEP:58109-970

³DEMEC/UFPE, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE - Brasil. CEP: 50670- 901

Abstract. *The forms of manifestation of the negative action of the working environment on the structural materials, such as high strength steels are very diverse. There are several degradation phenomena of their mechanical properties associated with the action of an environmental effect, as the different forms of corrosion and cracking processes caused by the hydrogen present in moist air, in seawater and other environmental media assets, when it's absorbed into the material. The Hydrogen Embrittlement is a degradation process that has shown a very significant influences on the intensification of subcritical crack growth, and in the decreased the fatigue resistance of these materials. Almost inevitably it derives in unexpected catastrophic failures, both in new structures and in old structures with long time in service and is therefore, very important to determine the mechanical behavior of structural materials that work in environments that promote or facility the adsorption and absorption of hydrogen, both at the design stage and structural integrity assessments operations. This paper presents a numerical formulation based on a synthesis of fracture mechanics and continuum damage mechanics to simulate the propagation in elastic regime, of a crack in an material body in plane strain, loaded in the tensile opening mode and under the effects of an cyclic mechanical load and an environmental action, characterized by the hydrogen. The simulations results shown that under these conditions, the subcritical crack evolution process is enhanced by the presence of hydrogen in the material and that the start time of the propagation decreases as its concentration increases. These results are consistent with experimental observations, allowing to reaching a better understanding of the process of initiation and cracks propagation in hydrogenated environments and to infer the validation of the adopted model.*

Keywords: *Continuum Damage Mechanics, Hydrogen Embrittlement, Crack Propagation, Cyclic Loads*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.