



# ACOMPANHAMENTO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA EM ENSAIOS DE FLEXÃO ALTERNADA, ATRAVÉS DA MEDIDA DE PARÂMETROS INDIRETOS<sup>1</sup>

Ana Maria Gontijo Figueiredo<sup>2</sup>

Gabriel de Oliveira Ribeiro<sup>2</sup>

José Felipe Dias<sup>3</sup>

Paulo José Modenesi<sup>4</sup>

Felipe Leonardo Pereira Queiroz<sup>5</sup>

Ana Paula Oliveira Pires<sup>5</sup>

## Resumo

Este trabalho mostra resultados de um projeto que visa sistematizar procedimentos para monitorar a iniciação e propagação de trincas de fadiga em corpos-de-prova sem entalhes de um aço estrutural de alta resistência. Essa metodologia é baseada na redução da rigidez à flexão do corpo-de-prova, detectada pela variação do momento fletor induzido no engastamento. Os ensaios de fadiga por flexão foram realizados com controle de deformação e o momento fletor no apoio ao longo do tempo foi registrado através de um sistema eletrônico de aquisição de dados. Com os resultados obtidos, foi construída a curva de vida em fadiga e, com os valores médios do momento, foram construídos gráficos em função do tempo e identificados os pontos de variação brusca de inclinação. Posteriormente, foi realizada análise fractográfica das superfícies de fratura. Os resultados iniciais se mostraram promissores, permitindo supor que a metodologia proposta será capaz de detectar os pontos de iniciação e propagação de trincas.

**Palavras-chave:** Aço estrutural; Ensaio de fadiga por flexão; Iniciação e propagação de trincas por fadiga.

## MONITORING OF FATIGUE CRACK GROWTH IN ALTERNATING BENDING TESTS BY MEASURES OF INDIRECT PARAMETERS

### Abstract

This work presents results from a project that aims to develop procedures to monitor crack initiation and propagation during fatigue testing of high strength structural steels. The technique is based on the decrease of bending stiffness of the specimen, which results from crack nucleation and growth in an alternating bending test. This stiffness decrease is detected by the bending moment changes at the fixed support of the specimen during the test. The tests have been accomplished under strain control and the bending moment values at the fixed support during the tests were measured and stored in a computer using a digital data-logging system. Fatigue life curves were obtained based on these data. Also curves of the medium bending moment along the time have been drawn from which points of sudden change in slope were identified. Fracture surfaces have analyzed by means of fractography. The results suggest that this methodology can potentially provide means to detect crack initiation and crack growth during fatigue bending tests of metallic materials.

**Keywords:** Structural steels; Bending fatigue test; Fatigue crack initiation and growth.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor, Depto. de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG.

<sup>3</sup> Doutor, Faculdade de Engenharia, Universidade de Itaúna.

<sup>4</sup> Doutor, Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG.

<sup>5</sup> Graduando, Curso de Engenharia Civil, UFMG.



## 1 INTRODUÇÃO

O fenômeno denominado fadiga pode ser simplificado definido como o processo que leva à fratura de componentes e materiais, sob aplicação repetida de tensão, ou deformação, de magnitude inferior tanto ao limite de ruptura do material, quanto à tensão crítica de propagação de trincas sob carga monotônica. A fadiga é responsável por pelo menos 90% das falhas em serviço de componentes mecânicos ou estruturais,<sup>(1)</sup> causando importantes prejuízos econômicos, ambientais e sociais. Cada vez mais, compreende-se que componentes estruturais freqüentemente operam sob carregamentos variáveis, suficientemente severos para fazer da resistência à fadiga um critério importante de projeto. Apesar da compreensão dos processos envolvidos na fadiga ter aumentado consideravelmente, traduzindo-se em projetos mais eficientes contra esse tipo de falha, a fratura por fadiga e os processos que a promovem ainda não estão colocados no mesmo tipo de base conceitual que outros tipos de falhas mecânicas importantes, tais como fratura por sobrecarga. Assim, falhas devidas à fadiga têm se tornado, cada vez mais, uma das principais preocupações em projetos de engenharia, e critérios de projeto considerando o efeito, baseados em modelos mais sofisticados, têm sido incorporados às principais normas técnicas. O estudo do fenômeno de fadiga dos materiais, de natureza interdisciplinar, tem se dado em duas vertentes principais, fortemente inter-relacionadas: desenvolvimento de materiais com boa resistência à fadiga, no âmbito da ciência dos materiais, e desenvolvimento de métodos confiáveis de previsão do comportamento de elementos sujeitos a fadiga, no âmbito de mecânica aplicada.

Uma das classificações comuns dos processos de fadiga os divide em “fadiga de alto ciclo” e “fadiga de baixo ciclo”. Fadiga de alto ciclo é aquela na qual a sollicitação é baixa, portanto o número de ciclos para ruptura ( $N_f$ ) é grande, usualmente excedendo muito  $10^3$  ciclos, e o material sofre deformação macroscópica apenas elástica. Neste caso,  $N_f$  é relacionado tanto com o campo de deformações elásticas ( $\Delta\varepsilon_{el}$ ) quanto com o campo de tensões ( $\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon_{el}$ ). Metais duros, ou com tratamento para endurecimento superficial, são adequados para resistirem a este tipo de fadiga. Comumente, para  $N_f \approx 10^3$  ciclos, as amplitudes de deformação plástica ( $\Delta\varepsilon_{pl}$ ) e elástica ( $\Delta\varepsilon_{el}$ ) são semelhantes. À medida que a amplitude da tensão ou da deformação cíclicas é aumentada,  $N_f$  decresce e, concomitantemente, é desenvolvida uma componente de deformação plástica cíclica e, para valores menores de  $N_f$ ,  $\Delta\varepsilon_{pl}$  excede  $\Delta\varepsilon_{el}$ . O processo passa, então, a ser conhecido como fadiga de baixo ciclo e, neste caso,  $\Delta\varepsilon_{pl}$  correlaciona-se melhor com  $N_f$  do que  $\Delta\sigma$ . Equações empíricas relacionando  $\Delta\varepsilon_{pl}$  com  $N_f$  têm sido desenvolvidas para fadiga de baixo ciclo e seu emprego provê uma estimativa de vida em fadiga neste caso. Eventualmente essas expressões podem ser usadas para fadiga de alto ciclo, no caso da presença de defeitos preexistentes com dimensões conhecidas. Metais dúcteis respondem melhor à fadiga de baixo ciclo, uma vez que a deformação plástica da ponta da trinca resulta no seu embotamento, reduzindo a taxa de propagação. A amplitude de tensões abaixo da qual se considera, na abordagem clássica, que o material não irá falhar por fadiga denomina-se limite de fadiga.

O comportamento em fadiga é tradicionalmente abordado através de duas metodologias diferentes. A primeira, conhecida por “vida em fadiga”, é uma abordagem clássica, baseada no conceito de número total de ciclos para falhar a partir do material sem trincas, quando este é submetido a tensões ou deformações cíclicas de amplitude controlada ( $\sigma_a$ ). Com os resultados, são construídas curvas  $\sigma_a$ - $N_f$  (ou S-N), no caso de processo com controle de amplitude de tensão, e  $\varepsilon_a$ - $N_f$ , no



caso de processo com controle de amplitude de deformação. A vida em fadiga obtida desta forma incorpora o número de ciclos para iniciar e para propagar uma trinca dominante até que ocorra a falha final. Nos casos comuns de fadiga de alto ciclo, o número de ciclos para a falha costuma ser caracterizado em termos de amplitude de tensões. No caso de fadiga de baixo ciclo, a vida em fadiga é mais bem caracterizada em termos de amplitude de deformações. A segunda metodologia, conhecida por “tolerância a danos”, emprega as leis de crescimento de trincas da mecânica de fratura. Trabalha-se com a premissa de que existem trincas pré-existentes no material, e procura-se estimar o número de ciclos para propagar uma trinca dominante até um comprimento crítico, o qual pode ser estimado com base, por exemplo, na tenacidade à fratura do material. Esta abordagem é mais comumente adotada nas situações de fadiga de alto ciclo, sob cargas baixas, em que são atendidos os requisitos da mecânica de fratura elástica-linear, isto é, a zona plástica na ponta da trinca é pequena, comparada com as dimensões características do componente trincado (incluindo o comprimento da trinca), prevalecendo as condições de comportamento elástico.<sup>(2-9)</sup>

Dentre os vários tipos de ensaio de fadiga existentes, o ensaio de fadiga por flexão apresenta algumas vantagens em relação a outros comumente empregados, tais como o de flexão rotativa, devidas à maior simplicidade do estado de tensões atuante (flexão simples), produzindo menos interferências nos resultados, facilitando portanto sua análise. Estudando o fenômeno de fadiga em ferro fundido ADI, Dias (2006) realizou ensaios de fadiga por flexão alternada sob controle de deformação, em corpos de prova planos, durante os quais observou indícios de redução no momento fletor registrado (no engastamento) quando do surgimento da trinca, com destaque para o fato de que o valor do momento permaneceu inalterado. A partir dessa constatação, sugeriu uma adaptação no equipamento para identificar a fase de iniciação de trincas, através de aquisição eletrônica de dados. Tal procedimento tornaria possível identificar a iniciação das trincas em um ensaio de fadiga relativamente simples, tendo em vista que testes específicos para tal detecção são raros para a maioria dos materiais.<sup>(9)</sup> Além da iniciação, Dias<sup>(10)</sup> sugere ser possível identificar as fases de propagação e ruptura do corpo-de-prova, sob carregamentos de amplitude constante e variável.

Este trabalho mostra resultados iniciais de um projeto que visa sistematizar procedimentos para monitorar a iniciação e propagação de trincas de fadiga em um aço estrutural de alta resistência, a partir da medida de variações no momento fletor induzido no apoio do corpo-de-prova. Para tanto, foram realizados ensaios de fadiga por flexão, com controle de deformação, do corpo-de-prova submetido a diferentes amplitudes de deformação. Com os resultados obtidos, foi levantada a curva de vida em fadiga do material e as superfícies de fratura foram observadas em microscópio eletrônico de varredura. Com a média dos valores absolutos do momento, obtidos em intervalos regulares de tempo, foram construídos gráficos em função do tempo e identificados os pontos de variação brusca em sua inclinação. Posteriormente, foi realizada análise fractográfica das superfícies de fratura.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram empregadas chapas com espessura de 4,75 mm, de aço estrutural de baixa liga e alta resistência mecânica, comumente empregado em estruturas de edifícios industriais: ASTM A572 – Grau 50-1 ( $f_y = 350$  MPa e  $f_u = 450$  MPa) fabricado pela USIMINAS. Sua caracterização mecânica (medidas de tensão de escoamento e

limite de resistência) foi realizada através de ensaios de tração em uma máquina Instron 5582, Canton, MA, EUA. Os ensaios de fadiga por flexão foram realizados no equipamento LFE-150 da Fatigue Dynamics Inc. (Figura 1), à qual foram acoplados um contador de ciclos e um sistema de aquisição de dados eletrônico, que registra e a variação do momento fletor no apoio ao longo do tempo (ECON-DT9816/DT-MF).



**Figura 1.** (a) Equipamento empregado nos ensaios de fadiga por flexão;(b) detalhe do corpo-de-prova fletido.

Foram adotados corpos de prova planos e sem entalhe para ensaios de fadiga, cuja geometria foi definida a partir de ensaios preliminares e modelagens numéricas via método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS<sup>®</sup>, de forma a trabalhar na faixa de tensões adequada (Figura 2). Nas modelagens, foi empregado o elemento SOLID 45, análise não-linear multielástica e curva tensão-deformação obtida nos ensaios de tração, introduzida através de 100 pontos. Para levantamento da curva de vida em fadiga (Amplitude de deformação - Número de ciclos para ruptura do material), foram realizados 37 ensaios de fadiga por flexão até a ruptura com oito diferentes níveis de deformação. Os ensaios foram realizados com controle de deformação, isto é, o deslocamento na extremidade do corpo-de-prova ao longo do tempo foi mantido constante. Em todos os ensaios foi registrada a variação do momento fletor no engaste com o tempo. Com a média dos valores absolutos do momento, obtidos em intervalos regulares de tempo foram construídos gráficos em função do tempo e identificados os pontos de variação brusca em sua inclinação. Posteriormente, foi realizada análise fractográfica das superfícies de fratura por microscopia eletrônica de varredura (MEV), através de equipamento JSM 6360, Jeol, Tokyo, Japão.

### 3 RESULTADOS

A Figura 2 mostra as curvas “tensão *versus* deformação” obtidas nos ensaios de tração (caracterização do material). A partir delas foram calculadas as propriedades apresentadas na Tabela 1.

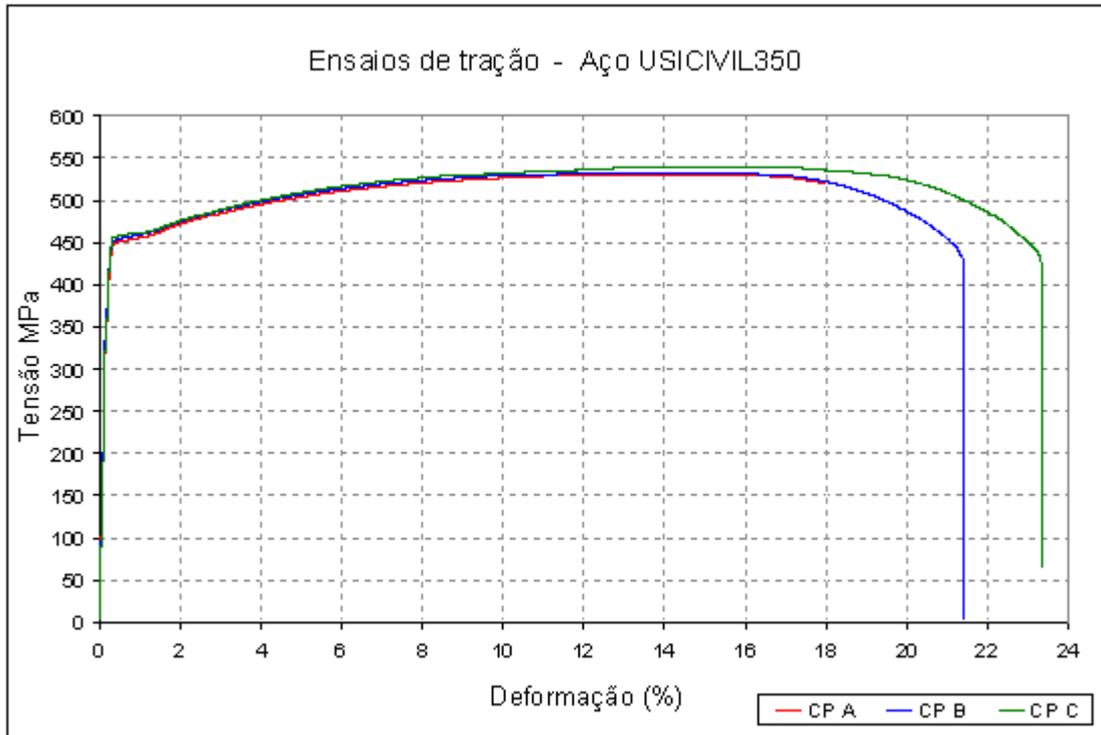


Figura 2. Curva tensão-deformação obtida nos ensaios de tração.

Tabela 1. Propriedades do material, obtidas a partir das curvas da Figura 1.

	Obtidos (média)	Informado pelo fabricante
Tensão de escoamento (MPa)	452	350
Limite de resistência (Mpa)	534	450

O corpo de prova foi projetado para permitir ser atingida uma tensão  $\sigma_x$  máxima equivalente a aproximadamente 90% do limite de resistência do material, com a aplicação de 50% do deslocamento máximo permitido pelo equipamento. As dimensões adotadas estão mostradas na Figura 3.

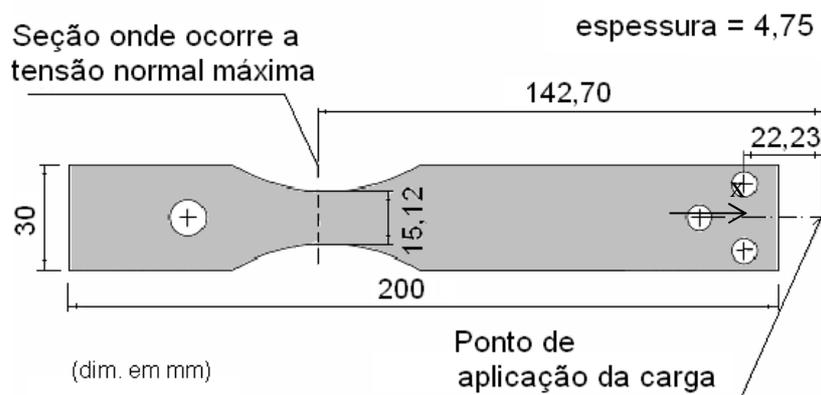


Figura 3. Corpo-de-prova empregado nos ensaios

A Figura 4 mostra as distribuições de (a) tensões e (b) deformações obtidas na análise numérica, quando aplicado um deslocamento de 25,4 mm na extremidade do corpo-de-prova.

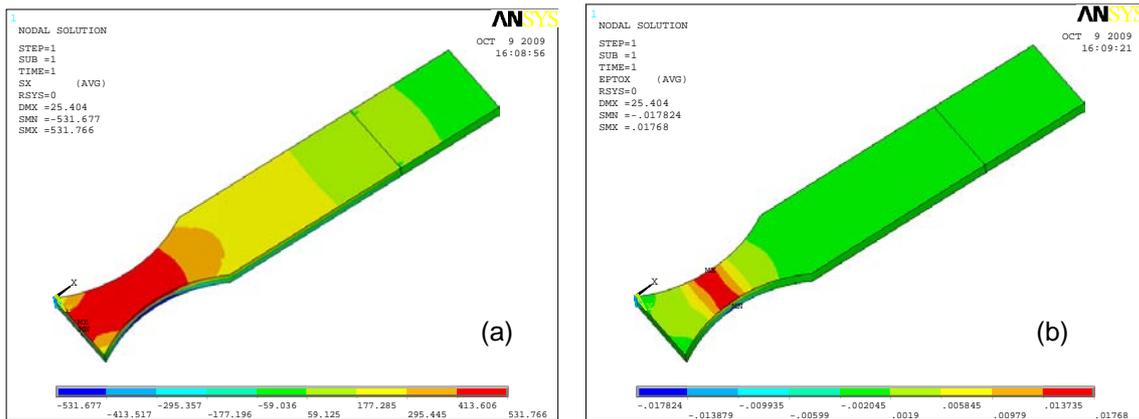


Figura 4. Distribuição de (a) tensões normais  $\sigma_x$  e (b) deformações  $\epsilon_x$  obtidas na análise numérica.

A curva de vida em fadiga por flexão (“amplitude de deformação x número de ciclos para ruptura” –  $\epsilon_a-N_f$ ), construída com os resultados dos ensaios, está mostrada na Figura 5 – curva (b). O número de ciclos para falha,  $N_f$ , corresponde à média dos valores obtidos para cada amplitude de deformação.

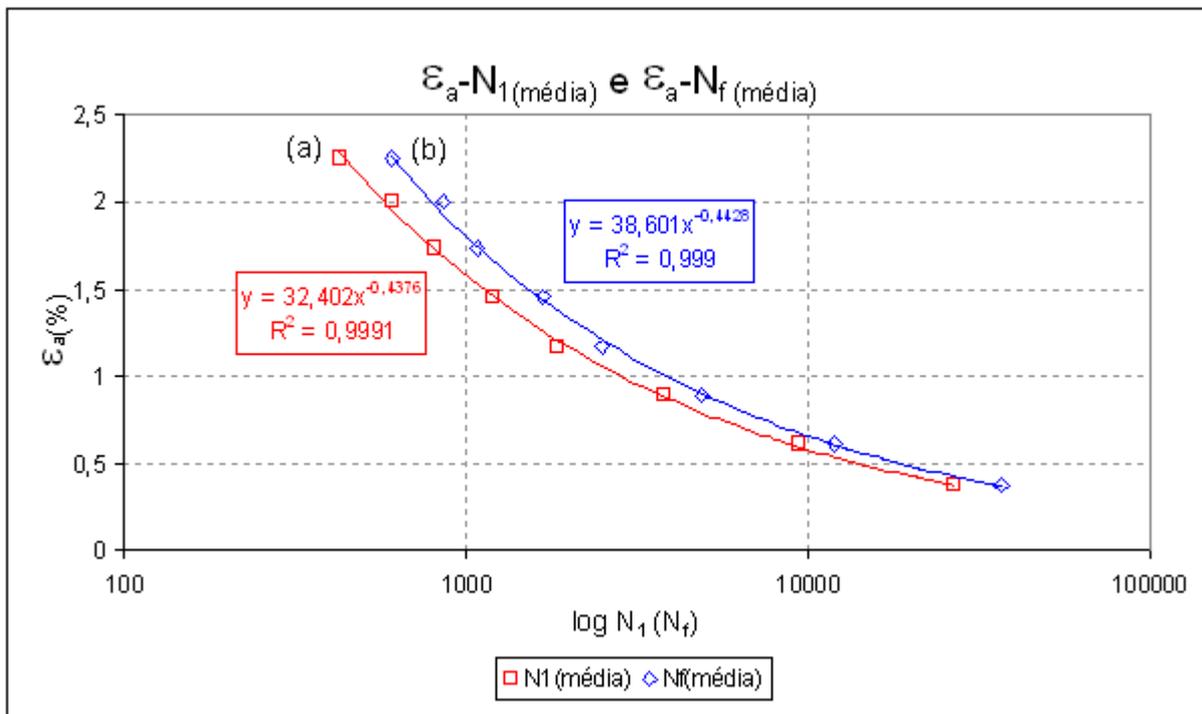


Figura 5. Curvas (a)  $\epsilon_a-N_{1(média)}$  e (b)  $\epsilon_a-N_{f(média)}$ .

A curva (a) mostrada na Figura 5,  $\epsilon_a-N_1$ , apresenta o número médio de ciclos necessário para produzir uma mudança significativa na inclinação da curva “momento fletor no apoio x tempo” (Figura 6), para cada amplitude de deformação. Esta curva foi obtida da seguinte maneira: em cada ensaio, o momento fletor no apoio foi registrado em intervalos regulares de tempo, gerando uma curva senoide (momento versus tempo) para cada período de aquisição de dados. Com esses dados, foi calculada a média dos valores absolutos do momento. Com os valores obtidos adotando este procedimento para todas as curvas registradas ao longo de um ensaio, foi construído um gráfico da variação do momento médio ao longo do tempo durante todo o ensaio. Dessa forma, cada ponto da curva corresponde ao



momento médio calculado como a média dos valores absolutos do momento durante um número inteiro (entre 20 e 30) de ciclos de carregamento por flexão. Uma dessas curvas é apresentada na Figura 6 e refere-se a um ensaio com amplitude de deformação  $\epsilon_a = 0,61\%$ .

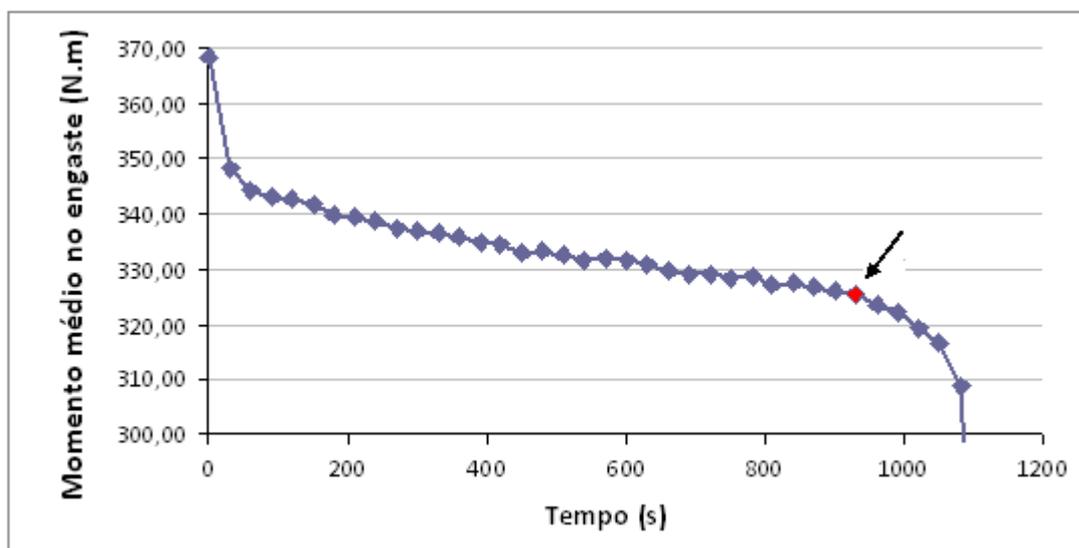


Figura 6. Curva “momento médio no apoio versus tempo” de um ensaio realizado com  $\epsilon_a = 0,61\%$ .

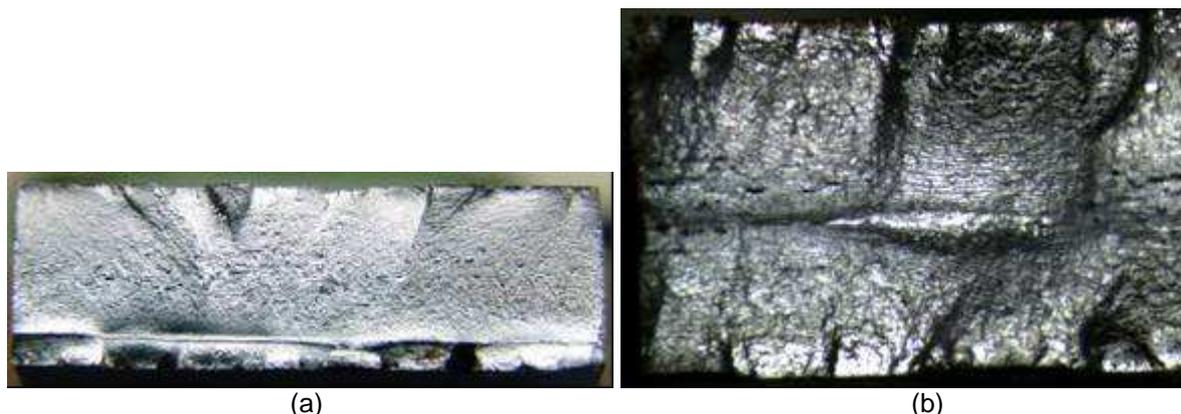
Desprezados os pontos iniciais, considerados como acomodação do equipamento, a curva da Figura 6 pode ser aproximada a uma reta ao longo da maior parte do tempo. O ponto em que pode ser identificada mudança de inclinação importante na reta está em vermelho e assinalado com uma seta na Figura 6. Foi, então, calculado o número de ciclos ( $N_1$ ) correspondente ao tempo referente a este ponto. Com os valores de  $N_1$  obtidos aplicando-se esse procedimento em todos os ensaios, para todas as amplitudes de deformação, foi construído um gráfico  $\epsilon_a-N_1$ . Com a média dos valores de  $N_1$  para cada amplitude de deformação versus tempo, foi construída a curva (a) da figura 5. Os desvios-padrão referentes aos valores médios de  $N_f$  e  $N_1$  dos gráficos da figura 5, assim como o número de ensaios realizados com cada amplitude de deformação, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de  $\epsilon_a$ , número de ensaios para cada  $\epsilon_a$ ,  $N_f$  e  $N_1$  com os quais foram construídos os gráficos da figura 5, com os respectivos desvios-padrão

$\epsilon_{ax}$ (%)	No ensaios	$N_1$ (média)	DP( $N_1$ )	$N_f$ (média)	DP( $N_f$ )
0,37	4	26603	1660	36925	3633
0,61	4	9349	867	11975	1600
0,88	4	3800	417	4900	365
1,17	3	1851	29	2500	100
1,46	3	1201	79	1666	57
1,74	5	807	106	1084	135
2	6	608	97	856	80
2,26	5	427	19	605	7

A Figura 7(a) mostra a superfície de fratura de um corpo-de-prova, ensaiado com  $\epsilon_a=0,52\%$ , em que podem ser observadas as regiões de início das trincas de fadiga, com a ocorrência de marcas de catraca, além das regiões de propagação e de

fratura final. Na figura 6(b), com aumento maior, podem ser observadas marcas de praia, em um corpo-de-prova ensaiado com  $\epsilon_a=3,20\%$ .



**Figura 7.** Superfícies de fratura de corpos-de-prova rompidos com (a)  $\epsilon_a= 0,52\%$  e (b)  $\epsilon_a= 3,20\%$ .

#### 4 DISCUSSÃO

As características mecânicas do aço, obtidas nos ensaios de tração, dificultaram em certa medida a realização dos ensaios, uma vez que a proximidade entre os valores da tensão de escoamento e do limite de resistência reduziram a faixa de amplitudes de deformação possível de ser empregada. Além disso, o fato de o aço estar encruado, o que pode ser verificado nas curvas da Figura 2, dificultou a interpretação dos resultados, pois o amaciamento sofrido durante o ensaio de fadiga produz inclinação negativa na curva “momento *versus* tempo” (Figura 6). Com isso, a redução de rigidez do material (amaciamento) pode ser confundida com redução de rigidez estrutural que ocorre na iniciação ou propagação de trincas (redução da seção resistente), colocando a necessidade de empregar um critério de identificação desta última, no caso, a mudança de inclinação da reta.

As tensões e deformações obtidas na análise numérica, cuja distribuição para uma das situações de solicitação está mostrada na Figura 4, são compatíveis com as esperadas e as dimensões dos corpos-de-prova foram definidas a partir desses resultados.

A curva de vida em fadiga,  $\epsilon_a-N_f$  mostrada na Figura 5b, apresentou forma semelhante à clássica da literatura, com equação  $y = 38,601 x^{-0,4426}$  semelhante à de Coffin-Manson, com coeficiente próximo de 0,5, valor compatível com fadiga de baixo-ciclo.<sup>(2,6,7)</sup> A dispersão verificada nas curvas da Figura 5 parece razoável, tendo em vista os desvios-padrão apresentados na Tabela 2.

As superfícies de fadiga mostradas na Figura 7 apresentam características claras da ruptura por de fadiga, coerentes com a solicitação imposta, isto é, flexão do corpo-de-prova.<sup>(2,6)</sup>

Com os resultados obtidos, até o presente momento, não é possível afirmar com certeza qual fenômeno está sendo detectado pela mudança de inclinação da reta da figura 6, isto é, a iniciação de uma trinca, ou a propagação de trincas iniciadas anteriormente no processo. Entretanto, o grande número de ensaios realizados, sob diferentes amplitudes de deformação, e a ocorrência de fenômenos semelhantes nos resultados obtidos em todos eles, apontam para a possibilidade referirem-se a um desses fenômenos. Para sua correta identificação e a sistematização da metodologia será necessária a análise dos resultados de ensaios que se encontram ainda em andamento.



## 5 CONCLUSÃO

Os ensaios de fadiga por flexão, realizados em corpos-de-prova de aço estrutural de alta resistência, permitiram construir uma curva de vida em fadiga semelhante às relatadas na literatura. Com o registro do momento fletor no apoio em intervalos regulares de tempo foram traçadas curvas momento *versus* tempo, nas quais foi possível identificar pontos de variação brusca do momento a partir da mudança de sua inclinação. A fractografia mostrou superfícies coerentes com fadiga por flexão. Os resultados iniciais se mostram promissores, permitindo supor que o prosseguimento do projeto levará a uma metodologia capaz de detectar a iniciação e propagação de trincas, através do registro de parâmetros indiretos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro e à CODEME Engenharia pelo material cedido.

## REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1988, 751p.
- 2 BROEK, D. Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4. ed. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers 1986, 501p.
- 3 HERTZBERG, R.W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 3. ed., John Wiley & Sons, 1989, 680p.
- 4 COURTNEY, T.H. Mechanical behavior of materials, McGraw-Hill 1990, 620p.
- 5 EWALDS, H.L.; WANHILL, R.J.H. Fracture Mechanics, Arnold DUM Edition, 1993, 304p.
- 6 DOWLING, N.E.; (1998), Mechanical behavior of materials. 2a. ed., Prentice Hall.
- 7 SURESH, S. (2001). Fatigue of Materials, 2 ed., Cambridge University Press.
- 8 DAVIDSON, D.L; LANKFORD, J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics, International Materials Reviews, v.37, No.2, p45-76, 1992.
- 9 SCHIJVE, J. (1996). Fatigue crack grow under variable-amplitude loading. In: ASM Handbook – Fatigue and Fracture, v19, p. 110-133.
- 10 DIAS, J.F. (2006); Estudo do comportamento à fadiga em ferro fundido nodular austemperado (ADI) sujeitos a carregamentos de amplitude variável. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas – DEES, UFMG, Belo Horizonte, 2006.