

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DANO EM UM MODELO DE MATERIAL ELASTOPLÁSTICO SOB CARREGAMENTO CÍCLICO

José Luis do Nascimento¹, Antonio Almeida Silva², José Maria Andrade Barbosa³

¹ UFCG/CCT/DEM/ Bolsista PRH-25/ANP - Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, Tel: (83) 310 1126 R. 30. e-mail: anpjoseluis@yahoo.com.br

² UFCG/CCT/DEM/ Professor Adjunto IV- Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, Tel: (83) 310 1126 Ramal 30. e-mail: almeida@dem.ufcg.edu.br

³ UFPE/DEMEC/ Professor Adjunto – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, 50740-530, Recife - PE, Tel: (81) 2126 8230 R. 216. e-mail: jmab@ufpe.br

Resumo – Dutos e estruturas assim como ferramentas, equipamentos e máquinas estão sujeitos a problemas de fadiga, em virtude de estarem constantemente sofrendo esforços repetidos. Este problema é acentuadamente interdisciplinar e seu estudo envolve contribuições de especialistas da física dos materiais, metalurgia e engenheiros projetistas de máquinas e estruturas. Nos aspectos da Mecânica da fratura a literatura existente é bastante vasta, com estudos igualmente avançados. Porém, nos aspectos da Mecânica do dano contínuo seus estudos são recentes e vem sendo impulsionados pelas simulações numéricas computacionais. Através de uma teoria termodinâmica com variáveis internas foi possível estudar e identificar o comportamento do modelo elastoplástico, a partir da simulação unidimensional de uma barra, submetida a carregamentos monótonos e cíclicos prescritos em tensão. Apesar de ser um modelo sofisticado, esquemas numéricos simples podem ser utilizados na solução do problema se uma técnica de decomposição for adotada. A introdução do modelo de uma variável de estado chamada dano, D, permitiu incorporar o efeito da degradação do material. Neste modelo o efeito do dano permitiu observar a influencia da degradação no material simulado.

Palavras-Chave: dano; carregamento cíclico; simulação computacional.

Abstract – Pipes and offshore structures as well as tools, equipments and machines are subject to the fatigue, because they are constantly submitted to repeated loads. This problem is strongly interdisciplinary - this study involves specialists of the physics of the materials contributions, metallurgy and designer engineers of machines and structures. In the aspects of the Fracture Mechanics the existent literature is quite vast, with studies equally advanced. However, in the aspects of the Continuous Damage Mechanics the studies are recent and it has been impelled by the computational numeric simulations. Through a thermodynamic theory with internal variables was possible to study and to identify the behavior of the elastoplastic models, starting from the one-dimensional simulation of a bar, submitted to monotonous and cyclical loads prescribed in tension. In spite of being a sophisticated model, simple numeric scheme can be used in the solution of the problem if a decomposition technique be adopted. The introduction of the model of a state variable called damage, D, allowed to incorporate the effect of the degradation of the material. In this model the effect of the damage allowed to observe her it influences of the degradation in the simulated material.

Keywords: damage; cyclical loads; computational simulation.

1. Introdução

A análise e predição de vida remanescente de componentes e estruturas é um passo importante que merece atenção no projeto de componentes metálicos. A análise de integridade de estruturas usando-se a Mecânica dos Meios Contínuos com variáveis internas vem sendo objeto de pesquisa há décadas e nos últimos anos tomou um impulso considerável gerando um grande número de trabalhos científicos que vem sendo aplicados em problemas industriais. A predição de vida útil pode ser feita através da Mecânica do Contínuo incluindo-se nas equações constitutivas uma

variável adicional D denominada de Dano e que é associada ao grau de degradação do material. Para modelar o comportamento inelástico de materiais metálicos submetidos a solicitações cíclicas ou monótonas introduziu-se a variável interna de dano D . O dano D , pode ser interpretado como uma medida de degradação material local causada pela deformação plástica (deformação permanente). Se $D=0$ o material está intacto e se D se aproxima de 1 o material está localmente danificado não resistindo mais aos esforços aplicados (Lamaitre and Chaboche, 1990).

O comportamento de um corpo deformável é regido por dois tipos de equações: as básicas e as constitutivas. As básicas representam os princípios fundamentais ou as Leis físicas Universais que regem o comportamento de todos os corpos. As equações constitutivas descrevem comportamentos particulares de cada material. Baseando-se nestas equações definem-se algumas equações de estado e leis de evolução que são utilizadas no trabalho para caracterizar os modelos estudados. As equações de estado expressam a relação entre as “forças termodinâmicas” associadas as variáveis internas estudadas. As leis de evolução representam a história do comportamento do corpo ao longo do tempo e satisfazem a Segunda Lei da termodinâmica.

O uso de variáveis internas parte da teoria de que o estado termodinâmico de um meio contínuo, num dado ponto e instante, podem ser completamente caracterizados a partir de um número finito de variáveis. Estas variáveis são introduzidas a priori para descrever alguns mecanismos físicos e suas leis de evolução. As variáveis internas refletem modificações do estado interno do meio, estando associadas com mecanismos dissipativos de natureza não térmica. Dois modelos constitutivos que vem sendo bastante pesquisados são os modelos elastoviscoplastico e o elastoplastico (Galindo e Barbosa, 2001). Ambos são caracterizados pelas variáveis internas e leis de evolução, porém diferem no seguinte: o modelo elastoviscoplastico leva em consideração os efeitos viscosos e de fluência do material tendo importância no que diz respeito a estudar o comportamento de metais a altas temperaturas e alguns aços inoxidáveis a temperatura ambiente. O elastoplastico considera metais no qual o efeito da viscosidade não é relevante. Para demonstrar a importância de se acoplar o efeito do dano na predição de vida útil dos metais, simulou-se o modelo elastoplastico com e sem a presença do dano, e para os casos de carregamentos monótonos e cíclicos.

2. Modelo Elastoplastico com Dano

Sabendo-se que σ , x e y são chamadas de variáveis de estado por representarem as características do material em determinado instante e também de forças por possuírem características que possam causar alterações a um corpo, apresentando variáveis associadas respectivamente, são elas: ε_p , c e p . O modelo tem as equações de estado dadas por (Barbosa, 1993):

$$x = (3/2)a \cdot c(1 - D), \quad (1)$$

$$\sigma = E(\varepsilon_e)(1 - D); \quad (2)$$

$$y = (b(1 - e^{-dp}) + \sigma_p)(1 - D); \quad (3)$$

A deformação elástica é substituída por

$$\varepsilon_e = \varepsilon - \varepsilon_p \quad (4)$$

onde, σ , tensão; σ_p , limite de escoamento; x , variável do endurecimento cinemático isotrópico; y , força de endurecimento isotrópico; c , variável interna associada a x ; ε , deformação total; ε_p , deformação plástica; ε_e , deformação elástica; p , deformação plástica acumulada; $a; b; d$, constantes do material.

Leis de evolução:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dt} &= E \left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{d\varepsilon_p}{dt} \right) (1 - D) - E \frac{dD}{dt} (\varepsilon - \varepsilon_p) \\ \frac{dD}{dt} &= \frac{B^D}{S_o} \cdot \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dt} = \left| \frac{d\varepsilon_p}{dt} \right| \quad (6)$$

$$\frac{d\varepsilon_p}{dt} = \frac{dp}{dt} \text{sgn} \quad (7)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d\varepsilon_p}{dt} - \varphi \cdot c \frac{dp}{dt} (1 - D) \quad (8)$$

Um outro artifício matemático envolve da derivação da tensão no tempo,

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{d\varepsilon_p}{dt} \right) (1-D) - E \frac{dD}{dt} (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (9)$$

2.1. Esquema plástico simplificado

Escrevendo-se o conjunto de equações do problema em termos incrementais e em função da variável de deformação plástica acumulada Δp , obtém-se uma equação que é função apenas do incremento da deformação plástica acumulada $f(\Delta p)$. A solução do problema evolutivo restringe-se a determinar a raiz dessa equação que representa o incremento da deformação plástica acumulada. Este enfoque é bastante interessante, uma vez que a deformação plástica é uma grandeza escalar, e pode ser diretamente aplicada ao conjunto de equações de evolução, independentemente de o problema ser uni, bi ou tridimensional.

A evolução da deformação plástica acumulada ocorre pelas condições de Kuhn-Tucker, se $f(\sigma, x, y) \leq 0$, $p \geq 0$, $pf = 0$, onde $f(\sigma, x, y)$ é uma função de escoamento definida por: $f(\sigma, x, y) = |\sigma - x| - y$ (Simo and Hughes, 2000). A condição de consistência é dada por $\dot{p}f = 0$.

Adotando-se a seguinte expressão para a equação da deformação plástica acumulada: $p_n = p_{n-1} + \Delta p$ e escrevendo o conjunto de equações em termos incrementais, temos: $p_n = p_{n-1} + \Delta p$; $\varepsilon_{p_n} = \varepsilon_{p_{n-1}} + \Delta \varepsilon_p$; $\sigma_n = \sigma_{n-1} + \Delta \sigma$; $x_n = x_{n-1} + \Delta x$; $y_n = y_{n-1} + \Delta y$; $D_n = D_{n-1} + \Delta D$; $c_n = c_{n-1} + \Delta c$. Os incrementos são dados por:

$$\Delta \sigma = E(\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_p)(1-D) - E\Delta D(\varepsilon - \varepsilon_p); \quad (10)$$

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta p \operatorname{sgn}; \quad (11)$$

$$\Delta c = \Delta \varepsilon_p - \varphi \cdot c \Delta p (1-D); \quad (12)$$

$$\Delta D = \frac{B^D}{S_o} \cdot \Delta p; \quad (13)$$

$$\Delta y = db e^{-dp} \cdot (1-D) \Delta p - \Delta D(b(1-e^{-dp}) + \sigma_p); \quad (14)$$

$$\Delta x = (3/2)a \cdot \Delta c(1-D) - (3/2)a \cdot c \cdot \Delta D; \quad (15)$$

$$B^D = E \frac{1}{2} (\varepsilon - \varepsilon_p)^2 + b \left(p + \frac{1}{d} e^{-dp} \right) + \sigma_p \cdot p + \frac{3}{4} a \cdot c^2 \quad (16)$$

onde, B^D é função associada ao dano e S_o é uma constante associada ao dano. A solução do problema evolutivo envolve a determinação da raiz real da equação acima que pode ser obtida através de um método numérico como o de Newton – Raphson. Definida a função $f_n(\Delta p)$ é possível deduzir analiticamente a derivada de f em função de Δp :

$$f'(\Delta p) = \frac{(\sigma_n + \Delta \sigma) - (x_n + \Delta x)}{[(\sigma_n + \Delta \sigma) - (x_n + \Delta x)]} \cdot \left(\frac{d\Delta \sigma}{d\Delta p} - \frac{d\Delta x}{d\Delta p} \right) - \frac{d\Delta y}{d\Delta p} \quad (17)$$

A raiz da equação pode ser obtida aplicando-se ao problema o método de Newton – Raphson. Na simulação realizada neste trabalho utilizou-se um valor de $|f| < 10^{-9}$ como tolerância.

2.2. Resultados

A metodologia utilizada neste trabalho foi proposta por Galindo e Barbosa (2001). Contudo, a elaboração e execução do algoritmo foram desenvolvidas por Nascimento (2005). O software utilizado foi o MatLab 6.5[®]. O avanço apresentado neste trabalho em relação ao anterior é que neste o problema do carregamento cíclico foi resolvido para o modelo elastoplástico. Tanto para o caso de carregamento cíclico como o monótono o controle utilizado foi o da deformação. O material utilizado foi o Aço 316L. Nos gráficos que seguem tem-se que o comportamento elastoplástico sem dano tem o mesmo equacionamento, porém com dano permanentemente igual a zero.

2.2.1. Carregamento Monótono

A deformação é controlada por $\varepsilon = A \cdot t$, onde A é a constante que representa a taxa de solitação. A figura 1.a mostra o gráfico $\sigma \times \varepsilon$ com e sem a presença do dano. Todas as regiões estão bem visíveis neste gráfico: região elástica, endurecimento e amolecimento. Observa-se que a simulação parou de realizar iterações em $\sigma = 0$ MPa para ambos os casos. Contudo, o instante que $\sigma = 0$ MPa coincide com $D = 1$, para o caso em que este é levado em consideração. Também, no modelo com dano o nível de deformação plástica foi menor no momento da “ruptura”. De maneira análoga a figura 1.b mostra o gráfico $\sigma \times t$ com e sem a presença do dano. As mesmas condições de parada foram utilizadas para a obtenção deste gráfico, isto deve-se ao fato de que ε difere t a menos de uma constante, A . É visível que no modelo com dano a “ruptura” ocorreu num intervalo de tempo consideravelmente menor. Isto é óbvio,

contudo este gráfico ganhará maior importância quando se estiver analisando as mesmas curvas para o carregamento cíclico.

Tabela 1. Propriedades do material para na condição simulada, para a temperatura de 20°C (Fonte: Lamaitre and Chaboche, 1990).

$E = 196 \text{ GPa};$
$a = 108,3 \text{ MPa};$
$b = 60 \text{ MPa};$
$d = 8;$
$\sigma_p = 82 \text{ MPa};$
$\varphi = 2800;$
$A=0,001\% \text{ a } 0,1\%$
$S_0 = 30 \text{ kPa}.$

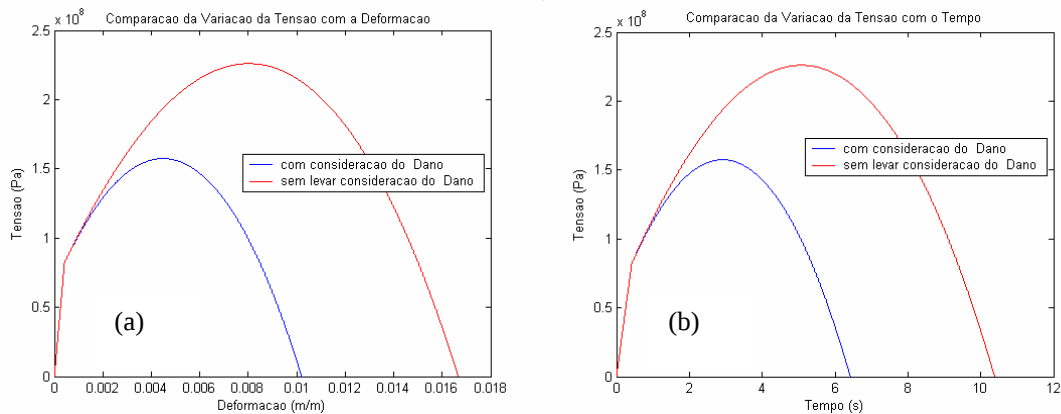


Figura 1. (a) Curva tensão versus deformação para um modelo elastoplástico do Aço 316L.
(b) Curva tensão versus tempo para um modelo elastoplástico do Aço 316L.

2.2.2. Carregamento Cíclico

A deformação é controlada por $\varepsilon = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot w \cdot t)$, onde A é a constante que representa a taxa de solitação. $E = 196 \text{ GPa}$; $a = 108,3 \text{ MPa}$; $b = 60 \text{ MPa}$; $d = 8$; $\sigma_p = 82 \text{ MPa}$; $\varphi = 2800$; $A=0,001\% \text{ a } 0,1\%$ $S_0 = 30 \text{ MPa}$ e $w = 2\text{Hz}$. A figura 2.a mostra o gráfico $\sigma \times \varepsilon$ sem do dano. O Material foi ciclado até o 223º ciclo sem, contudo, começar o seu amolecimento. A figura 2.b mostra o gráfico $\sigma \times \varepsilon$ com o do dano. O Material foi ciclado até o 223º ciclo, que foi o instante em que o dano atingiu a unidade, $D=1$. Neste caso tanto o endurecimento como o amolecimento foram atingidos, ou seja, este ciclo de histerese teve um início, aonde o material foi progressivamente endurecendo, depois amoleceu e finalmente o ciclo se findou totalmente, quando atingiu o ponto de ruptura, daí vem o fato de o ciclo está fechado.

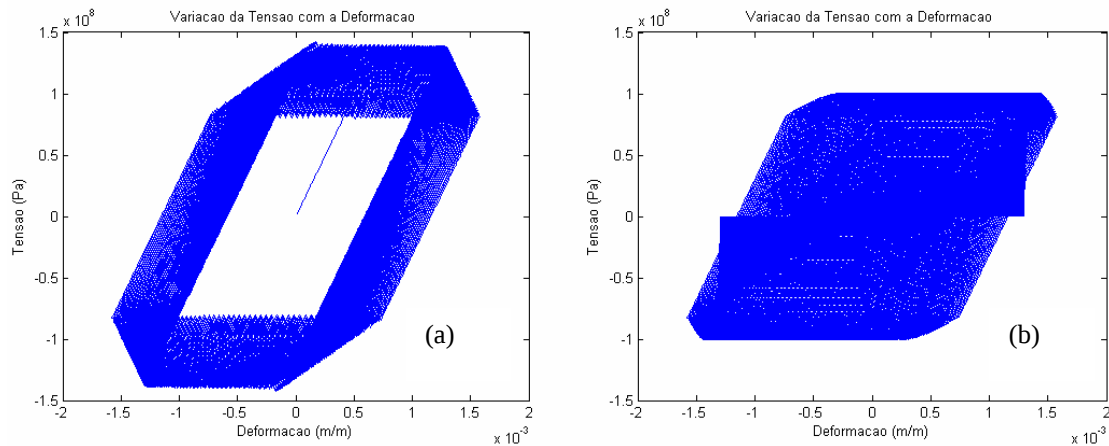


Figura 2. (a) Ciclo de histerese para um modelo elastoplástico sem dano do Aço 316L.
(b) Ciclo de histerese para um modelo elastoplástico com dano do Aço 316L.

A figura 3 mostra o gráfico $\sigma \times \varepsilon$ com a presença do dano, para o 1º, 10º, 100º, 200º, 223º ciclos, deixando mais visível as fases de endurecimento, amolecimento e “ruptura”.

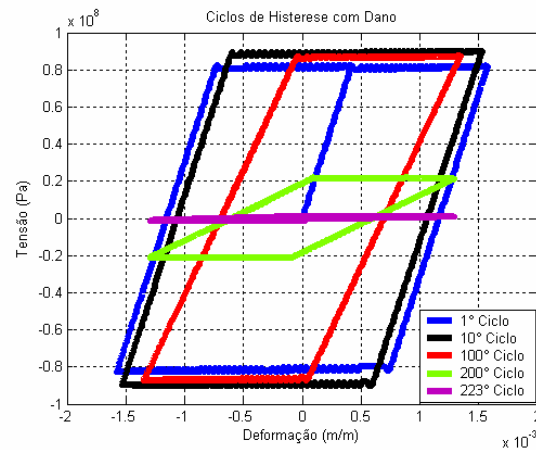


Figura 3. Endurecimento e Amolecimento do Aço 316L, elastoplástico.

A figura 4 mostra o gráfico do comportamento de $D \times t$ com a presença do dano até o instante da “ruptura”.

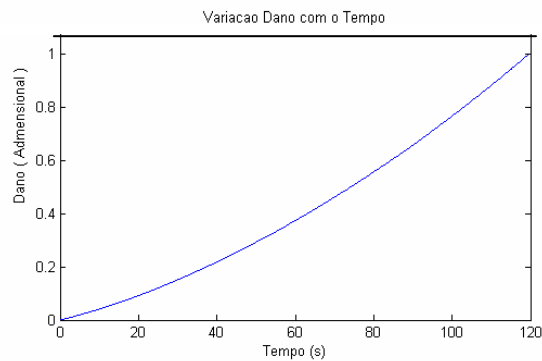


Figura 4. Variação do dano com o tempo do Aço 316L, elastoplástico.

A figura 5.a mostra o gráfico $\sigma \times t$ sem do dano. Observe que a fase de amolecimento ainda não foi atingida, conforme dito anteriormente. A figura 5.b mostra o gráfico $\sigma \times t$ com a presença do dano. Neste caso, é possível observar o endurecimento, amolecimento e “ruptura” do material.

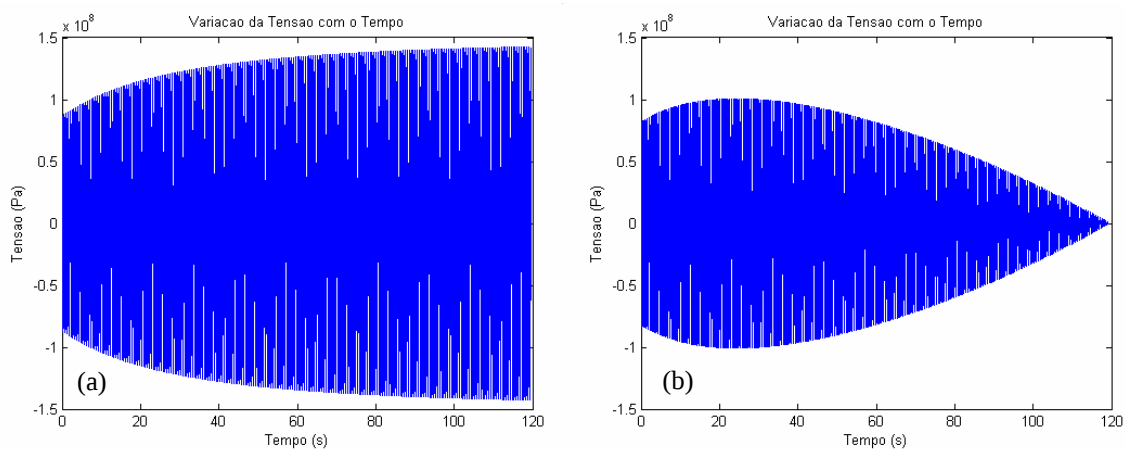


Figura 5. (a) Curva da tensão versus o tempo, sob controle da deformação do Aço 316L, sem dano.
(b) Curva da tensão versus o tempo, sob controle da deformação do Aço 316L, com dano.

As figuras 6.a e 6.b mostram os gráficos de $p \times t$ sem e com a presença do dano, respectivamente. Não é possível observar diferenças entre ambos.

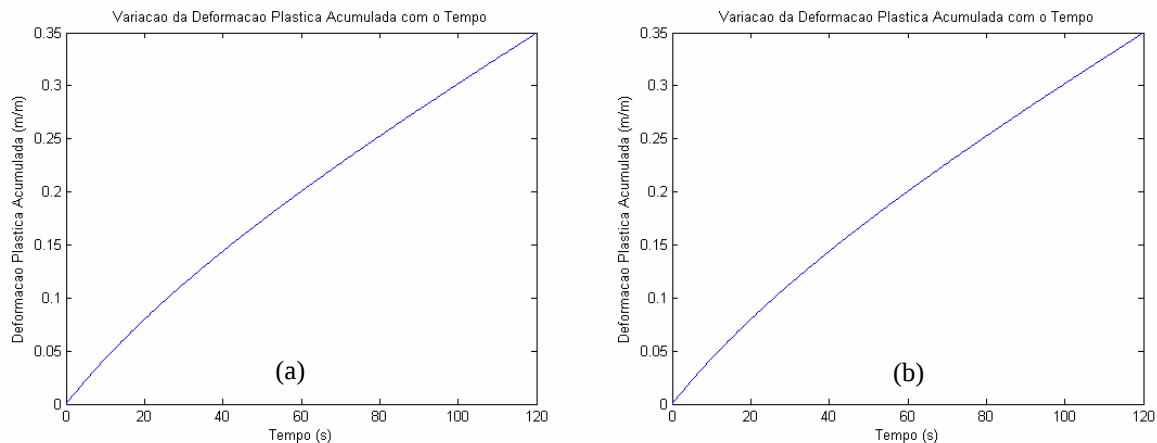


Figura 6. (a) Variação da deformação plástica acumulada com o tempo, sem dano.
(b) Variação da deformação plástica acumulada com o tempo, com dano.

3. Conclusões

Através de uma teoria termodinâmica com variáveis internas foi possível estudar e identificar o comportamento do modelo elastoplástico, a partir da simulação unidimensional de uma barra, submetida a carregamentos monótonos e cíclicos prescritos em tensão. Os resultados apresentados neste trabalho ainda estão em fase de aprimoramento, para que se possam avaliar os diversos efeitos das variáveis internas. Apesar de ser um modelo sofisticado, esquemas numéricos simples podem ser utilizados na solução do problema se uma técnica de decomposição for adotada. A introdução do modelo de uma variável de estado chamada dano, D , permitiu incorporar o efeito da degradação do material. Neste modelo o efeito do dano permitiu observar a influencia da degradação no material simulado.

4. Agradecimentos

À UFCG, ao PRH/ANP, ao PRH-25, à FINEP, ao CTPetro e ao CTBRASIL.

5. Referências

- BARBOSA, J. M. A. "Simulação de Carregamento Cílico a Altas Frequências em Barras Elasto-Viscoplásticas", Dissertação de Mestrado, Depto. de Eng. Mecânica, PUC-Rio, 1993.
- BARBOSA, J. M. A., PACHECO, P. M. C. L e COSTA MATOS, H. S. "Sobre o Papel da Temperatura nas Vibrações Mecânicas de Barras Elasto Viscoplásticas" Anais do XIII Conaresso Brasileiro de Engenharia Mecânica., CD-ROM, Belo Horizonte, 1995.
- GALINDO, I. O. e BARBOSA, J. M. "Simulação Numérica da Degradação de Materiais Elasto-Viscoplásticos Incluindo Efeitos Térmicos e de Inércia". Relatório Final das Atividades do Bolsista UFPE/CNPQ/PROPESQ-PE, 2001.
- LAMAITRE, J. and CHABOCHE, J. L. Mechanics of Solids Materials, Cambridg University Press, 1990.
- PERSIVAL, S. B. P. Elementos de Mecânica do Dano em Meios Contínuos, Notas de aula, São Carlos, 2000.
- MEYERS, M. A. and CHAWLA, K. K. Princípios da metalurgia mecânica. São Paulo, Edgard Blüncher, 1982.
- RUGGIERO, M. A. G. Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais. 2ª Ed., São Paulo, MAKRON Books, 1996.
- SIMO, J. C., and Hughes T. J. R. Computational Inelasticity, Springer, 2000.