

ANÁLISE DE FADIGA VIA MECÂNICA DO DANO CONSIDERANDO INCERTEZAS E CONSEQUÊNCIAS DE FALHA

José Antonio Vargas Bazán¹ & André Teófilo Beck²

Resumo

O custo computacional gasto nas análises estruturais costuma ser um ponto crítico na viabilidade da análise. Esse fator é ainda mais limitante quando se faz uma abordagem probabilística e um número elevado de análises deve ser realizado. Nesse sentido, procuram-se métodos de análise estrutural que minimizem o tempo de processamento sem prejudicar a confiabilidade dos resultados. Este trabalho apresenta uma formulação geral de análise de pórticos baseada em modelos de dissipação concentrada de energia (Cipollina et al., 1993), contemplando a resposta de estruturas submetidas a carregamentos cíclicos. Por outra parte, levam-se em conta as incertezas associadas aos carregamentos e aos parâmetros dos modelos de propagação do dano. Desta maneira, é possível realizar análises de confiabilidade do processo de fadiga, bem como calcular o risco associado a este modo de falha.

Palavras-chave: Dano concentrado. Fadiga. Incertezas. Risco.

FATIGUE ANALYSIS VIA DAMAGE MECHANICS CONSIDERING UNCERTAINTIES AND CONSEQUENCES OF FAILURE

Abstract

The computational cost in structural analyses is one of the most critical points for the feasibility of the analysis. This factor is even more restrictive when a large number of analyses needs to be accomplished for a probabilistic approach. Accordingly, we look for methods of structural analysis that minimize the processing time without loss of reliability. This work presents a general formulation for the frame analysis based on lumped dissipation models (Cipollina et al., 1993), including the response of structures under cyclical loads. Furthermore, it considers the uncertainties associated to loads and parameters of damage growth models. Thus we are able to perform reliability analysis of the fatigue process, as well as compute the risk of failure due to fatigue.

Keywords: Lumped damage. Fatigue. Uncertainties. Risk.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, jvargas@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, atbeck@sc.usp.br



1 INTRODUÇÃO

Desde o trabalho pioneiro de Kachanov (1958), a mecânica do dano tornou-se um dos campos mais ativos de pesquisa na mecânica dos sólidos. A principal ideia é a introdução de uma nova variável interna, o dano, que mede a densidade de microfissuras e microvazios, e a sua influência no comportamento do material. A ideia básica é tão simples e tão geral que tem sido utilizada para modelar a maioria de materiais de construção (Cipollina et al, 1995). Teorias da plasticidade têm sido adaptadas à análise de pórticos através da noção de *lumped plasticity models*, nos quais se assume que os efeitos plásticos podem ser concentrados em locais especiais chamados rótulas plásticas

Por outra parte, é amplamente conhecido que ações ambientais apresentam grande incerteza e são mais bem representadas como quantidades aleatórias, i.e., como variáveis aleatórias ou processos estocásticos. Isto acontece, por exemplo, porque os carregamentos mudam ao longo do tempo (inclusive quando são quase-estáticos) ou porque as propriedades de resistência do material variam com o tempo, seja como resultado direto de ações previamente aplicadas ou devido a algum mecanismo de deterioração. Fadiga é um exemplo típico de deterioração da resistência (Melchers, 1999).

2 METODOLOGIA

2.1 Recursos existentes

1) Programa de confiabilidade estrutural StRAnD (Beck, 2007) com recursos para solução de problemas independentes do tempo e problemas dependentes do tempo (fadiga ou corrosão). O programa StRAnD e seu módulo de otimização permitem o acoplamento a programas de análise numérica.

2) O Prof. Julio Flórez López, professor da Universidad de los Andes (Venezuela), desenvolveu, junto a seu grupo de pesquisa, um programa acadêmico baseado na mecânica do dano. Este programa permite a análise estrutural estática e/ou dinâmica, em regime linear ou não-linear, fornecendo a resposta em termos do dano concentrado.

2.2 Recursos a serem desenvolvidos

Após uma série de análises aleatórias (i.e., a partir de séries aleatórias de carregamentos, bem como resistências representadas como variáveis aleatórias), será possível descrever a variabilidade do parâmetro dano em cada uma das juntas da estrutura, e em cada instante (número de ciclos) da análise. De posse destes dados, será possível calcular os momentos estatísticos e a distribuição de probabilidades que melhor se ajusta a cada dano. A probabilidade de falha do modo de falha associado à fadiga (em cada um dos nós e globalmente) será calculada através do programa StRAnD

3 DESENVOLVIMENTO

A partir dos resultados da análise de fadiga fornecidos pela mecânica do dano numa única análise no domínio do tempo, é possível traçar um mapa de dano, no qual estará identificado o dano de cada junta após um dado número de ciclos. Desta maneira, em qualquer instante da análise (i.e., após um número de ciclos de carregamento) antes da falha por fadiga, podem ser obtidos valores de dano em cada junta, o que possibilitará o cálculo de parâmetros estatísticos e o ajuste de funções de probabilidade.

3.1 Confiabilidade estrutural: avaliação das probabilidades de falha sob incertezas

Sejam $\mathbf{R}$ e $\mathbf{S}(t)$ vetores contendo parâmetros de um sistema estrutural. O vetor $\mathbf{S}(t)$ inclui processos estocásticos de carregamento (solicitação), que variam de forma rápida com o tempo. O vetor $\mathbf{R}$ inclui, de forma geral, as variáveis aleatórias que descrevem a resistência do elemento estrutural, como propriedades geométricas, tensões de escoamento e ruptura, parâmetros da Lei de Paris (1961) e do modelo de corrosão. Sob a ação de processos como fadiga e corrosão, a resistência é tipicamente um processo estocástico, i.e., também é função do tempo. No entanto, a variação temporal da resistência é muito mais lenta do que a variação das solicitações. Por isto, processos estocásticos como fadiga e corrosão podem ser descritos através de conjuntos de variáveis aleatórias.

3.2 Cinemática e estática de estruturas sujeitas a fadiga de alta ciclagem

Considere-se um pórtico plano sujeito a fadiga de alta ciclagem tal como acontece em estruturas *offshore*, pontes e estruturas utilizadas na geração de energia eólica. Em cada ciclo, a força varia entre dois valores limite. Estes valores podem variar no tempo.

Para caracterizar o padrão de movimento sob estas condições, as variáveis estáticas e cinemáticas são definidas utilizando a notação usual da mecânica. As relações entre estas variáveis também são análogas às usuais. Na Figura 1, estão esquematizadas as relações que governam as variáveis envolvidas. Destaca-se que a principal diferença está na introdução de uma nova variável, o dano, $\mathbf{D}$.

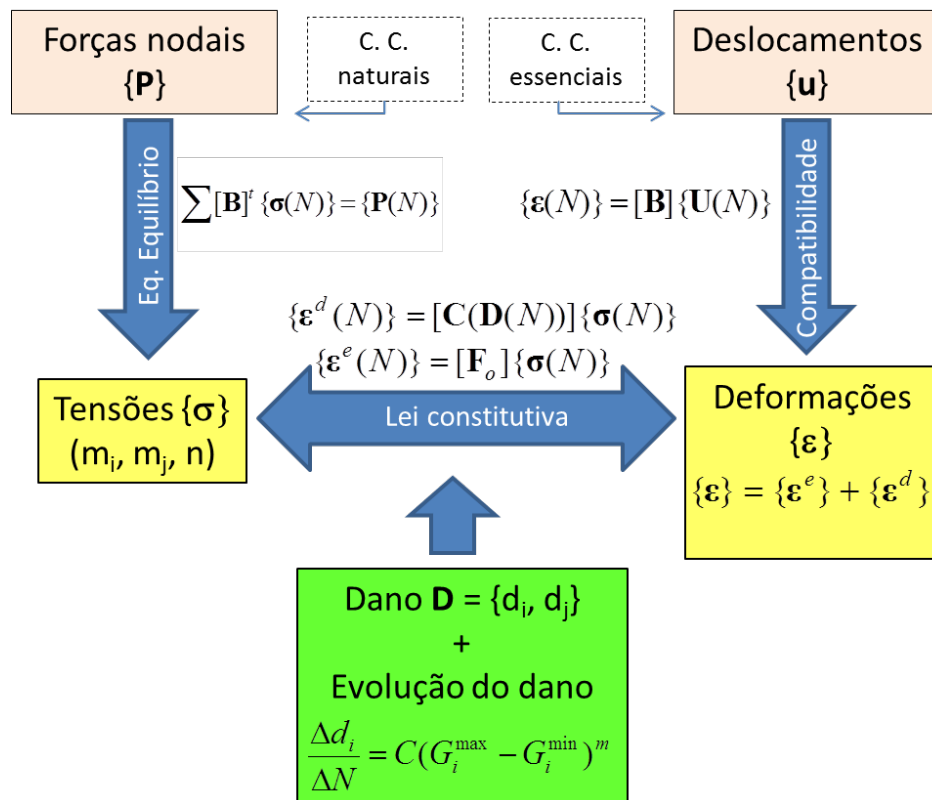


Figura 1 – Esquema da análise estrutural através da mecânica do dano concentrado.

Equação cinemática: A equação cinemática relacionando deslocamentos e deformações generalizadas tem a mesma forma geral da equação utilizada segundo a abordagem do dano acumulado, e pode ser derivada através do mesmo procedimento. Observa-se que a deformação, $\{\boldsymbol{\epsilon}\}$, terá agora uma parcela elástica, $\{\boldsymbol{\epsilon}^e\}$, e uma correspondente ao dano, $\{\boldsymbol{\epsilon}^d\}$.

Equação de equilíbrio: A equação de equilíbrio que relaciona as tensões generalizadas, $\{\boldsymbol{\sigma}(N)\}$, e as forças externas, $\{\mathbf{P}(N)\}$, tem a mesma forma geral das equações de equilíbrio da mecânica tradicional, através da matriz de derivadas parciais, $[\mathbf{B}]$.

Dano: O dano neste tipo de estruturas manifesta-se como fissuras nas juntas sujeitas a forças axiais ou momentos fletores. Na mecânica do dano concentrado, o conjunto de fissuras numa junta é medido por uma variável adimensional que assume valores entre 0 e 1 (usualmente, a razão entre a variação da área transversal e a área transversal inicial). As deformações totais são divididas em um termo elástico e um termo relativo ao dano (deformações plásticas foram consideradas nulas).

Lei constitutiva: Neste exemplo, adota-se a Lei de Hooke como lei que relaciona as tensões e deformações generalizadas. Portanto, a matriz de flexibilidade, $[F(D(N))]$, deverá ter uma parcela correspondente às deformações elásticas, $[F_0]$, e uma correspondente às deformações do dano, $[C(D(N))]$.

Leis de evolução do dano: A última expressão necessária para definir uma análise simplificada de pórticos sujeitos a fadiga de alta ciclagem é a lei de evolução do dano. Existem diversas expressões para calcular a taxa de liberação de energia de uma rótula inelástica, G , encontradas na literatura. Aqui, adota-se a relação proposta por Dowling and Begley (1976).

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Analisaram-se exemplos de estruturas reticuladas submetidas a carregamentos cíclicos. Esperam-se implementar as considerações das incertezas dos parâmetros dos carregamentos, bem como dos parâmetros do modelo adotado para propagação do dano.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os exemplos mostraram que uma estrutura real reticulada pode ser analisada com um custo computacional muito baixo através do dano concentrado. Por isto, as perspectivas para executar análises de confiabilidade resultam muito promissoras. Outros modos específicos de dano por fadiga, como os relacionados com forças axiais, podem ser analisados também. Finalmente, outras leis de crescimento da trinca poderão também ser implementados.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

- ANG, A. H-S.; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering**. 2nd Edition. 2007. John Wiley & Sons.
- BECK, A. T. Desenvolvimento de Programa Computacional para Análise de Confiabilidade de Estruturas. **Projeto de pesquisa FAPESP**, 2007/00154-4.
- CIPOLLINA, A.; LÓPEZ-INOJOSA, A.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames. **Computers & Structures** Vol. 54 No 6, pp 1113-1126, 1995.
- DOWLING, N. E.; BEGLEY, J. A. Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J Integral. **ASTM STP 590**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1976, pp. 82-103.
- KACHANOV, L. M. On creep rupture time, Izv. Akad. Nauk. **SSSR** 8, 26-1 (1958)
- MELCHERS, R. E. **Structural Reliability Analysis and Prediction**, second edition, John Wiley and Sons, NY, 1999.
- PARIS, P. C.; GOMEZ M. P.; ANDERSON, W. E. A rational analytical theory of fatigue. **The trend of Engineering**, 13:9-14, 1961.