PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Antonio Carlos de Oliveira Miranda

Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas sob Cargas Cíclicas Variáveis

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Luiz Fernando C. R. Martha

Rio de Janeiro,26 de fevereiro de 2003

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Antonio Carlos de Oliveira Miranda

Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas sob Cargas Cíclicas Variáveis

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio (Orientador)

Jaime Tupiassú Pinho de Castro
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Marco Antonio Meggiolaro
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Raul Rosas e Silva
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Alvaro Maia da Costa
CENPES – PETROBRAS

Edgardo Omar Taroco Aliano
Departamento de Mecânica Computacional - LNCC / RJ

Timothy H. Topper
Department of Civil Engineering – University of Waterloo

Prof. Ney Augusto Dumont
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Departamento de Engenharia Civil, 26 de fevereiro de 2003

Antonio Carlos de Oliveira Miranda

Graduou-se Engenheiro Civil em 1997 na Universidade Federal do Pará. Defendeu dissertação de mestrado em fevereiro de 1999 na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro com o título "Integração de Algoritmos de Geração de Malhas de Elementos Finitos", com diversas publicações em congressos e revistas. A corrente tese já gerou publicações em congressos, capítulo de livro e revistas internacionais da área.

Ficha Catalográfica

Miranda, Antonio Carlos de Oliveira

Propagação de trincas por fadiga em geometrias 2D complexas sob cargas cíclicas variáveis / Antonio Carlos de Oliveira Miranda; orientador: Luiz Fernando C. R. Martha. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[19], 106 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Propagação de trinca. 3. Fatiga. 4. Geometria complexa. 5. Carregamento variável. I. Martha, Luiz Fernando C. R. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Á minha família.

Agradecimentos

A todos aqueles que estivem comigo tanto nos bons e maus momentos. Felizmente o autor só lembra dos bons momentos.

Aos meus pais, pela educação, atenção, carinho de todas as horas e por compreender a distância de vários anos.

Aos professores Luiz Fernando, Jaime Tupiassú e Marco Antonio, que têm grande parte dos créditos deste trabalho.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Ao Vagner e Garcia pela ajuda na confecção dos corpos-de-prova e auxílio no laboratório de vibrações.

Aos amigos do café: Chan, Ricardo e a gauchada.

Aos amigos do Pará e Amapá: Alan, Anibal, Ricardo, Salete, Antonio Sérgio, Vitor, Janaina, Alexandre, e outros que voltaram para terra do açai.

Aos meus amigos do Tecgraf.

Aos meus amigos da PUC-Rio.

A todos os professores e funcionários do Departamento pela ajuda.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Miranda, Antonio Carlos de Oliveira. **Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas sob Cargas Cíclicas Variáveis.** Rio de Janeiro, 2003. 106p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma metodologia eficiente e segura é proposta para prever a propagação de trincas de fadiga sob carregamento complexo em estruturas bidimensionais com geometria genérica. Primeiro, o caminho da trinca (em geral curvo) e os fatores de intensidade de tensão $K_I(a)$ e $K_{II}(a)$ ao longo do comprimento da trinca a são calculados num programa de elementos finitos especialmente desenvolvido para este fim, o **Quebra2D**. Estes cálculos são feitos usando pequenos incrementos especificáveis no tamanho da trinca e técnicas de remalhamento automatizadas. Os valores de $K_I(a)$ são usados como dados de entrada num programa de previsão de vida à fadiga, o **ViDa**. Esse programa foi desenvolvido para prever a iniciação e a propagação de trincas 1D e 2D sob carregamento complexo por todos os métodos clássicos, incluindo *SN*, *eN* e *IIW* (estruturas soldadas) para a iniciação da trinca, e o método *da/dN* para a propagação. Em particular, o módulo que propaga a trinca aceita qualquer expressão de $K_I(a)$ e qualquer regra *da/dN*, e usa o método DK_{rms} ou CCC (crescimento ciclo-a-ciclo) para prever a propagação de trincas uni e bidimensionais sob carregamento complexo. A análise numérica proposta foi verificada através de vários experimentos representativos, cuja metodologia experimental é discutida em detalhes.

Palavras-chave

Propagação de trinca; Fatiga; Geometria Complexa; Carregamento Variável.

Abstract

Miranda, Antonio Carlos de Oliveira. **Fatigue Crack Propagation in Arbitrary 2D Geometries under Complex Loading.** Rio de Janeiro, 2003. 106p. DSc Thesis - Department of Civil Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

A reliable and cost effective two-phase methodology is proposed to predict fatigue crack propagation in generic two-dimensional structural components under complex loading. First, the fatigue crack path and its stress intensity factor are calculated in a specialized finite-element software, using small crack increments. Numerical methods are used to calculate the crack propagation path, based on the computation of the crack incremental direction, and the stress-intensity factors K_I, from the finite element response. Then, an analytical expression is adjusted to the calculated $K_I(a)$ values, where a is the length along the crack path. This $K_I(a)$ expression is used as an input to a powerful general purpose fatigue design software based on the local approach, developed to predict both initiation and propagation fatigue lives under complex loading by all classical design methods, including the *SN*, the *eN* and the *IIW* (for welded structures) to deal with crack initiation, and the *da/dN* to treat propagation problems. In particular, its crack propagation module accepts any K_I expression and any *da/dN* rule, using the DK_{rms} or the cycle-by-cycle propagation methods to deal with one and two-dimensional crack propagation under complex loading. If requested, this latter method may include overload-induced crack retardation effects. This two-phase methodology is experimentally validated by fatigue tests on compact tension and bending single edge notch specimens, modified with holes positioned to attract or to deflect the cracks.

Keyworks

Crack Propagation; Fatigue; Complex Geometric; Variable Loading.

Sumário

Lista de figuras

Lista de simbolos

ABREVIATURAS

ASTM	*American Society for Testing and Materials.*
CTOD	*Crack Tip Opening Displacement.*
da/dN	Método de previsão de dano à fadiga (propagação de trinca).
DCT	*Displacement Correlation Technique.*
EDI	*Equivalent Domain Integral.*
MEF	Método dos Elementos Finitos.
MCC	*Modified Crack-Closure Integral technique* .
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica.
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica.
QP	*Quarter-Point.*
SN	Método de previsão de dano à fadiga (iniciação de trinca).
TCD	Técnica de Correlação dos Deslocamentos.
IIW	Método de previsão de dano à fadiga para estruturas soldadas (iniciação de trinca).
e**N**	Método de previsão de dano à fadiga (iniciação de trinca).

SÍMBOLOS GREGOS

$2a$	Largura do furo elíptico em uma placa infinita.
$2b$	Comprimento do furo elíptico em uma placa infinita.
a	Comprimento de trinca.
a_0	Comprimento de trinca inicial.
a_f	Comprimento de trinca final.

A^*	Área fechada de G^*.
da	Incremento de trinca infinitesimal.
B	Espessura da placa.
	Espessura do corpo-de-prova
C, m e p	Constantes empíricas na regra de propagação.
da/dN	Taxa de propagação da trinca.
dA	Incremento de área de trinca.
$d_{grão}$	Diâmetro de grão.
E	Módulo elástico.
E_T	Energia total do sistema.
f	Parâmetro que depende da geometria da peça.
$f_{ij}(q)$	Uma função de q.
$f(a/W)$	Função adimensional.
F_{x_i}, F_{x_j}	Forças nodais equivalentes na direção x, nos nós i e j, respectivamente
F_{y_i}, F_{y_j}	Forças nodais equivalentes na direção y, nos nós i e j, respectivamente.
G	Modulo de cisalhamento.
$G_{qmáx}$	Máxima Taxa de Liberação de Energia Potencial.
$\mathfrak{G}$	Taxa de alívio de energia.
$\mathfrak{G}_{\mathrm{I}}$, $\mathfrak{G}_{\mathrm{II}}$, $\mathfrak{G}_{\mathrm{III}}$	Taxas de alívio de energia nos modos I, II e III de carregamento, respectivamente.
J	Integral de linha em torno da ponta da trinca.
J_k	Integrais invariantes.
J_I, J_{II}	Integrais J associadas aos modos I e II de carregamento, respectivamente.
J_1, J_2	Integrais J associadas às direções x e y, respectivamente.
k_1 e k_2	Fatores de intensidade de tensões para trinca desviada ou bifurcada.

K	Fator de intensidade de tensões.
K_I , K_{II} , K_{III}	Fatores de intensidade de tensões nos modos I, II e III de carregamento, respectivamente.
K_c	Tenacidade à fratura.
K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc}	Tenacidade à fratura nos modos I, II e III de carregamento, respectivamente.
K_{max}	Fator de intensidade de tensões máximo.
K_{min}	Fator de intensidade de tensões mínimo.
DK	Amplitude do fator de intensidade de tensões.
DK_{th}-*threshold*	Fator de intensidade de tensões limiar.
DK_0	Limiar de propagação para $R = 0$.
K_{ab} e K_{OP}	Carga de abertura da trinca em termos de K.
DK_{ef}	Amplitude do fator de intensidade de tensões efetivo.
DK_{rms}	Raiz da média quadrática da amplitude do fator de intensidade de tensões.
L	Comprimento do elemento de roseta na ponta da trinca.
N	Número de ciclos.
P	Carga.
q	Função contínua.
r	Raio.
R	Razão de carga, K, etc.
RA	Redução de área.
S	Intensidade de dW/dA no interior do elemento infinitesimal.
S_E e S_Y	Tensão de escoamento do material.
S_U	Tensão de ruptura.
S_{qmin}	Mínima Densidade de Energia de Deformação.
t	Espessura do corpo-de-prova.
u_i	Vetor de deslocamentos.

u_{j-1} e u_{j-2}	Deslocamentos relativos na direção *x,* nos nós *j*-1 e *j*-2 na roseta da ponta da trinca.
u, v	Deslocamentos nas direções dos eixos *x* e *y*, respectivamente
u^I, v^I	Deslocamentos associados simétricos
u^{II}, v^{II}	Deslocamentos associados antissimétricos
$u(r)$ e $v(r)$	Deslocamento de abertura da trinca a uma distância *r*, atrás da nova ponta da trinca.
v_{j-1} e v_{j-2}	Deslocamentos relativos na direção *y,* nos nós *j*-1 e *j*-2 na roseta da ponta da trinca.
x, y	Eixos coordenados locais na ponta da trinca
ZP_{ov}	Zona plástica da sobrecarga.
ZP_i	Zona plástica no *i-ésimo* ciclo.
$ZP_{cíclica}$	Zona plástica cíclica.
w	Dimensões do corpo-de-prova.
w_f	Energia de fratura.
W_s	Energia de formação das superfícies da trinca.
W	Energia de deformação por unidade de volume.
	Dimensões do corpo-de-prova.

SÍMBOLOS GREGOS

a	Ângulo da trinca desviada ou bifurcada.
	Constante experimentalmente ajustável no modelo de fechamento de Newman.
b	Constante experimentalmente ajustável no modelo de Weeler.
$d(r)$	Deslocamento na ponta da trinca aberta para um elemento singular.
ε	Deformação.
e_{ij}	Tensor de deformações.
g_s	Trabalho para formação de nova superfície de área da trinca.

g_p	Trabalho plástico.
g	Constante experimentalmente ajustável no modelo de Weeler modificado.
Γ	Contorno na ponta da trinca.
h_j	Co-senos diretores.
n	Coeficiente de Poisson.
Π	Energia potencial.
Π_0	Energia potencial total.
q	Ângulo.
t_{xy}	Tensão de cizalhamento em xy.
r	Raio de curvatura da ponta da elipse.
s	Tensão nominal.
s_A	Tensão atuante no ponto A.
s_f	Tensão de fratura.
s_{ij}	Tensor de tensões.
s_x	Tensão normal na direção x.
s_y	Tensão normal na direção y.
$s_{qmáx}$	Máxima Tensão Circunferencial.
s_r, s_q e t_{rq}	Tensões nas vizinhanças da ponta da trinca em coordenadas polares.
$s_{\max_{rms}}$	Raiz da média quadrática das tensões máximas.
$s_{\min_{rms}}$	Raiz da média quadrática das tensões mínimas.
Δs_{rms}	Raiz da média quadrática da amplitude de tensões.

Iniciei esta série no vale do Omo, na África Oriental, e aqui retorno porque algo que aconteceu neste lugar permaneceu em minha mente desde aquele primeiro encontro. Na manhã do dia em que éramos para dar início à organização do primeiro capítulo da série, um pequeno avião decolou de nossa pista levando a bordo o *cameraman* e o técnico de som, mas, segundos após ter subido, o avião caiu. Milagrosamente, o piloto e os dois outros homens saíram ilesos.

Naturalmente, esse evento mau agourado me marcou profundamente. No momento em que me preparava para fazer o passado desfilar, o presente insinua sorrateiramente sua mão na página escrita da história e diz: "É aqui. É agora". História não são eventos, mas, sim, pessoas. Além disso, não são pessoas apenas recordando; é o homem vivendo seu passado no presente. História é o ato instantâneo de decisão do piloto, que cristaliza em si todo o conhecimento, toda a ciência, tudo aquilo que foi aprendido desde o surgimento do homem.

Permanecemos inativos por dois dias à espera de outro avião. Nesse intervalo, em conversa com o *cameraman,* perguntei-lhe delicadamente, mas, talvez, sem muito tato, se ele não preferia que algum outro realizasse a filmagem aérea. Ao responder-me, disse: "Tenho pensado nisso. Vou sentir medo de subir amanhã, mas eu vou fazer a filmagem. Esse é meu dever".

Estamos todos com medo – de nossa presunção, de nosso futuro, do mundo. Tal é a natureza da imaginação humana. Contudo, cada homem, cada civilização, foi para a frente em razão de seu engajamento naquilo que havia decidido realizar. O compromisso pessoal de um homem com seu ofício, o compromisso intelectual e o compromisso emocional, unidos em um só propósito, fizeram a Escalada do Homem.

Jacob Bronowsky – Trecho final da série "A Escalada do Homem"