



Marco Vinicio Guamán Alarcón

**Previsão do efeito das trincas curtas em
componentes estruturais**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Rio de Janeiro
Setembro de 2012



Marco Vinicio Guamán Alarcón

**Previsão do efeito das trincas curtas em
componentes estruturais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. Paulo Pedro Kenedi

Centro Federal de Educação Tecnológica — CEFET-RJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Setembro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marco Vinicio Guamán Alarcón

Graduou-se em Engenharia Mecânica em 2009, na Escuela Politécnica Nacional (Quito, Equador).

Ficha Catalográfica

Guamán, Marco Vinicio

Previsão do efeito das trincas curtas em componentes estruturais / Marco Vinicio Guamán Alarcón; orientador: Jaime Tupiassú Pinho de Castro. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

v., 93 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Trinca curta. 3. Limiar de propagação. 4. Vida à fadiga. 5. Tamanho característico de trinca curta. 6. Modelagem das trincas curtas. 7. Fadiga. I. Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A DIOS y a mi Patria
A mis padres, Anita y José
A mis hermanos, Darwin, José, Mary, Tomás y Fernanda
Al amor de mi vida, Patty

Agradecimentos

Ao Professor Jaime Tupiassú Pinho de Castro pelo apoio moral como amigo e pelo suporte como orientador no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Marcos Henrique pela ajuda na análise microscópica no Laboratório de Microscopia do DEMa.

À CAPES e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos durante o tempo de desenvolvimento desta pesquisa.

À Patty pelo amor incondicional, pela paciência e pela colaboração na redação deste trabalho.

Ao Lucho por sua grande ajuda na minha fase inicial na PUC-Rio.

Ao meu amigo Byron "el compadre" por sua amizade incondicional.

Aos meus amigos do Laboratório de Fadiga, em especial ao Gerardo, pela amizade e ajuda proporcionada.

Aos meus familiares e amigos equatorianos que sempre mantiveram o contato e me apoiaram ao longo destes dois anos. Obrigado por acreditar em mim.

Resumo

Guamán, Marco Vinicio; Castro, Jaime Tupiassú Pinho de (Orientador). **Previsão do efeito das trincas curtas em componentes estruturais**. Rio de Janeiro, 2012. 93p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A resistência à fadiga dos elementos estruturais pode ser limitada pela presença de trincas curtas, as quais podem passar despercebidas em inspeções não-destrutivas tradicionais. Para modelar o comportamento dessas trincas pode-se utilizar o tamanho característico das trincas curtas a_0 , proposto por El Haddad, Topper e Smith (ETS), que permite ajustar adequadamente os dados experimentais do diagrama de Kitagawa-Takahashi. Partindo do modelo ETS, neste trabalho se apresenta o modelo do Gradiente de Tensão (GT), desenvolvido para prever o efeito das trincas curtas que nascem em pontas de entalhes. Este modelo reconhece que trincas podem ser facilmente geradas por fadiga em entalhes afiados, que introduzem efeitos de concentração de tensão elevados nas suas pontas. Mas devido ao alto gradiente de tensão que atua em torno das pontas desses entalhes, as trincas curtas que deles emanam também podem parar de crescer por fadiga após terem se propagado por uma pequena distância, tornando-se assim trincas não-propagantes que podem ser toleradas em serviço. Corpos de prova tipo C(T) modificados foram projetados especificamente para estudar a geração e o crescimento inicial dessas trincas em ensaios de fadiga, e usados para verificar experimentalmente as previsões do modelo proposto.

Palavras-chave

Trinca curta; Limiar de propagação; Vida à fadiga; Tamanho característico de trinca curta; Modelagem das trincas curtas; Fadiga.

Abstract

Guamán, Marco Vinicio; Castro, Jaime Tupiassú Pinho de (Advisor). **Prediction of the short cracks effect on structural components**. Rio de Janeiro, 2012. 93p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The fatigue strength of structural elements may be limited by the presence of short cracks, which can not be detected with traditional nondestructive inspections. The behavior of these cracks can be modeled using the characteristic size of short cracks a_0 , proposed by El Haddad, Topper and Smith (ETS), which allows one to properly adjust experimental data from the Kitagawa-Takahashi diagram. Based on the ETS model, this work presents the Stress Gradient (SG) model, developed to predict the effect of short cracks that grow from the notch tips. This model considers that cracks are easily generated due to fatigue in sharp notches, which introduce high stress concentration effects at their tips. Because of the high stress gradient acting at these notch tips, the short cracks can also stop to grow by fatigue after having propagated through a small distance, thereby becoming non-propagating cracks that can be tolerated in service. C(T) modified specimens were specifically designed to study the generation and initial growth of these cracks in fatigue tests, and used to experimentally verify the predictions of the proposed model.

Keywords

Short crack; Growth threshold; Fatigue stress limit; Fatigue short crack threshold; Short crack modeling; Fatigue.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Visão global	16
1.2	Objetivos	16
1.3	Resultados esperados e limitações	17
1.4	Organização da dissertação	17
2	Fundamentos teóricos	19
2.1	Fator de concentração de tensões	19
2.2	Fator de concentração de tensões em fadiga	21
2.3	Concentração de tensões em torno de uma trinca	23
2.4	Estimativa de Creager e Paris	24
2.5	O limiar de propagação de trincas curtas e o modelo ETS	26
2.6	O modelo GT	28
2.7	O modelo TCD	32
2.8	Trabalhos existentes sobre trincas curtas	34
3	Projeto dos corpos de prova e execução de ensaios de fadiga	35
3.1	Seleção do material para fabricação dos CPs	35
3.2	Seleção da geometria do corpo de prova	36
3.3	Análise por Elementos Finitos	38
3.4	Aplicação do modelo GT a um corpo de prova tipo C(T)	40
3.5	Análise de sensibilidade do modelo GT	45
3.6	Aplicação do modelo TCD a um corpo de prova tipo C(T)	50
3.7	Ensaio múltiplos	52
3.8	Fabricação e preparação dos corpos de prova	54
3.9	Ensaio a fadiga dos CPs	55
3.10	Procedimento de monitoramento detecção das trincas	57
4	Análise e comparação de resultados numéricos e experimentais obtidos	59
4.1	Comparação dos valores numéricos determinados pelos modelos GT e TCD	59
4.2	Ensaio a fadiga	61
4.3	Análise por microscopia ótica	64
4.4	Comparação dos resultados experimentais com os calculados pelos modelos GT e TCD	64
4.5	Outros CPs para visualizar trincas não-propagantes	69
5	Conclusões e recomendações	75
5.1	Conclusões	75
5.2	Sugestões para continuar o trabalho	76
	Referências Bibliográficas	77
A	Paper apresentado no 67 th ABM International Congress	80

Lista de figuras

2.1	Placa de Inglis [1]	20
2.2	Algumas medidas experimentais de K_f [10]	22
2.3	Trincas não-propagantes geradas se $S'_L/K_t < \sigma_n < S'_L/K_f$ [12].	23
2.4	Modo I de carregamento de trincas [1].	24
2.5	Alguns FIT catalogados na literatura [1].	25
2.6	Coordenadas de Creager-Paris [1]	25
2.7	Diagrama de Kitagawa-Takahashi que descreve a propagação de fadiga de trincas curtas e longas sob cargas pulsantes ($R = 0$) num aço HT80 com $\Delta K_0 = 11.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ e $\Delta S_0 = 575\text{MPa}$.	27
2.8	Razão entre limiares de propagação de trincas curtas e trincas longas como função da razão a/a_0 [1].	28
2.9	Curvas de ajuste por Elementos Finitos (EF) gerados no Quebra2D e comparação com os resultados experimentais obtidos por Nishitani e Tada [1].	30
2.10	Geometria do corpo de prova de flexão em quatro pontos utilizado por [6] no seus experimentos.	34
3.1	Geometria de um corpo de prova tipo C(T) modificado.	37
3.2	Malha gerada no <i>Abaqus</i> para a análise por EF num corpo de prova tipo C(T), para valores de $b = 15\text{mm}$ e $\rho = 1\text{mm}$.	38
3.3	Tipos de carregamento analisados por EF no corpo de prova tipo C(T).	39
3.4	Gradiente de tensão à frente da ponta do entalhe, obtido por EF para um C(T), quando $b = 15\text{mm}$ e $\rho = 1\text{mm}$.	40
3.5	Coeficiente de fadiga FR versus teor de carbono para aços.	41
3.6	Esquema de curvas $\sigma_a\sigma_m$ típicas [1].	42
3.7	Funções adimensionais $f(a)$ e $g(a, \Delta S_0/\Delta\sigma_n, \Delta K_0/\Delta S_0, \gamma)$ para valores de $\rho = 0.5\text{mm}$ e $\Delta\sigma_n = 46.78\text{MPa}$, respectivamente.	43
3.8	Fator de concentração de tensão linear elástico K_t e fator de concentração de tensão em fadiga K_f , determinado pelo modelo GT, em função do raio da ponta do entalhe ρ , para $b = 15\text{mm}$.	44
3.9	Limiar de propagação ΔK_{th} e faixa da gama do FIT onde se teria trincas não-propagantes em função do tamanho da trinca a , para $\rho = 0.1\text{mm}$.	45
3.10	Limiar de propagação ΔK_{th} e faixa da gama do FIT onde se teria trincas não-propagantes em função do tamanho da trinca a , para $\rho = 1\text{mm}$.	45
3.11	Previsão da maior trinca não-propagante a_{max} em função do radio da ponta ρ do entalhe, para $b = 15\text{mm}$.	46
3.12	Influência do valor do parâmetro de Bazant γ no valor de K_f .	47
3.13	Influência do valor de ΔS_0 , estimado por Gerber, Goodman e Soderberg, no valor de K_f .	48
3.14	Relação entre $\Delta K_{th}/S_R$ e R para aços [23].	49
3.15	Limiar de propagação ΔK_{th} versus razão de tensão R para alguns aços [24].	49

3.16	Influência do valor do limiar de propagação de trincas longas ΔK_0 no valor de K_f .	50
3.17	Influência do valor de γ no valor de a_{max} .	51
3.18	Influência do valor de ΔS_0 , estimado por Gerber, Goodman e Soderberg, no valor de a_{max} .	51
3.19	Influência do valor do limiar de propagação de trincas longas ΔK_0 no valor de a_{max} .	52
3.20	Fator de concentração de tensão linear elástico K_t e fator de concentração de tensão em fadiga K_f em função do radio da ponta do entalhe ρ , para $b = 15\text{mm}$.	53
3.21	Configuração de um C(T) modificado para múltiplos ensaios.	53
3.22	Fator de concentração de tensão linear elástico K_t e fator de concentração de tensão na fadiga K_f em função do radio do furo ρ , para $b = 38\text{mm}$.	54
3.23	Direção do lixamento das faces do CP.	55
3.24	Esquema da usinagem de um novo entalhe no C(T).	56
3.25	Equipamento de ensaio marca INSTRON 8501.	56
3.26	Lente de aumento óptico utilizado para visualização do aparecimento de trincas.	57
3.27	Microscópio óptico utilizado para visualização de eventuais trincas não-propagantes.	58
4.1	Comparação dos K_f determinados pelos modelos GT e TCD e o K_t estimado por Creager-Paris, para um C(T) com $b = 15\text{mm}$.	59
4.2	Comparação dos K_f determinados pelos modelos GT e TCD e o K_t estimado por Creager-Paris, para um C(T) com $b = 22.5\text{mm}$.	60
4.3	Comparação dos K_f determinados pelos modelos GT e TCD e o K_t estimado por Creager-Paris, para um C(T) com $b = 28.5\text{mm}$.	60
4.4	Comparação dos K_f determinados pelos modelos GT e TCD e o K_t estimado por Creager-Paris, para um C(T) com $b = 38\text{mm}$.	61
4.5	Micrografia do entalhe com $b = 38\text{mm}$ e $\rho = 0.62\text{mm}$ do CP1, aumento 20X. a) ensaio prévio ao início da trinca, b) início e propagação de uma trinca.	65
4.6	Micrografia do entalhe com $b = 22.5\text{mm}$ e $\rho = 1\text{mm}$ do CP2, aumento 10X. a) ensaio prévio ao início da trinca, b) início e propagação de uma trinca.	65
4.7	Micrografia do entalhe com $b = 28.5\text{mm}$ e $\rho = 0.62\text{mm}$ do CP2, aumento 10X. a) ensaio prévio ao início da trinca, b) início e propagação de uma trinca.	65
4.8	Micrografia do entalhe com $b = 15\text{mm}$ e $\rho = 1\text{mm}$ do CP1, aumento 10X. a) ensaio prévio ao início da trinca, b) início e propagação de uma trinca.	66
4.9	Valores numéricos de K_f determinados pelos modelos GT e TCD em função do K_f experimental. Pelo modelo GT se analisam três casos: ΔS_0 calculado por Goodman, por Soderberg e $\Delta K_0 = 12\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.	66
4.10	Zonas determinadas pelo modelo GT em que, segundo Frost, se deveriam ter trincas não-propagantes e comparação com resultados experimentais.	67

4.11	Zonas determinadas com ΔS_0 estimado por Soderberg pelo modelo GT em que, segundo Frost, se deveriam ter trincas não-propagantes e comparação com resultados experimentais.	68
4.12	Zonas determinadas com $\Delta K_0 = 12\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ pelo modelo GT em que, segundo Frost, se deveriam ter trincas não-propagantes e comparação com resultados experimentais.	69
4.13	Geometria e dimensões em milímetros do CP tipo SEN(T) modificado.	70
4.14	Comparação dos valores numéricos de K_f obtidos pelos modelos GT e TCD e o K_t calculado por Inglis, para um CP tipo SEN(T), quando $b = 15\text{mm}$.	71
4.15	Comparação dos valores numéricos de K_f obtidos pelos modelos GT e TCD e o K_t calculado por Inglis, para um CP tipo SEN(T), quando $b = 50\text{mm}$.	71
4.16	Geometria e dimensões em milímetros do CP tipo SE(B) modificado.	72
4.17	Comparação dos valores numéricos de K_f determinados pelos modelos GT e TCD e o valor de K_t estimado por Creager-Paris, para um CP tipo SE(B), quando $b = 15\text{mm}$.	72
4.18	Comparação dos valores numéricos de K_f determinados pelos modelos GT e TCD e o valor de K_t estimado por Creager-Paris, para um CP tipo SE(B), quando $b = 30\text{mm}$.	73
4.19	Comparação da maior trinca não-propagante a_{max} em função do raio ρ da ponta do entalhe para corpos de prova tipo C(T), SEN(T) e SE(B) modificados, para uma valor $b = 15\text{mm}$.	74

Lista de tabelas

3.1	Estimativas do tamanho característico de trinca curta a_0 para alguns aços estruturais [1].	36
3.2	Propriedades mecânicas do aço comercial ASTM A36.	36
3.3	Propriedades εN do aço ASTM A36	36
4.1	Resultados do modelo GT para um CP tipo C(T), sem considerar o efeito da tensão fletora causada pela carga ΔP ($b = 15\text{mm}$).	62
4.2	Programa de teste para o entalhe número 1 do CP1 ($b = 15\text{mm}$).	63
4.3	Resultados corrigidos para um CP tipo C(T), considerando o efeito da tensão fletora causada pela carga ΔP ($b = 15\text{mm}$).	63
4.4	Resumo dos ensaios que permitiram a detecção de trincas.	64
4.5	Valores numéricos de K_f determinados pelos modelos GT e TCD e erros relativos ao K_f determinado experimentalmente.	66

Sumário das notações

Abreviaturas

AM	método da área do modelo TCD (<i>area method</i>)
C(T)	corpo de prova compacto de tensão (<i>compact tension specimen</i>)
CP	corpo de prova
C-P	Creager e Paris
EF	elementos finitos
ETS	El Haddad, Topper e Smith
FIT	fator de intensidade de tensões
FR	coeficiente de fadiga (<i>fatigue ratio</i>)
GT	gradiente de tensão
K-T	diagrama de Kitagawa-Takahashi
LM	método da linha do modelo TCD (<i>line method</i>)
MFLE	mecânica da fratura linear elástica
PM	método do ponto do modelo TCD (<i>point method</i>)
SE(B)	corpo de prova de flexão (<i>single-edge-notched bending specimen</i>)
SEN(T)	corpo de prova de tensão (<i>single-edge-notched tension specimen</i>)
SN	método de dimensionamento contra a iniciação de trincas por fadiga (análise elástica)
TCD	teoria da distância crítica (<i>theory of critical distance</i>)
VM	método do volume do modelo TCD (<i>volume method</i>)
ϵN	método de dimensionamento contra a iniciação de trincas por fadiga (análise elastoplástica)

Símbolos

a	tamanho de trinca [mm]
a_0	tamanho característico de trinca curta [μm]
b	profundidade de entalhe [mm]
$C(\%)$	teor de carbono no aço
F^2	fator de correlação de ajuste de dados
$f(a)$	função adimensional que quantifica o gradiente de tensões à frente da ponta do entalhe
$f(a/W)$	função adimensional de geometria do fator de intensidade de tensão
K_f	fator de concentração de tensão na fadiga
K_I	fator de intensidade de tensão em modo I [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
K_t	fator de concentração de tensão linear elástico
L	distância crítica no modelo TCD [μm]
l_r	comprimento do ligamento residual de uma peça [mm]
q	sensibilidade ao entalhe
R	razão de tensão $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ou K_{min}/K_{max}
S_E	resistência ao escoamento [MPa]
$S_F(N)$	resistência à fadiga para um número de ciclos N [MPa]
S_L	limite de fadiga da peça [MPa]
S'_L	limite de fadiga do material [MPa]
S_R	resistência à ruptura [MPa]
t	espessura da peça [mm]
W	largura da peça [mm]
α	fator de superfície livre do fator de intensidade de tensão
γ	expoente de Bazant de ajuste de dados
μ	símbolo de micro (10^{-6})
ρ	raio de ponta do entalhe [mm]
σ_a	componente alternada da tensão [MPa]
σ_m	componente média da tensão [MPa]
σ_{max}	tensão máxima [MPa]
σ_n	tensão nominal [MPa]
ΔK_0	limiar de propagação de trinca para $R = 0$ [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
ΔK_I	gamma do fator de intensidade de tensão em modo I [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
ΔK_{th}	limiar de propagação de trinca [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
ΔP	gamma da carga aplicada [kN]
ΔS_0	gamma do limite de fadiga do material para $R = 0$ [MPa]
$\Delta\sigma$	gamma da tensão atuante no ponto crítico da peça [MPa]
$\Delta\sigma_n$	gamma das tensões nominais [MPa]