



Habib Zambrano Rodríguez

**Efeito da tensão nominal no tamanho e forma da zona
plástica**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Rio de Janeiro, setembro de 2007



Habib Zambrano Rodríguez

**Efeito da tensão nominal no tamanho e forma da zona
plástica**

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

Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Orientador
PUC-Rio

Marco Antonio Meggiolaro

PUC-Rio

Fathi Aref Ibrahim Darwish

Universidade Federal Fluminense

Antonio Carlos de Oliveira Miranda

Tecgraf

José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de setembro de 2007

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

Habib Zambrano Rodríguez

Graduou-se em Engenharia Mecânica em 2002, na *Universidad del Atlántico* (Barranquilla, Colômbia). Gradou-se como especialista em direção de plantas industriais em 2005, na *Universidad del Norte* (Barranquilla, Colômbia).

Ficha Catalográfica

Zambrano Rodríguez, Habib

Efeito da tensão nominal no tamanho e forma da zona plástica / Habib Zambrano Rodríguez ; orientador: Jaime Tupiassú Pinho de Castro. – 2007.

84 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Mecânica da fratura. 3. Tamanho da zona plástica. 4. Trincas. I. Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A Deus por guiar sempre os meus passos, A minha esposa e musa Beatriz por tanto amor e compreensão e em memória de meu avô Miguel Rodríguez Barrios.

Agradecimentos

A meus pais, Juan Antonio e Aida Isabel, e aos meus irmãos Harvey Alexander e Heidy Lissette por tanto amor e carinho.

A meu orientador, Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro por todos os conhecimentos ensinados com tanta paciência e dedicação.

Ao professor Marco Antonio Meggiolaro e ao Dr. Antonio Carlos Miranda, que sem a sua ajuda não teria conseguido a qualidade do presente trabalho do que vocês têm grande parte dos créditos.

Ao professor José Luiz de França Freire por quem sinto uma grande admiração.

A meu colega e grande amigo Jaime de Castro Neto por todo o apoio e colaboração prestada.

Aos meus amigos do laboratório Maira Amanda Vargas Ávila, José de Jesus Leal Carvajalino, Marco Antonio Perez Rosas, Sergio Ibañe Oliveira Bueno e Leonardo Dantas Rodrigues.

Ao casal Julio Cesar Cuisano Egúsqüiza e Zaida Eliana Ancajima Marquez de Cuisano por ter brindado a sua amizade e ter compartilhado tantos momentos bons juntos.

Ao casal José Luis Plasencia Cabanillas e Sara Olenka Castillo Alva por sua amizade incondicional.

Aos meus amigos Juan Gerardo Castillo Alva e Franklin Antonio Sanchez Paiba.

A todos os meus amigos peruanos, sua amizade tornou a distancia mais suportável.

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

Resumo

Zambrano, Habib. **Efeito da tensão nominal no tamanho e forma da zona plástica.** Rio de Janeiro, 2007. 84p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As estimativas do tamanho e forma da zona plástica, tradicionalmente usada na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), são baseadas na suposição que o fator de intensidade de tensões KI (ou KII ou $KIII$) é o único parâmetro necessário para descrevê-las. Quando as zonas plásticas são obtidas a partir da solução de Inglis para o campo de tensões em volta de um furo elíptico, ou da solução completa de Westergaard para uma placa com uma trinca central, pode-se observar que as estimativas tradicionais subestimam a localização da fronteira elastoplástica. Isto acontece devido às estimativas tradicionais da zona plástica que não levam em consideração a influência da tensão nominal no campo de tensões. Como na maioria dos casos a tensão nominal atinge 80% da tensão de escoamento do material é muito importante gerar estimativas melhoradas da zona plástica em volta da ponta da trinca, as quais são apresentadas neste trabalho.

Palavras-chave

Mecânica da fratura, Tamanho da zona plástica, trincas

Abstract

Zambrano, Habib. **On the Plastic Zone Size and Shape Dependence on the Nominal Stress in Fracture Mechanics**. Rio de Janeiro, 2007. 84p. MSc. Thesis - Department of Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The estimates of the size and shape of the plastic zones, traditionally used in Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM), are based on the supposition that the stress intensity factor (SIF) K_I (or K_{II} or K_{III}) is the only necessary parameter to describe them. However, when the linear elastic stress analysis problem is solved in an Inglis plate, or the cracked infinite plate is analyzed using the stresses generated by the complete Westergaard function, it is verified that those traditional estimates significantly underestimate the position of the elastoplastic border. This happens because those solutions ignore the influence of the nominal stress on the stress field. However, as in most of the practical cases nominal stresses of up to 80% of the yielding strength are used, it is worthwhile to generate better estimates ahead for the plastic zones of the cracks, which are presented in this work.

Palavras-chave

Fracture Mechanics, plastic zone size, cracks.

Sumário

1 Introdução	15
1.1 Falhas por fadiga do material	17
1.2 Modelo do Dano Crítico para a propagação de trincas por fadiga	20
1.3 Objetivos da Dissertação	23
1.4 Descrição da Dissertação	23
2 Fundamentos da Mecânica da Fratura Linear Elástica	25
2.1 Concentração de tensões	25
2.1.1 Perturbação das linhas de força	25
2.1.2 Fator de concentração de tensões	27
2.1.3 Solução do campo de tensões numa placa infinita com um furo circular tracionada	27
2.1.4 Solução do campo de tensões numa placa infinita com um furo elíptico tracionada	29
2.2 Mecânica da Fratura Linear Elástica	33
2.2.1 Estado de tensões num concentrador de tensões	33
2.2.2 Modos de carregamento das trincas	36
2.2.3 Fator de intensidade de tensões	37
2.2.4 Solução de Williams para o campo linear elástico de tensões em torno de uma trinca	39
2.2.5 Solução de Westergaard para o campo linear elástico de tensões em uma placa infinita com uma trinca central	43
2.2.6 Modificação da Solução de Westergaard para o campo linear elástico de tensões em torno de uma trinca	47
2.2.7 Estimativa da zona plástica na ponta da trinca	47
2.2.8 Abertura da ponta da trinca (CTOD)	52
3 Influência da tensão nominal no tamanho e na forma da zona plástica	54
3.1 Estimativas tradicionais da zona plástica	54
3.2 Influência da tensão nominal no tamanho e forma da zona plástica	60

3.3 Estimativa da fronteira elastoplástica a partir da solução de Inglis para o campo de tensões em uma placa com um furo elíptico	62
3.4 Estimativa da zona plástica a partir da solução de Westergaard completa para o campo de tensões em uma placa infinita com uma trinca central	65
3.5 Comparação das soluções de Inglis e Westergaard	68
4 Zona plástica equilibrada	72
4.1 Zona plástica de Irwin	72
4.2 Zona plástica equilibrada considerando o efeito da tensão nominal	74
5 Conclusões e recomendações	78
5.1 Conclusões	78
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	79
6 Referências Bibliográficas	81

Lista de figuras

Figura 1.1 - Diferentes estruturas onde a MFLE pode ter muita aplicação.	17
Figura 1.2 - Validação das previsões da MFLE.	17
Figura 1.3 - Falha por fadiga no trem de aterrissagem de um avião.	18
Figura 1.4 - Esquema do modelo de dano crítico.	21
Figura 1.5 - Zona plástica a frente da ponta da trinca.	22
Figura 2.1 - Fluxo das linhas de força.	26
Figura 2.2 - Perturbação nas linhas de força.	26
Figura 2.3 - K_t de um furo circular numa placa infinita tracionada.	28
Figura 2.4 - Variação das tensões normais σ_θ e σ_r ao longo do eixo x numa placa infinita com um furo circular tracionada.	28
Figura 2.5 - Placa infinita contendo um furo elíptico tracionada.	29
Figura 2.6 - Coordenadas ortonormais elíptico-hiperbólicas.	30
Figura 2.7 - Variação da tensão σ_y ao longo do eixo x numa placa infinita com um furo elíptico tracionada.	32
Figura 2.8 - Deformação na ponta do entalhe.	35
Figura 2.9 - Modos de carregamento de uma trinca em uma placa.	36
Figura 2.10 - Modos de carregamento de uma trinca em uma placa.	40
Figura 2.11 - Placa infinita com uma trinca central sob carregamento biaxial.	45
Figura 2.12 - Variação da zona plástica com a espessura em peças suficientemente grossas.	49
Figura 2.13 - Redistribuição das tensões σ_y para manter o equilíbrio das forças numa peça trincada em tensão plana.	50
Figura 2.14 - Estimativa da abertura da ponta da trinca a partir de K_I , sob condições predominantemente LE, a partir da hipótese de Irwin de que a trinca se comporta como se tivesse um comprimento $a + \frac{ZpIrw}{2}$.	53
Figura 3.1 - Fronteiras elastoplástica por Mises em modo I previstas usando Williams.	55

- Figura 3.2 - Placa com trinca central e carregamento perpendicular à trinca. 55
- Figura 3.3 - Razão $\frac{F}{F'}$ onde F é a força produzida pela tensão σ_n e F' é a força produzida pela tensão σ_y gerada pelo K_I atuante na peça. 56
- Figura 3.4 - Razão $\frac{F}{F''}$ onde F é a força produzida pela tensão σ_n e F'' é a força calculada somando na tensão σ_y gerada por K_I a tensão nominal σ_n que atua na placa trincada. 58
- Figura 3.5 - Razão $\frac{F}{F_{Westergaard}}$, onde F é a força produzida pela tensão σ_n e $F_{Westergaard}$ é a força calculada a partir da componente σ_y da solução completa de Westergaard. 59
- Figura 3.6 - Fronteira elastoplástica estimada adicionando σ_n à componente σ_y da solução de Williams para o campo de tensões na ponta da trinca, em σ -plana. 61
- Figura 3.7 - Fronteira elastoplástica adicionando σ_n à componente σ_y da solução de Williams para o campo de tensões na ponta da trinca, em ε -plana. 62
- Figura 3.8 - Fronteira elastoplástica em torno de uma trinca modelada a partir da placa de Inglis com $\rho = \frac{CTOD}{2}$, em σ -plana. 64
- Figura 3.9 - Fronteira elastoplástica em torno de uma trinca modelada a partir da placa de Inglis com $\rho = \frac{CTOD}{2}$, em ε -plana. 65
- Figura 3.10 - Fronteira elastoplástica em torno da ponta de uma trinca modelada a partir da equação completa de Westergaard, em σ -plana. 67
- Figura 3.11 - Fronteira elastoplástica em torno da ponta de uma trinca modelada a partir da equação completa de Westergaard, em ε -plana. 68
- Figura 3.12 - Comparação da fronteira elastoplástica em torno da ponta de uma trinca modelada a partir da solução de Inglis e Westergaard completa, em σ -plana. 69
- Figura 3.13 - Comparação da fronteira elastoplástica em torno da ponta de uma trinca modelada a partir da solução de Inglis e Westergaard completa, em ε -plana. 69

Figura 3.14 - Coincidência forçada da solução de Inglis e Westergaard completa fazendo $b = CTOD/2$ na solução de Inglis, em σ -plana .	71
Figura 3.15 - Coincidência forçada da solução de Inglis e Westergaard completa fazendo $b = CTOD/2$ na solução de Inglis, em ε -plana .	71
Figura 4.1 - Zona plástica de Irwin, em σ -plana .	73
Figura 4.2 - Zona plástica de Irwin, em ε -plana .	74
Figura 4.3 - Limitação da tensão dentro da zona plástica de Westergaard.	75
Figura 4.4 - Fronteira elastopástica atendendo ao equilíbrio, em σ -plana .	76
Figura 4.5 - Fronteira elastopástica atendendo ao equilíbrio, em ε -plana .	76

Lista de abreviaturas e símbolos

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials.
COD	Crack Opening Displacement.
CTOD	Crack tip Opening Displacement.
da/dN	Método de previsão de dano à fadiga (propagação de trinca).
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica.
SN	Método de previsão de dano à fadiga (iniciação de trinca).
ϵN	Método de previsão de dano à fadiga (iniciação de trinca).

SÍMBOLOS

$2a$	Largura do furo elíptico em uma placa infinita.
$2b$	Comprimento do furo elíptico em uma placa infinita.
a	Comprimento de trinca.
δa	Incremento de trinca infinitesimal.
α, β	Coordenadas ortonormais elíptico-hiperbólicas.
$\frac{da}{dN}$	Taxa de propagação de trinca.
dA	Incremento de área de trinca.
E	Módulo elástico.
ϵ	Deformação.
$\Delta\epsilon$	Amplitude das deformações.
$f_{ij}(\theta)$	Uma função de θ .
$f(a/W)$	Função adimensional.
G	Módulo de cisalhamento.
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.
ΔK	Amplitude do fator de intensidade de tensões.
ΔK_I	Amplitude do fator de intensidade de tensões em modo I.
K_t	Fator de concentração de tensões.
ΔK_{th}	Fator de intensidade de tensões limiar.
K_{ab}	Carga de abertura da trinca em termos de K .
N	Número de ciclos.
P	Carga.
P_e	Força externa.
ρ	Raio de curvatura da ponta da trinca.
σ	Tensão.
σ_1 , σ_2 e σ_3	Tensões nas direções principais.
σ_n	Tensão nominal.
σ_{max}	Tensão máxima que atua numa dada seção (entalhada).
$\Delta\sigma$	Amplitude das tensões.
σ_{ij}	Tensor de tensões.
σ_x	Tensão normal na direção x.
σ_y	Tensão normal na direção y.
σ_r , σ_θ e $\tau_{r\theta}$	Tensões nas vizinhanças da ponta da trinca em coordenadas polares.
σ_α , σ_β e $\tau_{\alpha\beta}$	Componentes da tensão em Coordenadas ortonormais elíptico-hiperbólicas.
S_E	Tensão de escoamento do material.
S_{ut}	Tensão de ruptura.
u_x , u_y	Deslocamentos nas direções dos eixos x e y, respectivamente.
ν	Coefficiente de Poisson.
θ	Ângulo.
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento em xy.
t	Espessura da placa.

x, y	Eixos coordenados locais na ponta da trinca.
Z_p	Zona plástica.
Z_{p_0}	Tamanho da Zona plástica de Williams na direção $\theta = 0$.
$Z_p(K_I)$	Zona plástica de Williams, usando Mises, em tensão plana dividida por Z_{p_0} .
$Z_{p_{Mises}}^{Inglis}$	Zona plástica de Inglis usando Mises.
$Z_{p_{Mises}}^{Westergaard}$	Zona plástica de Westergaard usando Mises.
$Z_{p_{Mises}}^{Williams}$	Zona plástica de Williams usando Mises.
$Z_{p_{Mises}}^{\text{efeito da } \sigma_n}$	Zona plástica somando σ_n na componente σ_y à solução de Williams, usando Mises.