PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Rafael Araujo de Sousa

Estimativas de zonas plásticas à frente de pontas de trincas

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.

Orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Co-orientador: Alexandre Antonio de Oliveira Lopes
Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Rio de Janeiro, setembro de 2011.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Rafael Araujo de Sousa

Estimativas de zonas plásticas à frente de pontas de trincas

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

Prof. Luiz Fernando C. R. Martha
Presidente/Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Alexandre Antonio de Oliveira Lopes
Co-Orientador – Petrosoft Design

Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro
Co-Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Carlos Alberto de Almeida
Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Remo Magalhães de Souza
Departamento de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Timothy Hamilton Topper
University of Waterloo

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de setembro de 2011.

Rafael Araujo de Sousa

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Pará, em fevereiro de 2005. Durante a graduação atuou na área de estruturas na análise de vibrações em cabos considerando a rigidez à flexão, a rigidez ao cisalhamento e a inércia à rotação, que gerou um artigo em revista. Defendeu sua dissertação de mestrado em 14 de fevereiro de 2007 com o trabalho intitulado de Adaptatividade geométrica e numérica na geração de malhas de elementos finitos em 2D e 3D.

Ficha Catalográfica

Sousa, Rafael Araujo de

Estimativas de zonas plásticas à frente de pontas de trincas / Rafael Araujo de Sousa ; orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha ; co-orientadores: Alexandre Antonio de Oliveira Lopes, Jaime Tupiassú Pinho de Castro. – 2011.

3vs. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Zonas plásticas. 3. Mecânica da fratura linear elástica. 4. Métodos numéricos. I. Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. II. Lopes, Alexandre Antonio de Oliveira. III. Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Stélio e Maria do Carmo;

Meu irmão, Allan Araujo de Sousa;

Minha avó, Paula Costa Ferreira Araujo;

E a minha esposa Nayana de Macedo Lopes

Agradecimentos

Aos leitores deste trabalho, peço desculpas pela extensão dos agradecimentos. Entretanto, não posso deixar de relacionar as pessoas que foram importantes para a minha formação pessoal e que de forma indireta participaram no término desta tese. Dessa forma, agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Stélio Augusto Amorim de Sousa e Maria do Carmo Araujo de Sousa e a Deus. Agradeço aos meus pais por toda criação e dedicação dadas a mim e a meu irmão. Dentro desse contexto, não poderia deixar de citar o bairro em que fui criado, o Jurunas, subúrbio de Belém, que me mostrou como a vida pode ser dura e que é necessário muita força de vontade para mudar uma situação desfavorável. Agradeço também ao meu irmão, Allan Araujo de Sousa, a quem devo em torno de 80% do meu pouco conhecimento geral e a minha esposa Nayana Silvia de Macedo Lopes por todo amor, dedicação, amizade e companheirismo ao longo desses três anos de convivência, assim como a toda sua família, em especial a minha sogra Ana e a minha cunhada Adriana Karoline. Também agradeço em primeiro plano, aos meus avós paternos e maternos, em especial ao meu avô Cândido José Costa Ferreira Araujo pelo exemplo de comportamento e a minha avó Paula Costa Ferreira Araujo por participar diretamente na minha vida.

Ainda no ambiente familiar, gostaria de agradecer a todos os meus tios, tias, primos e primas, em especial aos mais próximos: como os tios José Henrique Araujo, Cândido Araujo Filho, Jorge Lima, Genilson Andrade e José Carlos Araujo, as tias Conceição Araujo, Isabela Araujo, Thelma Araujo e em especial a tia Maria de Nazaré Araujo Lima, que me adotou como afilhado, aos primos Daniel Sena, Lucas Araujo, Leonardo Araujo e Bernardo Araujo e as primas Juliana Araujo e Farah Malcher. Pelos longos e importantíssimos seis anos de convivência, também agradeço à Vanessa Ferreira e toda sua família (dona Carmelina, Dalila Santos e Paulo Eduardo Ferreira).

De acordo com a minha concepção de importância na minha formação pessoal, não posso deixar de agradecer aos amigos formados ao longo da minha vida. Dentre eles destaco: Elisson Borges Saldanha “gueldo”, Francisco Nunes da

Rocha Junior, Felipe Melo “cancão”, Bruno Flexa “tabajara”, Igor Nunes “malaco”, Thiago Sena, Benedito Franciano, Evandro Leomar “mano brown”, Manoel “ted”, Francinei, Fernando Santos “dog”, Vladimir Barbosa “capitão planeta”, Bruna Cristina, Bruno Eutrópio “rato”. Agradeço especialmente aos amigos Fábio Luiz Araújo Araújo e toda a sua família que sempre me tratou como um membro e ao meu compadre, xará e parceiro nos sambas e cervejas, Rafael Ferreira Pinheiro “cachacinha” e a sua filha Arielle Bezerra Pinheiro.

No ambiente acadêmico, eu agradeço aos amigos formados durante a graduação na Universidade Federal do Pará. Entre eles destaco Tiago Rodrigues, Jean Rodrigo Aguilera e Remo Magalhães de Souza. Aos amigos conquistados durante o mestrado na PUC-Rio: Amanda Jarek, André Guedes “Dedé Bambu” e sua esposa Elaine, Clébson Wilson “dino”, Antônio Vicente “combatente”, Ygor Netto “tio chico”, João Paulo Castagnoli “gagazeiro”, Klessis “seu Klessis”. Aos colegas de disciplina do doutorado: Jorge Hinostroza “biruta”, Juan Carlo Romero “loquito”, Gerardo “Piquet” Patrick, Juarez e Guillermo “franquito”. Agradeço em especial ao grande Adenilson Costa Oliveira “mão tôca” também conhecido como “pegador encubado” pela longa convivência tanto ao longo das disciplinas do mestrado quanto no papo do esporte (futebol, vôlei, automobilismo, mma), quanto nas cervejadas tomadas nos sambas e bailes funks.

Agradeço ao TECGRAF pelo apoio financeiro e pelo ambiente agradável que me ajudou na conclusão do mestrado e do doutorado. Assim, agradeço ao Luiz Fernando Bitton pelo incentivo em entrar para o TECGRAF e aos amigos formados lá ao longo desses seis anos de convivência: Isebelle Telles “paraense pai d’égua”, Bruno Ávila, Gisele Cunha, Mauro Artemio Páchas pelas cervejas tomadas nesses anos, Antônio Sérgio “MacGyver”, Jaime Castro Neto por toda ajuda no laboratório de fotoelasticidade, Alonso Carbono “cuio”, Pedro Michelle “K-” pelas cervejas e pelos papos de samba, Antônio Miranda “caboco doido”, Ivan Fábio Menezes “Éguaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa” que com esse nome composto deve ter algum descendente nortista. Agradeço ao Ivan pelas horas perdidas em que me ajudou nas listas de Elementos Finitos e nas outras disciplinas. Dentro do Tecgraf, agradeço principalmente aos amigos Marcos Arruda e esposa (Christina “pay”) por ele me transmitir o amor pela engenharia e

pela pesquisa, por transmitir o prazer em ler José Saramago e por me ensinar a diferença entre ser magro e ser seco. Finalmente, agradeço ao Fábio Pereira Figueiredo e esposa (Daniela Paes) por ele ser uma pessoa que transmite calma, compreensão e paciência assim como por ter sido a pessoa que mais ouviu minhas angustias em relação ao desenvolvimento da tese.

Agradeço também a todos os professores, treinadores e pessoas que me incentivaram a progredir nos estudos e me ensinaram a ter disciplina e força de vontade para seguir em frente. Relacionados a minha fase de atleta, agradeço ao Paulo Pimenta, Raimundo Pena, Marcelo “Biro”. Agradeço aos meus professores do segundo grau Pantoja e Moura (Matemática), Zé Luis e Hélio Dourado (Física), Celeste Proença (Redação e Português), Guilherme e Odir (Geografia) e Marcos (Literatura). Em relação a minha graduação, agradeço a todos os professores do departamento de engenharia civil da UFPA, em especial aos professores Salim Habib, Abílio da Cruz pelo incentivo e confiança depositadas em mim, ao professor José Perilo da Rosa Neto por todo conhecimento transmitido, ao professor José Raimundo Serra Pacha pela confiança e pela excelente aula ministrada e principalmente ao professor Remo Magalhães de Souza pela excelente aula, pela confiança e pelo incentivo depositados em mim, por sua simplicidade e por ser um grande amigo.

Agradeço também à Rita de Cássia e a todos os professores que tive ao longo desses seis anos de pós graduação na PUC-Rio. Entre eles destaco os professores Paulo Cuadrat, Márcio Carvalho, Carlos Alberto de Almeida e Paulo Gonçalves pela excelência no ensino, a professora Deane Roehl e ao professor João Roehl pela confiança e incentivo dados a mim e ao professor Carlos Tomei pela ajuda na compreensão da parte analítica desta tese. Relação que só não foi mais profícua por culpa minha. Também agradeço ao professor Gustavo Donato da FEI-São Bernardo do Campo e a professora Edna Fernandes Pacheco do departamento de letras da PUC-Rio por toda ajuda na correção do texto, por sua confiança, paciência e amizade.

Mais diretamente relacionados ao desenvolvimento desta tese, agradeço ao professor Jaime Tupiassú Pinho de Castro pelo tema proposto, pelos diversos conselhos e pelas extensas conversas ao longo desta convivência. Agradeço ao professor Luiz Fernando Martha pela paciência, por sua fácil convivência, pela grande ajuda na revisão do texto e pelas boas ideias dadas ao longo da tese. Em especial, agradeço ao Alexandre Antonio de Oliveira Lopes por todas as horas gastas em diversas madrugadas em que verificávamos e discutiamos resultados e trabalhávamos juntos em uma parceria muito produtiva. Também agradeço a ele pelas diversas ideias que enriqueceram este trabalho.

Resumo

Sousa, Rafael Araujo de; Martha, Luiz Fernando C. R.; Lopes, Alexandre Antonio de Oliveira; Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. **Estimativas de zonas à frente de pontas de trincas.** Rio de Janeiro, 2011. 283p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O tamanho das zonas plásticas (zps) presentes na ponta de trincas valida a utilização da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). Dessa forma, a partir das estimativas dessas zps, este trabalho estuda o limite de validade dos dois parâmetros que caracterizam MFLE. Esses dois parâmetros são o Fator de Intensidade de Tensões (*K*) e a *T-stress*. Este trabalho mostra que esses dois parâmetros são termos da expansão da série de Williams partir da função de tensão de Westergaard. As duas formas são maneiras diferentes de se obter a solução linear elástica (LE) completa para o campo de tensões gerados na ponta de trincas. Esta tese mostra que esses dois campos de tensões têm uso limitado, pois eles geram tensões infinitas na ponta de trincas. Essas tensões singulares são características do problema matemático, não reproduzindo o real comportamento mecânico. Devido a isso, o problema das estimativas das zps é intrinsecamente não linear. Como tentativa de contornar o problema, este trabalho propõe três maneiras de considerar os efeitos do escoamento nas estimativas zps em que se adota um material perfeitamente plástico. As estimativas feitas por campos LE são verificadas numericamente a partir do uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) e do Método Híbrido dos Elementos de Contorno (MHEC). Duas das propostas de considerar os efeitos do escoamento nas zps são utilizadas juntamente com MHEC. Como contribuição final, este trabalho estima zps a partir de uma análise numérica não linear via MEF em que os efeitos do encruamento também são testados. Essas estimativas são comparadas com as estimativas LE corrigidas em que se considera um material perfeitamente plástico.

Palavras Chave:

Zonas plásticas; Mecânica da Fratura Linear Elástica; Métodos numéricos

Abstract

Sousa, Rafael Araujo de; Martha, Luiz Fernando C. R.; Lopes, Alexandre Antonio de Oliveira; Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. **Estimates of plastic zones ahead of cracks tips.** Rio de Janeiro, 2011. 283p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The size of plastic zones (pz) at the crack tips validates the use of Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM). Thus, this thesis studies the limits of validity of the two parameters that characterize MFLE from the pz estimates. These two parameters are the stress intensity factor (*K*) and the *T-stress*. This work shows that K_I and the *T-stress* are terms of the Williams' series expansion, which is the complete linear elastic (LE) solution for the stress fields generated at the crack tips. It also demonstrates that the Williams' series is a different way of writing the Westergaard stress function in terms of a trigonometric series with infinite terms, and comments that even if the two functions are the complete LE solution for cracked bodies, they have limited use, because they generate infinite tensions at the crack tip. These singular stresses are characteristics of mathematical problem, not reproducing the real mechanical behavior. As an attempt to outline the problem of singularity in a qualitative way, this work proposes three ways to consider the yielding effects in pz estimates in which one adopts a perfectly plastic material. The completeness of the stress fields generated by the Westergaard stress function is verified numerically from the use of Finite Element Method (FEM) and from of the Hybrid Boundary Element Method (HBEM). Two of the proposals to consider the yielding effects in the pz are used in conjunction with HBEM. The problem of pz estimates is instrinsically non-linear due to the singularity obtained by the mathematical formulation. Finally, this thesis also estimates the pz from a non-linear numerical analysis via FEM. The hardening effects are also tested in these nonlinear estimates. Moreover, they are compared to estimates corrected LE in which a perfectly plastic material is considered.

Keywords:

Plastic zones; Linear Elastic Fracture Mechanics; Numerical methods

Sumário

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de símbolos

K	Fator de Intensidade de Tensão.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
K_I	Fator de Intensidade de Tensão em modo I de trincamento.
K_{II}	Fator de Intensidade de Tensão em modo II de trincamento.
K_{III}	Fator de Intensidade de Tensão em modo III de trincamento.
σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}, e σ_{xy}	Componentes de tensão escritas em coordenadas Cartesianas.
x e y	Sistema Cartesiano de coordenadas.
r e θ	Sistema Polar de coordenadas.
σ_n	Tensão nominal.
a	Comprimento ou metade do comprimento de trinca.
K_{IC}	Medida de tenacidade para peças que estejam sob estado plano de deformação.
S_Y	Tensão de escoamento do material.
σ_n/S_Y	Relação entre a tensão nominal e a tensão de escoamento.
$\mathcal{T}$	Tenacidade.
MF	Mecânica da Fratura.
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica.
MFEP	Mecânica da Fratura Elastoplástica.
J_{IC}	Medida de tenacidade sob deformação plana em que não vale a MFLE.
K_{JIC}	Medida de tenacidade sob deformação plana obtida a partir de valores por J_{IC}
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal que depende do estado de tensão estudado, podendo ser de tensão ou de deformação plana.
E	Módulo de elasticidade longitudinal.
ν	Coeficiente de Poisson do material.
CT ou CS	Compact Specimen.
DC(T)	Disk-Shaped Compact Specimens.
SENB	Single Edge Notched Bend.
SENB	Single Edge Notched Bend.

CCT — Center Cracked Tension.

t — Espessura da peça.

$K_C(t)$ — Valor empírico da tenacidade que é expresso como função de t.

$t_{\min}$ — Valor de t mínimo onde $K_C(t)$ se torna constante e igual a K_{IC}.

t_C — Comprimento característico da peça.

$pz(\theta)$ — Zonas plásticas estimadas por um determinado critério de escoamento.

$pz(\theta)_M$ — Zonas plásticas estimadas pelo critério de escoamento de Mises.

EPE — Estado de escoamento em pequena escala.

EGE — Estado de escoamento em grande escala.

σ_{Mises} — Tensão equivalente de Mises.

$pz(\theta)^K_{M,pl-\sigma}$ — Zonas plásticas estimadas para um estado plano de tensão e obtidas pelo campo de tensões originado a partir de K_I em que se usa a tensão equivalente de Mises como critério de escoamento.

$pz(\theta)^K_{M,pl-\varepsilon}$ — Zonas plásticas estimadas para um estado plano de deformação e obtidas pelo campo de tensões originado a partir de K_I em que se usa a tensão equivalente de Mises como critério de escoamento.

$pz0$ — Zona plástica de referência obtida para $\theta = 0^\circ$.

K_t — Fator de Concentração de Tensão.

J — Integral J.

T-stress — Termo constante de ordem zero gerado pela série de Williams.

ρ — Raio de ponta da trinca.

Ti — Titânio.

Al — Alumínio.

δW — Incremento de trabalho.

ΔK — Variação de K.

δE_D — Variação da energia de deformação.

δA — Incremento de área de trinca.

E_P — Energia Pontencial.

$\mathcal{G}$ — Taxa de alívio de energia.

Z — Função de tensão de Westergaard.

z e $\bar{z}$ — Número complexo e seu conjugado.

Z'	Derivada da função de tensão de Westergaard em relação ao número complexo (z).
σ_0	Tensão correspondente à deformação máxima do material.
CTOD	Crack Tip Open Displacement.
zp_c	Zonas plástica crítica que segundo a ASTM valida a MFLE.
MEF	Método dos Elementos Finitos.
MEC	Método dos Elementos de Contorno.
MHEC	Método Híbrido dos Elementos de Contorno.
σ_{ij}	Componentes do campo de tensões escritas em notação indicial.
ε_{ij}	Componentes do campo de deformações escritas em notação indicial.
α e m	Parâmetros do modelo de encruamento $pz_M^{Wtg+eqHard_{Exp-\sigma,r}}$.
$f_{ij}(\theta)$	Função da coordenada θ para cada campo de tensões.
k	Parâmetro que define a intensidade biaxial do carregamento.
Φ	Função de tensão.
n_e	Expoente de encruamento do material.
α_e	Coeficiente de encruamento do material.