Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Giancarlo Luis Gómez Gonzáles

Medição de deformações elastoplásticas em regiões de concentração de tensões utilizando métodos sem malha e visão computacional

Tese de Doutorado

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

Orientador: Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro
Setembro de 2014

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Giancarlo Luis Gómez Gonzáles

Medição de deformações elastoplásticas em regiões de concentração de tensões utilizando métodos sem malha e visão computacional

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

Prof. Marco Antonio Meggiolaro
Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

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

Prof. José Luiz de França Freire
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

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

Prof. Luiz Carlos da Silva Nunes
Departamento de Engenharia Mecânica – UFF-Rio

Prof. José Eduardo de Almeida Maneschy
Eletrobrás - Eletronuclear

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

Rio de Janeiro, 10 de setembro de 2014

Giancarlo Luis Gómez Gonzáles

Possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Nacional de San Agustín de Arequipa no Perú (2006) e mestrado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2010).

Ficha Catalográfica

Gómez Gonzáles, Giancarlo Luis

Medição de Deformações Elastoplásticas em Regiões de Concentração de Tensões utilizando Métodos Sem Malha e Visão Computacional / Giancarlo Luis Gómez Gonzáles; orientador: Marco Antonio Meggiolaro – 2014.

128 f. il. (color.); 30 cm

Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. SIFT. 3. Métodos sem malha. 4. Gradientes de deformação. 5. Deformações elastoplásticas. 6. Concentração de tensões I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A mis queridos padres, Luis y Mariela,
Que creyeron en mis sueños y ahora los ven realizados.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela inspiração.

Ao meu orientador Professor Marco Antonio Meggiolaro, pela orientação científica e conhecimentos compartilhados ao longo do mestrado e doutorado.

Aos professores membros da banca de defesa pelos pertinentes apontamentos e sugestões, contribuindo com o enriquecimento deste trabalho.

À Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro e ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro no Brasil.

Aos colegas do Laboratório de Fotomecânica e Fadiga pela colaboração, apoio, conversas e amizade.

Resumo

Gómez Gonzáles, Giancarlo Luis; Meggiolaro, Marco Antonio. **Medição de deformações elastoplásticas em regiões de concentração de tensões utilizando métodos sem malha e visão computacional.** PUC-Rio, 2014. 128p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A análise de deformações em torno de regiões de concentração de tensões é uma importante ferramenta na avaliação da integridade estrutural de peças e componentes mecânicos. Todavia, esta análise se torna mais complexa quando o material atinge a plastificação junto ao entalhe. Neste trabalho, uma nova metodologia numérico-experimental para medição de deformações na superfície de um material, combinando métodos sem malha e visão computacional, é apresentada. A parte experimental da técnica é baseada na captura de imagens de um material em estados diferentes de deformação durante um ensaio mecânico. A técnica de visão computacional conhecida como *Scale Invariant Feature Tecnique* (SIFT) é utilizada aqui para extrair pontos característicos nas imagens capturadas. Para tanto, uma textura aleatória foi pintada na superfície do corpo de prova. Em seguida, os deslocamentos são obtidos experimentalmente, através do seguimento das posições dos pontos SIFT corretamente correspondidos no par de imagens capturadas do ensaio, antes e depois da aplicação da carga. Os pontos fornecidos pelo algoritmo SIFT são selecionados como nós de uma formulação sem malha, e o método de mínimos quadrados móveis é utilizado para gerar uma aproximação numérica do campo de deslocamentos e as suas derivadas. Assim, deformações na região próxima ao entalhe são devidamente quantificadas para posterior análise. Na validação da metodologia proposta, corpos de prova entalhados foram utilizados para estudar o comportamento da deformação plástica nas regiões de concentração de tensões. Os resultados dos testes mostraram boa concordância e precisão quando comparados com soluções analíticas, simulações pelo método dos elementos finitos (ANSYS) e soluções obtidas através de um *software* comercial de correlação de imagens digitais.

Palavras-chave

SIFT; métodos sem malha; gradientes de deformação; deformações elastoplásticas; concentração de tensões.

Abstract

Gómez Gonzáles, Giancarlo Luis; Meggiolaro, Marco Antonio (Advisor). **Measurement of elastoplastic strains at stress concentration regions using meshless methods and computer vision.** PUC-Rio, 2014. 128p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Strain analysis near stress concentration regions is an important tool for structural integrity of mechanical components. However, this analysis becomes more complex when the material starts to deform plastically near the notch root. In this work, a novel experimental-numerical technique for the measurement of the strain distribution on the surface of a deformable body is described, which uses meshless methods and computer vision. The experimental part of this technique is based on the capture of images at different stages of material deformation during a mechanical test. The Scale Invariant Feature Transform (SIFT) is a computer vision algorithm used here to extract distinctive points or features in the captured images. For this purpose, a random texture was painted on the specimen surface. Then, the displacements are experimentally obtained by tracking the positions of successfully matched SIFT points in an undeformed-deformed pair of images. The points provided by SIFT are selected as nodes in a meshless formulation and the moving least square method is used to generate a numerical approximation for the displacement field and its derivates. Thus, the corresponding strain field close to the notch is calculated. To validate the proposed methodology, notched specimens were employed to study the deformation behavior on regions of stress concentration. Experimental results showed good agreement and accuracy when compared to analytical solutions, to simulations by finite elements (ANSYS) and to solutions obtained by using a commercial software based on the digital image correlation technique.

Keywords

SIFT; meshless methods; strain gradient; elastoplastic strain; stress concentration.

Sumário

Lista de figuras

Lista de tabelas

Abreviaturas e símbolos

ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CCD	*Charge-coupled device*
DEM	*Diffuse Element Method*
DIC	*Digital Image Correlation*
DoG	*Difference of Gaussians*
EFG	*Element-free Galerkin*
FEM	*Finite Element Method*
FDP	Função Densidade de Probabilidade
MLS	*Moving Least Square*
SIFT	*Scale Invariant Feature Transform*
a, b	Constantes da função peso
$a(x)$	Vetor de coeficientes
C	Centro de projeção
D	Função diferença de gaussianas, ou
	altura da seção reta de uma viga [mm]
Det	Determinante de uma matriz
dm	Dimensão do domínio de influência [mm]
d	Raio de influência [mm]
E	Modulo de elasticidade [GPa]
e_o	Erro
$e(x)$	Erro residual
f	Distância focal
F	Imagem filtrada
G	Módulo de elasticidade ao cisalhamento [GPa]
H	Matriz Hessiana, ou
	coeficiente de encruamento monotônico [MPa]
h	expoente de encruamento monotônico
I	Imagem de entrada, ou
	momento de inércia [mm^3]
J	Funcional ou função cujo domínio é um espaço vetorial

k	Constante da função peso
k_1, k_2	Coeficientes de distorção radial
K	Matriz de parâmetros intrínsecos da câmera
K_t	Fator de concentração de tensão linear elástico
K_t^M	Fator de concentração de tensão linear elástico modificado
K_ε	Fator de concentração de deformação elastoplástico
K_σ	Fator de concentração de tensão elastoplástico
K_p	Fator de plasticidade do entalhe
L	Comprimento [mm]
L_i, L_s	Comprimento do vão inferior e vão superior [mm]
L_p	Carga de escoamento [MPa]
L_y	Carga de colapso plástico [MPa]
M	Posição de um ponto no espaço
m	Magnitude do gradiente do descritor
log, ln	Logaritmos na base 10 e na base e ($e \approx 2.71828$)
r	Razão, ou raio do entalhe [mm]
r_{ij}	Elemento na i-ésima linha e na j-ésima coluna da matriz de rotação
r_d	Raio da distorção radial [*pixels*]
R	Matriz de rotação
S	Coeficiente *skew* da câmera
S_y	Resistência ao escoamento [MPa]
u, v	Deslocamentos nas direções dos eixos x e y
P	Carga aplicada [N]
$P(x)$	Base polinomial
P_e, P_d	Raio de projeção esquerda e direita
$sign$	Função sinal
T	Vetor de translação
t	Espessura da peça [mm]

tr	Traço de uma matriz
t_x, t_y, t_z	Componentes de do vetor de translação
$w(x)$	Função peso
α	Autovalor com maior magnitude
α_s	Constante de proporcionalidade
β	Autovalor com menor magnitude
$\phi(x)$	Função de forma
φ	Magnitude do elemento de um descritor
ε	Deformação real
ε_{eng}	Deformação de engenharia
ε_m	Deformação máxima
ε_n	Deformação nominal
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$	Componentes do tensor deformação
ε_n^M	Deformação nominal modificada [MPa]
$\mu\varepsilon$	Abreviatura de "microstrain" ($1\mu\varepsilon = 10^{-6}$ m/m)
ν	Coeficiente de Poisson
π	Plano de imagem da câmera
Θ	Descritor associado a um ponto característico
θ	Ângulo de rotação, ou orientação do gradiente do descritor
σ	Tensão real [MPa]
σ_{eng}	Tensão de engenharia [MPa]
σ_n	Tensão nominal [MPa]
σ_m	Tensão máxima [MPa]
σ_g	Desvio padrão do filtro Gaussiano
σ_n^M	Tensão nominal modificada [MPa]
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Rotação em torno do eixo x, y e z, respectivamente
ψ	Magnitude do elemento de um descritor