Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Carlos Javier Melchor Placencia

Análise do Colapso de Estruturas com Não Linearidade Física e Geométrica

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Raul Rosas e Silva
Co-orientadora: Profª. Deane de Mesquita Roehl

Rio de Janeiro
Julho de 2015

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Carlos Javier Melchor Placencia

Análise do Colapso de Estruturas com Não Linearidade Física e Geométrica

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

Prof. Raul Rosas e Silva
Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Profª. Deane de Mesquita Roehl
Co-Orientadora
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Sebastião Artur Lopes de Andrade
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

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

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

Rio de Janeiro, 15 de Julho de 2015

Carlos Javier Melchor Placencia

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Nacional de Ingeniería - UNI (Lima – Perú), em 2009. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil, na área de Estruturas, da PUC-Rio em 2013, desenvolvendo investigações na linha de pesquisa de Modelos computacionais para Instabilidade.

Ficha Catalográfica

Melchor Placencia, Carlos Javier

Análise do Colapso de Estruturas com Não-Linearidade Física e Geométrica / Carlos Javier Melchor Placencia; orientador: Raul Rosas e Silva; co-orientadora: Deane de Mesquita Roehl. - 2015.

v., 102 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Elementos Finitos. 3. Colapso. 4. Plasticidade. 5. Analise Não Linear. 6. Flambagem. 7. Instabilidade. 8. Cargas Críticas. 9. Problema de autovalor. I. Silva, Raul Rosas e. II. Roehl, Deane de Mesquita. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao meu orientador Raul Rosas e Silva pela amizade, orientação e conhecimentos transmitidos.

À minha co-orientadora Deane Roehl pela motivação, ajuda e ensinamentos.

Aos meus pais, Javier e Elsa, pelo incentivo, amor e dedicação infinita.

Aos professores integrantes da banca examinadora.

As pessoas que de alguma maneira influíram na realização deste trabalho, especialmente a Deysi Garcia, pela paciência e amizade, ao Nilthson Noreña e Luis Fernando Paullo que souberam compartilhar e transmitir seus conhecimentos para enriquecer este trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil.

A CAPES e FAPERJ, pelos auxílios financeiros concedidos.

Resumo

Placencia, Carlos Javier Melchor; Silva, Raul Rosas e; Roehl, Deane de Mesquita. **Análise do Colapso de Estruturas com Não Linearidade Física e Geométrica.** Rio de Janeiro, 2015. 102p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho apresentam-se três tipos de técnicas de análise do colapso estrutural através do método dos elementos finitos: análise linearizada da carga crítica, análise incremental da carga crítica e análise não linear completa. Na análise linearizada da carga crítica formulou-se um problema de autovalor empregando matrizes de rigidez baseadas na configuração indeformada da estrutura e materiais com comportamento linear elástico. No caso da análise incremental da carga crítica, o problema de autovalor foi formulado empregando matrizes de rigidez incrementais para levar em consideração os grandes deslocamentos e propriedades não lineares do material. Finalmente, na análise não linear completa a configuração deformada da estrutura e propriedades não lineares do material são atualizadas durante todo o processo incremental-iterativo até atingir a carga crítica. Desenvolveu-se uma implementação computacional para estudar as três técnicas de análise em estruturas planas como vigas, colunas, pórticos e arcos, empregando elementos isoparamétricos bidimensionais para estado plano de tensões. A configuração deformada da estrutura, devido aos grandes deslocamentos e rotações dos elementos, foi considerada através de uma formulação Lagrangeana Total, enquanto o comportamento inelástico do material foi modelado empregando um modelo elastoplástico de Von Mises (J2) com encruamento isotrópico. Nos exemplos apresentados mostrou-se a influência da não linearidade geométrica e física na estimativa de cargas críticas e no comportamento pós-crítico, podendo ocorrer bifurcações ao longo da trajetória de equilíbrio fundamental definida no espaço carga-deslocamentos.

Palavras – chave

Elementos finitos; colapso; plasticidade; análise não linear; flambagem; instabilidade; cargas críticas; problema de autovalor.

Abstract

Placencia, Carlos Javier Melchor; Silva, Raul Rosas e (Advisor); Roehl, Deane de Mesquita (Co-Advisor). **Collapse Analysis of Structures with Geometric and Material Nonlinearity.** Rio de Janeiro, 2015. 102p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents three kinds of techniques for collapse analysis using the finite element method: linear buckling analysis, nonlinear buckling analysis and full nonlinear analysis. The linear buckling analysis requires the definition of an eigenvalue problem using a stiffness matrix formulation based on the initial configuration of the structure and under the assumption of a linear elastic material behavior. In the case of nonlinear buckling analysis, the eigenvalue problem was formulated employing an incremental stiffness matrix in order to consider the effects of large displacements and nonlinear material properties in the critical load estimation. Finally, the full nonlinear analysis takes into account the deformed configuration and the nonlinear material properties of the structure, updating both of them through all the incremental-iterative process up to reaching the critical load. A Finite Element computational program, using plane stress isoperimetric bidimensional elements, was developed to study the three analysis techniques applied to plane structures such as beams, columns, frames and arches. The deformed configuration of the structure, due to large displacements and rotations, was considered through the Total Lagrangian formulation, whereas the inelastic material behavior was modeled using the Von Mises plasticity model with isotropic hardening. The examples presented in this article show the influence of geometric and material nonlinearity in the critical load estimation and the post-critical behavior, being this the reason for the potential occurrence of bifurcation points over the fundamental equilibrium path defined in the load-displacement space.

Keywords

Finite elements; collapse; plasticity; nonlinear analysis; buckling; instability; critical loads; eigenvalue problem.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

${}^{t+\Delta t}\mathcal{P}$	Trabalho virtual externo na configuração do tempo $t+\Delta t$
${}^{t+\Delta t}V$	Volume do sólido na configuração do tempo $t+\Delta t$
${}^{t+\Delta t}\sigma_{ij}$	Componentes do tensor de tensão de Cauchy no tempo $t+\Delta t$
$\delta_{t+\Delta t}e_{ij}$	Componentes do tensor de deformações infinitesimais dos deslocamentos virtuais na configuração do tempo $t+\Delta t$
${}^{t+\Delta t}f_i^B$	Componentes das forças aplicadas externas por unidade de volume na configuração do tempo $t+\Delta t$
${}^{t+\Delta t}f_i^S$	Componentes das forças aplicadas externas por unidade de superfície na configuração do tempo $t+\Delta t$
$\delta^{t+\Delta t}u_i$	Componentes dos deslocamentos virtuais na configuração do tempo $t+\Delta t$
${}^{t+\Delta t}S$	Superfície do sólido na configuração do tempo $t+\Delta t$
${}^{t+\Delta t}_{0}S_{ij}$	Componentes do segundo tensor das tensões de Piolla-Kirchhoff na configuração do tempo $t+\Delta t$ em relação à configuração inicial
${}^{t+\Delta t}_{0}\epsilon_{ij}$	Componentes do Tensor de deformação Green-Lagrange na configuração do tempo $t+\Delta t$
$\delta^{t+\Delta t}_{0}\epsilon_{ij}$	Variação das componentes do tensor de deformação Green-Lagrange na configuração do tempo $t+\Delta t$
${}_{0}\epsilon_{ij}$	Componentes dos incrementos do tensor de deformação Green-Lagrange
${}_{0}e_{ij}$	Componentes lineares nos incrementos dos deslocamentos no incremento do tensor de deformação Green-Lagrange
${}_{0}\eta_{ij}$	Componentes não lineares nos incrementos dos deslocamentos no incremento do tensor de deformação Green-Lagrange
u_i	Componentes do vetor de incrementos dos deslocamentos
${}^{t}u_k$	Componentes do vetor de deslocamentos no tempo t
${}^{0}x_i$	Coordenas do corpo em relação à configuração inicial
${}_{0}C_{ijrs}$	Tensor incremental de tensão-deformação no tempo t em relação à configuração inicial
$\delta\,{}_{0}e_{ij}$	Variação das componentes lineares nos incrementos dos deslocamentos
$\delta\,{}_{0}\eta_{ij}$	Variação das componentes não lineares nos incrementos dos deslocamentos
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Tensor de deformação total
$\boldsymbol{\varepsilon}^{e}$	Tensor de deformação elástica
$\boldsymbol{\varepsilon}^{p}$	Tensor de deformação plástica
$\boldsymbol{D}^{e}$	Tensor elástico infinitesimal

ε_{ij}	Componentes do tensor de deformação total
$\boldsymbol{\sigma}$	Tensor de tensão de Cauchy
σ_{ij}	Componentes do tensor de tensão de Cauchy
ψ	Energia livre por unidade de massa de Helmholtz
$\boldsymbol{A}$	Conjunto genérico de forças termodinâmicas
$\boldsymbol{\alpha}$	Conjunto genérico de variáveis do estado interno
Φ	Função da superfície de escoamento
$\dot{\gamma}$	Multiplicador plástico
$\boldsymbol{N}$	Vetor de fluxo plástico
$\boldsymbol{H}$	Modulo de encruamento generalizado
Ψ	Potencial de fluxo plástico
δ_{ij}	Delta de Kronecker
J_2	Invariante da tensão desviadora
$\boldsymbol{s}$	Tensor de tensão desviadora de Cauchy ou Kirchhoff
σ_y	Tensão de escoamento uniaxial
$\bar{\varepsilon}^p$	Deformação plástica acumulada ou equivalente
$\boldsymbol{u}^t$	Vetor de deslocamentos no tempo t
$\mathbf{H}$	Matriz das funções de forma ou interpolação
h_k	Função de forma ou interpolação k
$\boldsymbol{U}^{\boldsymbol{t}}$	Vetor dos deslocamentos nodais no tempo t
ξ, η, ζ	Coordenadas isoparamétrica dentro de um elemento
$\boldsymbol{K_L}$	Primeira contribuição na matriz de rigidez tangente (matriz linear nos efeitos cinemáticos)
$\boldsymbol{K_{NL}}$	Segunda contribuição na matriz de rigidez tangente (matriz não linear nos efeitos cinemáticos)
$\Delta\boldsymbol{U}$	Incremento no vetor dos deslocamentos nodais
$\delta\Delta\boldsymbol{U}$	Variação no Incremento dos deslocamentos nodais
$\boldsymbol{P}^{t+\Delta t}$	Vetor de forças externas no tempo $t + \Delta t$
$\boldsymbol{F}^t$	Vetor de forças internas no tempo t
$\boldsymbol{K}$	Matriz de rigidez tangente total
$\boldsymbol{K}_j^i$	Matriz de rigidez tangente total na j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo
$\Delta\boldsymbol{U}_j^i$	Incremento no vetor dos deslocamentos nodais na j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo
$\boldsymbol{P}_j^i$	Vetor de forças externas na j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo
$\boldsymbol{F}_{j-1}^i$	Vetor de forças internas na j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo

λ_j^i	Parâmetro do incremento de carga na j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo
$\hat{\boldsymbol{P}}$	Vetor da carga de referência (constante)
$\Delta\bar{\boldsymbol{U}}_j^i$	Vetor dos deslocamentos nodais da solução tangencial na j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo
$\Delta\bar{\bar{\boldsymbol{U}}}_j^i$	Vetor dos deslocamentos nodais da solução iterativa na j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo
$\Delta\boldsymbol{U}_{qj}^i$	Componente q-ésima do incremento no vetor dos deslocamentos da j-ésima iteração do i-ésimo incremento de passo
l	Comprimento de arco prescrito na solução incremental
ν	Coeficiente de Poisson
E	Módulo de Young
$\boldsymbol{e}$	Representação matricial das componentes do tensor ${}_0e_{ij}$
$\boldsymbol{\eta}$	Representação matricial das componentes do tensor ${}_0\eta_{ij}$
$\boldsymbol{C}$	Representação matricial das componentes do tensor ${}_0C_{ijrs}$
$\boldsymbol{B}_L$	Matriz de transformação deformação-deslocamento linear
$\boldsymbol{B}_{NL}$	Matriz de transformação deformação-deslocamento não-linear
$\boldsymbol{\mathcal{S}}^t, \boldsymbol{S}^t$	Representação matricial e vetorial das componentes do tensor ${}^{t+\Delta t}_{0}S_{ij}$
F_{ij}	Componentes do tensor gradiente de deformação
$\Delta\gamma$	Incremento do multiplicador plástico
$\boldsymbol{\mathcal{E}}, \boldsymbol{\mathcal{E}}^e, \boldsymbol{\mathcal{E}}^p$	Representação matricial dos tensores $\boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ y $\boldsymbol{\varepsilon}^p$, respectivamente
$\boldsymbol{\sigma}$	Representação matricial do tensor $\boldsymbol{\sigma}$
$\boldsymbol{\mathcal{D}}^e$	Representação matricial do tensor $\boldsymbol{D}^e$
$\boldsymbol{\mathcal{D}}^{ep}$	Matriz tangente elastoplástica consistente
H	Modulo de encruamento
Δt	Intervalo de tempo