



Sandoval José Rodrigues Júnior

**Otimização de Pilares
de Edifícios Altos de Concreto Armado**

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.

Orientadores: Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães
Prof. Luiz Eloy Vaz

Rio de Janeiro, setembro de 2005



Sandoval José Rodrigues Júnior

**Otimização de Pilares
de Edifícios Altos de Concreto Armado**

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

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luiz Eloy Vaz

Co-orientador

UFRJ

Prof. Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Marta de Souza Lima Velasco

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Cláudia Ribeiro Eboli

UFRJ

Prof. Ibrahim Abd Ei Malik Shehata

UFRJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de setembro de 2005

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

Sandoval José Rodrigues Júnior

Graduou-se em Engenharia Civil na UFPA/Belém (Universidade Federal do Pará) em 1988. Concluiu o mestrado na PUC-Rio em 1996. Interesses acadêmicos em áreas de pesquisa que envolvam concreto armado, otimização de estruturas, programação matemática. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Civil da UFPA.

Ficha Catalográfica

Rodrigues Júnior, Sandoval José

Otimização de Pilares de Edifícios Altos de Concreto Armado / Sandoval José Rodrigues Júnior; orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães; co-orientador: Luiz Eloy Vaz. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

v., 154 f.: il. ; 29,7 cm

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

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Otimização. 3. Análise de sensibilidade. 4. Programação matemática. 5. Projeto ótimo. 6. Pórtico espacial. 7. Concreto armado. 8. Edifícios altos. I. Guimarães, G. B. (Giuseppe B.). II. Vaz, L. E. (Luiz Eloy). III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. IV. Título

CDD: 624

Dedicado aos meus pais,
Sandoval e Lucyléa Rodrigues

Agradecimentos

Aos meus orientadores Giuseppe Barbosa Guimarães e Luiz Eloy Vaz pela orientação e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial ao professor João Luis Pascal Roehl, por todos os conhecimentos transmitidos durante a pós-graduação.

À minha esposa Lucilene, e minhas filhas Caroline e Bruna, por todo o amor, carinho, e companheirismo que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

A toda minha família, em especial aos meus pais e meus irmãos Sandra, Jefferson e Daniele.

Aos grandes amigos Anderson e Müller, pelas excelentes discussões ao longo deste trabalho.

A todos os amigos da PUC, em especial Galvão, Ivy, Joabson, Antonio Sérgio, Antônio Miranda, Chan, Walter, Maurício, Pasquetti, Andréia e Denyse.

Aos funcionários da PUC-Rio, em particular a Ana Roxo, Lenilson, Cristiano, Euclides, Haroldo, José Nilson e Evandro.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UFPA, em especial ao grande amigo José Raimundo Serra Pacha, pelas discussões e sugestões ao presente trabalho.

À CAPES, à UFPA e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Resumo

Rodrigues Júnior, Sandoval José; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Vaz, Luiz Eloy. **Otimização de Pilares de Edifícios Altos de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2005. 154p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho propõe uma formulação para o projeto ótimo de pilares de edifícios altos de concreto armado. São variáveis de projeto as dimensões da seção transversal e a armadura longitudinal dos pilares e a resistência característica do concreto. A fim de reduzir o tamanho desta classe de problema, a estratégia de solução em multinível é aplicada. O problema é então subdividido em um problema global de otimização conectado a uma série de subproblemas individuais de otimização. No problema global são determinadas as dimensões da seção transversal de todos os pilares e a resistência característica do concreto, enquanto que nos subproblemas individuais são determinadas apenas as armaduras longitudinais dos pilares. As variáveis dos subsistemas são freqüentemente chamadas de variáveis locais, enquanto que as variáveis do sistema global, responsáveis pela interação entre os grupos de variáveis, são denominadas variáveis globais ou de acoplamento. A função objetivo do problema de otimização é o custo total das colunas do edifício. Os edifícios são modelados como pórticos espaciais e a não-linearidade geométrica é considerado na análise estrutural. A hipótese de diafragma rígido é adotada para o comportamento das lajes e a rigidez à torção é desprezada em todas as barras do pórtico. Cargas permanentes, acidentais e devidas ao vento são aplicadas ao modelo. Restrições relativas aos estados limite último e de utilização, bem como restrições relativas aos limites máximos e mínimos atribuídos a cada variável, são impostas ao problema de otimização. Adicionalmente, impõem-se restrição sobre o parâmetro de instabilidade, caso este parâmetro seja empregado na determinação dos esforços globais de 2ª ordem. Os estados limite são definidos de acordo com o código brasileiro para projeto de estruturas de concreto NBR-6118 (2003). O problema de otimização proposto é resolvido empregando-se técnicas de programação matemática.

Palavras-chave

Otimização; análise de sensibilidade; programação matemática; projeto ótimo; pórtico espacial; concreto armado; edifícios altos.

Abstract

Rodrigues Júnior, Sandoval José; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Vaz, Luiz Eloy (advisors). **Optimization of Columns of Reinforced Concrete Tall Buildings**. Rio de Janeiro, 2005. 154p. D.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work proposes a formulation for the optimum design of columns of reinforced concrete tall buildings. The design variables are the dimensions of the cross-sections and the amount of longitudinal reinforcement in the columns and the concrete characteristic resistance. Aiming at reducing the size of this class of problem, the multilevel optimization technique is applied so that the problem is subdivided into a global problem connected with a series of dependent sub-problems. In this kind of problem, the design variables are subdivided into two groups, namely, the group of the so called global variables, represented here by the cross-section dimensions of the columns and by the concrete characteristic resistance, and the group of local variables, represented here by the areas of the longitudinal steel reinforcement in the cross-sections of the columns. Consequently, a global optimization problem is defined for the global variables, at the global level, and local independent optimization sub-problems are defined for the local design variables, at the local levels, following each iteration at the global level. The objective function of the optimization problem is the total cost of the columns of the building. The buildings are modeled as three dimensional frames and geometric nonlinear behavior is considered in the structural analysis. The assumption of rigid diaphragm is adopted for the structural behavior of the slabs and the torsional stiffness of elements is neglected. Dead, live and wind loads are applied to the model. Constraints related to ultimate and serviceability limit states, as well as lateral constraints, are imposed to the design variables. The limit states are defined according to the Brazilian Code for reinforced concrete structures NBR-6118 (2003). The solution of the optimization problem is obtained using Mathematical Programming techniques.

Keywords

Optimization; sensibility analysis; mathematical programming; optimal design; three-dimensional frame; reinforced concrete; tall buildings.

SUMÁRIO

1. Introdução	16
1.1. Considerações Gerais	16
1.2. Revisão Bibliográfica	18
1.3. Objetivos e Justificativas	26
1.4. Escopo do Trabalho	29
2. Contraventamento de Edifícios de Concreto Armado	31
2.1. Parâmetros de Instabilidade	33
2.1.1. Parâmetros de Instabilidade α	34
2.1.2. Parâmetros de Instabilidade γ_z	35
2.2. Rigidez Limite do Sistema de Contraventamento	37
2.3. Projetos: Processos Ótimos e Tradicionais	37
3. Modelo e Análise Estrutural	40
3.1. Modelo Estrutural	40
3.1.1. Esforços de Eng. Perfeito e vão Efetivo das Vigas	40
3.2. Análise Estrutural	42
3.2.1. Não-Linearidade Física	42
3.2.2. Não-Linearidade Geométrica	44
3.2.3. Combinações e Fatores de Ponderação das Ações	50
3.2.4. Simulação das Lajes como pavimento Rígido	54
3.2.5. Estratégia de Solução	57
4. Concreto Armado	59
4.1. Dimensionamento à Flexão Composta Oblíqua	59
4.1.1. Características mecânicas dos materiais	59
4.1.2. Esforços Atuantes	61
4.1.3. Parâmetros de Descrição da Deformada da Seção	61
4.1.4. Esforços Resistentes de uma Seção	64
4.1.5. Dimensionamento de uma Seção	66
4.2. Dimensionamento de Pilares segundo a NBR 6118:2003	67
4.2.1. Classificação quanto à Esbeltez	68

4.2.2. Esbeltez Limite λ_1	68
4.2.3. Momento Mínimo	70
4.2.4. Imperfeições Geométricas Locais	70
4.2.5. Efeitos Locais de Segunda Ordem	71
4.2.6. Distribuição da Armadura Longitudinal A_s na seção	75
4.2.7. Comprimento de Ancoragem da Armadura Longitudinal	76
4.2.8. Armadura Transversal	77
5. Programação Matemática – Princípios Básicos	78
5.1. Considerações Gerais	78
5.2. Condições de Ótimo	79
5.3. Forma Geral dos Algoritmos de Otimização	80
5.4. Método de Newton para Problemas de otimização s/ Restrição	81
5.5. Busca Linear	82
5.6. Programação Quadrática	83
5.7. Algoritmo de Han-Powell – Programação Quadrática Seqüencial	84
5.7.1. Etapas do Algoritmo Não-Linear Han-Powell (PQS)	86
5.8. Método dos Pontos Interiores	88
5.8.1. Etapas do Algoritmo de Pontos Interiores	90
6. Otimização de Dimensões	93
6.1. Considerações Gerais	93
6.2. Otimização em Multinível	93
6.3. Metodologia de Otimização	96
6.4. Formulação do Problema de otimização	100
6.4.1. Função Objetivo	101
6.4.2. Restrições Relativas à Resistência	101
6.4.3. Limites das Armaduras Longitudinais	102
6.4.4. Estado Limite de Deformação Excessiva da Estrutura	102
6.4.5. Restrições sobre o parâmetro de Instabilidade Global γ_z	103
6.4.6. Restrições Laterais	103
6.4.7. Restrições Laterais Relativas	104
6.4.8. Fatores de Escala	104
7. Análise de Sensibilidade	107
7.1. Considerações Gerais	107

7.2. Sensibilidade dos Deslocamentos	108
7.3. Sensibilidade das Forças Externas $\{P(x)\}$	110
7.3.1. Parcelas devidas ao Peso Próprio	110
7.3.2. Parcelas devidas à consideração do vão Efetivo	110
7.3.3. Parcelas devidas ao Parâmetro γ_z	111
7.4. Sensibilidade dos Esforços Internos Solicitantes	112
7.5. Sensibilidade da Armadura	114
7.5.1. Sensibilidade da Armadura Longitudinal	114
7.5.2. Sensibilidade da Armadura Transversal	115
7.6. Sensibilidade dos Esforços Solicitantes de Projeto	116
7.6.1. Seção Crítica nos Extremos dos Pilares	116
7.6.2. Seção Crítica no Centro dos Pilares	116
7.7. Sensibilidade dos Esforços Resistentes de Projeto	117
8. Implementações Computacionais e Exemplos	119
8.1. Implementações Computacionais	119
8.2. Exemplos	121
8.2.1. Materiais: Propriedades Mecânicas e Custos	121
8.2.2. Exemplo I	122
8.2.3. Exemplo II	135
9. Conclusões e Sugestões	148
9.1. Conclusões	148
9.2. Sugestões	149
10. Referências Bibliográficas	150
ANEXO A – Fatores de Ponderação e Combinação	154

Lista de figuras

Figura 2.1 - Sistema associado de pórticos e paredes estruturais	(32)
Figura 3.1 - Vão efetivo das vigas.	(41)
Figura 3.2 - Modelo para determinação dos esforços de engastamento perfeito.	(41)
Figura 3.3 - Eixos de referência e graus de liberdade locais.....	(46)
Figura 3.4 - Imperfeições geométricas globais.....	(52)
Figura 3.5 - Deslocamentos nodais e distância entre os nós i e j	(55)
Figura 4.1 - Diagrama tensão-deformação idealizado (NBR 6118 (2003))	(59)
Figura 4.2 - Diagrama tensão-deformação para aços de armadura passiva (NBR 6118 (2003)).....	(60)
Figura 4.3 - Esforços atuantes de cálculo.	(61)
Figura 4.4 - Inclinação da linha neutra.	(62)
Figura 4.5 - Domínios de estado limite último de uma seção transversal (NBR 6118 (2203)).....	(62)
Figura 4.6 - Esquematização da deformada da seção.....	(63)
Figura 4.7 - Definição das regiões 0, I e II da seção.	(65)
Figura 4.8 - Lande de pilar - Imperfeições geométricas locais.	(70)
Figura 4.9 - Posicionamento de A_s e A_{s_w} na seção.	(75)
Figura 6.1 - Estruturas de decomposição em bloco diagonal e angular.....	(95)
Figura 6.2 - Esquema para projeto ótimo de estruturas de concreto armado em multinível.	(99)
Figura 6.3 - Tipos de seções transversais admitidas para os pilares ..	(100)
Figura 8.1 - Planta de fôrma estrutural - Exemplo I: edifício de 24 pavimentos tipo	(122)
Figura 8.2 - Variação do custo dos pilares com o f_{ck}	(124)
Figura 8.3 - Variação do custo dos pilares com o f_{ck}	(126)
Figura 8.4 - Planta de fôrma estrutural - Exemplo I: proposta (I).....	(128)
Figura 8.5 - Planta de fôrma estrutural - Exemplo I: proposta (II).....	(129)

Figura 8.6 - Redução relativa do custo dos pilares com respeito a redução de seção.....	(130)
Figura 8.7 - Redução relativa de material dos pilares com respeito a redução de seção.....	(131)
Figura 8.8 - Variação relativa de material para o modelo $R(0)$ considerando possíveis variações no custo do concreto.	(134)
Figura 8.9 - Planta de fôrma estrutural - Exemplo II: edifício de 24 pavimentos tipo	(137)
Figura 8.10 - Redução relativa do custo dos pilares com respeito a redução de seção.....	(138)
Figura 8.11 - Redução relativa de material dos pilares com respeito a redução de seção.....	(139)
Figura 8.12 - Redução relativa do custo dos pilares com respeito a redução de seção: comparação entre os métodos SQP e IP.....	(142)
Figura 8.13 - Verificação da capacidade resistente do pilar P1, lance1 (opção 1).	(144)
Figura 8.14 - Verificação da capacidade resistente do pilar P1, lance1 (opção 2).	(144)
Figura 8.15 - Verificação da capacidade resistente do pilar P3, lance1 (opção 1).	(145)
Figura 8.16 - Verificação da capacidade resistente do pilar P3, lance1 (opção 2).	(146)

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Correspondência entre os domínios dos E.L.U. (NBR 6118 (2003)) e os valores do parâmetro D e das funções ε_s e ε_i (63)

Tabela 5.1 - Divisão dos problemas de Programação Matemática (80)

Tabela 8.1 - Preços de concreto massa ($R\$/m^3$)..... (121)

Tabela 8.2 - Variação do parâmetro de instabilidade γ_z com o f_{ck} ... (125)

Tabela 8.3 - Resultados ótimos (cm): Classe C35 (127)

Tabela 8.4 - Variação do parâmetro γ_z com respeito a redução de seção..... (131)

Tabela 8.5 - Resultados ótimos para o modelo R(0) (132)

Tabela 8.6 - Resultados ótimos para o modelo R(1) (132)

Tabela 8.7 - Resultados ótimos para o modelo R(2) (132)

Tabela 8.8 - Resultados ótimos para o modelo R(3) (133)

Tabela 8.9 - Deslocamentos máximos relativos no topo do prédio (133)

Tabela 8.10 - Variação da taxa de armação com respeito a redução de seção (%) (134)

Tabela 8.11 - Resultados ótimos para o modelo R(0) considerando possíveis variações no custo do concreto..... (135)

Tabela 8.12 - Variação do parâmetro γ_z com respeito à redução de seção..... (139)

Tabela 8.13 - Deslocamentos máximos no topo do prédio (140)

Tabela 8.14 - Resultados ótimos para o modelo R(0) (140)

Tabela 8.15 - Resultados ótimos para o modelo R(1) (140)

Tabela 8.16 - Resultados ótimos para o modelo R(2) (140)

Tabela 8.17 - Resultados ótimos para o modelo R(3) (141)

Tabela 8.18 - Variação da taxa de armação com a redução de seção (141)

Tabela 8.19 - Tempos de processamento - SQP x IP (142)

Tabela A.1 - Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$ (NBR 6118 (2003)) (154)

Tabela A.2 - Valores do coeficiente γ_{f2} (NBR 6118 (2003)) (154)