



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Miguel Henrique de Oliveira Costa

**Modelagem do comportamento estrutural de sistemas treliçados espaciais para escoramentos de estruturas de aço, concreto e mistas (aço-concreto)**

Rio de Janeiro

2012

Miguel Henrique de Oliveira Costa

**Modelagem do comportamento estrutural de sistemas treliçados espaciais  
para escoramentos de estruturas de aço, concreto e mistas (aço-concreto)**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C838 Costa, Miguel Henrique de Oliveira.  
Modelagem do comportamento estrutural de sistemas treliçados espaciais para escoramentos de estruturas de aço, concreto e mistas (aço-concreto) / Miguel Henrique de Oliveira Costa. – 2012.  
134f.

Orientador: José Guilherme Santos da Silva.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Aço – Estruturas - Dissertações. 2. Concreto – Estruturas - Dissertações. 3. Estruturas mistas de aço e concreto - Dissertações. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 624.016

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada à fonte.

---

Assinatura

---

Data

Miguel Henrique de Oliveira Costa

**Modelagem do comportamento estrutural de sistemas treliçados espaciais  
para escoramentos de estruturas de aço, concreto e mistas (aço-concreto)**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 03 de maio de 2012.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Raul Rosas e Silva  
Pontifícia Universidade Católica – PUC-Rio  
Departamento de Engenharia Civil

Rio de Janeiro

2012

## DEDICATÓRIA

A Deus, por iluminar meu caminho durante essa trajetória, à minha família e esposa por apoiarem e respeitarem minhas escolhas e em especial à minha mãe pelo exemplo de luta, perseverança e incentivo em todos os momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

Especial a minha mãe, minhas irmãs, irmãos e a todos familiares pelo incentivo e motivação.

A minha esposa Thais de Alcantara Oliveira e família pela paciência e apoio nesses momentos tão desafiadores, que nos exigiram tanto um do outro.

Ao meu orientador, Professor José Guilherme, pelo aprendizado nesses dois anos de mestrado.

Ao professor Luciano que me incentivou no e ao longo do curso e aos demais professores do PGECIV pelos ensinamentos.

Aos meus amigos de trabalho pela paciência com os meus estudos. À Mills Estruturas e Serviços de Engenharia S/A, pelo suporte material e técnico, em especial a Avelino e Vinicius pelo entendimento e compreensão das dificuldades dessa fase tão importante na minha carreira profissional e realização pessoal.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário. Aos estagiários e funcionários do LABBAS – UERJ.

À UERJ, pelo acolhimento, à CAPES pelo apoio financeiro e a todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

E a Deus, acima de tudo, que me dá saúde e força para cada etapa da vida.

Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso  
desistir, pois pra mim, vencer é a única solução

*Albert Einstein*

## RESUMO

COSTA, Miguel Henrique de Oliveira. *Modelagem do comportamento estrutural de sistemas treliçados espaciais para escoramentos de estruturas de aço, concreto e mistas (aço-concreto)*. 2012. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

A utilização de treliças para o escoramento de elementos estruturais de concreto armado e aço é considerada uma solução eficaz para o atual sistema de construção de engenharia civil. Uma mudança de atitude no processo de construção, associado com a redução dos custos causou um aumento considerável na utilização de treliças tridimensionais em aço com maior capacidade de carga. Infelizmente, o desenho destes sistemas estruturais baseia-se em cálculos muito simplificados relacionadas com vigas de uma dimensão, com propriedades de inércia constantes. Tal modelagem, muito simplificada, não pode representar adequadamente a resposta real dos modelos estruturais e pode levar a inviabilidade econômica ou mesmo inseguro desenho estrutural. Por outro lado, estas estruturas treliçadas estão relacionadas com modelos de geometria complexa e são desenhados para suportar níveis de cargas muito elevadas. Portanto, este trabalho de investigação propôs modelos de elementos finitos que representam o caráter tridimensional real do sistema de escoramento, avaliando o comportamento estático e dinâmico estrutural com mais confiabilidade e segurança. O modelo computacional proposto, desenvolvido para o sistema estrutural não linear de análise estática e dinâmica, aprovou as habituais técnicas de refinamento de malha presentes em simulações do método de elementos finitos, com base no programa ANSYS [1]. O presente estudo analisou os resultados de análises linear-elástica e não linear geométrica para ações de serviço, físicos e geométricos para as ações finais. Os resultados do presente estudo foram obtidas, com base na análise linear-elástica e não linearidade geométrica e física, e comparados com os fornecidos pela metodologia simplificada tradicional de cálculo e com os limites recomendadas por normas de concepção.

Palavras-chave: Sistemas de treliças tridimensionais; Análise não linear; O comportamento estrutural.

## ABSTRACT

The use of lattice structures for shoring of steel, composite and reinforced concrete structures is considered an effective solution in the construction of civil engineering systems. An attitudinal change in the construction process associated with costs reduction has caused a considerable increase in the use of three-dimensional lattice steel truss systems with greater load capacity. Unfortunately, the design of these structural systems is based on very simplified calculations related to one-dimensional beams with constant inertia properties. Such a very simplified modeling cannot adequately represent the actual response of the structural models and can lead to uneconomic or even unsafe structural design. On the other hand, these lattice steel structures are related to three-dimensional models of complex geometry and are designed to support very high loading levels. Therefore, this work research has proposed finite element models that represent the actual three-dimensional character of shoring system, evaluating the static and dynamic structural behavior with more reliability and security. The proposed computational model, developed for the structural system non-linear static and dynamic analysis, adopted the usual mesh refinement techniques present in finite element method simulations, based on the Annoys program. The present study has considered the results of a linear-elastic and non-linear geometric analysis for serviceability actions, physical and geometrical nonlinear analysis for ultimate actions. The results of the present investigation were obtained, based on linear-elastic and non-linear geometric and physical analysis, and compared with those supplied by the traditional simplified methodology of calculation and with the limits recommended by design standards.

Keywords: Three-dimensional lattice truss systems; Non-linear analysis; Structural behavior.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Viaduto sobre a Avenida dos Imigrantes - SP.....	20
Figura 2– Escoramento de obra de arte em estrutura elevada .....	21
Figura 3– Escoramento com treliça M-150.....	21
Figura 4– Obra de arte em estrutura elevada.....	21
Figura 5– Escoramento de obra de arte da passarela da Rocinha .....	22
Figura 6– Escoramento de obra de arte da ponte do Saber - RJ.....	22
Figura 7– Configuração da montagem da treliça.....	30
Figura 8– Vista tridimensional da estrutura montada (Modelo - IX).....	31
Figura 9– Configuração dos modelos apresentados .....	32
Figura 10– Configuração dos modelos estruturais I,V e IX .....	39
Figura 11– Configuração dos modelos estruturais II,VI e X .....	40
Figura 12– Configuração dos modelos estruturais III,VII e XI .....	41
Figura 13– Configuração dos modelos estruturais IV, VIII e XII.....	42
Figura 14– Modelo estrutural I.....	46
Figura 15– Modelo estrutural II.....	46
Figura 16– Modelo estrutural III.....	46
Figura 17– Modelo estrutural IV .....	47
Figura 18– Modelo estrutural V .....	47
Figura 19– Modelo estrutural VI .....	47
Figura 20– Modelo estrutural VII .....	48
Figura 21– Modelo estrutural VIII .....	48
Figura 22– Modelo estrutural IX .....	48
Figura 23– Modelo estrutural X .....	49
Figura 24– Modelo estrutural XI .....	49
Figura 25– Modelo estrutural XII .....	49
Figura 26– Elemento BEAM 44.....	50
Figura 27– Elemento finito de tubo 3D PIPE16.....	50
Figura 28– Elemento finito de tubo LINK8 ANSYS [1].....	51
Figura 29– Gráfico da rigidez pós limite .....	51
Figura 30– Modos de Vibração do Modelo Estrutural I. ....	55
Figura 31– Modos de Vibração do Modelo Estrutural V. ....	56

Figura 32– Modos de Vibração do Modelo Estrutural IX. ....	57
Figura33– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo I. ....	60
Figura34– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo V ....	60
Figura35– Deformada do Modelo estrutural I e V.....	61
Figura36– Esforços Normais do Modelo estrutural I ....	62
Figura37– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo II. ....	63
Figura38– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo VI ....	63
Figura39– Deformada do Modelo estrutural II e VI.....	64
Figura40– Esforços Normais do Modelo estrutural II e VI ....	65
Figura41– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo III. ....	66
Figura42– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo VII ....	66
Figura43– Deformada do Modelo estrutural III e VII.....	67
Figura44– Esforços Normais do Modelo estrutural III e VII ....	68
Figura45– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo IV. ....	69
Figura46– Carga distribuída em função do deslocamento no Modelo VIII ....	69
Figura47– Deformada do Modelo estrutural IV e VIII ....	70
Figura48– Esforços Normais do Modelo estrutural IV e VIII.....	71
Figura 49– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo I. ....	74
Figura 50– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo V.....	74
Figura 51– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo IX. ....	75
Figura 52– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo I ....	77
Figura 53– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo V ....	78
Figura 54– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo IX.....	79
Figura 55– Deformada no eixo y do Modelo estrutural I.....	80
Figura 56– Deformada no eixo y do Modelo estrutural V ....	80
Figura 57– Deformada no eixo y do Modelo estrutural IX.....	81
Figura 58– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo II. ....	82
Figura 59– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo VI.....	82
Figura 60– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo X. ....	83
Figura 61– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo II ....	85
Figura 62– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo VI.....	86
Figura 63– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo X.....	87
Figura 64– Deformada no eixo y do Modelo estrutural II.....	88
Figura 65– Deformada no eixo y do Modelo estrutural VI ....	88

Figura 66– Deformada no eixo y do Modelo estrutural X .....	89
Figura 67– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo III. ....	90
Figura 68– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo VII. ....	90
Figura 69– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo XI. ....	91
Figura 70– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo III .....	93
Figura 71– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo VII .....	94
Figura 72– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo XI .....	95
Figura 73– Deformada no eixo y do Modelo estrutural III.....	96
Figura 74– Deformada no eixo y do Modelo estrutural VII .....	96
Figura 75– Deformada no eixo y do Modelo estrutural XI .....	97
Figura 76– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo IV. ....	98
Figura 77– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo VIII. ....	98
Figura 78– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo XII. ....	99
Figura 79– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo IV .....	101
Figura 80– Evolução das tensões de Von Misses (MPa) no modelo VIII .....	102
Figura 81– Evolução das tensões de Von Misses no modelo XII.....	103
Figura 82– Deformada no eixo y do Modelo estrutural IV .....	104
Figura 83– Deformada no eixo y do Modelo estrutural VIII .....	104
Figura 84– Deformada no eixo y do Modelo estrutural XII .....	105
Figura 85– Projeto da estrutura estudada .....	107
Figura 86– Corte da estrutura estudada.....	108
Figura 87– Esquema de aplicação das propriedades do material.....	119
Figura 88– Esquema de aplicação de deslocamento no nó.....	119
Figura 89– Esquema de configuração da análise não linear.....	120
Figura 90– Janela de convergência com interações .....	121
Figura 91– Confirmação que o modelo possui solução.....	121
Figura 92– Janela de análise dos deslocamentos.....	122
Figura 93– Janela de análise do histórico dos deslocamentos .....	123
Figura 94– Janela de análise do histórico dos esforços.....	123
Figura 95– Gráfico carga versus deslocamento .....	124
Figura 96– Salvar dados em formato txt .....	124
Figura 94– Modos de Vibração do Modelo Estrutural II. ....	125
Figura 95– Modos de Vibração do Modelo Estrutural III. ....	126
Figura 96– Modos de Vibração do Modelo Estrutural IV. ....	127

Figura 97– Modos de Vibração do Modelo Estrutural VI. ....	128
Figura 98– Modos de Vibração do Modelo Estrutural VII. ....	129
Figura 99– Modos de Vibração do Modelo Estrutural VIII. ....	130
Figura 100– Modos de Vibração do Modelo Estrutural X. ....	131
Figura 101– Modos de Vibração do Modelo Estrutural XI. ....	132
Figura 102– Modos de Vibração do Modelo Estrutural XII. ....	133

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Fator de imperfeição.....	36
Tabela 2– Propriedades físicas e geométricas das seções .....	43
Tabela 3– Frequências naturais dos modelos investigados.....	53
Tabela4– Variação do deslocamento vertical em função da carga distribuída no Modelo I e V. ....	62
Tabela5– Variação do deslocamento vertical em função do carga distribuída no Modelo II e VII. ....	65
Tabela6– Variação do deslocamento vertical em função do carga distribuída no Modelo III e VII. ....	68
Tabela7– Variação do deslocamento vertical em função do carga distribuída no Modelo IV e VIII. ....	71
Tabela 8 – Resumo das cargas dos modelos de análise linear .....	72
Tabela 8 – Carga Crítica do modelo numérico linear nos modelos I, V e IX .....	75
Tabela 9 – Cargas Crítica numérica dos modelos I, V e IX.....	76
Tabela 10– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo I, V e IX....	81
Tabela 11 – Carga Crítica do modelo numérico linear nos modelos II, VI e X .....	83
Tabela 12 – Cargas Crítica numérica dos modelos II, VI e X.....	84
Tabela 13– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo II, VI e X...89	
Tabela 14 – Carga Crítica do modelo numérico linear nos modelos III, VII e XI .....	91
Tabela 15 – Cargas Crítica numérica dos modelos III, VII e XI.....	92
Tabela 16– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo III, VII e XI. .....	97
Tabela 17 – Carga Crítica do modelo numérico linear nos modelos IV, VIII e XII.....	99
Tabela 18 – Cargas Crítica numérica dos modelos IV, VIII e XII.....	100
Tabela 19– Deslocamento em função da carga concentrada no Modelo IV, VIII e XII. .....	105
Tabela 20 – Resumo das cargas de plastificação .....	106
Tabela 21– Propriedades físicas do concreto estrutural .....	109
Tabela 22– Carregamento por metro linear .....	109
Tabela 23– Deslocamento vertical e esforço normal em função da carga distribuída .....	110

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

M-150	Pórtico espacial treliçado
PUC - Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
EUROCODE	European Committee for Standardisation
DEC	Departamento de Engenharia Civil
MSP	Modelo Simplificado de Projeto
ELUMSP	Estado Limite Último sobre o Modelo Simplificado de Projeto.
ELUMNL	Estado Limite Último sobre o Modelo Numérico Linear
MNL	Modelo Numérico Linear sem ponderação dos carregamentos
MNNL	Modelo Numérico Não Linear sem ponderação dos carregamentos
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_n$	Área líquida da barra
$A_g$	Área bruta da seção transversal
$A_e$	Área líquida da seção transversal
$A_{net}$	Área total líquida da seção transversal
$d$	Diâmetro do furo na linha de ruptura
$n$	Quantidade de furos na linha de ruptura
$t$	Espessura da seção transversal
$E$	Módulo de elasticidade
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\alpha$	Coeficiente de dilatação térmica
$\rho$	Densidade do aço
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus Celsius
$\text{N}$	Newton
$\text{kg}$	Quilograma
$f_y$	Tensão limite de escoamento
$f_u$	Tensão última de ruptura
$\gamma_{M0}$	Coeficiente de resistência
$\gamma_{M1}$	Coeficiente de resistência
$\gamma_{M2}$	Coeficiente de resistência
$\gamma_{a1}$	Coeficiente de resistência
$\gamma_{a2}$	Coeficiente de resistência
$C_t$	Fator de redução da área líquida
$\chi$	Fator de redução relativo às curvas de flambagem
$Q$	Fator de redução total a flambagem local
$k_r$	Fator de redução de ruptura
$\alpha$	Fator de imperfeição generalizada
$\lambda$	Índice de esbeltez
$\lambda_E$	Índice de esbeltez Euleriano
$N_{pl,rd}$	Carga última de escoamento da seção bruta
$N_{u,rd}$	Carga última de projeto de ruptura da seção líquida

$N_{t,rd}$	Força normal de tração da seção transversal
$N_d$	Carregamento solicitante
$N_{b,rd}$	Força última de projeto de escoamento da seção bruta
$N_{c,rd}$	Força última de projeto resistente à compressão
$N_e$	Força axial de flambagem elástica
$\sigma$	Tensão

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	20
1	<b>ASPECTOS DE PROJETO E SITUAÇÃO DO ASSUNTO</b> .....	30
1.1	<b>Recomendações de Projeto</b> .....	32
1.1.1	Recomendações de projeto ABNT NBR 8800 [2].....	33
1.1.1.1	Resistência à tração do elemento estrutural:.....	33
1.1.1.2	Resistência à compressão do elemento estrutural: .....	34
1.1.2	Recomendações de projeto Eurocode 3 [6].....	35
1.1.2.1	Resistência à tração do elemento estrutural:.....	35
1.1.2.2	Resistência à compressão do elemento estrutural: .....	36
2	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO</b> .....	38
2.1	<b>Introdução</b> .....	38
2.2	<b>Modelos Estruturais Investigados</b> .....	39
2.3	<b>Características físicas e geométricas das seções</b> .....	43
3	<b>MODELAGEM COMPUTACIONAL</b> .....	45
3.1	<b>Introdução</b> .....	45
3.2	<b>Modelos Numéricos</b> .....	45
4	<b>ANÁLISE DE MODOS DE VIBRAÇÃO E FREQUÊNCIAS</b> .....	52
4.1	<b>Generalidades</b> .....	52
4.2	<b>Análise das frequências naturais (Autovalores)</b> .....	52
4.3	<b>Análise dos modos de vibração (Autovetores)</b> .....	54
5	<b>ANÁLISE LINEAR ELÁSTICA</b> .....	59
5.1	<b>Introdução</b> .....	59
5.2	<b>Modelos Estruturais</b> .....	60
5.2.1	Modelo Estrutural I e V - Análise de deslocamentos e esforços máximos....	60
5.2.2	Modelo Estrutural II e VI - Análise de deslocamentos e esforços máximos..	63
5.2.3	Modelo Estrutural III e VII - Análise de deslocamentos e esforços máximos	66
5.2.4	Modelo Estrutural IV e VIII - Análise de deslocamentos e esforços máximos .....	69
6	<b>ANÁLISE NÃO LINEAR DOS MODELOS INVESTIGADOS</b> .....	73
6.1	<b>Introdução</b> .....	73

6.1.1	Modelo Estrutural I, V e IX - Análise de deslocamentos, esforços e tensões .....	74
6.1.2	Modelo Estrutural II, VI e X - Análise de deslocamentos, esforços e tensões .....	82
6.1.3	Modelo Estrutural III, VII e XI - Análise de deslocamentos, esforços e tensões .....	90
6.1.4	Modelo Estrutural IV, VIII e XII - Análise de deslocamentos, esforços e tensões .....	98
7	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	107
7.1	<b>Premissas de utilização</b> .....	108
8	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	111
8.1	<b>Introdução</b> .....	111
8.2	<b>Considerações finais</b> .....	111
8.3	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	114
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	115
	<b>APÊNDICE A</b> .....	118
	<b>APÊNDICE B</b> .....	125