

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**MODELO ESTRUTURAL QUALITATIVO PARA PRÉ-
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Ouro Preto, agosto de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**MODELO ESTRUTURAL QUALITATIVO PARA PRÉ-
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

MÁRCIO SEQUEIRA DE OLIVEIRA

ORIENTADORA: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, agosto de 2008

Aos meus pais, José Carlos e Jorgina.

Agradecimentos

A origem deste trabalho remonta ao período 2004/2005 durante o curso de especialização em Estruturas Metálicas CEACOM III realizado na cidade de Belo Horizonte – MG. Durante esse período várias pessoas contribuíram para que fosse possível o desenvolvimento desta pesquisa, dentre essas gostaria de agradecer: ao professor e amigo Célio Firmo, que desde aquela época como professor do curso, proporcionou conversas e debates instigantes sobre o tema que, de certa forma, fizeram nascer a idéia deste trabalho; ao Professor Luis Fernando Loureiro Ribeiro pelo convite a participar do mestrado em Construções Metálicas na Universidade Federal de Ouro Preto; e aos arquitetos Ascanio Merrighi e Pedrosvaldo Caram Santos que desde o princípio acreditaram no meu trabalho, me incentivaram de forma encorajadora e através da Superintendência de Desenvolvimento e Aplicação do Aço da USIMINAS/COSIPA proporcionaram todo o suporte financeiro deste projeto.

Gostaria de agradecer a professora e orientadora Arlene Sarmanho Freitas pela confiança, dedicação, incentivo e orientação ao longo dessa pesquisa, e a todos os funcionários do laboratório de estruturas da Universidade Federal de Ouro Preto que contribuíram para a realização dos ensaios.

Durante o mestrado vários colegas fizeram contribuições importantes. Comentários para o engenheiro Francisco Canazart Mendes, que ajudou com a análise computacional das estruturas através de orientações na utilização do *software* SAP 2000; a arquiteta Eliana Nunes pelos debates, conversas e opiniões sobre o trabalho; o arquiteto Célio Firmo por estar sempre disposto a ajudar; meu pai, José Carlos, pela colaboração na execução de algumas peças do modelo; e todos os colegas do Mestrado pela companhia nos estudos durante o curso.

Um “*Obrigado Especial*” aos meus pais, José Carlos e Jorgina, ao meu irmão Felipe e a minha namorada, Bianca, pelo amor e carinho, e por sempre estarem ao meu lado apoiando minhas idéias e meus projetos de vida.

Resumo

As primeiras e mais importantes decisões na concepção de um projeto estrutural, que visa tanto os aspectos estéticos como também os econômicos, são valores qualitativos e intuitivos. É de extrema importância que o profissional envolvido neste processo, seja ele o arquiteto ou o engenheiro, tenha a habilidade de visualizar e compreender o comportamento das estruturas em diferentes circunstâncias. Tendo em vista estes aspectos, este trabalho apresenta estudos experimentais para a avaliação do comportamento de um modelo estrutural qualitativo, intitulado *Maquete Estrutural*. Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma metodologia experimental alternativa que valida o modelo e que consiste basicamente de comparações utilizando imagens digitalizadas. Para isso, foram realizados ensaios de diversos sistemas estruturais planos e espaciais, concebidos na *Maquete Estrutural*. Posteriormente, esses ensaios foram comparados com os resultados obtidos a partir de simulações dos mesmos sistemas em *software* comercial. Os resultados comparados foram das deformadas dos sistemas sob carregamento previamente definido. Os resultados experimentais constataam que o comportamento da *Maquete Estrutural* é realmente similar ao comportamento de uma estrutura real. Após a validação do modelo, são apresentadas algumas formas de aplicação da *Maquete Estrutural* para a pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas e a montagem de diversas edificações existentes com o objetivo de demonstrar a versatilidade do modelo.

Abstract

The most important decisions in a design process of a structure, in terms of both aesthetic and economy, are qualitative and intuitive values. It's important that the professionals involved in the design process, both Architect and Structural Engineer, should have the ability to visualize and understand the structural behavior at any circumstances. In this way, this work presents an experimental research to evaluate the behavior of a Qualitative Structural Model called *Maquete Estructural*. This work presents an alternative experimental methodology that consists basically of comparing digital images. Many structural systems, both plane and spatial, built with the *Maquete Estructural*, were tested and compared with computer simulations. Only the results of the deformed shape of the structural systems were compared. The experimental results show that the model's behavior it is really similar of a real structural behavior. After the model's validation are presented some applications of the *Maquete Estructural* for pre-evaluation of steel structures behavior and representations of different existent structures to demonstrate the versatility of the proposed structural model.

Sumário

Agradecimentos.....	IV
Resumo.....	V
Abstract.....	VI
Lista de Figuras.....	X
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais	2
1.2 Objetivos	8
1.3 Justificativa.....	8
1.4 Estruturação do Trabalho	11
Capítulo 2 Modelos Estruturais.....	13
2.1 Introdução.....	14
2.2 Definição e classificação dos modelos estruturais	15
2.2.1 <i>Modelo Qualitativo</i>	16
2.2.2 <i>Modelo Indireto</i>	17
2.2.3 <i>Modelo Direto</i>	20
2.2.4 <i>Modelo Reduzido</i>	20
2.2.5 <i>Modelo Dinâmico</i>	21
2.2.6 <i>Outras Classificações</i>	24
2.3 Modelos estruturais qualitativos para o ensino de estrutura	25
Capítulo 3 Maquete Estrutural.....	42
3.1 Introdução.....	43
3.2 Filosofia de ensino	44
3.3 Evolução da Maquete Estrutural.....	50
3.4 Elementos da Maquete Estrutural	55
Capítulo 4 Programa Experimental	66
4.1 Introdução.....	67
4.2 Metodologia	68
4.2.1 <i>Montagem do modelo</i>	68

4.2.2 <i>Digitalização</i>	69
4.2.3 <i>Simulação computacional</i>	71
4.2.4 <i>Preparação e sobreposição das imagens</i>	72
4.2.5 <i>Comparação dos resultados</i>	74
Capítulo 5 Apresentação e Análise dos Resultados.....	76
5.1 <i>Introdução</i>	77
5.2 <i>Estruturas Planas</i>	77
5.2.1 <i>Coluna</i>	77
5.2.2 <i>Viga</i>	81
5.2.3 <i>Pórtico</i>	85
5.2.4 <i>Viga contínua</i>	94
5.2.5 <i>Arco</i>	98
5.2.6 <i>Treliça</i>	102
5.3 <i>Estruturas Espaciais</i>	107
5.3.1 <i>Pórtico Espacial 1</i>	107
5.3.2 <i>Pórtico Espacial 2</i>	111
5.3.3 <i>Pórtico Espacial 3</i>	115
5.3.4 <i>Treliça Espacial</i>	120
Capítulo 6 Aplicações da Maquete Estrutural em Estruturas Metálicas.....	122
6.1 <i>Introdução</i>	123
6.2 <i>Estudo 1 - Influência das ligações</i>	123
6.3 <i>Estudo 2 - Influência do arranjo na estabilidade de sistemas</i>	133
6.4 <i>Estudo 3 - Estabilidade global e efeitos de segunda ordem</i>	135
Capítulo 7 Avaliação de Edificações Existentes.....	141
7.1 <i>Introdução</i>	142
7.2 <i>Apresentação das edificações</i>	143
Capítulo 8 Considerações Finais.....	154
8.1 <i>Conclusões</i>	155
8.2 <i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	158
Referências Bibliográficas.....	159

Apêndice..... 166

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 – Imagens do livro *Sistemas Estruturais*..... 5

Capítulo 2

Figura 2.1 – Modelos estruturais qualitativos de pórticos espaciais.....	16
Figura 2.2 – Modelo indireto de Antonio Gaudí para a Crípta da Capela Guell.....	18
Figura 2.3 – Modelos indiretos de Frei Otto.....	19
Figura 2.4 – Modelo indireto do projeto de cobertura para o praça-anfiteatro da UFOP	19
Figura 2.5 – Modelo reduzido em escala 1/45 da plataforma de petróleo Carapeba 3.....	21
Figura 2.6 – Estudo de caso da barragem da Usina Hidrelétrica Melissa no estado do Paraná..	21
Figura 2.7 – Imagens do colapso da ponte de Tacoma Narrows em 1940.....	22
Figura 2.8 – Modelo dinâmico da ponte de Tacoma Narrows.....	23
Figura 2.9 – Estudo da resposta dinâmica do complexo viário Jornalista Roberto Marinho	23
Figura 2.10 – Complexo viário Jornalista Roberto Marinho.....	23
Figura 2.11 – Modelos em mesas vibratórias.....	24
Figura 2.12 – Gunt Hamburg: equipment for engineering education.....	26
Figura 2.13 – Aluizio F. Margarido: projeto de um modelo estrutural qualitativo	27
Figura 2.14 – José Amaro dos Santos: modelos estruturais qualitativos.....	27
Figura 2.15 – José Amaro dos Santos: modelo estrutural qualitativo número 56.....	28
Figura 2.16 – Zacarias Chamberlain: modelo estrutural proposto por Santos (1983).....	28
Figura 2.17 – FAU/UFRJ: modelo estrutural proposto por Santos (1983).....	29
Figura 2.18 – Yopanan Rebello: modelos estruturais qualitativos.....	29
Figura 2.19 – Yopanan Rebello: aula com modelos “humanos”.....	29
Figura 2.20 – Representação do sistema estrutural da ponte Forth Railway Bridge	30
Figura 2.21 – Aluizio F. Margarido: projeto de modelos estruturais qualitativos.....	31
Figura 2.22 – Zacarias Chamberlain: modelos estruturais qualitativos de treliças planas.....	31
Figura 2.23 – FAU/UFRJ: modelos didático.....	32
Figura 2.24 – Barry Hilson: modelos estruturais qualitativos	33
Figura 2.25 – Drexel University: modelo de uma geodésica com três apoios.....	33
Figura 2.26 – W. G. Godden: modelo estrutural qualitativo	34
Figura 2.27 – Structures Spagettis Franchissements: modelos estruturais com espaguetes.....	34

Figura 2.28 – V & M macaroni construction competition	35
Figura 2.29 – UFRGS: competição de pontes de espaguete.....	35
Figura 2.30 – Structures et Forces: modelos estruturais	36
Figura 2.31 – UFOP: primeira competição de pontes de madeira balsa.....	37
Figura 2.32 – UFOP: modelos estruturais de vigas perfil “I”.....	37
Figura 2.33 – UFOP: modelos estruturais de grelhas.....	38
Figura 2.34 – Célio Firmo: modelos didáticos desenvolvidos a partir do “Quadro”.....	38
Figura 2.35 – Imagens da animação de uma coluna sujeita a compressão.....	39
Figura 2.36 – Building Big: Imagens retiradas das animações do Forces Lab.....	40
Figura 2.37 – Building Big: Imagens retiradas das animações do Loads Lab.....	40
Figura 2.38 – Building Big: Imagens retiradas das animações do Materials Lab.....	40

Capítulo 3

Figura 3.1 – Salvadori Education Center: hands-on/minds-on actives.....	45
Figura 3.2 – Gráfico do processo de aprendizagem Learning by Making da Lego Education... 46	46
Figura 3.3 – Lego structures: kit para montagem de sistemas estruturais.....	47
Figura 3.4 – Produtos educacionais da Educational Innovations.....	47
Figura 3.5 – Imagens do livro Conceptual Physics	48
Figura 3.6 – Experimentação e conhecimento teórico.....	49
Figura 3.7 – Primeira montagem da Maquete Estrutural com peças de madeira.....	51
Figura 3.8 – Teste com tubos plásticos.....	52
Figura 3.9 – Teste com mangueiras de borracha.....	52
Figura 3.10 – Teste com madeira e arames metálicos embutidos nas mangueiras de borracha. 52	52
Figura 3.11 – Teste com molas metálicas	53
Figura 3.12 – Analogia das seções transversais de uma viga com os passos da mola.....	54
Figura 3.13 – Primeira apresentação da Maquete Estrutural no curso CEACOM III.....	55
Figura 3.14 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: pilares e vigas.....	56
Figura 3.15 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: contraventamentos e tirantes.....	56
Figura 3.16 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: lajes e paredes.....	57
Figura 3.17 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: cabos.....	57
Figura 3.18 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: arcos.....	57
Figura 3.19 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação rotulada.....	58
Figura 3.20 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação rígida.....	58
Figura 3.21 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação contínua	59

Figura 3.22 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação de base.....	59
Figura 3.23 – Processo de montagem e liberdade de criação da Maquete Estrutural.....	59
Figura 3.24 – Dimensão dos pilares e vigas da Maquete Estrutural.....	61
Figura 3.25 – Comparação das molas de comprimentos diferentes para colunas.....	62

Capítulo 4

Figura 4.1 – Montagem do modelo.....	68
Figura 4.2 – Peças utilizadas para a estabilização das estruturas planas.....	69
Figura 4.3 – Aparato instrumental utilizado na análise experimental.....	70
Figura 4.4 – Digitalização do modelo deformado.....	70
Figura 4.5 – Simulação computacional no software SAP2000.....	71
Figura 4.6 – Exemplo da correlação de escala do modelo com a modelagem computacional...	71
Figura 4.7 – Preparação das imagens no software Adobe Photoshop.....	73
Figura 4.8 – Perspectiva gerada pelo software com seus respectivos pontos de fuga.....	74
Figura 4.9 – Sobreposição das imagens.....	75

Capítulo 5

Figura 5.1 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 1.....	78
Figura 5.2 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 2.....	79
Figura 5.3 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 3.....	80
Figura 5.4 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 4.....	81
Figura 5.5 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 5.....	82
Figura 5.6 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 6.....	83
Figura 5.7 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 7.....	84
Figura 5.8 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 8.....	85
Figura 5.9 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 9.....	86
Figura 5.10 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 10.....	87
Figura 5.11 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 11.....	88
Figura 5.12 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 12.....	89
Figura 5.13 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 13.....	90
Figura 5.14 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 14.....	91
Figura 5.15 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 15.....	92
Figura 5.16 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 16.....	93

Figura 5.17 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 17.....	94
Figura 5.18 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 18.....	95
Figura 5.19 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 19.....	96
Figura 5.20 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 20.....	97
Figura 5.21 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 21.....	98
Figura 5.22 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 22.....	99
Figura 5.23 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 23.....	100
Figura 5.24 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 24.....	101
Figura 5.25 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 25.....	102
Figura 5.26 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 26.....	103
Figura 5.27 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 27.....	104
Figura 5.28 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 28.....	105
Figura 5.29 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 29.....	106
Figura 5.30 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 1	108
Figura 5.31 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 2	109
Figura 5.32 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 3	110
Figura 5.33 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 4	111
Figura 5.34 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 5	112
Figura 5.35 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 6	113
Figura 5.36 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 7	114
Figura 5.37 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 8	115
Figura 5.38 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 9	116
Figura 5.39 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 10.....	117
Figura 5.40 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 11	118
Figura 5.41 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 12.....	119
Figura 5.42 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 13	120
Figura 5.43 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 14.....	121

Capítulo 6

Figura 6.1 – Imagens da residência utilizada no estudo 1.....	124
Figura 6.2 – Desenhos esquemáticos do projeto da residência utilizada no estudo 1.....	125
Figura 6.3 – Parte da estrutura da residência utilizada na simulação.....	126
Figura 6.4 – Estrutura utilizada para a simulação	126
Figura 6.5 – Sobreposição das imagens: configuração 1	127

Figura 6.6 – Sobreposição das imagens: configuração 2	128
Figura 6.7 – Sobreposição das imagens: configuração 3	129
Figura 6.8 – Sobreposição das imagens: configuração 4	130
Figura 6.9 – Sobreposição das imagens: configuração 5	131
Figura 6.10 – Sobreposição das imagens: configuração 6.....	132
Figura 6.11 – Redistribuição de forças em uma treliça plana.....	133
Figura 6.12 – Efeitos de segunda ordem (efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$) em estruturas metálicas.....	136
Figura 6.13 – Representação das configurações para a edificação de três pavimentos.....	137
Figura 6.14 – Estrutura com todas as ligações engastadas.....	137
Figura 6.15 – Detalhe do pórtico central da estrutura deformada.....	138
Figura 6.16 – Estrutura com sistema de contraventamento em “X”.....	138
Figura 6.17 – Contraventamentos tipo “K” representados com a Maquete Estrutural.....	139
Figura 6.18 – Estrutura com núcleo central rígido	139

Capítulo 7

Figura 7.1 – Escritório de arquitetura representado com a Maquete Estrutural.....	143
Figura 7.2 – Aeroporto Internacional Pinto Martins representado com a Maquete Estrutural.	144
Figura 7.3 – Tribunal de Contas de Alagoas representado com a Maquete Estrutural.....	145
Figura 7.4 – Edifício sede da ABM representado com a Maquete Estrutural	146
Figura 7.5 – London Eye representado com a Maquete Estrutural.....	147
Figura 7.6 – New Millennium Experience Dome representado com a Maquete Estrutural.....	148
Figura 7.7 - Forth Railway Bridge representada com a Maquete Estrutural.....	149
Figura 7.8 – Passarela estaiada representada com a Maquete Estrutural.....	150
Figura 7.9 – Ponte ferroviária representada com a Maquete Estrutural.....	151
Figura 7.10 - Renault Distribution Centre representado com a Maquete Estrutural.....	152
Figura 7.11 – HSBC em HongKong representado virtualmente com a Maquete Estrutural...	153

Capítulo 1 | Introdução

1.1 | Considerações Iniciais

Durante séculos, o homem utilizou exclusivamente o conhecimento empírico e suas habilidades intuitivas para o projeto e execução de suas obras. Somente após o século XVII, com o desenvolvimento da matemática e da física e com o surgimento das ciências exatas, é que se passou a dar ênfase à análise teórica dos processos construtivos. Desde então, o estudo voltado à resistência dos materiais foi pouco a pouco se identificando como um assunto isolado e específico, com isso começou a existir uma separação formal entre as atividades estruturais e as atividades arquitetônicas (SCHWARK, 1996).

A separação entre escolas de Belas Artes e escolas de Engenharia provocou uma divisão de trabalho entre engenheiros e arquitetos, criando a falsa idéia de que arquitetura é atividade de arquiteto e estrutura é atividade de engenheiro. De acordo com Franco (1995), essa separação está na base do equívoco, “Estrutura *versus* Arquitetura”.

Essa separação, considerada algumas vezes necessária, é prejudicial a ambas as partes. Por um lado, a arquitetura fica limitada devido à carência de informações sobre questões estruturais, e por outro, a engenharia em geral se resume a um mundo de modelos matemáticos abstratos, o que prejudica a compreensão de suas dimensões sociais, ambientais e estéticas (CALATRAVA, 2003).

[...] Nos arquitetos pode se encontrar a falta de conhecimento ou interesse sobre questões técnicas.

Nos engenheiros existe uma grande desinformação a respeito das preocupações da arquitetura. Para o engenheiro falta o conhecimento de um repertório mais amplo de soluções arquitetônicas e suas respostas estruturais e que possam levá-lo a pensar em soluções estruturais mais interessantes. Falta a eles conhecerem os arquitetos notáveis e suas obras, principalmente aquelas em que a estrutura é destaque. Essas questões são os principais entraves para o encontro e entendimento entre essas duas áreas, que na verdade são uma única.

[...]

Os dois profissionais, engenheiro e arquiteto, deveriam conhecer e respeitar a profissão do outro, pois são companheiros do mesmo objetivo: a edificação executada. É de se prever que na situação vigente esse companheirismo não seja assim tão harmonioso [...] (REBELLO, [200-?b]).

Uma prova desta falta de integração citada anteriormente está na constante dificuldade de diálogo entre os profissionais de engenharia e de arquitetura. Esta realidade não é exclusiva do Brasil ou de países hoje ditos subdesenvolvidos, segundo o Professor de História e Arquitetura Stanford Anderson (CALATRAVA, 2003, prefácio) – chefe do departamento de Arquitetura do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) – “o divórcio entre arquitetura e engenharia é antigo, e agora, pelo menos nos Estados Unidos, quase ubíquo [...]”.

É evidente que, na engenharia como também na arquitetura, existem profissionais criativos que por meio do trabalho em conjunto com outros profissionais, criam obras exemplares. Um bom exemplo deste tipo de trabalho foi realizado pelo engenheiro irlandês, Peter Rice, que demonstrou ao longo de sua carreira a habilidade para o desenvolvimento de projetos multidisciplinares em diferentes linhas de trabalho. Rice participou de vários projetos e colaborou com vários profissionais, desde artistas como Frank Stella, cientistas como Fritz Vollrath e arquitetos internacionalmente conhecidos como Frei Otto, Renzo Piano, Richard Rogers, Michael Hopkins e I. M. Pei. Mas foi com o arquiteto italiano Renzo Piano, em seu Building Workshop, que o engenheiro teve maior contato e desenvolveu grande parte de seus trabalhos. Fruto desta parceria pode-se citar o projeto para o Center Pompidou em Paris, onde Rice participou juntamente com Renzo Piano e Richard Rogers (CARTER, 1995).

Além deste exemplo, podem-se citar algumas outras parcerias entre engenheiros e arquitetos, inclusive no Brasil, como o trabalho de mais de 30 anos entre o arquiteto João Filgueiras Lima (Lelé) e o engenheiro estrutural Roberto Vitorino, e a parceria do arquiteto Oscar Niemeyer como o engenheiro José Carlos Sussekind. No entanto, são casos isolados, e, infelizmente, o que deveria ser regra ainda é exceção (VITORINO, 2007).

No meio acadêmico a situação é similar, inserido no contexto, “Estrutura *versus* Arquitetura”, os cursos de engenharia e arquitetura em geral são praticamente independentes, tendo pouca relação entre suas disciplinas. Com isso o ensino de estrutura sofre algumas distorções de conceitos que são consideradas prejudiciais à formação dos engenheiros e arquitetos, contribuindo ainda mais para a separação entre engenharia e arquitetura.

Segundo Rebello (2000, p. 15) e Rodrigues (2003, p. 157), nas escolas, principalmente de arquitetura, existem inúmeras publicações que tratam exclusivamente sobre o ensino de estrutura para arquitetos, com títulos como Estrutura para Arquitetos, Estruturas Arquitetônicas ou *The Structural Basis of Architecture*. Essas publicações, mesmo tendo uma preocupação com o ensino de estrutura dirigido especificamente para arquitetos, apresentam um desvio em relação aos princípios do processo de ensino-aprendizagem de estrutura, pois pressupõem existir um ensino de estrutura voltado para arquitetos e outro voltado para engenheiros, o que é um erro, pois não existe uma estrutura para esse ou aquele profissional. O que pode existir é a separação entre o estudo da concepção estrutural e o estudo matemático das estruturas, ou seja, o estudo qualitativo, onde são analisados os fenômenos que regem o comportamento das estruturas e o estudo quantitativo, onde é feita a verificação e quantificação desses fenômenos.

De acordo com o Engenheiro Aluizio Fontana Margarido¹ (REBELLO, 2000, prefácio), no estudo das estruturas existem duas vertentes que devem ser seguidas, para que se adquira a experiência necessária para conceber uma estrutura: a da percepção e a do conhecimento teórico de cálculo. O professor deve desenvolver os conhecimentos teóricos ao mesmo tempo em que desenvolve a intuição do aluno.

Está comprovado que o cérebro humano é dividido em dois hemisférios com funções distintas. No lado esquerdo, processam-se os raciocínios lógicos, unívocos e analíticos, e no direito, os pensamentos intuitivos e sintéticos, portanto, é necessário que o

¹ Professor Doutor em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Professor Titular de Pontes e Sistemas Estruturais da Universidade São Judas Tadeu.

Engenheiro e o Arquiteto encontrem um equilíbrio entre razão pura e intuição (BROHN², 1992, *apud* SCHWARK, 1996). Segundo Firmo (2003), “[...] intuição e a razão fazem parte do ser humano, ambos são faces da mesma moeda. [...] É possível se aproximar do belo, seja pela arte ou pela matemática, seja pela intuição ou pela razão, mas atingi-lo, somente com essa fusão”.

Porém, percebe-se que de maneira geral, são poucos os autores que tratam do assunto considerando estrutura como fenômeno, a grande maioria prioriza a avaliação dos aspectos técnicos, em detrimento dos conhecimentos qualitativo e intuitivo.

Um bom exemplar de abordagem diferenciada sobre a concepção estrutural, com um método original de apresentar o comportamento das estruturas através de ilustrações, é o livro “Sistemas Estruturais” de Engel (2001). A Figura 1.1 mostra algumas imagens como exemplo.

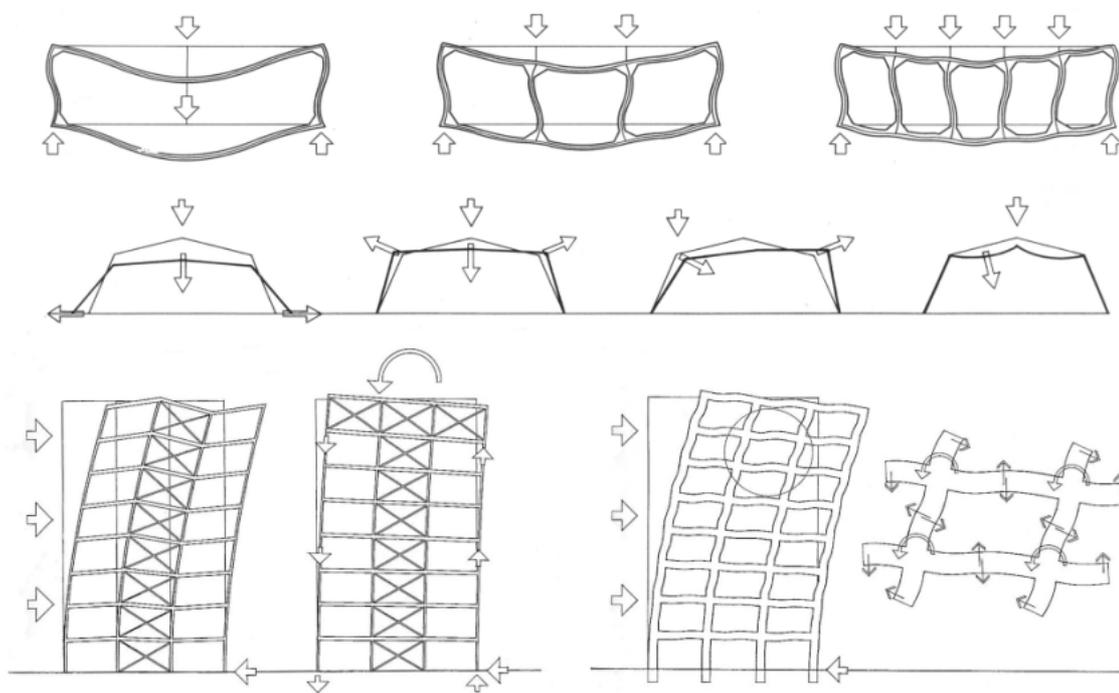


Figura 1.1 – Imagens do livro Sistemas Estruturais
Fonte: ENGEL, 2001

² BROHN, David M. *New paradigm for structural engineering*. Artigo publicado no *The Structural Engineer*, vol. 70, n. 13, 1992.

Segundo o autor, quando o livro foi publicado pela primeira vez em 1967, houve críticas de engenheiros estruturais a respeito do modo não convencional de transmitir a teoria das estruturas, não através da matemática, mas sim através da linguagem gráfica. Foi mencionado também que o livro talvez levasse à desvalorização do projeto arquitetônico.

O livro foi eleito em 1967 como um dos 10 melhores livros de projeto na Feira Internacional de Frankfurt, foi impresso em sua totalidade seis vezes sem nenhuma modificação e foi traduzido em diversos idiomas e publicado em outros países (ENGEL, 2001).

Atualmente, esta realidade de idéias tão contraditórias entre os profissionais ainda se encontra presente. Por outro lado, hoje, com o acelerado avanço tecnológico e conseqüentemente a transformação dos processos construtivos, torna-se imprescindível o contato cada vez maior entre todos os profissionais envolvidos no processo. No caso de estruturas metálicas, devido às características particulares do sistema, exige-se ainda mais integração dos profissionais, por este ser um sistema construtivo industrializado.

Segundo Firmo (2003), é impossível desenvolver tecnologia sem a troca de experiências, portanto nesses “novos tempos” de novas possibilidades construtivas, as palavras-chave para um bom projeto são: flexibilidade, multidisciplinaridade e trabalho em equipe.

De acordo com Polillo (1974, p. 2), o cálculo estrutural evoluiu devido à arquitetura moderna, e o avanço da arquitetura moderna ocorre graças aos novos recursos de cálculo e à tecnologia que estão à disposição. A prova disso está no fato de que, em geral, os países avançados em Arquitetura são também grandes centros de engenharia estrutural.

Assim, percebe-se que arquitetura e estrutura são conhecimentos que nascem juntos e se desenvolvem juntos, são vertentes complementares, e que a separação destes foi conseqüência de um problema acadêmico (REBELLO, 1992).

Assim, torna-se cada vez mais importante considerar a necessidade de uma ampliação na habilidade e no conhecimento do arquiteto e do engenheiro em relação a questões estruturais e arquitetônicas, respectivamente, de forma a promover a aproximação entre esses dois profissionais.

[...] este processo poderá ser maior, se for conduzido pelos professores nas Universidades, unificando pontos de vista de correntes artísticas e de correntes técnico-científicas hoje tão separadas [...].

Somente com esta aproximação do técnico e do artista, divorciados há cerca de um século com a descoberta da análise matemática, surgirão as novas formas da arquitetura de nosso tempo. O exemplo de união deve partir dos mestres nas Universidades (POLILLO, 1974, p. 2, 5).

Mario Salvadori³ sugere como alternativa para o problema da separação do ensino da arquitetura e da engenharia, chamada por ele de “ignorância recíproca”, que os arquitetos se tornem mais engenheiros e que os engenheiros se tornem mais arquitetos (BUSSEL, 1995).

É evidente que nem todos podem alcançar o nível profissional destes engenheiros e arquitetos internacionalmente conhecidos, como os citados anteriormente, mas conforme o professor Rafael L. Bras (CALATRAVA, 2003, prefácio) – ex-diretor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do MIT –, todo engenheiro civil pode tentar ser mais criativo, e todo arquiteto pode tentar ser mais consciente quanto a questões estruturais.

Assim, este trabalho pretende contribuir direta e indiretamente para a junção entre a engenharia e a arquitetura. Para isso, demonstra-se a importância do estudo qualitativo das estruturas como instrumento de pré-avaliação de novas concepções de projeto,

³ Considerado um dos melhores professores de estrutura de todos os tempos, Mario Salvadori sempre teve a habilidade de passar de forma simples as mais complexas teorias. Salvadori tem influenciado profundamente a educação dos engenheiros e arquitetos em todo o mundo, com livros como *Why Buildings Stand Up* e *Why buildings Fall Down*. Em 1993, se tornou o primeiro engenheiro a receber o prêmio AIA/ACSA *Topaz Medalion for Excellence in Architectural Education* (BUSSEL, 1995).

comportamento estrutural e aprimoramento de soluções arquitetônicas sob o foco da engenharia estrutural.

1.2 | Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o estudo e o aprimoramento de um modelo estrutural qualitativo, intitulado *Maquete Estrutural*⁴, desenvolvido anteriormente pelo mestrando (OLIVEIRA, 2005, 2006). Durante este trabalho, foram feitas adaptações e modificações no modelo, que serão apresentadas detalhadamente no capítulo 3.

Assim, esta pesquisa é basicamente experimental, com vistas ao desenvolvimento, aplicação, avaliação e validação da *Maquete Estrutural*, tendo como objetivo principal verificar a sua viabilidade como um instrumento de pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas. Para isso, o modelo estrutural qualitativo é validado a partir de comparações com modelos simulados em *software* comercial. Em seguida, características específicas de estruturas metálicas são abordadas e extrapolações são realizadas para concepções diversas em estruturas metálicas.

1.3 | Justificativa

De acordo com as idéias de Hilson (1972), é de extrema importância que o profissional envolvido no projeto estrutural, seja ele o arquiteto ou o engenheiro, tenha a habilidade de visualizar e compreender o comportamento das estruturas em diferentes circunstâncias, e como a forma da estrutura vai influenciar no seu comportamento.

Os profissionais devem desenvolver um sentimento intuitivo do comportamento estrutural, para que na fase da concepção estrutural e na de escolha da forma dos elementos a serem utilizados – uma das mais importantes – maior precisão seja obtida. Principalmente se tratando de estruturas metálicas, cujas suas características particulares

⁴ *Maquete Estrutural para ensino de estruturas arquitetônicas*. Patente requerida junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), nº MU 8602813-8.

de sistema construtivo industrializado não permitem tomadas de decisões durante sua execução, exigindo uma definição criteriosa da solução estrutural, levando em consideração seus diversos detalhes, ainda durante a fase do projeto arquitetônico. A definição de um projeto visando tanto os aspectos estéticos como também os econômicos, depende de todas estas importantes decisões (HILSON, 1972).

Segundo Schwark (1996, p.7), em um escritório de projeto estrutural, as primeiras e mais importantes decisões na concepção de um projeto relacionados a sua importância, necessidade, utilidade, tipo de solução e estética são valores qualitativos e intuitivos. Só em fase mais adiantada é que se deve completar e precisar essas primeiras decisões.

Entretanto, o ensino de estrutura que é praticado nas escolas de engenharia e arquitetura é deficiente quanto a este aspecto. Em geral, os cursos são ministrados por via analítica exclusivamente, e não consideram estrutura como fenômeno, deixando as noções qualitativas e o desenvolvimento da intuição de lado. O ensino por meio da matemática, reconhecidamente necessário para o engenheiro estrutural, não é suficiente, é preciso ter consciência de que os números são importantes como verificadores e não como formadores.

[...] Tem-se ensinado a manejar as ferramentas, tem-se dado o instrumental, mas tem-se esquecido da informação fundamental.

[...]

O grande especialista se forja somente com o desenvolvimento em alto grau de sua intuição inata. Todo engenheiro deve ter seu raciocínio desenvolvido de modo a educar e aprimorar o seu sentido estrutural da mesma maneira que um músico teve seu bom ouvido largamente educado e aprimorado (POLILLO, 1974, p. 4).

Em geral, essas habilidades intuitivas só são desenvolvidas e apuradas após a graduação dentro dos escritórios de cálculo estrutural por meio da vivência dos projetos. Se já não bastasse, o uso da informática, da forma como ocorre atualmente, tem agravado ainda mais a situação.

Segundo Brohn (2005), a partir de meados da década de 1980 com o avanço da informática e o desenvolvimento de poderosos *softwares* para análise estrutural, iniciou-se, talvez, a mudança mais significativa na história da forma de atuação do engenheiro estrutural, uma mudança dos cálculos manuais para o projeto e análise por meio de computadores. Hoje, é visível que os engenheiros mais experientes têm conhecimentos sobre o comportamento das estruturas que, devido ao uso universal dos computadores nos escritórios de projeto, os engenheiros recém-formados, que provavelmente vão substituí-los, não possuem. Ainda não se tem uma clara definição de como esses novos profissionais irão adquirir esse conhecimento intuitivo e qual a consequência da automação na formação desses engenheiros.

Esta é uma situação relativamente recente e ainda não se sabe ao certo qual a solução mais adequada, são poucas as publicações e estudos sobre o assunto. Mas é preciso reconhecer a necessidade de identificar um meio formal para o aprimoramento dessas habilidades intuitivas e substituir essa aquisição informal provinda da vivência dentro dos escritórios forjando os profissionais que comandarão este processo no futuro. De acordo com Brohn (2005), esses conhecimentos são prioridades para os jovens engenheiros que irão trabalhar em escritórios onde todos os cálculos são realizados por computadores.

O ideal seria que o engenheiro já saísse da universidade com esses conhecimentos. Segundo Rebello (1992, p. 3), “É muito comum um engenheiro civil recém-formado não saber por onde começar um projeto estrutural quando lhe é colocado à frente um projeto arquitetônico”.

Com mais de 25 anos de experiência oferecendo cursos de treinamentos sobre o comportamento dos sistemas estruturais (*Understanding Structural Behaviour, Understanding Structural Design e Understanding Structural Analysis*) para grandes escritórios de engenharia estrutural em todo o mundo como Ove Arup, Buro Happold, WS Atkins, Ramboll entre outros, o engenheiro Brohn (2005) comprova através de suas experiências que um esquema visual é crucial para se obter soluções qualitativas. No meio acadêmico, temos os testemunhos de diversos profissionais de diferentes instituições de ensino em vários países, como Hilson (1972, prefácio) – na época

Professor de Engenharia e Arquitetura da Brighton Polytechnic; Cowan⁵ (1962, *apud* REBELLO 1992, p. 41) – na época Professor de Arquitetura da Universidade da Austrália; Rebello (1992, p. 41) – Professor de Sistemas Estruturais da Universidade São Judas Tadeu; Schwark (1996, p. 4) – Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EPUSP; Engel (2001, prefácio) – Professor da Escola de Arquitetura da Universidade de Minnesota de 1956 a 1964; entre outros, que através de suas experiências pessoais como professores, compartilham da mesma idéia e ressaltam a importância da análise visual no aprendizado do comportamento das estruturas.

Assim, acredita-se que o uso de modelos qualitativos como ferramenta de auxílio ao aprendizado e a uma pré-avaliação do comportamento das estruturas seja uma proposta eficiente, já que os modelos permitem que o profissional ou o estudante desenvolva, através da vivência dos ensaios, um sentimento intuitivo do comportamento dos sistemas estruturais. Assim, ao aprimorar essa capacidade de percepção, este profissional estará mais preparado para conceber uma estrutura. Segundo Polillo⁶ (1968, *apud* RODRIGUES, 2003), “a concepção estrutural é o resultado de uma produção em cuja composição deve haver um complexo resultante de conhecimentos técnico-científico e artístico aprimorados pela experiência, cujas sementes devem ser muito bem plantadas nas Universidades”.

1.4 | Estruturação do Trabalho

Neste capítulo introdutório foi apresentada uma visão geral da atuação dos profissionais de Engenharia e Arquitetura ao longo dos anos, expondo em seguida os objetivos e a justificativa desta pesquisa, ressaltando a importância de se utilizar modelos estruturais qualitativos como ferramenta para pré-avaliação do comportamento dos sistemas estruturais de forma geral.

⁵ COWAN, Henry J. *Architectural Record*. 1962.

⁶ POLILLO, A. *Considerações sobre o ensino de estruturas nos cursos de formação de arquitetos*. Rio de Janeiro: Sedegra-Rio, 1968.

No Capítulo 2 é feita uma descrição dos modelos estruturais mais utilizados na Engenharia. Esse capítulo é composto por um breve histórico, descrição e classificação dos modelos. São apresentadas, também, algumas pesquisas referentes ao uso de modelos estruturais qualitativos para o ensino de estrutura.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação e à descrição do modelo proposto.

No Capítulo 4 é descrito o programa experimental realizado. São apresentados com detalhes todos os materiais utilizados, o esquema de montagem, a instrumentação e a metodologia utilizadas para a validação do modelo proposto.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação e análise dos resultados experimentais.

No Capítulo 6 são apresentadas formas de aplicação da *Maquete Estrutural* para a pré-avaliação do comportamento específico de estruturas metálicas.

No Capítulo 7 são apresentadas, por meio do modelo proposto, diversas simulações de edificações existentes em que a estrutura é destaque, demonstrando, assim, a versatilidade do modelo.

O Capítulo 8 apresenta as considerações finais da pesquisa realizada, e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 | Modelos Estruturais

2.1 | Introdução

A história nos conta que a idéia de se utilizar modelos físicos é tão antiga quanto à vontade do homem de compreender os fenômenos da natureza. Segundo Hossdorf, (1974, p. 18) existem basicamente três formas de se compreender o verdadeiro comportamento de um fenômeno físico: pela observação direta do fenômeno, por meio da teoria e por meio de experimentos. Portanto, de forma geral, a realidade (protótipo) pode ser simulada tanto por teoria pura (modelo teórico) como também por experimentos (modelo físico).

Ao longo dos anos, o Homem vem utilizando modelos, em diferentes setores, como meio de adquirir conhecimento. Isso se aplica não somente ao campo da engenharia, pois a princípio a maioria dos laboratórios, em qualquer área de conhecimento, utiliza modelos como simulação da realidade. Na medicina, por exemplo, os experimentos com ratos em laboratórios podem ser considerados testes como modelos, já que são adotados experimentos análogos à realidade como meio de adquirir conhecimento. Quando se dá uma caixa de peças de LEGO⁷ para uma criança brincar, imagina-se que brincando com modelos em escala reduzida ela irá aprender e se preparar para os desafios da vida real. Na engenharia não é diferente, a principal finalidade dessas simulações, é que o arquiteto, o engenheiro e o construtor possam prever o comportamento de seus projetos sem que haja a necessidade de construí-los antes (HOSSDORF, 1974).

Experimentos com modelos estruturais em escala geométrica reduzida sempre desempenharam um papel importante no desenvolvimento e na evolução da engenharia estrutural, com diversas aplicações como na educação, concepção de projetos, pesquisas e no desenvolvimento de produtos.

Neste capítulo tem-se a descrição dos modelos existentes que subsidiaram este trabalho.

⁷ O sistema LEGO é um brinquedo cujo conceito se baseia em partes que se encaixam, permitindo inúmeras combinações. Criado pelo dinamarquês Ole Kirk Christiansen, é fabricado em escala industrial desde meados da década de 1950, popularizando-se em todo o mundo desde então. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lego>>. Acesso em: 29 abr. 2008.

2.2 | Definição e classificação dos modelos estruturais

Um “Modelo Estrutural” pode ser definido como qualquer elemento estrutural ou um conjunto de elementos executados em escala geométrica reduzida (em comparação com a estrutura em tamanho real) para ser testado, e por meio das leis de similaridade interpretar os resultados dos testes. (JANNEY *et al.*⁸, 1970, *apud* HARRIS *et al.*, 1999, p. 2).

Em geral, os modelos físicos são executados em escala geométrica reduzida, porém existem casos especiais em que são adotados modelos maiores que os protótipos, normalmente usados para o estudo de problemas localizados.

Os modelos estruturais podem ser classificados de diferentes maneiras, alguns autores como Pippard (1947) e Hossdorf (1974) classificam os modelos de acordo com a finalidade da análise. Esse tipo de classificação tem como base o tipo de experimento e seu campo de aplicação e não especificamente o tipo de modelo utilizado, assim, um mesmo modelo pode ser enquadrado em diferentes análises como sendo de caráter exploratório, confirmatório, como complemento para o cálculo estrutural ou como uma ferramenta independente.

Outros autores como Harris *et al.* (1999) e Santos (1983) os classificam quanto às características do modelo em si. É um pouco difícil imaginar uma completa separação entre essas duas formas de classificação, já que em alguns momentos o tipo de experimento define o tipo de modelo e vice-versa. No entanto, para o presente trabalho, optou-se por adotar como base a classificação utilizada por Harris *et al.* (1999) como sendo mais adequada para uma possível definição do modelo proposto. Assim, os modelos são classificados da seguinte forma:

⁸ JANNEY, J. R.; BREEN, J. E.; GEYMAYER, H. Use of models in structural engineering. *Models for concrete structures*. Detroit, MI: ACISP-24, American Concrete Institute, p. 1-18, 1970.

2.2.1 / Modelo Qualitativo

Esse tipo de modelo tem como característica principal a análise visual dos fenômenos. Em geral, informações exatas desses modelos não podem ser obtidas, pois esses se restringem à análise qualitativa do comportamento das estruturas.

Modelos desse tipo têm a vantagem de serem facilmente adaptáveis a mudanças de qualquer informação sobre as condições da estrutura estudada. O comportamento de diferentes sistemas estruturais pode ser analisado em um mesmo modelo variando apenas as condições de contorno, por exemplo.

Normalmente, esse tipo de modelo apresenta semelhança geométrica direta com o protótipo (estrutura real), porém é feito com materiais homogêneos e elásticos que não são necessariamente semelhantes ao material do protótipo. Uma variedade muito grande de materiais é utilizada na construção desses modelos, sendo os mais empregados aqueles com baixo módulo de elasticidade como borrachas, papéis, espumas e plásticos para acentuar as deformações, tornando assim mais fácil a observação dos fenômenos (Figura 2.1). Diferentes tipos de madeira também são utilizados, em especial a madeira balsa em função da boa trabalhabilidade da mesma.

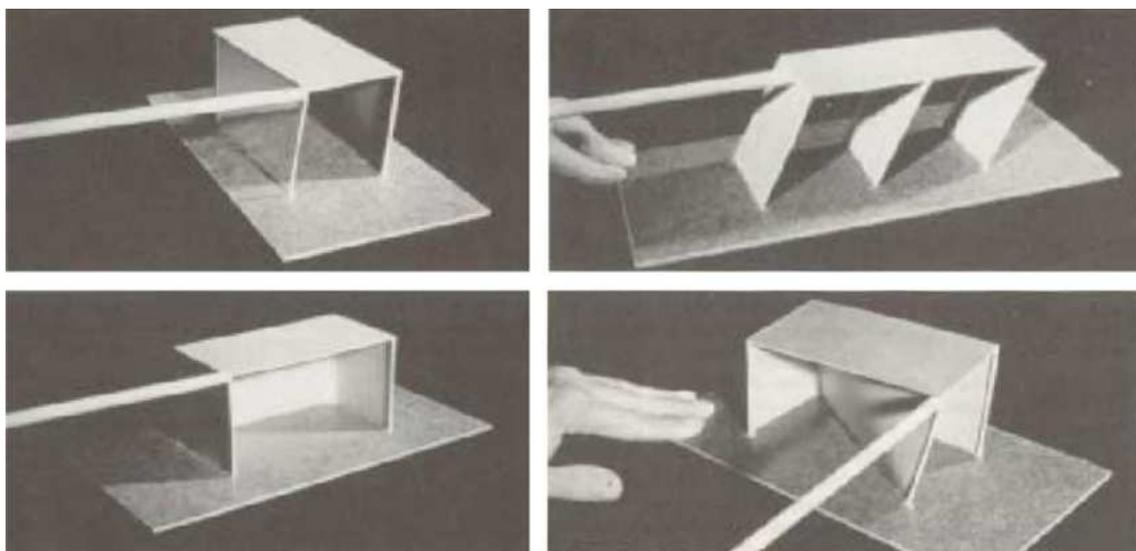


Figura 2.1 – Modelos estruturais qualitativos de pórticos espaciais

Fonte: Disponível em: < <http://www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/remy/L3C/01-revisions-light.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2007

2.2.2 / *Modelo Indireto*

Modelo Indireto é um tipo especial de modelo qualitativo que é usado para determinar reações de apoio e esforços internos resultantes, como força cortante, momentos e forças axiais. Esse tipo de modelo não necessariamente apresenta semelhança geométrica direta com o protótipo, podendo ser executado sem precisão da forma da seção transversal ou da área dos elementos da estrutura sem afetar os resultados.

No passado, a maioria das aplicações dos modelos indiretos era para elementos não uniformes em pórticos estaticamente indeterminados. Atualmente, esse tipo de modelo não é muito utilizado, pois esses cálculos podem ser melhores e mais facilmente executados em computadores. Somente em casos excepcionais em que a forma estrutural é muito complexa e difícil de ser modelada em *softwares*, é que são utilizados esses modelos.

Dois exemplos bastante conhecidos de utilização de modelos indiretos são os de Antonio Gaudí e Frei Otto. Ambos desenvolveram modelos qualitativos indiretos como ferramenta de auxílio no processo de concepção estrutural de seus projetos de modo a viabilizar a construção de suas obras.

Para o projeto da Cripta da Capela Güell, Antonio Gaudí reproduziu em escala 1/10 as curvas que deram origem a forma da Capela. Com cordas fixadas ao teto e pesos (sacos com chumbo) posicionados de acordo com as cargas que atuariam na edificação, o arquiteto catalão reproduziu curvas, e por meio da analogia do comportamento dos cabos com os arcos, definiu qualitativamente qual seria a forma mais eficiente para aquela determinada situação e para um determinado carregamento. Através de desenhos e fotos do modelo, o arquiteto invertia a imagem transformando as curvas dos cabos em arcos e pilares, e assim desenvolvia a estrutura, as fachadas, os espaços internos e os detalhes do projeto (Figura 2.2).

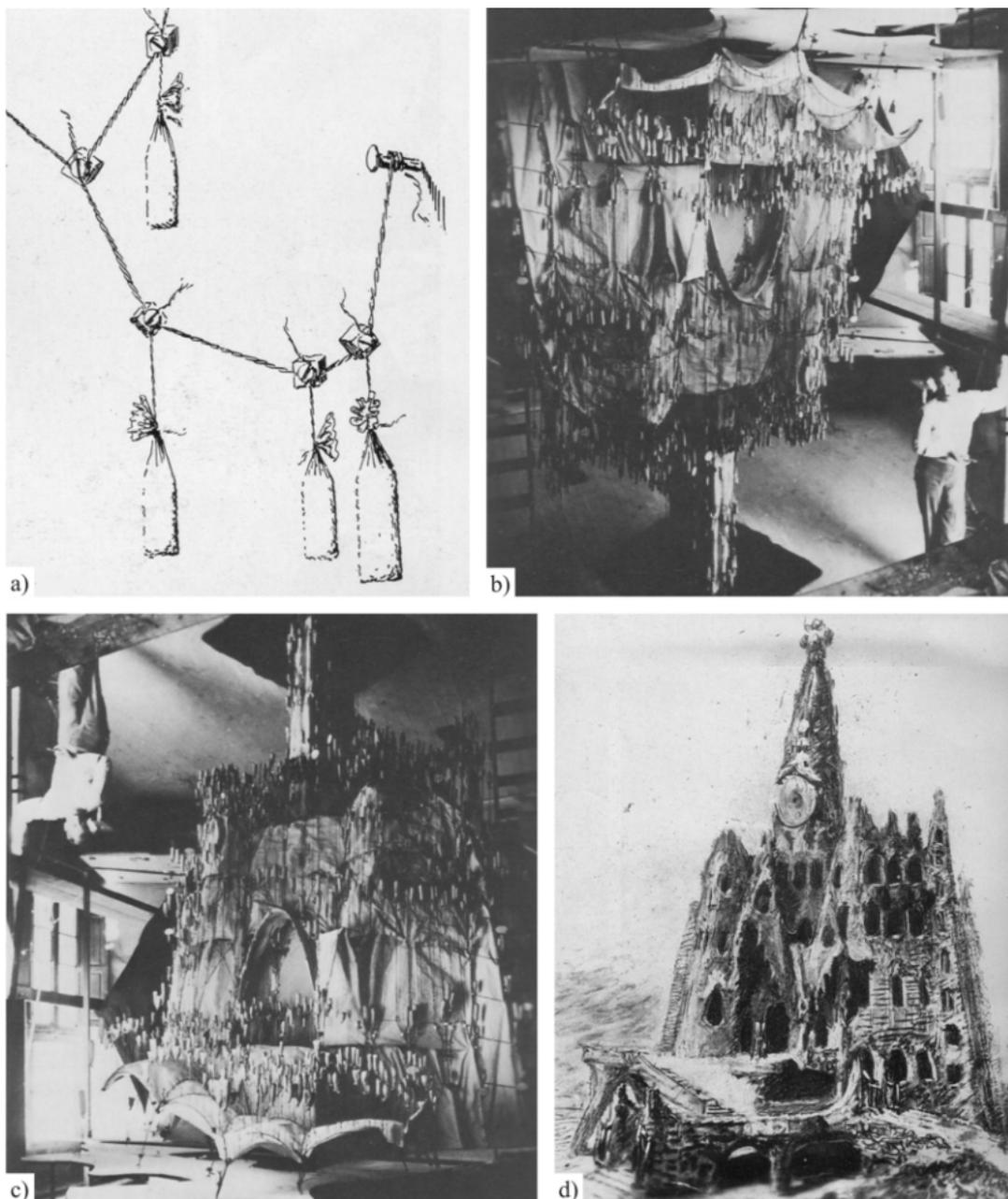


Figura 2.2 – Modelo indireto de Antonio Gaudí para a Crípta da Capela Guell
a) Detalhe dos pesos utilizados no modelo, b) Modelo estrutural para a Crípta da Capela Guell, c) Imagem invertida do modelo, d) Desenho original de Gaudí para a fachada principal da Capela Guell.
Fonte: a) Disponível em: < http://www.gaudiclub.com/ingles/i_vida/fotobras/colonia/1103.jpg>. Acesso em: 22 mar. 2007, b) e c) TARRAGÓ, 1977, d) Disponível em: < http://www.gaudiclub.com/ingles/i_vida/fotobras/colonia/1109.jpg>. Acesso em: 22 mar. 2007

Grande responsável pela evolução das estruturas de membranas, Frei Otto realiza experimentos com bolhas de sabão como orientação para a definição de suas complexas coberturas tensionadas como, por exemplo, o pavilhão alemão da Expo 67 (Figura 2.3b). Segundo o arquiteto alemão, as bolhas de sabão apresentam um comportamento

similar às estruturas tencionadas, e através dos modelos é possível definir a forma, a menor superfície e a localização das tensões mais elevadas das membranas. A Figura 2.3 mostra alguns modelos com bolhas de sabão e o pavilhão alemão da Expo 67.



Figura 2.3 – Modelos indiretos de Frei Otto

a) Modelos com bolhas de sabão, b) Pavilhão alemão da Expo 67

Fonte: a) OTTO, 1969, b) Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Germany_Pavilion_Expo_67_-_Montreal_Quebec.jpg>. Acesso em: 20 mar. 2007

Outros trabalhos nesta área (NUNES, 2008) ressaltam a importância do modelo indireto como ferramenta para concepção estrutural. A Figura 2.4 mostra duas imagens do modelo utilizado na concepção estrutural do projeto de cobertura para o praça-anfiteatro do campus da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

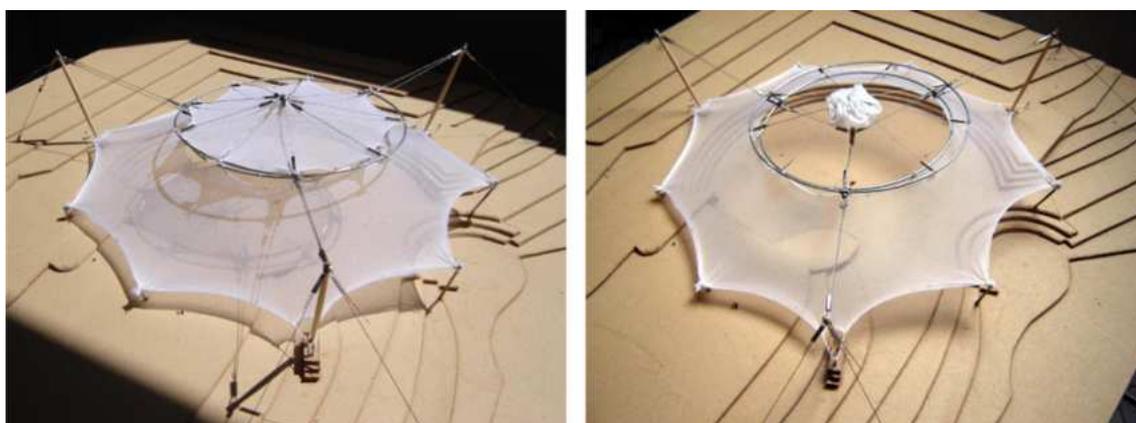


Figura 2.4 – Modelo indireto do projeto de cobertura para o praça-anfiteatro da UFOP

Fonte: NUNES, 2008, p.78 e 79

2.2.3 / *Modelo Direto*

Os modelos diretos são geometricamente similares, em todos os sentidos, ao protótipo e os carregamentos são aplicados da mesma maneira. As tensões e deformações no modelo para qualquer condição de carregamento representam quantidades similares ao protótipo.

2.2.4 / *Modelo Reduzido*

Dentre todos os modelos, os modelos reduzidos são os mais complexos e geralmente são utilizados em situações em que não se dispõe de soluções numéricas satisfatórias, podendo ser empregados no dimensionamento de protótipos.

Sempre que possível, são construídos segundo as leis da Teoria da Semelhança. Esta teoria, estudada inicialmente por Galileu Galilei (GALILEI, 1638), mostra que em problemas de comparação de resistência das estruturas em escalas diferentes, a simples semelhança geométrica não é suficiente. Se os materiais do protótipo e do modelo forem o mesmo, as forças serão reproduzidas em escalas diferentes da escala das resistências. Ou seja, para que um modelo possa representar um protótipo, ou para que os resultados obtidos em ensaios com modelos possam ser estendidos aos protótipos, é preciso que, além da semelhança geométrica, os modelos sejam construídos com materiais que apresentem semelhança física em relação aos materiais do protótipo, observando-se a “teoria da semelhança”. Portanto, a maior dificuldade deste tipo de análise é encontrar o material adequado e as técnicas de fabricação para o modelo (CARNEIRO, 1996).

No Brasil, este tipo de modelo tem sido muito utilizado na área de engenharia *offshore* através dos modelos de plataformas de petróleo. A Figura 2.5 mostra imagens do modelo reduzido em escala 1/45 da plataforma de petróleo Carapeba 3, e para o estudo de barragens na área de hidráulica; já a Figura 2.6 mostra algumas imagens do estudo com modelo reduzido em escala 1/50 da barragem da Usina Hidrelétrica Melissa no estado do Paraná desenvolvido no Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza (CEHPAR).



Figura 2.5 – Modelo reduzido em escala 1/45 da plataforma de petróleo Carapeba 3
 Fonte: MAGLUTA et al., 2003

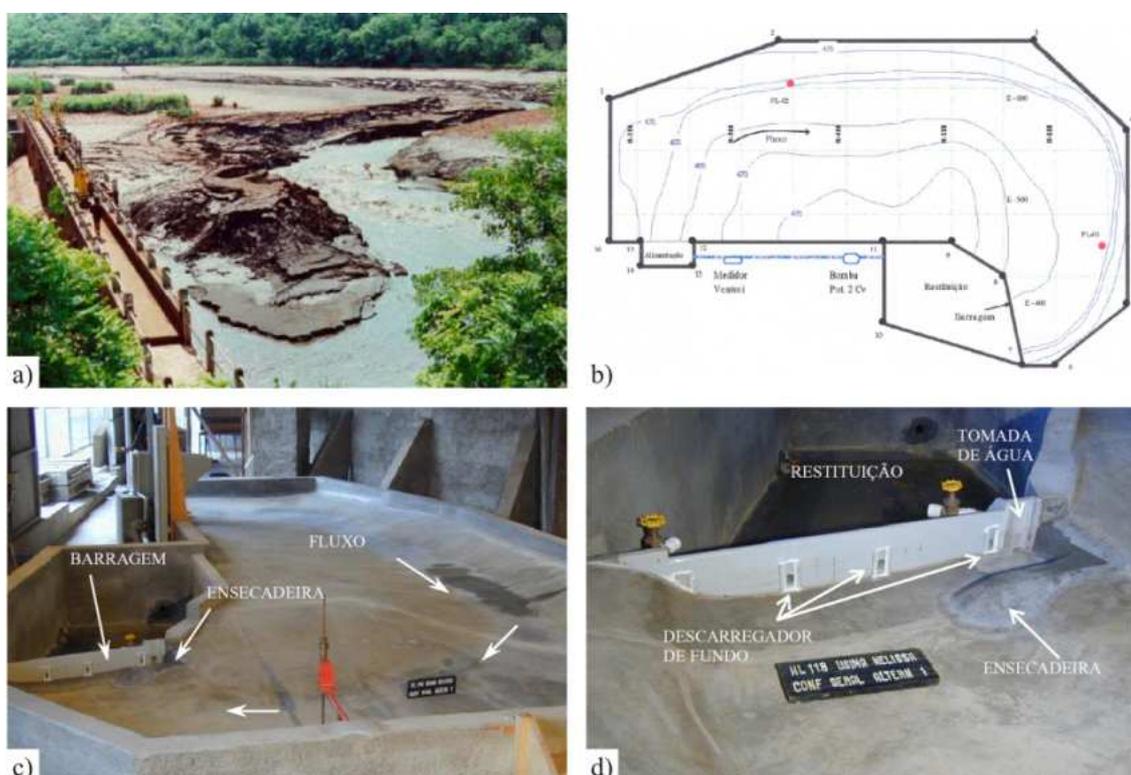


Figura 2.6 – Estudo de caso da barragem da Usina Hidrelétrica Melissa no estado do Paraná
 a) Vista geral do assoreamento do reservatório, b) Configuração geral do modelo reduzido, c) Vista da região próxima ao vertedouro, d) Vista da região do vertedouro
 Fonte: CHELLA et al., 2003

2.2.5 / Modelo Dinâmico

Os modelos dinâmicos são utilizados no estudo de vibrações e de efeito de cargas dinâmicas nas estruturas. É comum o uso desses modelos para estudar os problemas

devido às cargas de vento e de efeitos sísmicos. Com este tipo de análise é possível prever e evitar problemas como o famoso caso de colapso da ponte de Tacoma Narrows nos Estados Unidos, que em 1940 entrou em colapso devido a rajadas de vento de aproximadamente 70 km/h, o que provocou uma das mais famosas tragédias da construção civil (Figura 2.7).

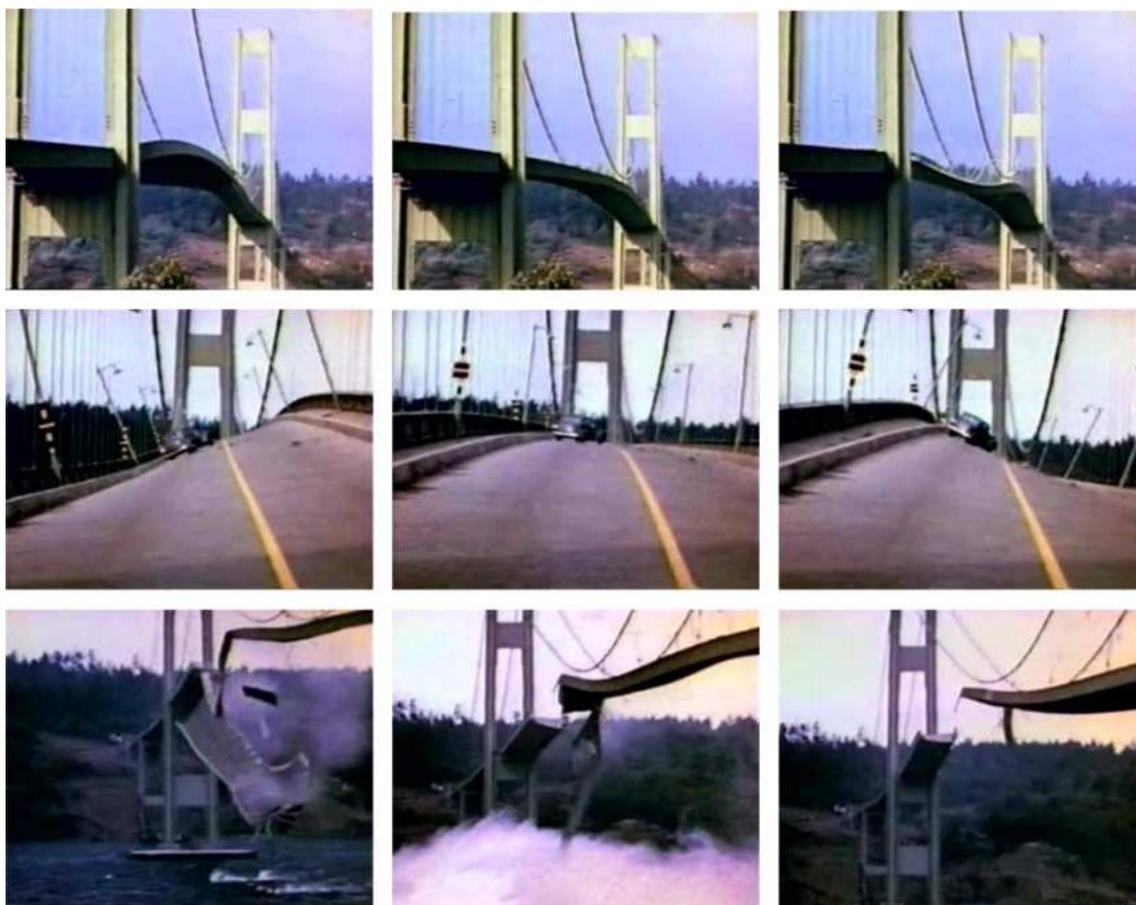


Figura 2.7 – Imagens do colapso da ponte de Tacoma Narrows em 1940

Fonte: Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=3mclp9QmCGs&feature=related>>. Acesso em: 22 fev. 2008

A análise da ação dinâmica do vento no comportamento das edificações sempre foi conhecida pelos engenheiros estruturais, porém, somente após este episódio, é que se passou a considerar estes fenômenos no dimensionamento das estruturas. Depois do desastre, foram realizados diversos estudos, utilizando modelos dinâmicos, para entender melhor a influência do vento no comportamento da famosa ponte (Figura 2.8). Atualmente, diversas pontes são estudadas em túneis de vento antes de serem construídas.



Figura 2.8 – Modelo dinâmico da ponte de Tacoma Narrows

Fonte: Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=qL8MhSjEpQ8&eurl=http://www.gluon.com.br/blog/2006/09/20/ponte-tacoma/>> . Acesso em: 22 fev. 2008

Na Figura 2.9, têm-se imagens do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde foram realizados os estudos da resposta dinâmica do complexo viário Jornalista Roberto Marinho, em São Paulo, e na Figura 2.10 imagens da obra finalizada.

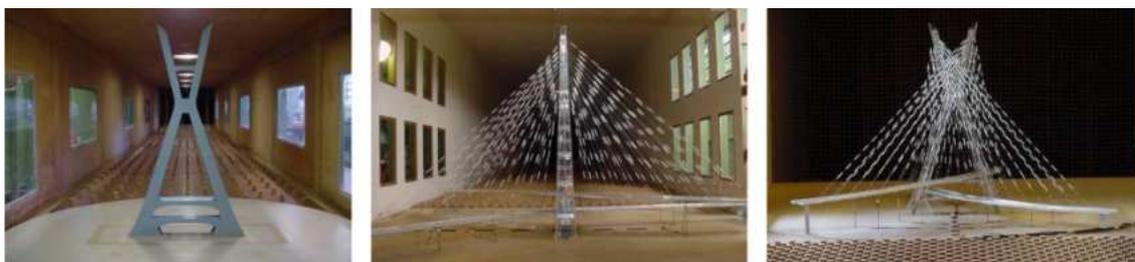


Figura 2.9 – Estudo da resposta dinâmica do complexo viário Jornalista Roberto Marinho

Fonte: a) SOUZA et al., 2008



Figura 2.10 – Complexo viário Jornalista Roberto Marinho

Disponível em: <<http://cenasdacidade.wordpress.com/2007/10/29/primeiro-post-ponte-estaiada-na-av-roberto-marinho/>> . Acesso em: 6 jun. 2008

Os túneis de vento são utilizados para a simulação das ações e efeitos do vento natural em ensaios com modelos reduzidos. Geralmente são utilizados para medir a pressão do ar nas estruturas e avaliar a forma da edificação através da interação dinâmica da estrutura com a força do vento.

Para o estudo dos efeitos das cargas de terremotos nas estruturas, normalmente os modelos são testados em mesas vibratórias, chamadas de plataformas sísmicas (*shaking table*), que simulam as movimentações naturais decorrentes dos abalos sísmicos. Este tipo de análise é mais comum em regiões onde tais fenômenos ocorrem com mais frequência. A Figura 2.11 apresenta dois modelos testados em plataformas sísmicas.



Figura 2.11 – Modelos em mesas vibratórias

a) Modelo antes da simulação, b) Modelo durante a simulação

Fonte: Disponível em: <<http://www.nees.org/5am/ppt/WednesdayJune20/330-500pmBreakouts/SoilFoundation-StructureAndBaseIsolation/ValentinShustov.pdf>>. Acesso em: 6 jun. 2008

Os modelos dinâmicos também podem ser utilizados para avaliar os efeitos de impactos nas estruturas.

2.2.6 | Outras Classificações

Existem também outras classificações que incluem modelos que não foram considerados na classificação apresentada, visto sua diferença dos modelos estruturais. Como exemplo pode-se citar os *modelos térmicos*, onde os efeitos de mudanças de

temperatura são estudados; *modelos para procedimento de montagem de estruturas* que são usados para auxiliar os construtores no planejamento da construção de estruturas muito complexas; modelos puramente arquitetônicos, conhecidos como *maquetes*, que são também muito importantes no planejamento de novas construções e na correlação de espaços; entre outros.

O uso de modelos estruturais na engenharia tem diversas aplicações como: na educação, concepção de projetos, pesquisa e no desenvolvimento de produtos. O importante é que o profissional veja o modelo estrutural, independente do tipo e da finalidade, como um complemento para o projeto ou para a análise matemática das estruturas. É função do engenheiro ou do arquiteto definir qual, quando e onde os modelos devem ser utilizados.

2.3 | Modelos estruturais qualitativos para o ensino de estrutura

O uso de modelos qualitativos como ferramenta de auxílio no processo de ensino-aprendizagem de estrutura é uma atividade que vem sendo desenvolvida há mais de 70 anos. Segundo Harris *et al.* (1999, p. 681), um dos primeiros a utilizar modelos estruturais para demonstrações em sala de aula foi Rathbun, que em 1934 utilizou blocos de madeira presos por arames para demonstrar o comportamento de um arco.

Dentre todos os tipos de modelos estruturais, os utilizados para demonstrações em sala de aula, geralmente, são os mais simples. Por sua aplicação, é preciso que os mesmos sejam portáteis e fáceis de operar. Esses modelos podem ser executados com materiais comuns, como papel, madeira, plástico ou borrachas, pois normalmente não necessitam de instrumentação, e o comportamento das estruturas é analisado visualmente por meios de deformações acentuadas (HARRIS *et al.*, 1999).

Segundo Harris *et al.* (1999), diversas universidades nos Estados Unidos possuem laboratórios que utilizam modelos elásticos para o ensino de estrutura, como exemplo o autor cita o MIT, Princeton, Lehigh, Carnegie-Mellon, Cornell, Johns Hopkins, University of Califórnia, Berkeley, College of the City of New York, Drexel, entre outras.

No exterior existem diversos fabricantes de equipamentos para a educação na engenharia, que dispõe ao mercado uma série de modelos estruturais industrializados. Como exemplo, pode-se citar alguns equipamentos da *Gunt Hamburg: equipment for engineering education* (Figura 2.12).

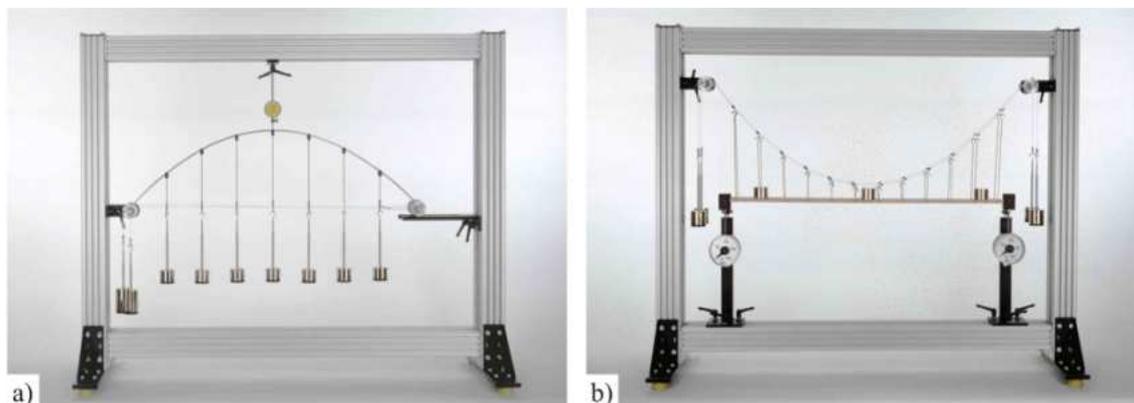


Figura 2.12 – Gunt Hamburg: equipment for engineering education
a) Modelo experimental de um arco parabólico, b) Modelo experimental de uma ponte suspensa.
Fonte: Disponível em: <http://www.gunt.de/static/s3_1.php>. Acesso em: 6 jun. 2008

No Brasil, percebe-se que existe uma preocupação muito grande entre os profissionais, mas infelizmente, essa preocupação tem ficado confinada ao espaço das escolas. Em geral, os modelos são concebidos pelos próprios professores que por sua vez não tem preocupação em divulgá-los. Grande parte destas experiências didáticas é isolada, tanto nas escolas de engenharia como também nas escolas de arquitetura.

A seguir, tem-se uma síntese sobre algumas publicações que serviram como base da pesquisa bibliográfica deste trabalho.

A primeira publicação no Brasil sobre o uso de modelos estruturais para o ensino de estrutura é atribuída aos anais do Primeiro Encontro dos Professores de Estrutura para Escolas de Arquitetura, realizado em 1974 na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU/USP). Nos anais são apresentadas várias publicações relatando as experiências e as opiniões de professores de diferentes universidades brasileiras. Neste encontro, dois pontos foram destaques: a necessidade do ensino da história das estruturas e o uso de modelos qualitativos como ferramenta de auxílio ao aprendizado. Margarido (1974) sugere uma lista de materiais para a execução de modelos (Figura 2.13) e algumas técnicas de utilização recomendadas para o ensino.

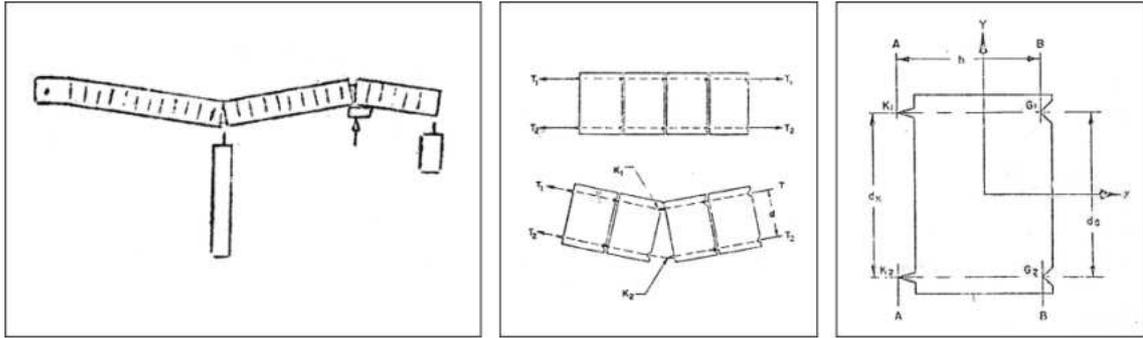


Figura 2.13 – Aluizio F. Margarido: projeto de um modelo estrutural qualitativo
 Fonte: MARGARIDO, 1974, p. 13

Franco (1974 b) também sugere a construção de modelos estruturais qualitativos a partir de peças de madeira e molas de aço. Grande parte dos autores ressalta em suas publicações que, mesmo sendo voltadas especificamente às escolas de arquitetura, as idéias se aplicam também às escolas de engenharia.

Santos (1983) desenvolveu sua dissertação de mestrado sobre a concepção, o projeto, a execução e a utilização de modelos estruturais qualitativos para o ensino de estrutura. Nesse trabalho são apresentados 62 modelos diferentes contendo todos os detalhes para a execução dos mesmos como, por exemplo, os representados na Figura 2.14.

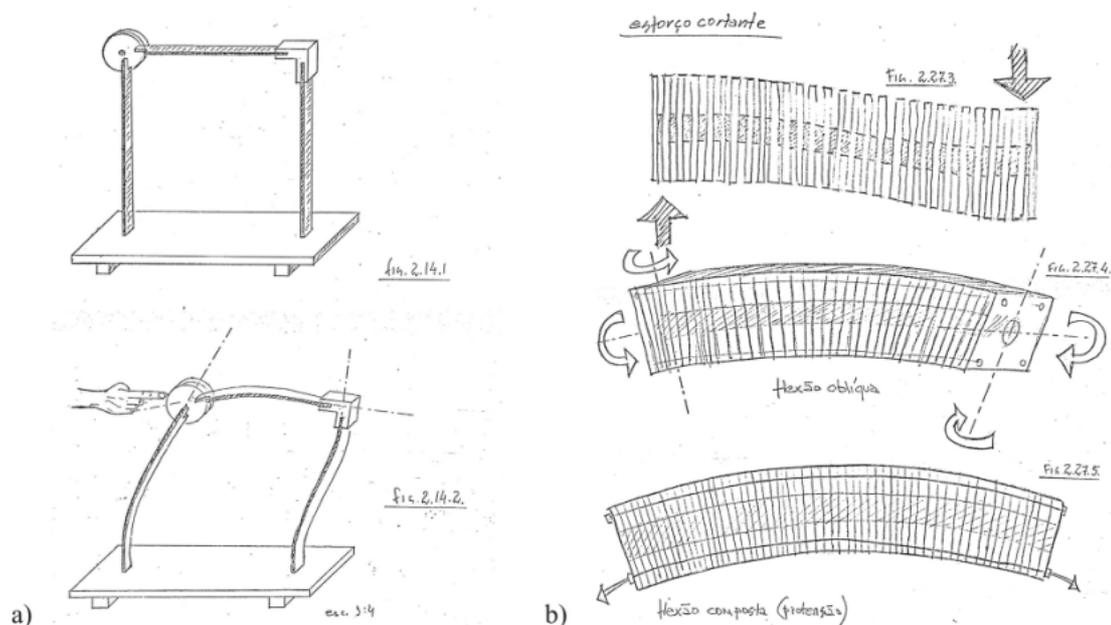


Figura 2.14 – José Amaro dos Santos: modelos estruturais qualitativos
 a) Modelo número 14, b) Modelo número 27
 Fonte: SANTOS, 1983

Atualmente, alguns trabalhos sobre o tema reproduzem os modelos sugeridos por Santos. Chamberlain *et al.* (2000) e Rodrigues *et al.* (2006) sugerem alternativas mais simples e econômicas para a construção de um modelo, proposto originalmente por Santos (1983), para a obtenção do comprimento efetivo de flambagem de elementos submetidos à compressão conforme ilustrado nas Figuras 2.15, 2.16 e 2.17.

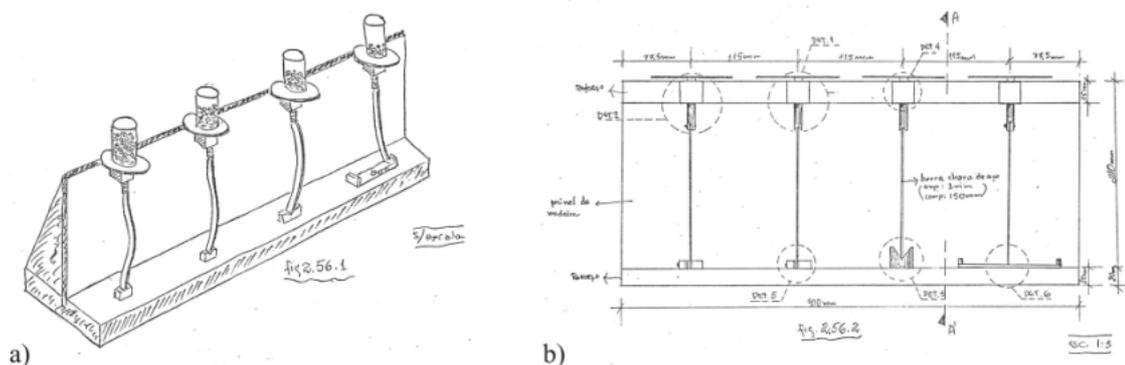


Figura 2.15 – José Amaro dos Santos: modelo estrutural qualitativo número 56
a) Perspectiva, b) Vista Frontal
Fonte: SANTOS, 1983

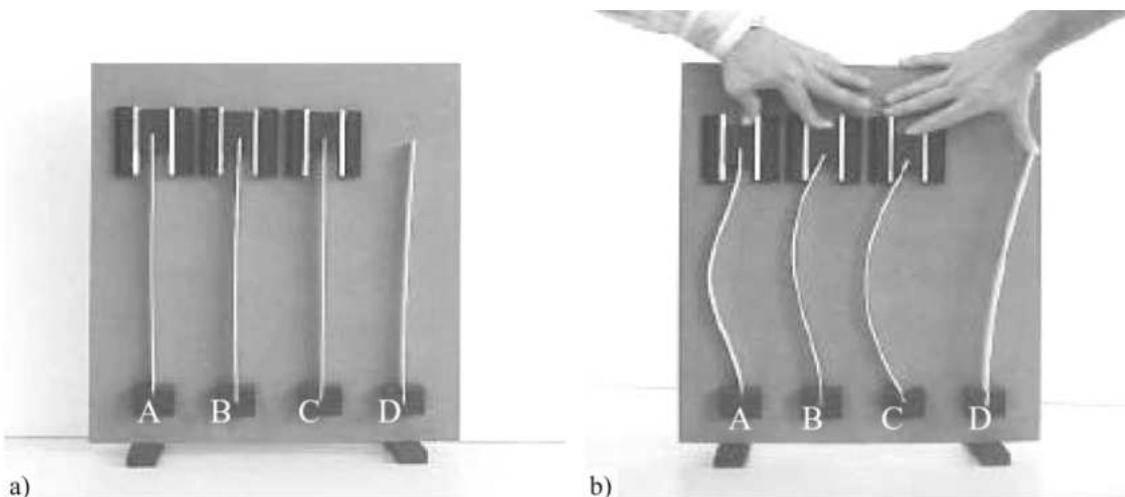


Figura 2.16 – Zacarias Chamberlain: modelo estrutural proposto por Santos (1983)
a) Modelo sem carregamento, b) Modelo com carregamento.
Fonte: CHAMBERLAIN *et al.*, 2000, p. 3

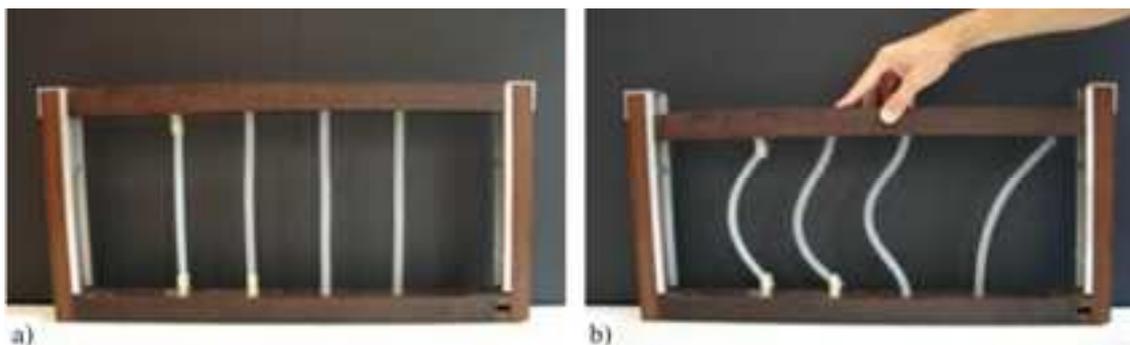


Figura 2.17 – FAU/UFRJ: modelo estrutural proposto por Santos (1983)

a) Modelo sem carregamento, b) Modelo com carregamento.

Fonte: Disponível em: <<http://www.fau.ufrj.br/apostilas/mse/Colunas.htm>>. Acesso em: 20 abr. 2008

Outro autor que trata do assunto é o Engenheiro e Professor Yopanan Rebello. Ele utiliza diversos artifícios para facilitar a compreensão por parte dos alunos. Suas aulas de estrutura são complementadas por diversos modelos qualitativos, construídos por ele mesmo (Figura 2.18), quando não, os próprios alunos são os modelos (Figura 2.19).

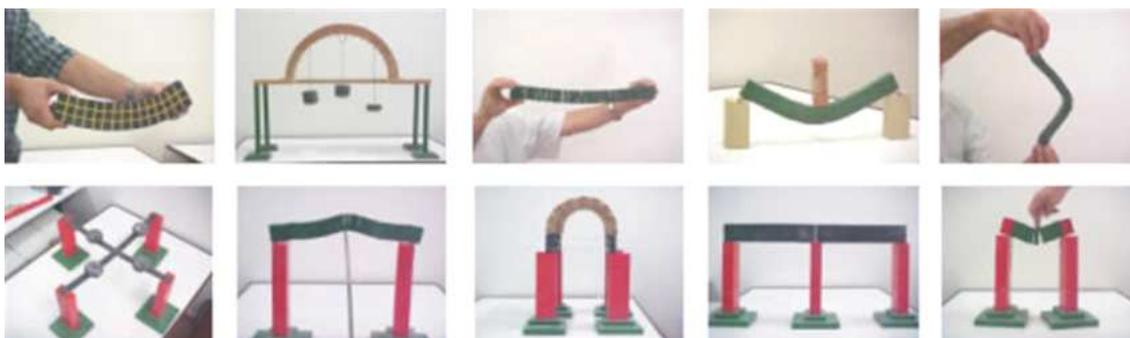


Figura 2.18 – Yopanan Rebello: modelos estruturais qualitativos

Fonte: Disponível em: <http://www.ycon.com.br/cod_CC28-G_master.htm>. Acesso em: 23 abr. 2008



Figura 2.19 – Yopanan Rebello: aula com modelos “humanos”

Fonte: REBELLO et al., 2001

Um exemplo bastante conhecido deste tipo de representação, através de pessoas, é a simulação do sistema estrutural da ponte Forth Railway Bridge de 1890 no Reino Unido (Figura 2.20).

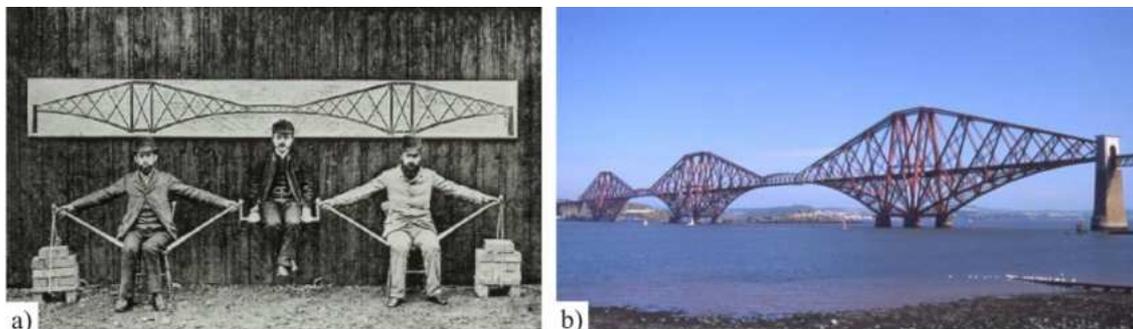


Figura 2.20 – Representação do sistema estrutural da ponte Forth Railway Bridge

Fonte: a) Disponível em: <<http://www.forthbridges.org.uk/>>. Acesso em: 21 dez. 2007, b) Disponível em: <<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=5582>>. Acesso em: 21 dez. 2007

Em sua dissertação de mestrado, Rebello (1992) apresenta uma avaliação do ensino de estruturas praticado nas escolas de arquitetura e ressalta a importância do uso de modelos qualitativos para a melhoria do ensino. No trabalho, é sugerida a utilização de uma mola como sendo um ótimo material didático para a visualização de um grande número de conceitos relacionados à estrutura.

Schwark (1996) apresenta em sua dissertação de mestrado sugestões para um curso intuitivo de teoria das estruturas. O uso de modelos também é citado como facilitador do aprendizado, principalmente nas disciplinas que compõem a área de estrutura. Este trabalho já é mais voltado ao curso de engenharia.

No livro “Fundamentos de Estruturas: um programa para arquitetos e engenheiros que se iniciam no estudo das estruturas”, Margarido (2001) dedica um capítulo exclusivo sobre a construção e utilização de modelos estruturais qualitativos, intitulado “Visualização das deformadas através de modelos”. Com o objetivo de demonstrar como as estruturas se comportam, o autor sugere uma lista de materiais, dentre eles a mola, para a construção de alguns sistemas estruturais como pórticos, treliças e grelhas, conforme a Figura 2.21.

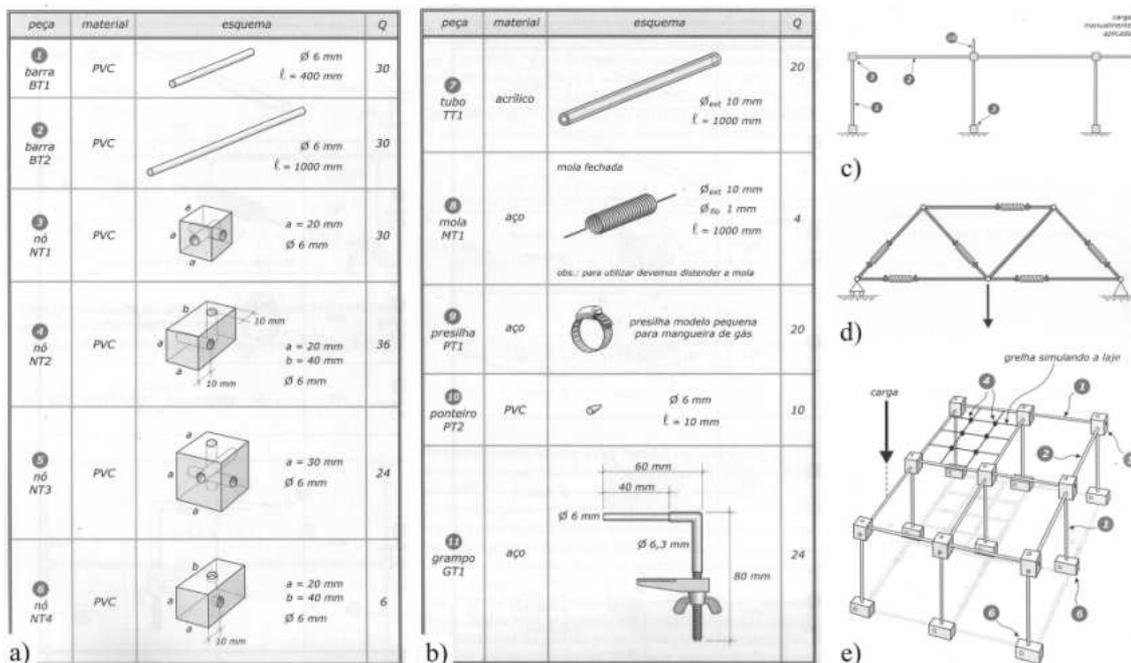


Figura 2.21 – Aluázio F. Margarido: projeto de modelos estruturais qualitativos
a) b) Relação das peças, c) Pórtico plano, d) Treliça plana, e) Pórtico espacial com grelha
Fonte: MARGARIDO, 2001, p. 263 – 267

No Brasil, existem alguns seminários que tratam sobre o ensino de engenharia como o Encontro de Ensino em Engenharia e o Congresso Brasileiro para o Ensino de Engenharia (COBENGE). Vários trabalhos relacionados ao assunto são apresentados nestes congressos, mas por se tratarem de eventos sobre o ensino de engenharia de uma forma geral, poucos abordam o uso de modelos qualitativos para o ensino de estrutura, como o de Chamberlain *et al.* (2001), que desenvolveu modelos qualitativos de treliças planas. A Figura 2.22 mostra um desses modelos.

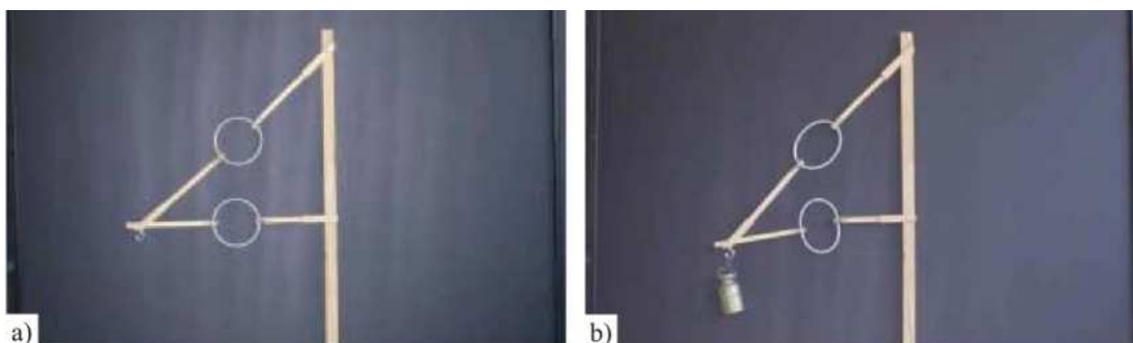


Figura 2.22 – Zacarias Chamberlain: modelos estruturais qualitativos de treliças planas
a) Treliça sem carregamento, b) Treliça com carregamento
Fonte: CHAMBERLAIN *et al.*, 2001

Rodrigues *et al.* (2006) apresenta aspectos do projeto de modelos desenvolvidos pelos alunos da disciplina “Modelagem dos Sistemas Estruturais” do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro (FAU/UFRJ) (Figura 2.23).

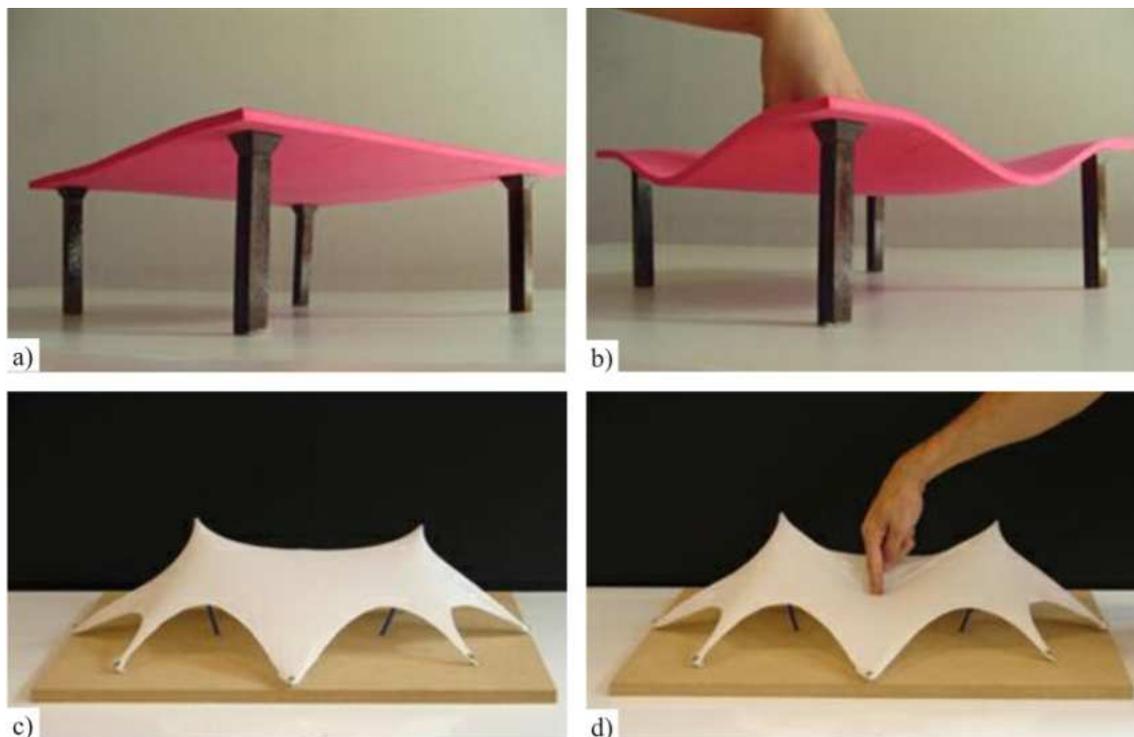


Figura 2.23 – FAU/UFRJ: modelos didático

a) Modelo de laje sem carregamento, b) Modelo de laje com carregamento, c) Modelo de membrana sem carregamento, d) Modelo de membrana com carregamento

Fonte: Disponível em: <<http://www.fau.ufrj.br/apostilas/mse/ModDidat.htm>>. Acesso em: 20 abr. 2008

Fora do país, uma das principais publicações sobre o uso de modelos qualitativos de estrutura no processo de ensino-aprendizagem é atribuída a Hilson (1972), que apresenta em seu livro “*Basic Structural Behaviour via Models*” diversos modelos estruturais qualitativos como os mostrados na Figura 2.24, e destaca o valor do uso de modelos para o aprendizado do comportamento dos sistemas estruturais em geral. Todos os modelos são detalhadamente descritos com dimensões e materiais utilizados para possibilitar a reprodução dos mesmos, e também é apresentado um tópico com o procedimento de teste a ser seguido para cada modelo.

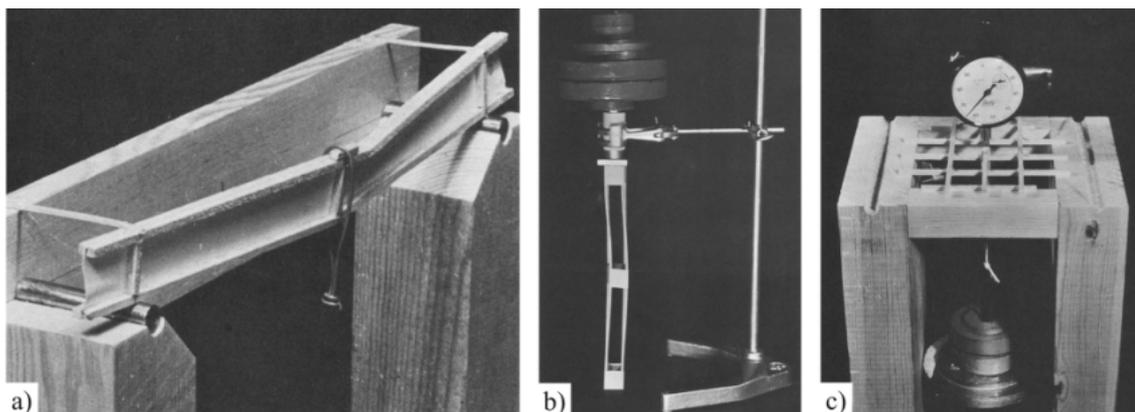


Figura 2.24 – Barry Hilson: modelos estruturais qualitativos
 a) Modelo de viga perfil I, b) Modelo de pilar, c) Modelo de grelha
 Fonte: HILSON, 1972

Os modelos de treliça e grelha, sugeridos por Hilson (1972), também podem ser encontrados representados no livro “Sistemas Estruturais: teoria e exemplos” de Sales *et al.* (2005, p. 107, 157).

Harris *et al.* (1999) apresentam no livro “*Structural Modeling and Experimental Techniques*” um apanhado geral sobre o uso atual dos modelos estruturais para aplicações em projeto, na educação, em pesquisas e no desenvolvimento de produtos. No capítulo 12, “*Educational Models for Civil and Architectural Engineering*”, é feita uma descrição minuciosa sobre os modelos estruturais utilizados na educação, desde histórico, classificação dos modelos, até estudo de casos, como o exemplo apresentado na Figura 2.25.

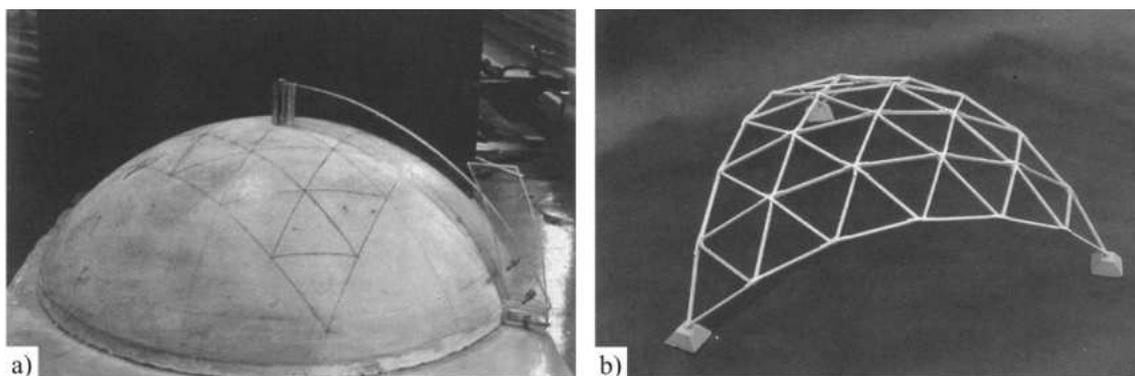


Figura 2.25 – Drexel University: modelo de uma geodésica com três apoios
 a) Superfície esférica utilizada para a montagem do modelo, b) Modelo de madeira balsa em escala 1/45
 Fonte: HARRIS et al., 1999, p. 750, 751

Nas páginas 713 e 714, é apresentado com mais detalhes, inclusive com fotos (Figura 2.26), o modelo estrutural de Godden⁹ (1963, *apud* HARRIS *et al.* 1999), utilizado por Margarido (1974), conforme apresentado anteriormente na Figura 2.13.

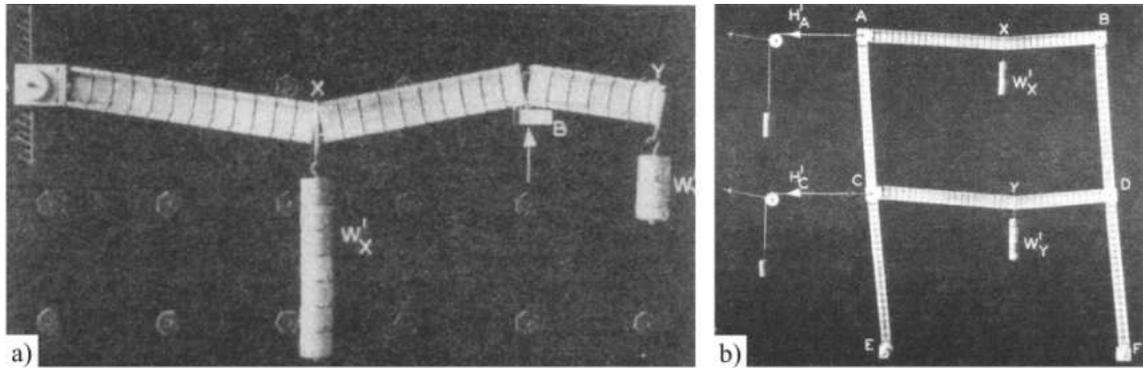


Figura 2.26 – W. G. Godden: modelo estrutural qualitativo
a) Modo de colapso de viga, b) Modo de colapso de pórtico plano.
Fonte: HARRIS *et al.*, 1999, p. 714

Além das publicações, destacam-se também algumas experiências didáticas em universidades. Uma delas é uma competição entre os alunos da Escola de Arquitetura de Grenoble na França, que inclusive é reproduzida em diversas universidades brasileiras. Os alunos são desafiados a construir pequenos modelos de pontes utilizando espaguete. A Figura 2.27 mostra duas destas estruturas.

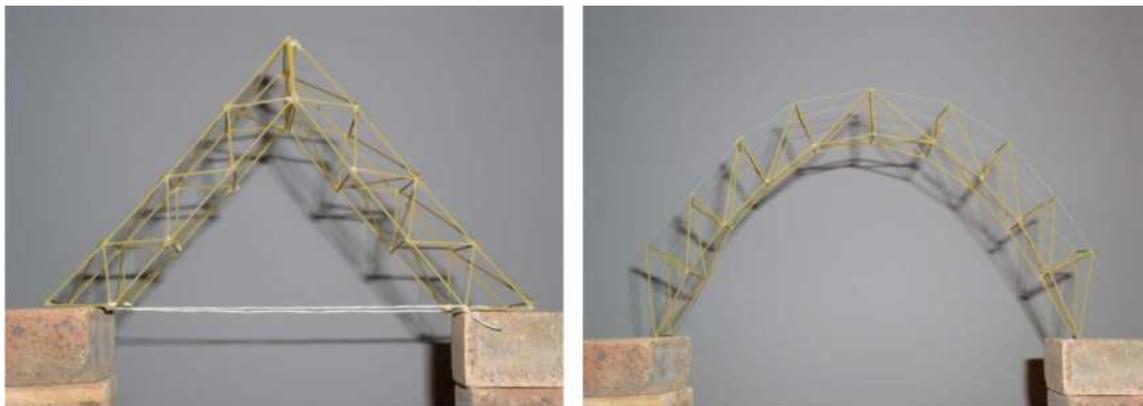


Figura 2.27 – Structures Spagettis Franchissements: modelos estruturais com espaguete
Fonte: Disponível em: <<http://www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/tixier/structures.html>>. Acesso em: 26 fev. 2007

⁹ GODDEN, W. G. *Demonstration models for teaching structural mechanics*. Engineering experiment station circular, n. 78, v. 60. University of Illinois: Urbana, 1963.

Uma atividade similar, organizada pela empresa *Vallourec & Mannesmann Tubes*, foi realizada na Universidade de *Aachen* na Alemanha em 2004. A “*V & M macaroni construction competition*” é uma competição de modelos de guindastes feitos com espaguete. A Figura 2.28, mostra alguns modelos participantes, e o modelo vencedor da competição.



Figura 2.28 – V & M macaroni construction competition

a) Modelos participantes, b) Modelo vencedor.

Fonte: Disponível em: <<http://www.vmtubes.de/jsp/epctrl.jsp?con=vmtubes000038&cat=vmtubes000198&mod=vmtubes000061&pri=vmtubes&lng=1>>. Acesso em: 07 fev. 2008

Esta prática tem se tornado comum em disciplinas de estrutura de algumas Universidades no Brasil, porém, como já foi mencionado anteriormente, poucas são publicadas. Uma delas é a competição de pontes de espaguete da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Essa atividade acontece desde 2004 e foi criada com base em experiências didáticas similares relatadas em instituições de ensino no exterior. A Figura 2.29 mostra dois modelos participantes da competição.

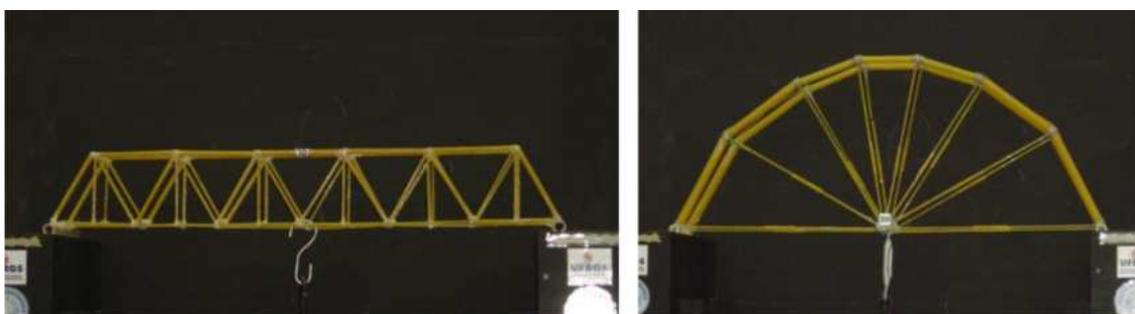


Figura 2.29 – UFRGS: competição de pontes de espaguete

Fonte: Disponível em: <<http://www.ppgec.ufrgs.br/segovia/espaguete/fotos.html>>. Acesso em: 14 fev. 2007

Outro trabalho desenvolvido na Escola de Arquitetura de Grenoble é o “*Structures et Forces*”. Nesta atividade, as turmas são divididas em grupos e cada equipe tem que construir e testar um modelo que simula um determinado sistema estrutural. O diferencial dessa atividade, em relação às mostradas anteriormente, está no fato de que os modelos são reproduzidos em escalas geométricas maiores e os alunos participam efetivamente da construção dos modelos. A Figura 2.30 mostra dois desses modelos.

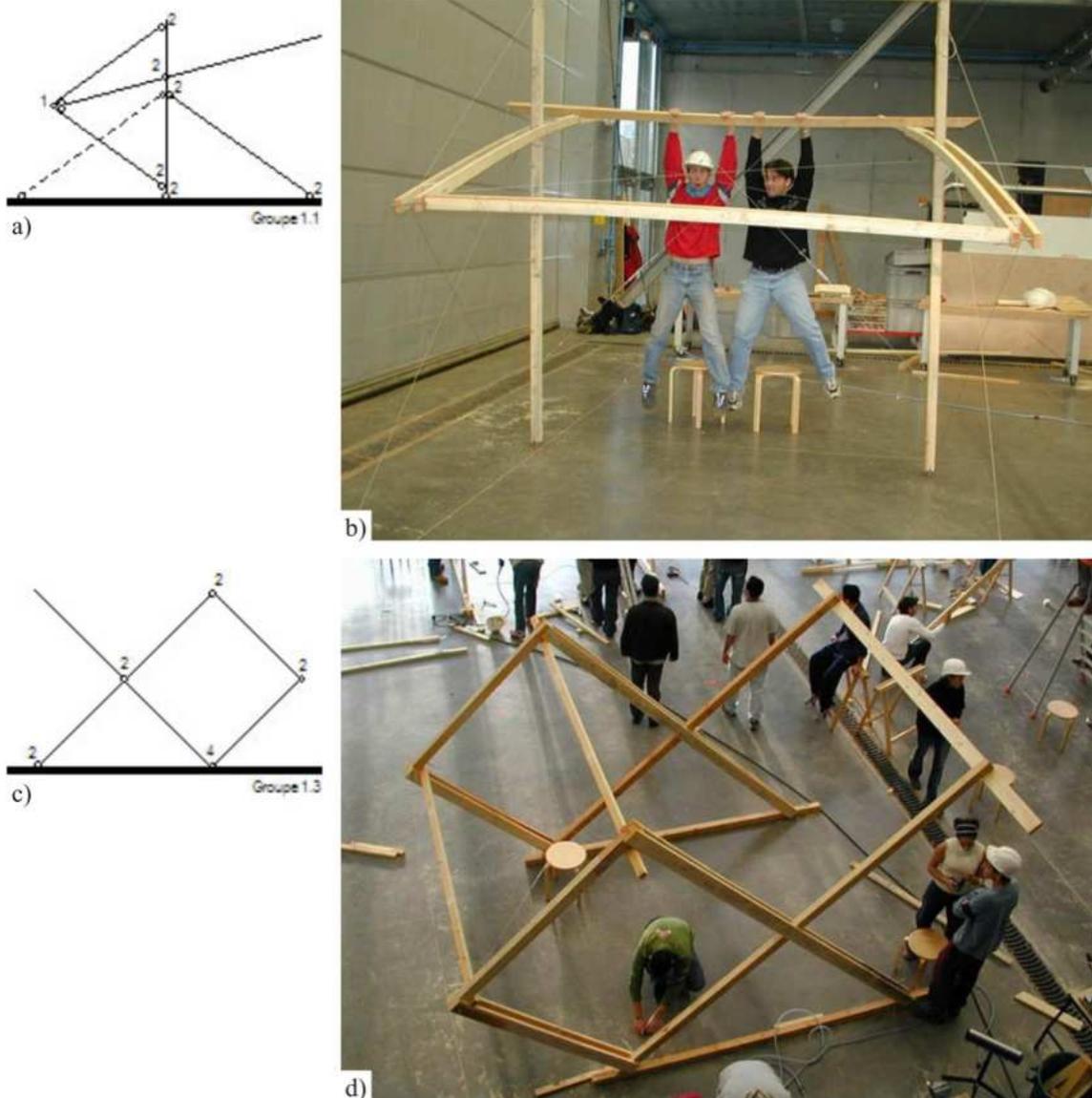


Figura 2.30 – Structures et Forces: modelos estruturais

a) Modelo teórico 1, b) Modelo físico 1, c) Modelo teórico 2, d) Modelo físico 2

Fonte: Disponível em: <<http://www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/tixier/structures.html>>. Acesso em: 26 fev. 2007

No ano de 2006, foi realizada na Universidade Federal de Ouro Preto a primeira competição de pontes de madeira balsa para os estudantes de graduação do curso de engenharia civil. Com base nas atividades didáticas mencionadas anteriormente, a competição foi criada com o objetivo de estimular o interesse dos alunos pelo tema. A Figura 2.31 mostra alguns modelos participantes da competição.



Figura 2.31 – UFOP: primeira competição de pontes de madeira balsa

Na disciplina Sistemas Estruturais do curso de mestrado em Construções Metálicas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) – turma 2006, dois trabalhos foram realizados utilizando-se modelos para o entendimento e estudo de aspectos como flecha, flambagem e a influência das propriedades geométricas dos sistemas estruturais metálicos. No primeiro, foram feitos ensaios de três vigas de perfil “I” com propriedades geométricas diferentes. Todos os modelos foram construídos com papel Paraná (Figura 2.32).

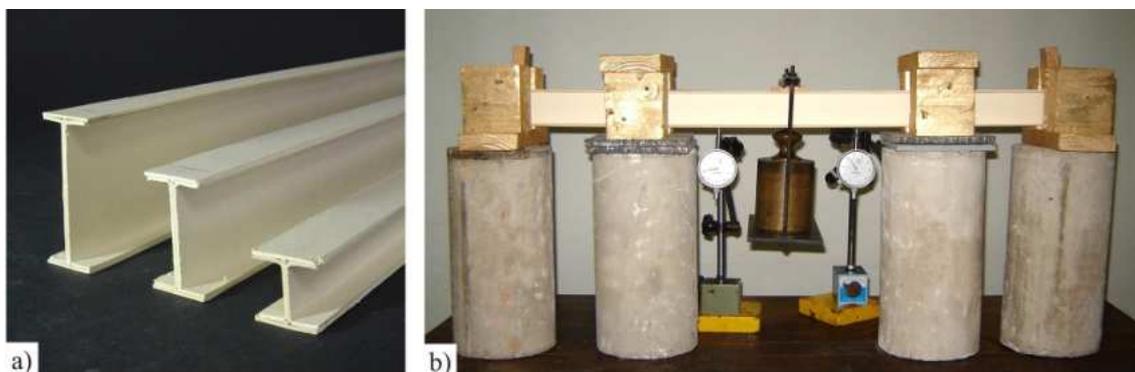


Figura 2.32 – UFOP: modelos estruturais de vigas perfil “I”
a) Vigas utilizadas nos ensaios, b) Configuração geral do ensaio

No segundo, foram utilizados modelos reduzidos, sugeridos por Sales *et al.* (2005), para o estudo do comportamento estrutural e das propriedades físicas que influem no desempenho de grelhas. Para a construção dos modelos, utilizou-se como material barras de madeira balsa com seção quadrada. Foram ensaiados três modelos diferentes, conforme Figura 2.33.

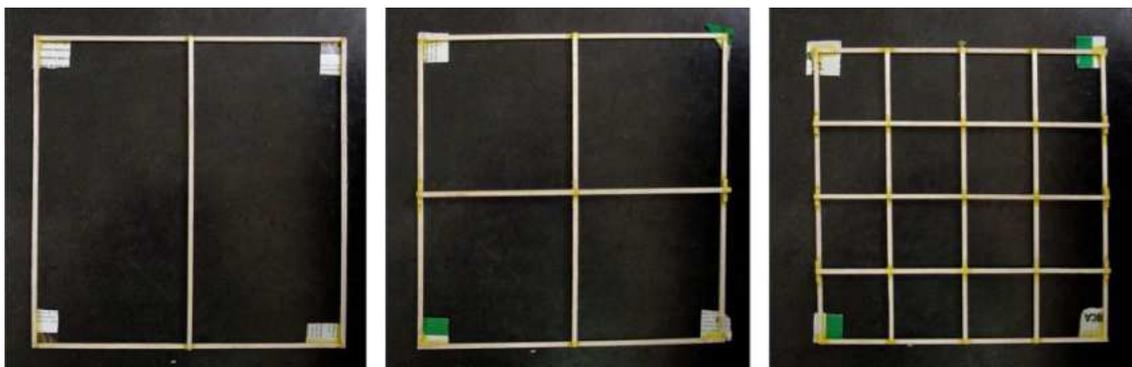


Figura 2.33 – UFOP: modelos estruturais de grelhas

Firmo (2003) cita uma atividade acadêmica realizada no curso de suplementação em pré-moldados realizado pelo CEFET-MG, na disciplina “A arquitetura dos pré-moldados”. Por meio de um brinquedo chamado “Quadro”, foram feitas simulações das implicações práticas decorrentes do processo das construções industrializadas. O objetivo principal do trabalho é demonstrar que o projeto com coordenação modular não representa uma sistemática complicada de projeto e não é um limitador da criatividade humana. A Figura 2.34 mostra duas estruturas criadas com o mesmo conjunto de peças.

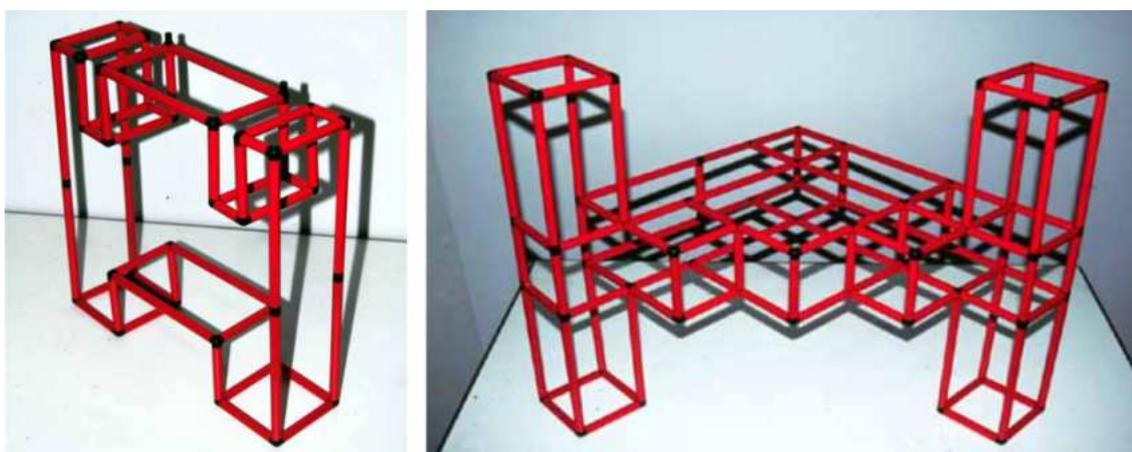


Figura 2.34 – Célio Firmo: modelos didáticos desenvolvidos a partir do “Quadro”
Fonte: FIRMO, 2003, p. 39

Para o entendimento do comportamento das estruturas, paralelamente aos modelos físicos qualitativos, existem outros artifícios que podem ser utilizados para facilitar a compreensão do assunto. Alguns trabalhos e *sites* na internet apresentam como alternativa algumas animações que demonstram o comportamento de sistemas estruturais.

Menezes (2003) desenvolveu em sua tese de Doutorado um CD-ROM educacional “Estruturas Metálicas: comportamento das estruturas de aço sujeitas a solicitações” que tem como objetivo mostrar o comportamento das estruturas de aço. Este comportamento pode ser observado através de 48 animações diferentes. A proporção dos deslocamentos e deformações das animações permite uma melhor compreensão dos fenômenos que podem ocorrer nas estruturas de aço. A Figura 2.35 mostra algumas imagens retiradas da animação de uma coluna em perfil “I” sujeita à compressão.

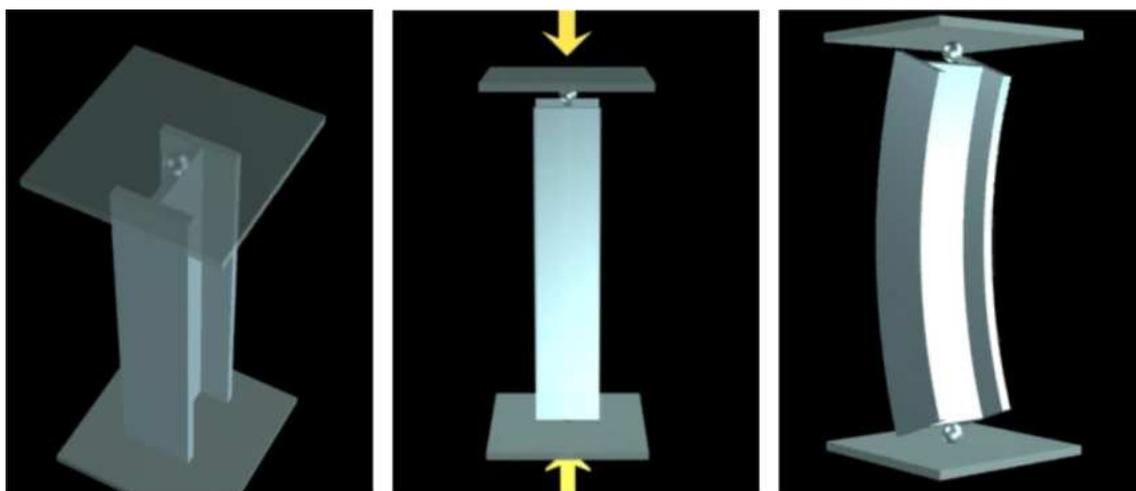


Figura 2.35 – Imagens da animação de uma coluna sujeita a compressão
Fonte: MENEZES, 2003

No *site* “*Building Big*”¹⁰ existe um laboratório interativo de engenharia chamado “*The Labs*”, dividido em quatro grupos (*Forces Lab*, *Loads Lab*, *Materials Lab* e *Shapes Lab*) que demonstram através de animações interativas o comportamento dos sistemas estruturais, levando em consideração a influência da forma, o tipo do material e os tipos

¹⁰ <http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/index.html>

de carga que normalmente atuam sobre as estruturas. Seguem algumas imagens capturadas destes vídeos (Figuras 2.36, 2.37 e 2.38).

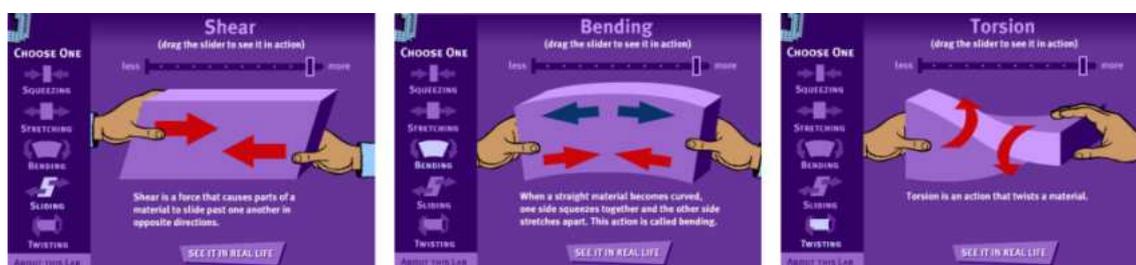


Figura 2.36 – Building Big: Imagens retiradas das animações do Forces Lab

Fonte: Disponível em: <<http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/lab/forces.html>>. Acesso em: 17 mai. 2008

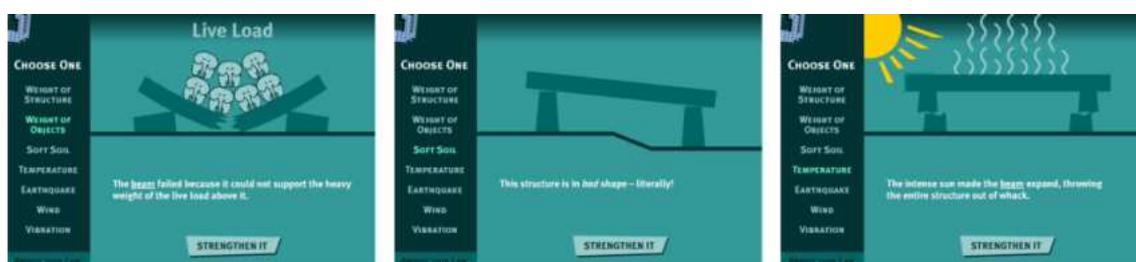


Figura 2.37 – Building Big: Imagens retiradas das animações do Loads Lab

Fonte: Disponível em: <<http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/lab/loads.html>>. Acesso em: 17 mai. 2008



Figura 2.38 – Building Big: Imagens retiradas das animações do Materials Lab

Fonte: Disponível em: <<http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/lab/materials.html>>. Acesso em: 17 mai. 2008

O uso de animações é uma proposta interessante para a demonstração dos fenômenos envolvidos no comportamento das estruturas, principalmente pela atual disponibilidade

do uso de computadores e conseqüentemente a facilidade de acesso à internet. Porém, mesmo com o acelerado desenvolvimento de novas tecnologias e a disponibilidade de uma série de recursos digitais, como *softwares* que calculam estruturas e fazem simulações do seu comportamento de forma bem didática, acredita-se que uma análise qualitativa de um objeto virtual permeia o campo da abstração bem mais que os estudos e vivências através de algo real, ou material, como os modelos físicos qualitativos. Além disso, mesmo sendo interativas, as animações citadas anteriormente são pré-definidas, o que impossibilita o usuário criar e testar algo novo.

A partir da análise dos trabalhos apresentados aqui, pode-se constatar que a grande maioria apresenta modelos estruturais qualitativos bastante interessantes, entretanto, quase todos os modelos físicos são específicos para determinado sistema estrutural. São poucos os modelos que podem ser adaptáveis a diferentes configurações e, assim, representar mais de um tipo de fenômeno. Os modelos também não apresentam soluções estruturais aplicadas a edificações reais ou em um estudo preliminar da concepção estrutural associada à arquitetura, o que é proposto neste trabalho.

Capítulo 3 | Maquete Estructural

3.1 | Introdução

A *Maquete Estrutural* é um material/modelo didático-experimental criado anteriormente pelo próprio mestrando (OLIVEIRA, 2005, 2006). Desde então, o material vem sendo desenvolvido e aperfeiçoado pelo arquiteto, chegando ao estágio que hoje se encontra neste trabalho. Foram feitas algumas adaptações, modificações e principalmente o aperfeiçoamento do modelo, que serão apresentadas posteriormente.

Conforme a classificação dos modelos estruturais apresentada no item 2.2, o modelo proposto, trata-se de um Modelo Estrutural Qualitativo que, assim como tal, tem como objetivo principal proporcionar aos estudantes de engenharia, de arquitetura e profissionais da área a compreensão dos conceitos básicos relacionados ao comportamento dos sistemas estruturais em geral, a fim de facilitar o entendimento da análise das estruturas através dos conhecimentos teóricos de cálculo. Suas características de modelo de alta deformação permitem, por meio de sua manipulação, a visualização do comportamento estrutural pelo lado qualitativo do fenômeno físico.

A *Maquete Estrutural* é composta por um conjunto de peças moduladas com dimensões padronizadas que permitem a montagem e simulação de diversos sistemas estruturais, desde os mais simples como pilares, vigas, contraventamentos, arcos, pórticos, tirantes e treliças passando pela associação entre os sistemas e chegando até os mais complexos como prédios de múltiplos andares, estruturas espaciais, torres, pontes, etc. Para todos estes sistemas, o modelo permite a análise de diferentes conceitos como estabilidade estrutural, visualização dos deslocamentos e deformadas, comportamento quanto ao tipo de carregamento e condições de contorno, a influência da forma e o processo de montagem. Tudo isso aliado à praticidade de montagem, manuseio e armazenamento.

Visando substanciar a capacidade de absorção de conceitos estruturais através da construção de modelos, no item seguinte é apresentada filosofias de ensino e experiências diversas utilizadas como base para a criação do modelo. Em seguida, a *Maquete Estrutural* propriamente dita é apresentada.

3.2 | Filosofia de ensino

“Eu escutei e me esqueci; Eu vi e eu me lembrei; Eu fiz e aí eu entendi!” Confúcio¹¹ (apud, PINHEIRO, 2000, p. 1).

A utilização da *Maquete Estrutural* para demonstração do comportamento dos sistemas estruturais tem como base filosofias e métodos de ensino e aprendizagem que defendem o pensamento do “aprender fazendo”. Segundo Seymour Papert, professor do MIT, “[...] O que você aprende no processo de fazer algo entra mais a fundo, o conhecimento cria mais raízes no subsolo da mente do que qualquer outra coisa dita por alguém”.¹²

Na concepção do pedagogo suíço Johann Heinrich Pestalozzi (apud FRIEDRICH *et al.*, 2007, p. 13), o aprendizado ideal deve ser “com a cabeça, o coração e as mãos”, e segundo resultados das pesquisas neurocientíficas modernas, hoje sabemos que o cérebro humano reúne num todo os três aspectos: o pensamento, o sentimento e a ação (FRIEDRICH *et al.*, 2007, p. 13).

Além de enriquecer o aprendizado, o contato direto com o material faz com que o usuário deixe de ser um mero espectador, passando a participar de forma mais ativa do processo de aprendizagem, estimulando, assim, seu interesse pelo tema. A proposta é que o usuário possa estimular sua curiosidade por meio do processo de ensaio e erro, e assim desenvolver um sentimento investigativo que vá além das soluções estruturais convencionais.

Tudo que se ensina a criança a impede de inventar e descobrir [...] A escola, dessa forma, deveria dar a qualquer aluno a possibilidade de aprender por si próprio, oportunidades de investigação individual, possibilitando-lhe todas as tentativas, todos os tateios e ensaios que uma atividade real pressupõe (PIAGET, apud REBELLO, 1992, p. 15).

A *Salvadori Education Centre on the Built Environment* (SECBE) é um bom exemplo de escola que utiliza a metodologia do aprendizado por meio da ação. “*See it – Build it*

¹¹ Confúcio (Kung-Fu-Tze) pensador chinês (551 a 479 AC).

¹² Disponível em: <<http://www.lego.com/education/default.asp>>. Acesso em: 10 mar. 2007.

– *Know it*”, esse é o lema da SECBE. Fundada pelo Engenheiro Estrutural Mario Salvadori, a SECBE é uma instituição educacional, sem fins lucrativos, voltada para ensino de crianças, com foco nos princípios da arquitetura, engenharia e da construção do meio ambiente, através de uma filosofia pedagógica chamada de “*hands-on/minds-on actives*” (Figura 3.1). Nessa instituição são utilizadas diversas ferramentas didáticas, como manuais, vídeos, livros e kits de modelos estruturais desenvolvidos por Salvadori. (BUSSEL, 1995).



Figura 3.1 – Salvadori Education Center: hands-on/minds-on actives
Fonte: Disponível em: <<http://www.salvadori.org/index.php>>. Acesso em: 16 maio 2008.

Estas mesmas idéias formam a base da filosofia de ensino “*Learning by Making*”, utilizada pela LEGO. Líder mundial no segmento de brinquedos educativos para crianças, a LEGO acredita que os métodos e materiais tradicionais de ensino tendem a limitar a habilidade natural das crianças de aprender, pois tais instrumentos estabelecem caminhos específicos para atingir as soluções apresentadas. Em vez de ter uma variedade de opções para solução dos problemas, os estudantes são limitados, em sua grande maioria, a apenas uma solução. O resultado é a simples reprodução do conhecimento no lugar da contextualização própria. Os estudantes que criam suas próprias soluções para os problemas, vivenciam a sensação do verdadeiro aprendizado, uma experiência totalmente diferente do que simplesmente memorizar o conhecimento já obtido por outros ¹³. A Figura 3.2 mostra um gráfico do processo de aprendizagem “*Learning by Making*”.

¹³ Disponível em: <<http://www.lego.com/education/default.asp>>. Acesso em: 10 mar. 2007.

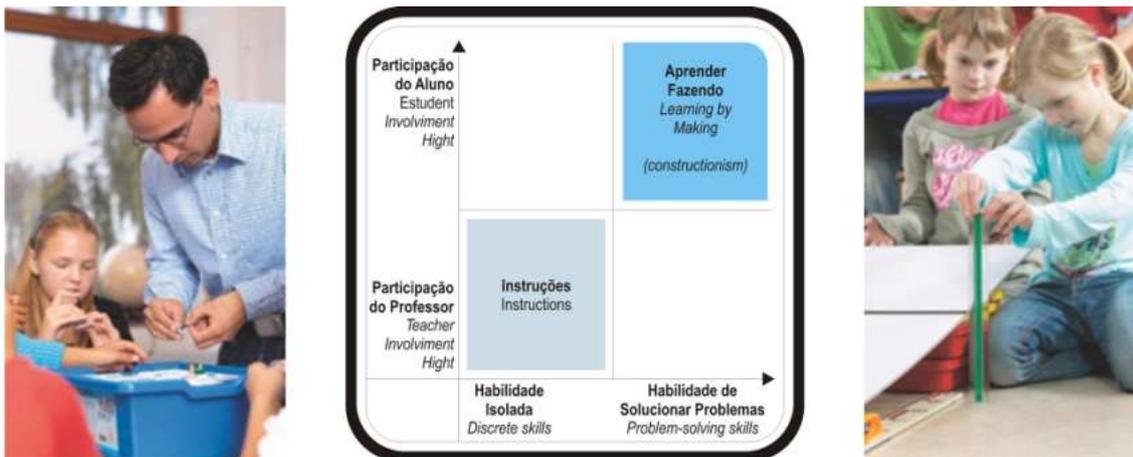


Figura 3.2 – Gráfico do processo de aprendizagem Learning by Making da Lego Education
 Fonte: Disponível em: <<http://www.lego.com/education/default.asp>>. Acesso em: 10 mar. 2007.
 [tradução nossa]

Na opinião de Chris Rogers, professor de Engenharia Mecânica da Universidade de Tufts nos Estados Unidos, as escolas deveriam ensinar as crianças a serem curiosas sobre as coisas ao seu redor, ensinando como resolver problemas e onde procurar por soluções e, portanto, encontrar as respostas. A utilização de ferramentas, como o material da *Lego Education*, permite que as crianças se tornem curiosas, e com a orientação do professor, possam encontrar respostas para suas perguntas.¹⁴

Para isso, a LEGO apresenta soluções que ajudam as crianças a se tornarem pensadores criativos, solucionadores de problemas e efetivos trabalhadores de equipe. Com diversas opções de kits e softwares que podem ser usados dentro e fora das salas de aula, estudantes com idade entre 8 e 16 anos, aprendem a projetar, programar e controlar modelos funcionais que representam tarefas reais em diversas áreas de conhecimento, como na ciência, tecnologia, engenharia e matemática, de um jeito divertido e engajado. A Figura 3.3 mostra dois kits para a montagem de sistemas estruturais.

¹⁴ Disponível em: <<http://www.lego.com/education/default.asp>>. Acesso em: 10 mar. 2007.



Figura 3.3 – Lego structures: kit para montagem de sistemas estruturais

Fonte: Disponível em: <http://www1.lego.com/education/default.asp?l2id=1_2&page=7_1>. Acesso em: 10 mar. 2007

Tal prática de ensino é comum em diversos temas. Para o ensino da física, base de todas as outras disciplinas científicas, é usual, por exemplo, a utilização de experimentos didáticos em sala de aula. No *site*¹⁵ da *Educational Innovations* estão disponíveis diversos produtos científicos para salas de aula de qualquer disciplina científica, inclusive o comportamento de sistemas estruturais. A Figura 3.4 mostra dois desses produtos.

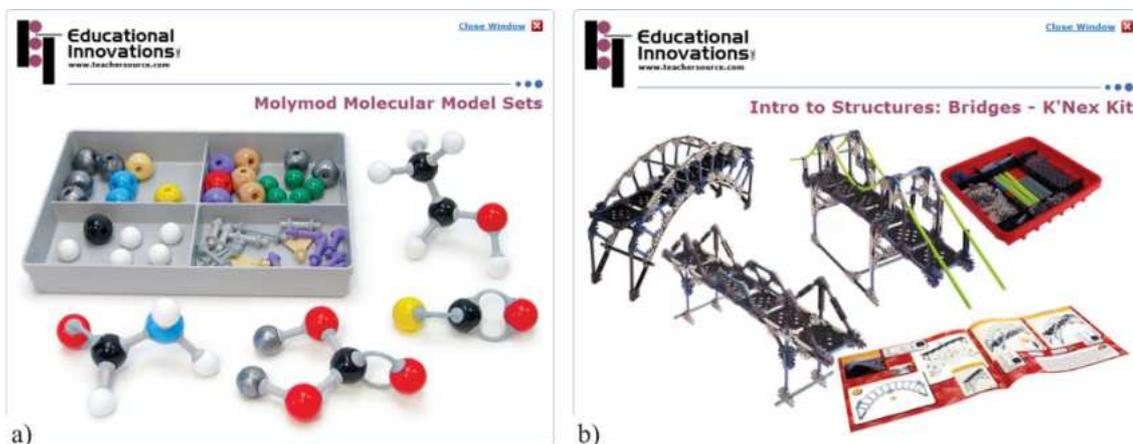


Figura 3.4 – Produtos educacionais da Educational Innovations

a) Kit para montagem de moléculas, b) Kit para montagem de pontes

Fonte: Disponível em: <<http://www.teachersource.com>>. Acesso em: 9 jan. 2008

¹⁵ <http://www.teachersource.com>

O professor americano Paul G. Hewitt é conhecido por utilizar esse mesmo método para ensinar os conceitos básicos da física. Hewitt defende a idéia de que a principal razão do estudo da física é aperfeiçoar a maneira de enxergar o mundo e para isso é preciso ter a compreensão dos conceitos básicos e ver a estrutura matemática como guias do pensamento, mais do que como receitas para realizar cálculos. Em seu livro “*Conceptual Physics*” (HEWITT, 1997), ele sugere através de imagens a utilização de diversos experimentos que auxiliam no aprendizado. A Figura 3.5 demonstra que com uma simples mola é possível compreender diferentes conceitos físicos, como as leis de Newton, propriedade dos materiais, características das ondas sonoras e forças eletrostáticas.

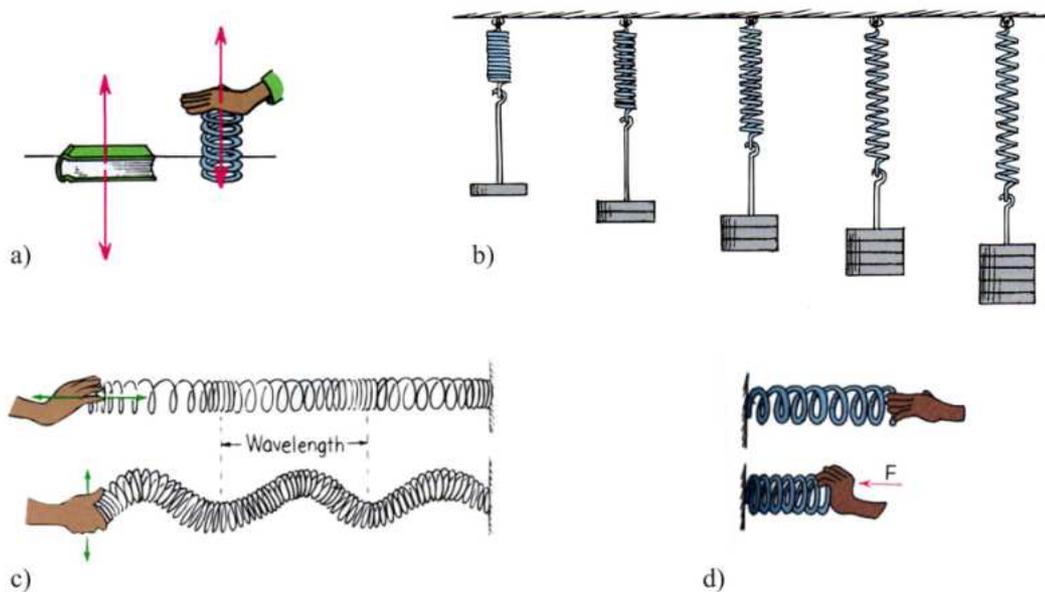


Figura 3.5 – Imagens do livro *Conceptual Physics*
a) Leis de Newton, b) Propriedade dos materiais, c) Ondas sonoras, d) Forças eletrostáticas
Fonte: HEWITT, 1997

Se esses conceitos da física e suas várias conexões formam a base para as demais ciências, adotar o mesmo processo de aprendizagem para a engenharia civil e arquitetura e, ainda, extrapolar para conceitos estruturais associados a estruturas inovadoras é o que se pretende com a *Maquete Estrutural*.

A proposta é que a *Maquete Estrutural* possa ser utilizada em uma primeira etapa, de experimentação, onde exista apenas a preocupação com o estudo qualitativo, dando

ênfase ao aspecto intuitivo, para que posteriormente sejam aprofundados e aplicados os conhecimentos teóricos de cálculo. A Figura 3.6 ilustra essas duas etapas, a análise qualitativa do comportamento da estrutura através da *Maquete Estrutural* e, em seguida, a representação do modelo teórico utilizado para a quantificação dos fenômenos envolvidos.

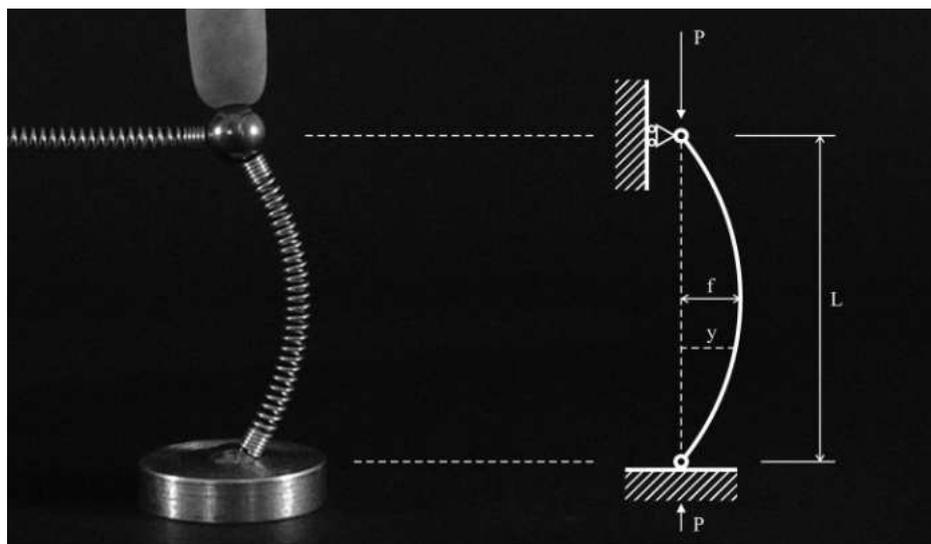


Figura 3.6 – Experimentação e conhecimento teórico

A principal razão para se utilizar experimentos com modelos no estudo de estrutura é que os fenômenos estruturais em geral, apesar de serem realmente simples, não são intuitivos, pois esses fenômenos fogem da gama de registro de nossos sentidos. Primeiro, devido à grandeza física das deformações e deslocamentos que ocorrem nas estruturas (que na maioria das vezes não podem ser vistos a olho nu), e, segundo, devido à grandeza das forças que estão envolvidas na resistência dos sistemas estruturais (que em geral são imperceptíveis aos nossos sentidos, incapazes de registrar tais valores) (MARGARIDO, 1974).

Através da *Maquete Estrutural* – por se tratar de um modelo físico de alta deformação onde todo o processo de manipulação é feito manualmente, desde a montagem até a aplicação do carregamento – o usuário pode, além de ver os deslocamentos e deformações, sentir a resistência e o comportamento do sistema estrutural ensaiado, aproximando a grandeza dos fenômenos manifestados nas estruturas para a percepção dos sentidos do homem. Referindo-se ao processo de aprendizagem proposto,

Siciliano (1974) afirma que “[...] é tão mais efetivo quanto mais sentidos humanos estiverem envolvidos no processo [...] não só a audição e a visão deveriam estar em jogo, mas o tato também.”

[...] quanto mais recursos forem empregados na transmissão de uma informação, tanto melhor ela se fixará na memória de longa duração. É mais fácil aprender com a colaboração do maior número possível de órgãos dos sentidos. [...] (FRIEDRICH; PREISS, 2007, p. 12).

No item seguinte, é apresentada a evolução da *Maquete Estrutural* e, finalmente, seus elementos.

3.3 | Evolução da Maquete Estrutural

A idéia de criar um modelo estrutural em escala reduzida que pudesse simular o comportamento das estruturas surgiu a partir da necessidade pessoal do mestrando em compreender os fenômenos que regem o comportamento dos sistemas estruturais de forma tátil e visual.

O modelo sofreu modificações significativas desde sua criação até à forma apresentada neste trabalho. Tal forma, provavelmente não é definitiva, pois se pretende que esta pesquisa sirva, também, como uma etapa do aperfeiçoamento constante do modelo, objetivando torná-lo cada vez mais fiel quanto ao comportamento das estruturas.

Inicialmente, foi idealizado e executado um modelo de um arco treliçado com peças de madeira e pequenos cabos metálicos ligados por meio de imãs e esferas metálicas, mostrado na Figura 3.7.

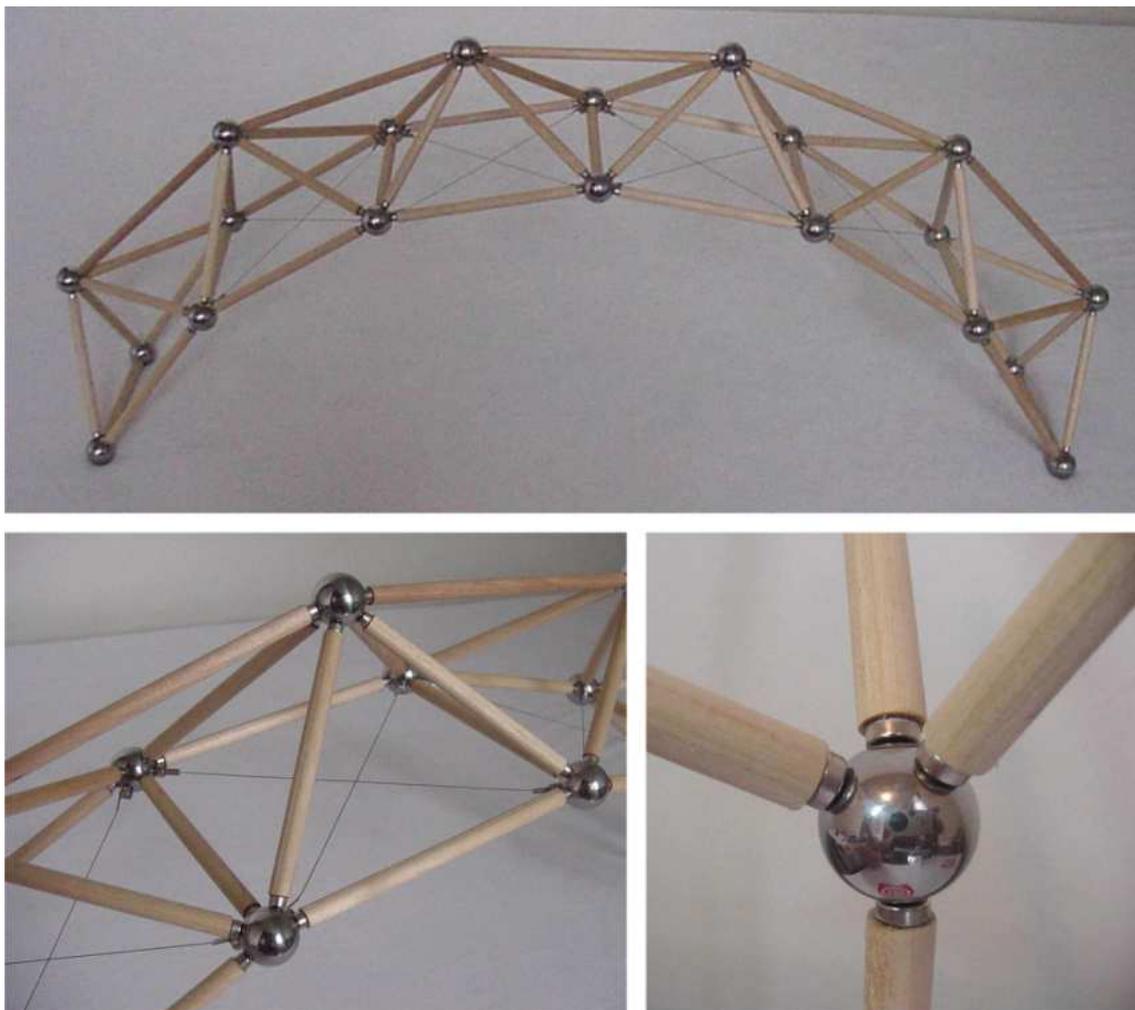


Figura 3.7 – Primeira montagem da Maquete Estrutural com peças de madeira

Porém, nesse modelo, só era possível analisar o sistema estrutural como um todo, não sendo possível perceber visualmente o comportamento dos elementos estruturais isolados, pois as peças de madeira eram muito rígidas e não sofriam deformações suficientes para tal análise.

Para isso, era necessário um material elástico que mesmo sofrendo grandes deformações, voltasse à sua forma original após a retirada do carregamento. Foram feitos diversos testes com alguns materiais, como tubos de plástico (Figura 3.8) e mangueiras de borracha (Figura 3.9). Porém, esses não corresponderam de forma satisfatória.



Figura 3.8 – Teste com tubos plásticos



Figura 3.9 – Teste com mangueiras de borracha

Quanto aos tubos de plástico testados, estes eram muito rígidos e precisavam de uma carga superior à força magnética dos ímãs para sofrerem as deformações desejadas, o que causava problemas nas ligações. Já as mangueiras de borracha, apresentavam grandes deformações, mas dificilmente retornavam à forma original, permanecendo deformadas. Foram feitos testes com peças de madeira e arames metálicos embutidos nas mangueiras, com o objetivo de resolver o problema, mas os resultados não foram satisfatórios (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Teste com madeira e arames metálicos embutidos nas mangueiras de borracha

Depois de diversas tentativas, chegou-se à mola metálica, sem dúvida, o material que mais se adequou às necessidades do modelo (Figura 3.11). Após alguns testes, ficou clara a eficiência do material para este tipo de análise.

Um exemplo simples do aprendizado global ao qual me refiro é o estudo de uma mola, onde podem ser analisados os conceitos de elasticidade, tração, os estudos de Hooke, o uso das molas em diversas situações, os tirantes, as estruturas penseis, etc. É fácil ver que de uma simples mola pode ser aprendido um grande número de conceitos, e suas ligações com as realizações estruturais e de outras áreas (REBELLO, 1992, p. 54).

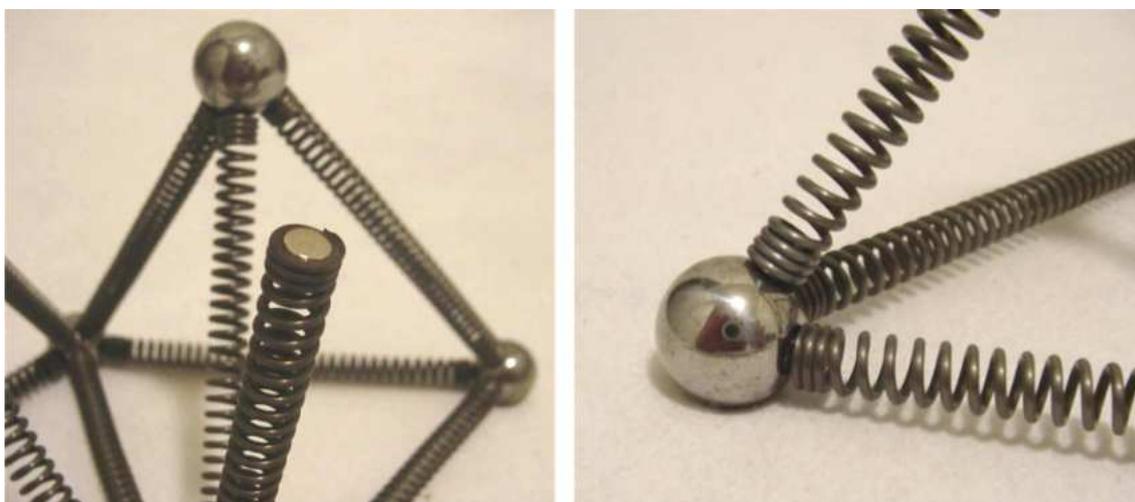


Figura 3.11 – Teste com molas metálicas

Além de permitir a visualização do comportamento de um sistema estrutural como um todo e dos elementos estruturais isoladamente, percebe-se, que com a mola é possível extrapolar a análise a partir da analogia dos passos da mola com as seções transversais ao longo de um elemento estrutural. As Figuras 3.12a e 3.12b, mostram que as seções transversais de uma viga submetida à flexão, giram em torno do seu eixo horizontal apresentando compressão na parte superior e tração na parte inferior. Nas Figuras 3.12c e 3.12d, percebe-se, que uma viga (componente da *Maquete Estrutural*), sobre as mesmas condições, apresenta uma aproximação dos passos da mola na parte superior e um afastamento na parte inferior.

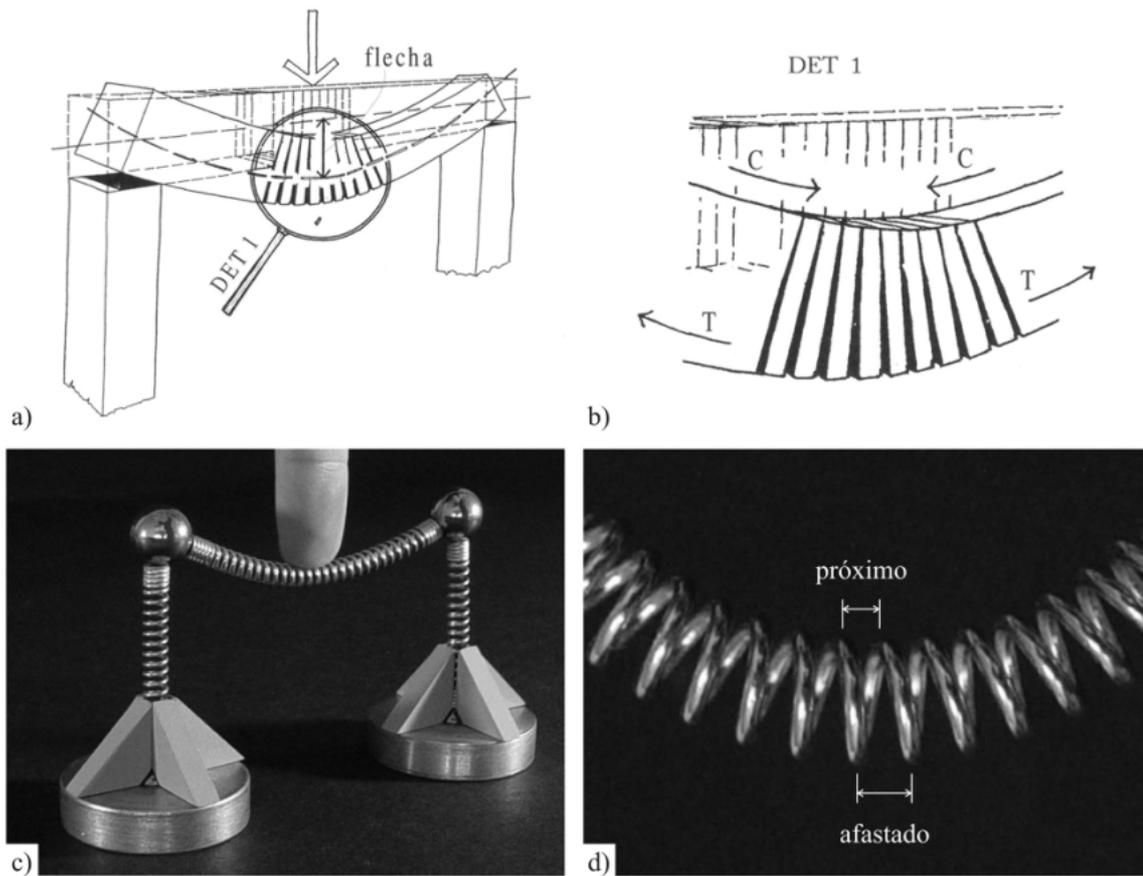


Figura 3.12 – Analogia das seções transversais de uma viga com os passos da mola
a) Viga submetida a flexão, b) Seções transversais da viga, c) Mola submetida a flexão, d) Paços da mola
Fonte: a), b) REBELLO, 2000, p.98

Após a definição do material das peças principais, foram desenvolvidos os outros elementos estruturais, como lajes, contraventamentos, tirantes e os diferentes tipos de ligações, conforme será apresentado no item 3.4. A Figura 3.13 mostra a primeira apresentação da *Maquete Estrutural* durante o curso de especialização CEACOM III.

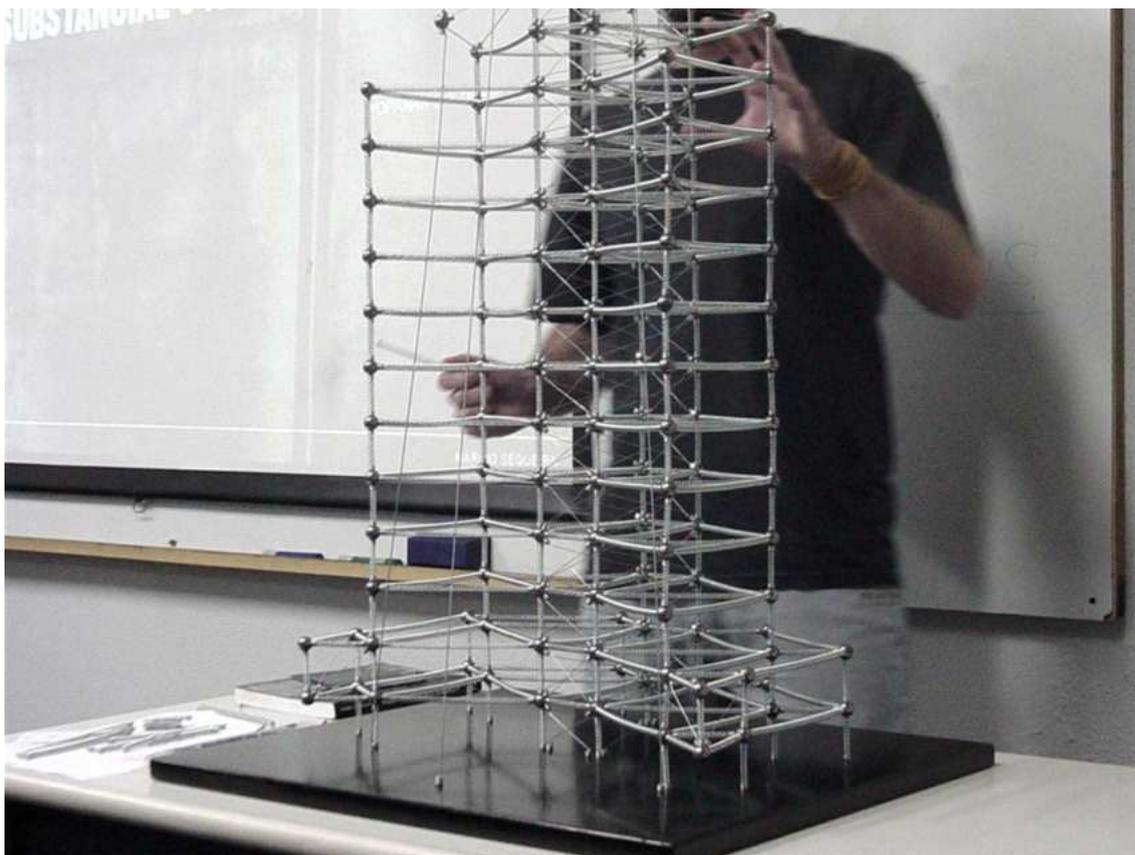


Figura 3.13 – Primeira apresentação da Maquete Estrutural no curso CEACOM III

Desde o princípio, tem-se procurado aperfeiçoar a *Maquete Estrutural* de forma a aproximá-la ao máximo do comportamento de uma estrutura real. Até então, sabia-se que, de forma geral, as deformadas e deslocamentos do modelo utilizando as molas metálicas eram semelhantes aos de uma estrutura comum. Mas até que ponto esse comportamento é realmente similar? As conexões entre as peças funcionam realmente como ligações rígidas ou rotuladas? Até onde se pode confiar no modelo para uma pré-avaliação do comportamento de um sistema estrutural? Daí a necessidade de realizar a investigação comprobatória proposta neste trabalho e apresentada no capítulo 5.

3.4 | Elementos da Maquete Estrutural

Com o objetivo de aproximar-se ao máximo do comportamento de uma estrutura real, a *Maquete Estrutural* é composta pelas mesmas peças que constituem uma estrutura comum, como pilares, vigas, lajes, paredes, contraventamentos, ligações, cabos, arcos,

fundações, etc. Para atender a todas as características mencionadas no item 3.1 e possibilitar a analogia quanto ao comportamento das estruturas, as peças do modelo foram projetadas da seguinte forma:

Pilares e Vigas: molas metálicas de tração e compressão que permitem grandes deformações quando carregadas, retornando a sua forma original após o descarregamento (Figura 3.14).

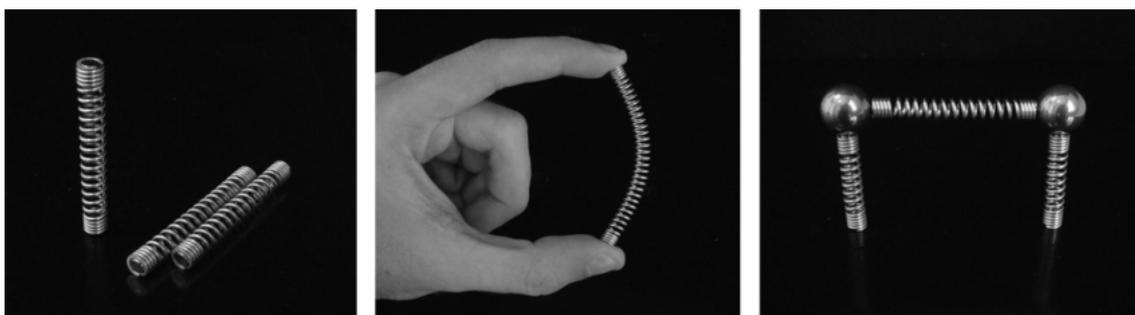


Figura 3.14 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: pilares e vigas

Contraventamentos e Tirantes: molas metálicas com a parte central retilínea que apresentam pouca resistência à compressão (Figura 3.15).

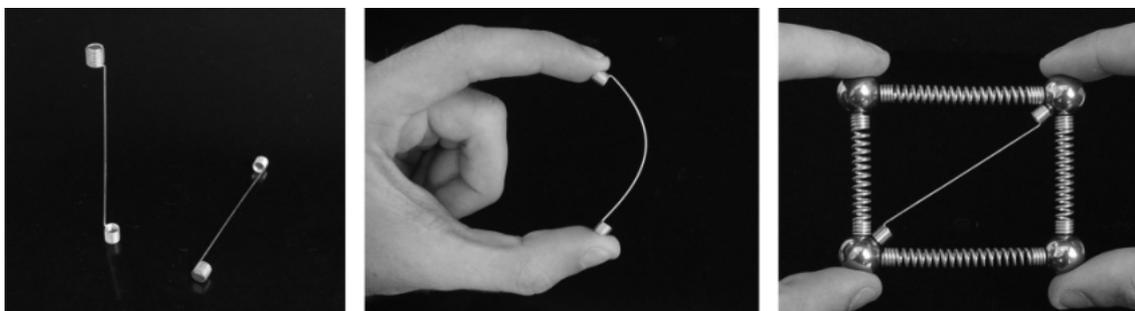


Figura 3.15 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: contraventamentos e tirantes

Lajes e Paredes: placas rígidas de MDF¹⁶ com imãs na periferia (Figura 3.16).

¹⁶ *Medium-density fiberboard* é um material derivado da madeira e é internacionalmente conhecido por MDF. Em português a designação correta é placa de fibra de madeira de média densidade. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Medium_Density_Fiberboard>. Acesso em: 22 mai. 2008.

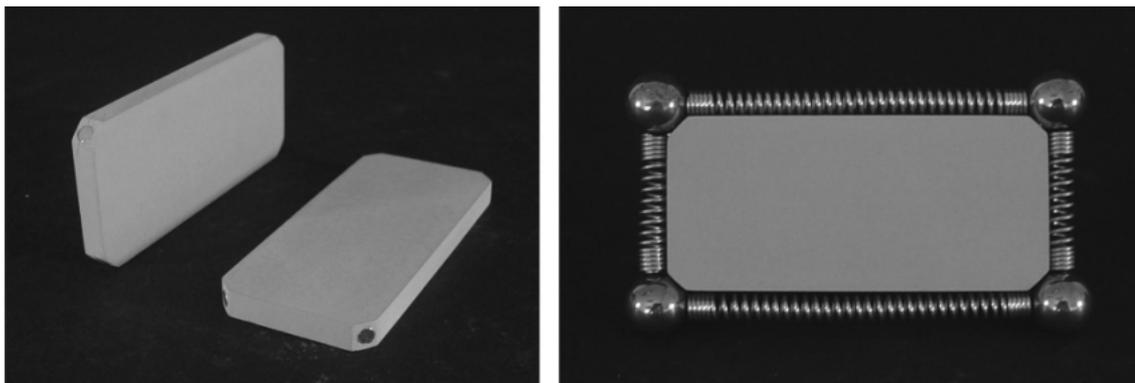


Figura 3.16 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: lajes e paredes

Cabos: são feitos de duas maneiras dependendo da finalidade, ou são pequenos cabos metálicos, ou pequenas correntes também metálicas. A ligação destas peças com o restante dos elementos do modelo é feita por meio de uma pequena mola metálica com imã embutido e um gancho em uma das extremidades (Figura 3.17).

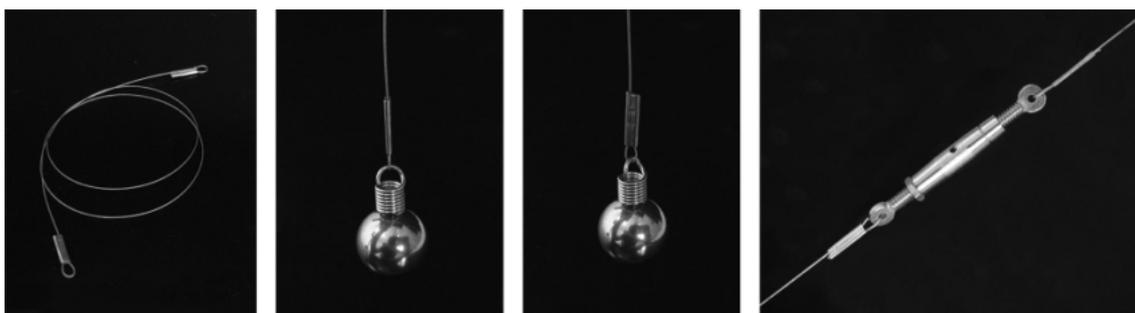


Figura 3.17 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: cabos

Arcos: molas metálicas de tração e compressão com o eixo curvo (Figura 3.18).

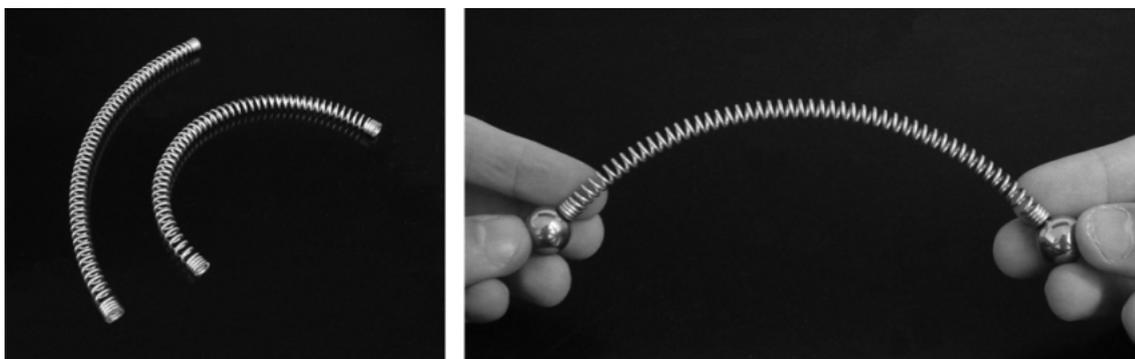


Figura 3.18 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: arcos

Todas as conexões do modelo são feitas por meio de magnetismo. Esferas metálicas fazem o papel da ligação entre as peças que possuem ímãs em suas extremidades.

Ligação rotulada: As ligações feitas por meio das esferas são consideradas ligações rotuladas, pois permitem o giro das peças não transmitindo momento (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação rotulada

Ligação rígida: a ligação rígida é obtida a partir do acréscimo de uma placa rígida de MDF com três ímãs que fazem a conexão entre as peças impedindo a rotação relativa entre as barras e consequentemente transmitindo o momento (Figura 3.20).

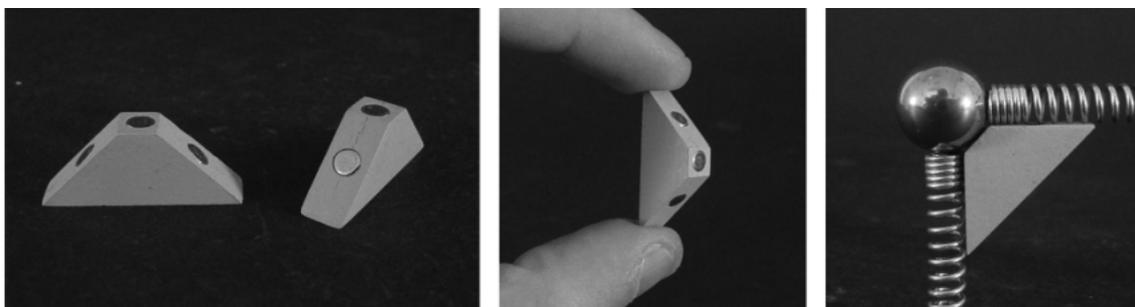


Figura 3.20 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação rígida

Ligação contínua: a ligação contínua é obtida a partir do acréscimo de uma placa rígida de MDF com três ímãs que fazem a conexão, por exemplo, entre as vigas independentes, transmitindo os esforços entre elas sem transferi-los para a coluna (Figura 3.21). Assim, a ligação contínua permite a continuidade do elemento estrutural e a transmissão dos esforços.

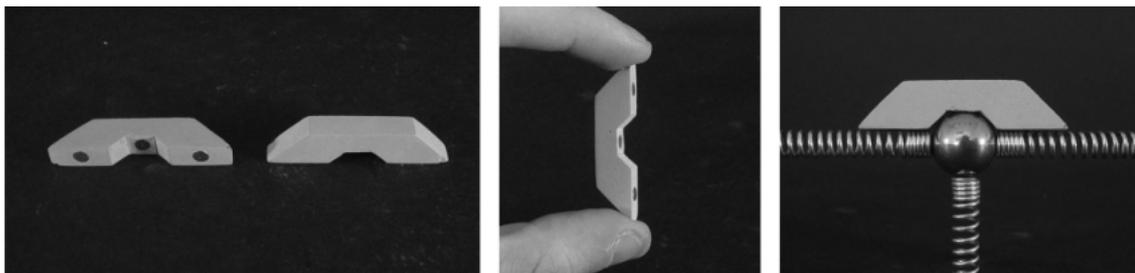


Figura 3.21 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação contínua

Ligação de base: a ligação da esfera com a base é feita por meio de uma peça metálica cilíndrica. Suas dimensões são adequadas para que as peças de ligação rígida possam ser utilizadas. Essa peça possui ímãs na parte inferior que fazem o contato com a fundação (chapa metálica) (Figura 3.22).

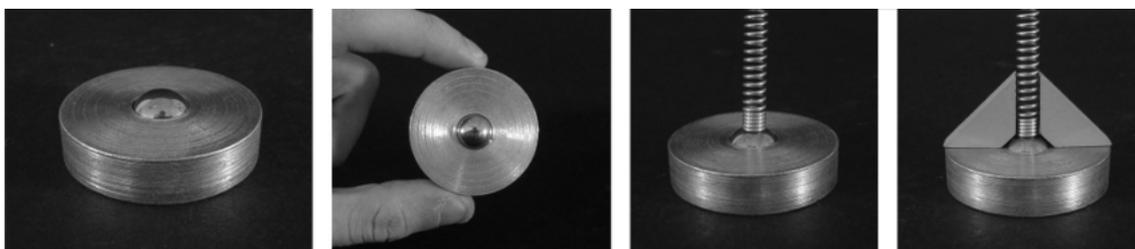


Figura 3.22 – Peças que compõem a Maquete Estrutural: ligação de base

Além de facilitar a montagem, as ligações com os ímãs e as esferas metálicas, permitem uma ampla possibilidade de arranjos sem um posicionamento pré-definido de uma mola em relação às outras, podendo assumir qualquer posição e gerando liberdade de criação. A Figura 3.23 mostra como uma peça pode assumir diversas posições.

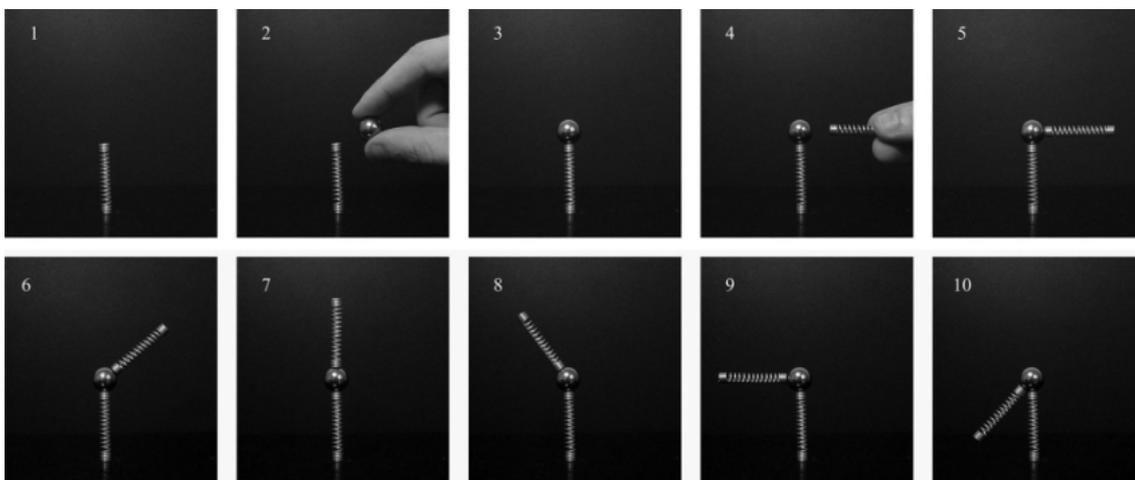


Figura 3.23 – Processo de montagem e liberdade de criação da Maquete Estrutural

Partindo do princípio que neste trabalho seriam feitas simulações de estruturas metálicas, foi estudada uma modulação quanto às dimensões de cada peça do modelo, de forma a aproximá-lo ao máximo das modulações e proporções utilizadas na grande maioria dos projetos que seguem este sistema construtivo. O principal desafio, quanto à padronização das peças, foi tentar simular o maior número de sistemas estruturais diferentes com a menor variedade de peças possível.

Por se tratar de um sistema construtivo industrializado, foram tomadas como base duas características fundamentais que, em geral, definem a coordenação modular do processo. A primeira, no que diz respeito à limitação da dimensão das peças (geralmente de 12 metros de comprimento) devido ao transporte, já que a estrutura é executada em fábrica e depois transportada e montada no local; e a segunda, no que diz respeito à preocupação quanto à repetição dos elementos estruturais, evitando uma grande variedade de dimensões, de forma a facilitar o processo de fabricação e montagem, e também, visando o máximo aproveitamento do material.

Tendo em vista as características do sistema construtivo e a possibilidade de montagem dos mais variados sistemas estruturais, foram definidos como elementos principais do modelo as colunas e as vigas. Todos os outros elementos têm suas dimensões definidas em função desses principais. Assim, optou-se que as colunas e vigas teriam quatro comprimentos diferentes que representariam, a princípio, as dimensões 3, 4, 6 e 12 metros de uma estrutura real, conforme ilustrado na Figura 3.24.

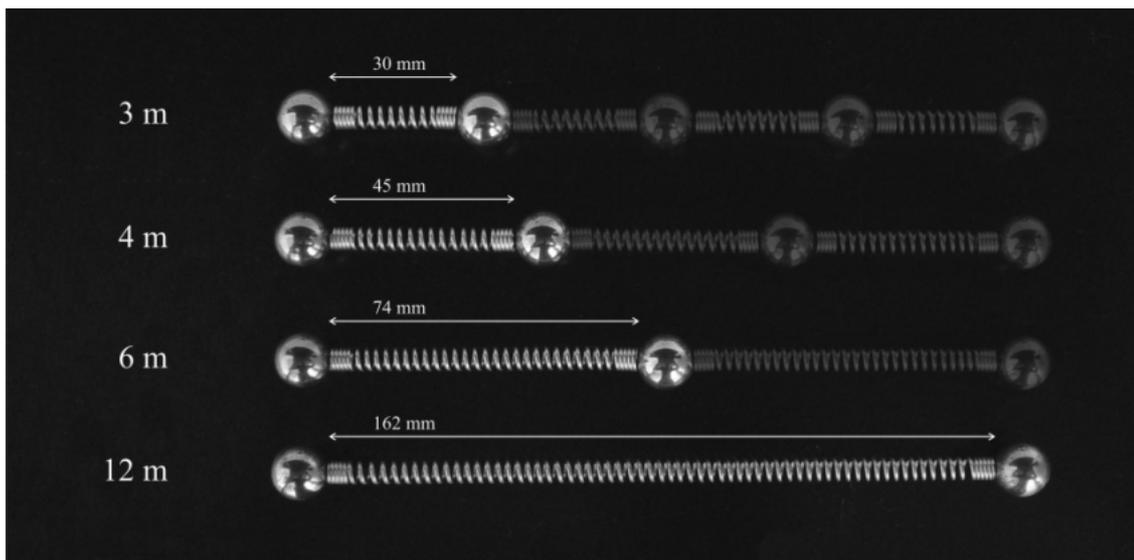


Figura 3.24 – Dimensão dos pilares e vigas da Maquete Estrutural

A relação mostrada na Figura 3.24 não precisa ser seguida obrigatoriamente, é possível utilizar qualquer mola para representar uma coluna de três metros, por exemplo, isso vai depender do sistema estrutural a ser analisado com o modelo. A relação mostrada anteriormente serve apenas para ilustrar os princípios utilizados para a definição da modulação que foi empregada na construção do modelo.

Destaca-se que, dependendo do elemento estrutural a ser analisado, peças com dimensões mais adequadas para representar melhor tal fenômeno podem ser utilizadas. No caso da análise da flambagem de colunas submetidas à compressão, onde, por exemplo, a esbeltez da peça é determinante, é mais interessante utilizar as peças (molas) mais esbeltas, ou seja, de maior comprimento. A Figura 3.25 mostra que a visualização da deformada é melhor nas peças com maior esbeltez, como as das Figuras 3.25a e 3.25b, do que nas peças de menor esbeltez, como as das Figuras 3.25c e 3.25d, onde este fenômeno é bem menor ou até mesmo inexistente.

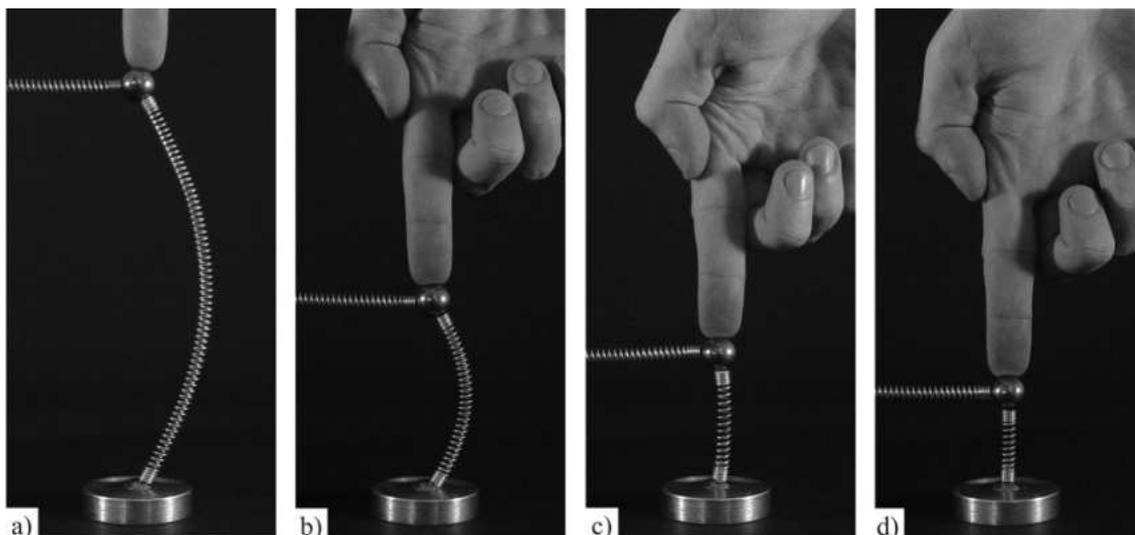


Figura 3.25 – Comparação das molas de comprimentos diferentes para colunas
a) Mola 12, b) Mola 6, c) Mola 4, d) Mola 3

No caso da análise de edificações verticais, por exemplo, quando o objetivo é a visualização do comportamento da estrutura como um todo e não somente do elemento comprimido, é mais interessante utilizar como colunas as peças (molas) com comprimentos menores.

Assim, a escolha da peça a ser utilizada para determinado elemento estrutural vai variar de acordo com as dimensões e proporções do sistema estrutural e com a finalidade da análise. Portanto, todos os sistemas estruturais apresentados neste trabalho foram idealizados de acordo com as dimensões das peças mais apropriadas.

A partir da definição do comprimento das molas, foram definidas as dimensões das outras peças e conseqüentemente sua nomenclatura, conforme indicado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Relação das peças da Maquete Estrutural

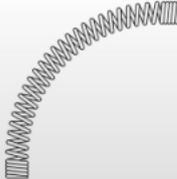
Nº	NOME	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
1	Ligação		esfera metálica ø14mm (ligação articulada)
2	Ligação de Base		peça metálica cilíndrica (ligação de base)
3	Ligação Rígida		peça rígida de MDF (ligação rígida)
4	Ligação Contínua		peça rígida de MDF (ligação de viga contínua)
5	Mola 3		mola metálica 30mm
6	Mola 4		mola metálica 45mm
7	Mola 6		mola metálica 74mm
8	Mola 12		mola metálica 162mm
9	Arco ½ circunferência		mola metálica em arco ½ círculo
10	Arco ¼ de circunferência		mola metálica em arco ¼ de círculo
11	Cabo		cabo metálico
12	Gancho		gancho metálico
13	Diagonal 3x3		mola metálica 48mm (diagonal 3x3)
14	Diagonal 3x4		mola metálica 61mm (diagonal 3x4)
15	Diagonal 3x6		mola metálica 88mm (diagonal 3x6)

Tabela 3.1 – Relação das peças da Maquete Estrutural (continuação)

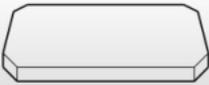
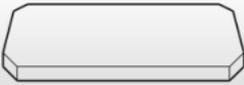
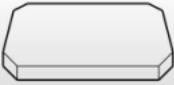
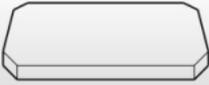
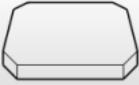
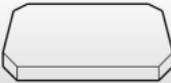
Nº	NOME	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
16	Diagonal 3x12		mola metálica 174mm (diagonal 3x12)
17	Diagonal 4x4		mola metálica 69mm (diagonal 4x4)
18	Diagonal 4x6		mola metálica 94mm (diagonal 4x4)
19	Diagonal 4x12		mola metálica 177mm (diagonal 4x12)
20	Diagonal 6x6		mola metálica 110mm (diagonal 6x6)
21	Diagonal 6x12		mola metálica 186mm (diagonal 6x12)
22	Diagonal 12x12		mola metálica 235mm (diagonal 12x12)
23	Placa 3x3		placa rígida de MDF dimensões: 38 x 38 x 6mm (placa 3x3)
24	Placa 3x4		placa rígida de MDF dimensões: 38 x 53 x 6mm (placa 3x4)
25	Placa 3x6		placa rígida de MDF dimensões: 38 x 82 x 6mm (placa 3x6)
26	Placa 3x12		placa rígida de MDF dimensões: 38 x 170 x 6mm (placa 3x12)
27	Placa 4x4		placa rígida de MDF dimensões: 53 x 53 x 6mm (placa 4x4)
28	Placa 4x6		placa rígida de MDF dimensões: 53 x 82 x 6mm (placa 4x6)
29	Placa 4x12		placa rígida de MDF dimensões: 53 x 170 x 6mm (placa 4x12)
30	Placa 6x6		placa rígida de MDF dimensões: 82 x 82 x 6mm (placa 6x6)

Tabela 3.1 – Relação das peças da Maquete Estrutural (continuação)

N°	NOME	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
31	Placa 6x12		placa rígida de MDF dimensões: 82 x 170 x 6mm (placa 6x12)
32	Placa 12x12		placa rígida de MDF dimensões: 170 x 170 x 6mm (placa 12x12)

Capítulo 4 | Programa Experimental

4.1 | Introdução

Neste capítulo, serão apresentados todos os detalhes de procedimento, configurações e a metodologia das análises experimentais e computacionais utilizadas neste trabalho.

O objetivo principal da investigação experimental foi validar, através da comparação de resultados, o modelo *Maquete Estrutural* como um meio confiável para avaliação qualitativa do comportamento estrutural aplicado a estruturas metálicas. Para isso, foram realizados no Laboratório de Estruturas Professor Altamiro Tibiriçá Dias do DECIV/EM/UFOP ensaios de diversos sistemas estruturais planos e espaciais, que posteriormente foram comparados com os resultados obtidos com simulações dos mesmos sistemas no *software “Structural Analysis Program”* (SAP2000, 2005). Esses resultados e suas comparações serão apresentados no capítulo 5.

Este trabalho apresenta um programa experimental alternativo que permite a medição dos deslocamentos sem contato direto com o modelo ensaiado. Esta metodologia foi desenvolvida com base em estudos de análises experimentais que utilizam técnicas de aquisição e processamento de imagens digitais (JURJO *et al.*, 2006).

Em geral, este tipo de análise é utilizada em modelos de escala reduzida que não podem ser monitorados com sensores convencionais, como é o caso da *Maquete Estrutural*, pois, devido à sensibilidade do modelo, a utilização desses sensores provocaria alterações significativas no seu comportamento. Além dos modelos reduzidos, esta metodologia também pode ser aplicada em grandes estruturas com difícil acesso para a colocação da instrumentação convencional (JURJO *et al.*, 2006).

Porém, neste caso, devido ao objetivo da análise, foi utilizado um aparato computacional bem mais simples do que os utilizados normalmente nesse tipo de análise, visto que a *Maquete Estrutural* não é um modelo reduzido cujas grandezas físicas são medidas e representam o protótipo. Portanto, os valores dos deslocamentos não foram quantificados, mas as deformadas e sua relação com os sistemas estruturais foram avaliadas.

4.2 | Metodologia

A metodologia experimental, desenvolvida neste trabalho, para a validação da *Maquete Estrutural* é constituída basicamente de cinco etapas, que serão descritas a seguir:

- Montagem do modelo;
- Digitalização;
- Simulação computacional;
- Preparação e sobreposição das imagens;
- Comparação dos resultados.

4.2.1 / Montagem do modelo

Nesta primeira etapa é definido o modelo teórico, em seguida é feita a separação das peças e posteriormente a montagem do sistema estrutural a ser ensaiado, conforme apresentado na Figura 4.1.

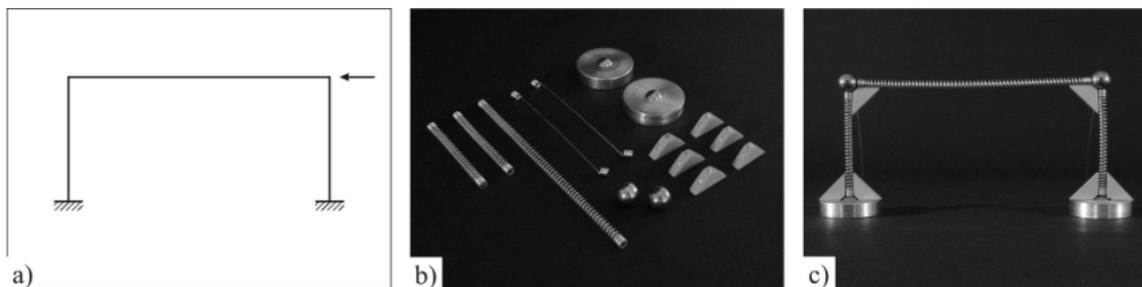


Figura 4.1 – Montagem do modelo

a) Modelo teórico escolhido, b) Peças separadas para a montagem, c) Vista frontal do sistema estrutural

Para a montagem e estabilização das estruturas planas, foram utilizados alguns artifícios, como componentes da *Maquete Estrutural*. No caso dos pórticos planos, como o da Figura 4.1c, foram utilizados duas peças de contraventamentos/tirantes conectadas a base metálica para manter a estrutura no mesmo plano, conforme mostrado na Figura 4.2.

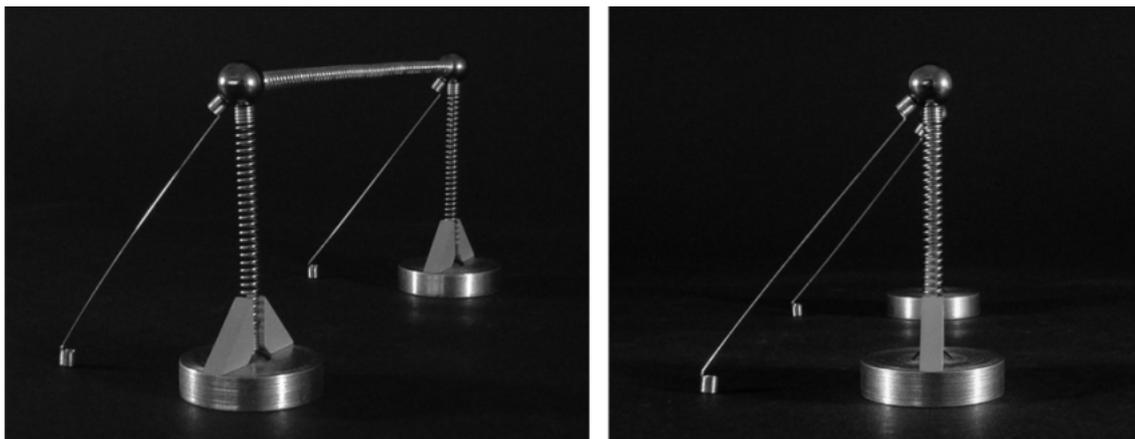


Figura 4.2 – Peças utilizadas para a estabilização das estruturas planas

Em alguns casos, quando a estrutura apresenta uma quantidade maior de nós, como as treliças planas, por exemplo, não foi possível a utilização destes elementos de travamento, sendo então utilizada como sistema de estabilização a montagem das treliças em dois planos, conforme será apresentado no item 5.2.6.

Para a análise das colunas e vigas, isoladamente, foram utilizados acessórios metálicos como elementos rígidos para a conexão/ancoragem das peças de ligação de base em planos diferentes do horizontal.

4.2.2 / Digitalização

Para a digitalização das imagens, foi utilizado um aparato instrumental simples composto de uma câmera digital com tri-pé e um sistema de luz para manter a iluminação uniforme sobre a estrutura. Para melhorar a qualidade das imagens, utilizou-se um fundo de cor preta (material usado em estúdios fotográficos) para aumentar o contraste com as peças do modelo e eliminar as sobras geradas pela estrutura sobre a base e o fundo (Figura 4.3). Procurou-se manter nos ensaios todos os procedimentos de utilização do modelo da forma que serão feitos normalmente. Portanto, todo manuseio do modelo incluindo, a aplicação do carregamento, foi feito manualmente.



Figura 4.3 – Aparato instrumental utilizado na análise experimental

Nesta etapa, é feita a preparação da instrumentação utilizada e a digitalização da imagem do modelo. Após a montagem do modelo (Figura 4.4a), é aplicada uma força na direção desejada gerando uma estrutura deformada, como a representada na Figura 4.4b. Esta imagem é digitalizada para posterior avaliação e comparação com a simulação computacional.

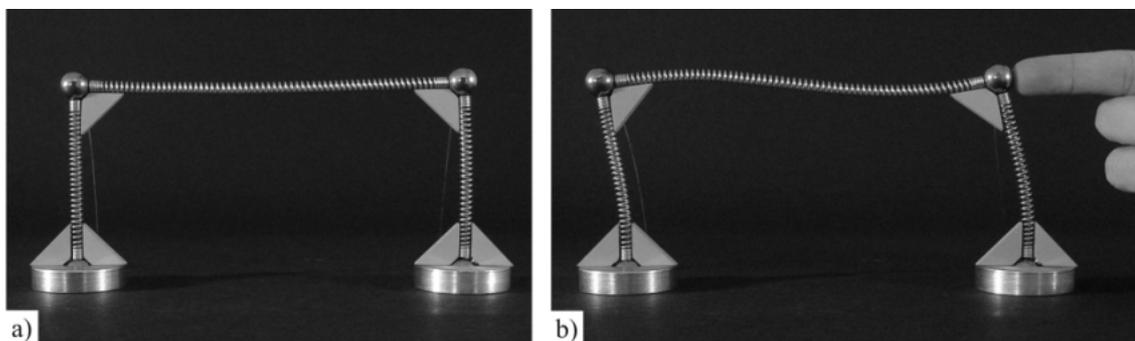


Figura 4.4 – Digitalização do modelo deformado
a) Modelo estrutural montado, b) Deformada do modelo estrutural

4.2.3 / Simulação computacional

Paralelamente a montagem do modelo e a digitalização da imagem, são feitas a modelagem e a simulação do mesmo sistema estrutural no software “*Structural Analysis Program*” (SAP2000). Com este programa, é possível simular estruturas com comportamentos lineares e não-lineares através de análises estáticas e dinâmicas e, também, estruturas em 3D. A partir do programa, é gerada uma imagem da deformada da estrutura modelada (Figura 4.5).

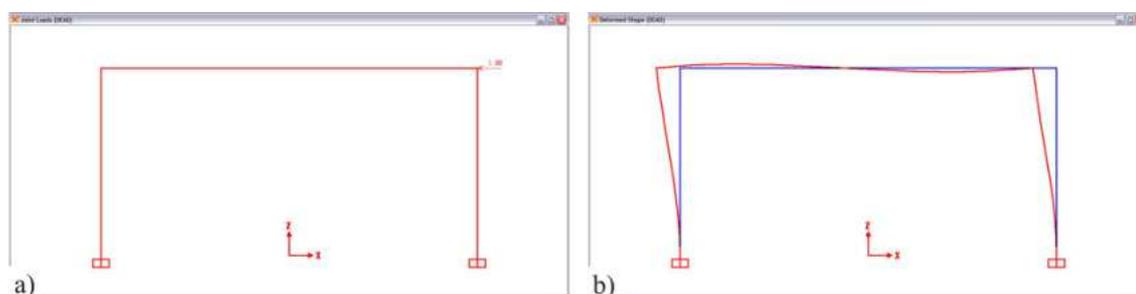


Figura 4.5 – Simulação computacional no software SAP2000
a) Modelo estrutural com indicação do carregamento, b) Deformada da estrutura

Para a simulação computacional dos sistemas estruturais, foi feita uma correlação proporcional das dimensões da *Maquete Estrutural* com as dimensões mais usuais do mesmo sistema em escala real, conforme o exemplo da Figura 4.6. Essa correlação observa a proporção da edificação, as características do elemento estrutural e as particularidades da *Maquete Estrutural*.

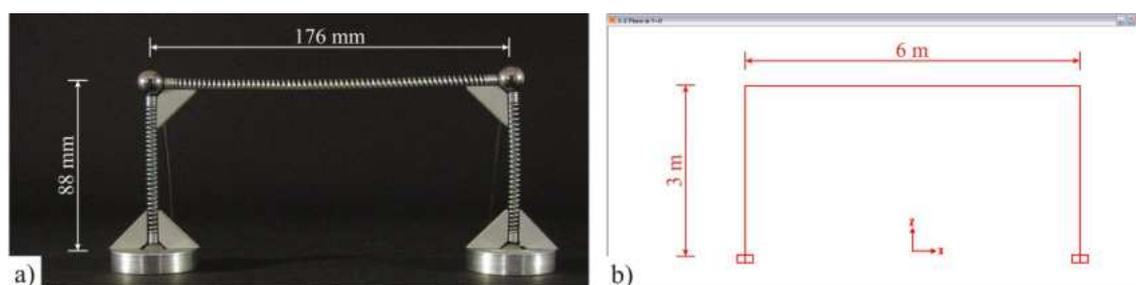


Figura 4.6 – Exemplo da correlação de escala do modelo com a modelagem computacional
a) Dimensões da Maquete Estrutural em milímetro, b) Dimensões do modelo no SAP em metro

Com o objetivo de simplificar a simulação computacional e aproximá-la ao máximo da *Maquete Estrutural*, optou-se por utilizar uma única seção transversal, tubular circular,

para todos os elementos estruturais, já que todas as molas do modelo também têm seção circular.

Antes de ser definida a seção tubular circular, foram feitas diversas simulações variando as tipologias de seções transversais dos elementos, de modo a verificar a influência da mesma no resultado final. Para análises de um sistema estrutural em um único plano, como um pórtico plano, por exemplo, a escolha da seção transversal dos elementos não influencia no resultado da deformada e dos deslocamentos.

Como a configuração da deformada de um sistema estrutural pode ser alterada para qualquer escala no *software*, optou-se por utilizar uma seção transversal com dimensões aleatórias e um único valor representativo, de 1 kN, para todos os carregamentos aplicados nas estruturas simuladas.

4.2.4 | *Preparação e sobreposição das imagens*

Esta etapa tem como objetivo principal preparar as imagens digitais para a etapa final de comparação dos resultados. Para isto, foi utilizado o *software* Adobe Photoshop CS (2003) que permite melhorar a qualidade das imagens, ajustando cor, tamanho e posição em relação à imagem gerada pelo *software* SAP2000. Optou-se por utilizar as imagens da *Maquete Estrutural* em preto e branco para facilitar a visualização da sobreposição das imagens coloridas geradas pelo *software* na etapa de comparação dos resultados. A Figura 4.7 apresenta as duas imagens na área de trabalho do *software* Adobe Photoshop durante o processo de preparação e sobreposição das mesmas.

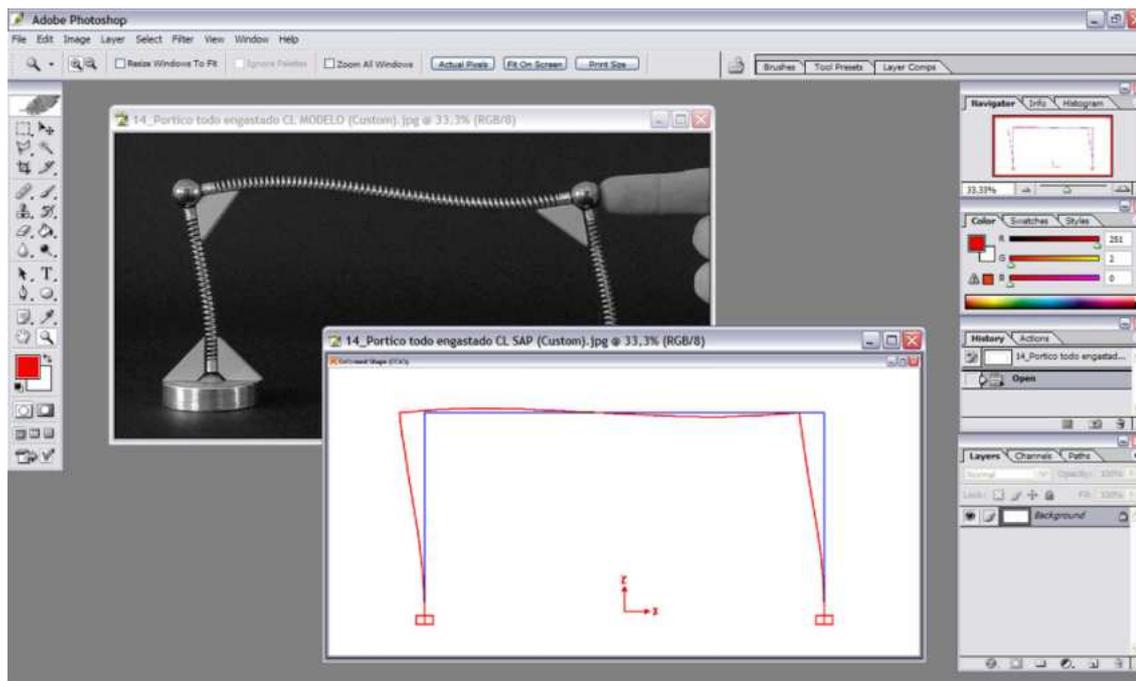


Figura 4.7 – Preparação das imagens no software Adobe Photoshop

Esta metodologia mostrou-se eficiente no caso de estruturas planas, conforme será apresentado no exemplo a seguir. No entanto, para a comparação das deformadas das estruturas espaciais, o processo de sobreposição das imagens não foi utilizado.

As imagens, em três dimensões, das estruturas espaciais fornecida pelo *software* SAP2000 apresentam distorções acentuadas devido aos pontos de fuga da perspectiva estarem muito próximos entre si, conforme a Figura 4.8. Isso impossibilita a sobreposição com as imagens da *Maquete Estrutural*, pois essas distorções acentuadas, são artifícios utilizados na construção da perspectiva. Na imagem de um objeto real, essas distorções são bem mais suaves. Acredita-se que, mesmo com a utilização de lentes especiais para fotografar o modelo, não seria possível que as imagens da *Maquete Estrutural* apresentassem a mesma conformação das perspectivas do *software* SAP2000.

Assim, para as estruturas espaciais, as deformadas foram comparadas sem a sobreposição das mesmas, conforme será apresentado no item 5.3.

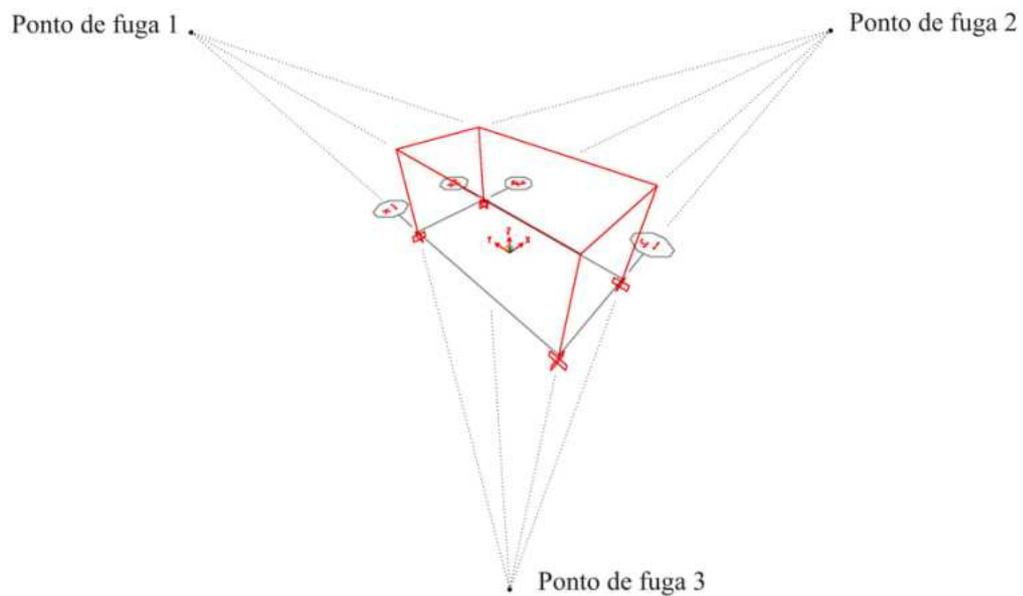


Figura 4.8 – Perspectiva gerada pelo software com seus respectivos pontos de fuga

4.2.5 / Comparação dos resultados

A partir da sobreposição das imagens é realizada a comparação entre os resultados obtidos pela *Maquete Estrutural* e os obtidos pelo modelo computacional (Figura 4.9). Para a visualização dos resultados digitalizados, na versão impressa da dissertação, utilizou-se uma transparência, onde foi impressa a imagem colorida da deformada da estrutura gerada no *software*, sobreposta à folha de papel, onde está impressa a imagem em preto e branco da *Maquete Estrutural*. Esta técnica de apresentação permite a visualização das duas imagens sobrepostas ou, se necessário, a visualização de cada uma isoladamente. Retirando-se a transparência, tem-se a visualização apenas da *Maquete Estrutural*, e a partir da colocação de uma folha em branco, sob a transparência, pode-se visualizar-se apenas o modelo computacional, facilitando, assim, a análise.

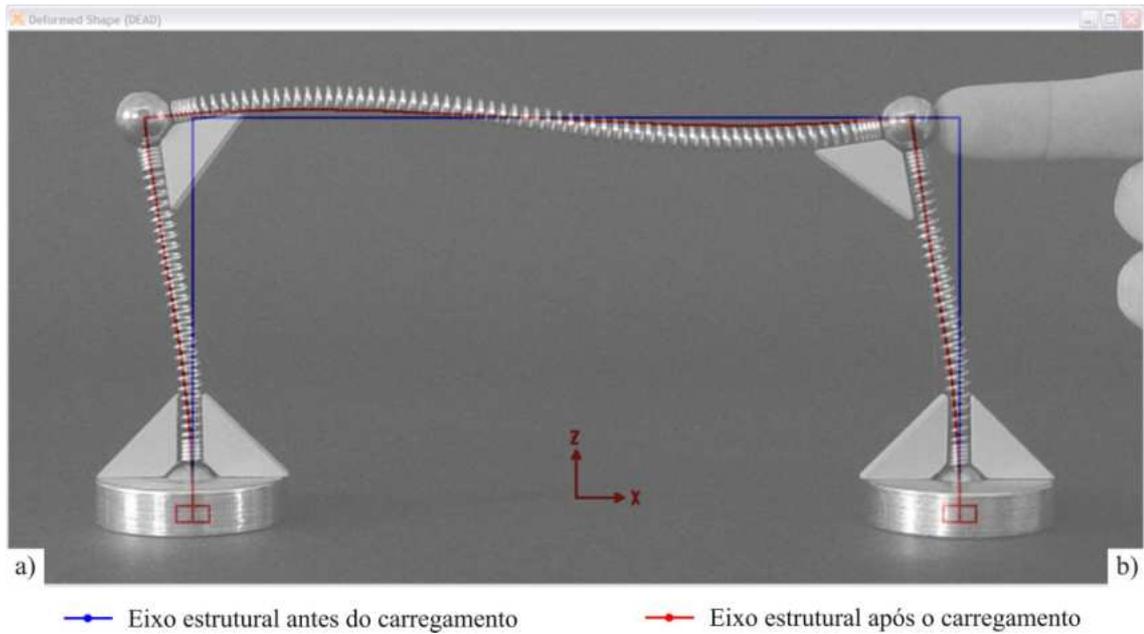


Figura 4.9 – Sobreposição das imagens

a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Em seguida, é feita a comparação e a validação da *Maquete Estrutural* para o sistema estrutural ensaiado. Todos os resultados serão apresentados no capítulo 5.

Capítulo 5 | Apresentação e Análise dos Resultados

5.1 | Introdução

A apresentação e análise dos resultados foi organizada e dividida segundo a tipologia das estruturas em estruturas planas e estruturas espaciais

De modo geral, na comparação dos resultados, foi encontrada boa concordância entre as deformadas da *Maquete Estrutural* e as deformadas geradas pelo *software* referentes ao comportamento dos sistemas estruturais ensaiados. Porém, alguns detalhes foram observados. A seguir são apresentados todos os resultados e suas respectivas observações. No Apêndice é apresentada uma tabela com a descrição de todos os ensaios realizados para facilitar a identificação dos sistemas testados e consulta dos mesmos.

5.2 | Estruturas Planas

Para facilitar a análise dos resultados, as estruturas planas estão divididas por sistema estrutural e segundo a lista a seguir:

- Coluna (ensaios 1 a 4);
- Viga (ensaios 5 a 8);
- Pórtico (ensaios 9 a 17);
- Viga contínua (ensaios 18 a 21);
- Arco (ensaios 22 a 25);
- Treliça (ensaios 26 a 29).

5.2.1 | Coluna

Nas Figuras 5.1 a 5.4, que correspondem respectivamente aos ensaios de 1 a 4, são apresentados os resultados para uma coluna submetida a um carregamento axial de compressão. Para cada ensaio foram consideradas condições de contorno diferentes para o mesmo elemento estrutural.

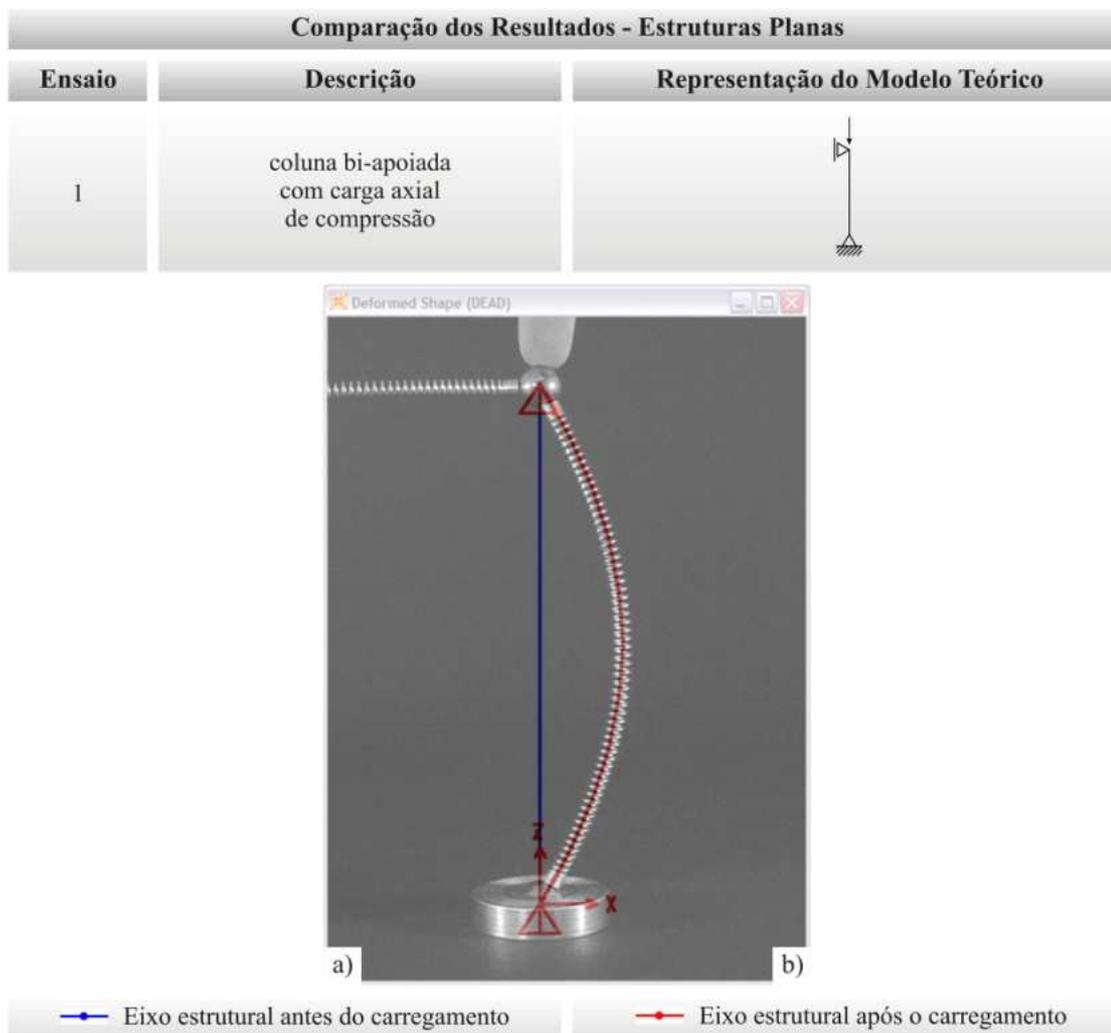


Figura 5.1 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 1
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Observa-se com a sobreposição das imagens na Figura 5.1 que para a coluna bi-apoiada montada com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é bem similar a simulação computacional. Os eixos estruturais deformados coincidem ao longo de todo o comprimento da coluna, mostrando um bom desempenho das ligações rotuladas e da peça (mola) utilizada para esse tipo de análise.

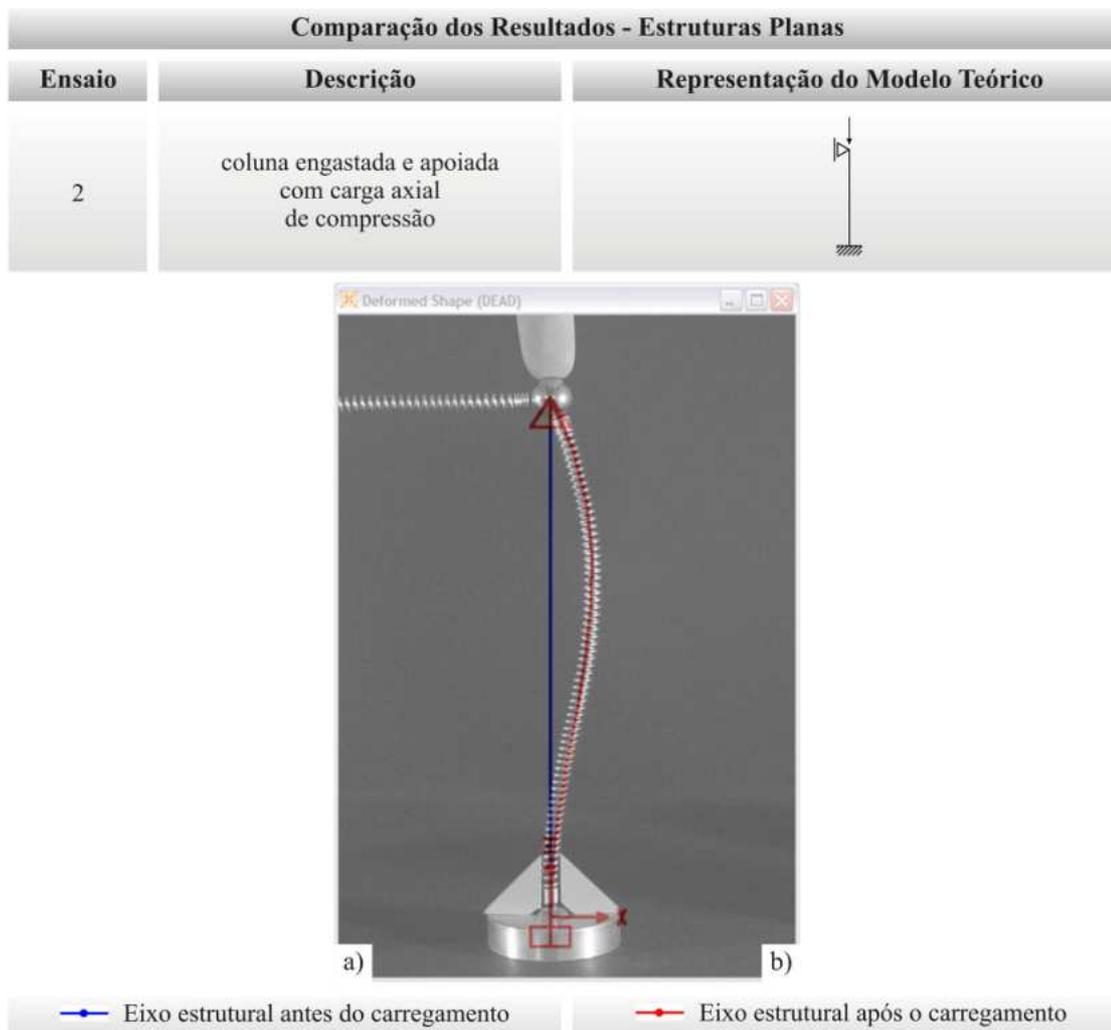


Figura 5.2 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 2
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na coluna engastada e apoiada, apresentada na Figura 5.2, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, os eixos deformados das colunas não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento do elemento analisado, existe uma imprecisão próxima a ligação engastada. Isso ocorre devido ao fato de que as peças de ligação rígida, em função da sua dimensão, ao engastarem a coluna, apresentam um travamento de um trecho do elemento ao invés de apenas na extremidade do mesmo. Essa imprecisão aumenta com o aumento do carregamento e conseqüentemente da deformada.

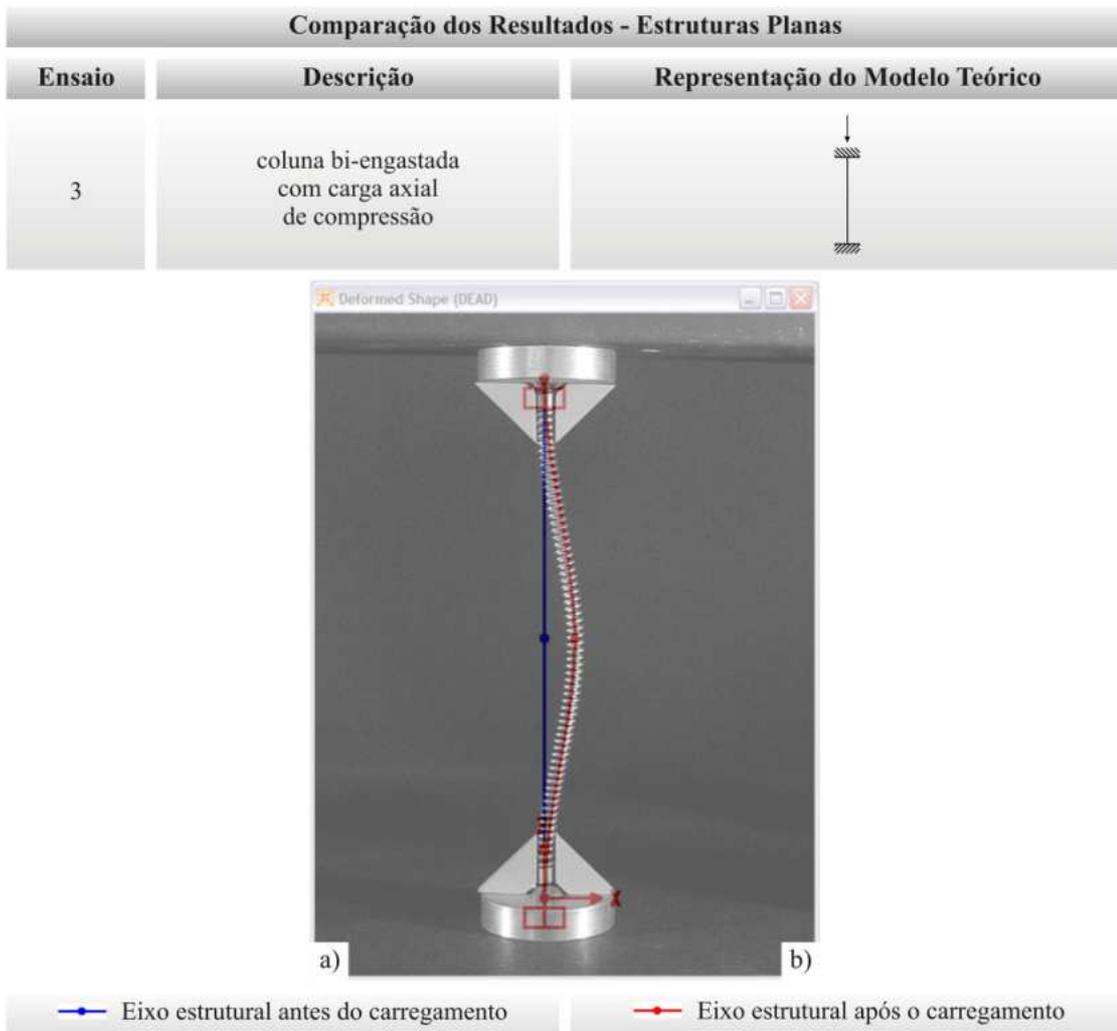


Figura 5.3 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 3
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na coluna bi-engastada, apresentada na Figura 5.3, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, assim como no caso anterior (ensaio 2) os eixos deformados das colunas não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento do elemento analisado, existe uma imprecisão nas partes próximas às ligações engastadas.

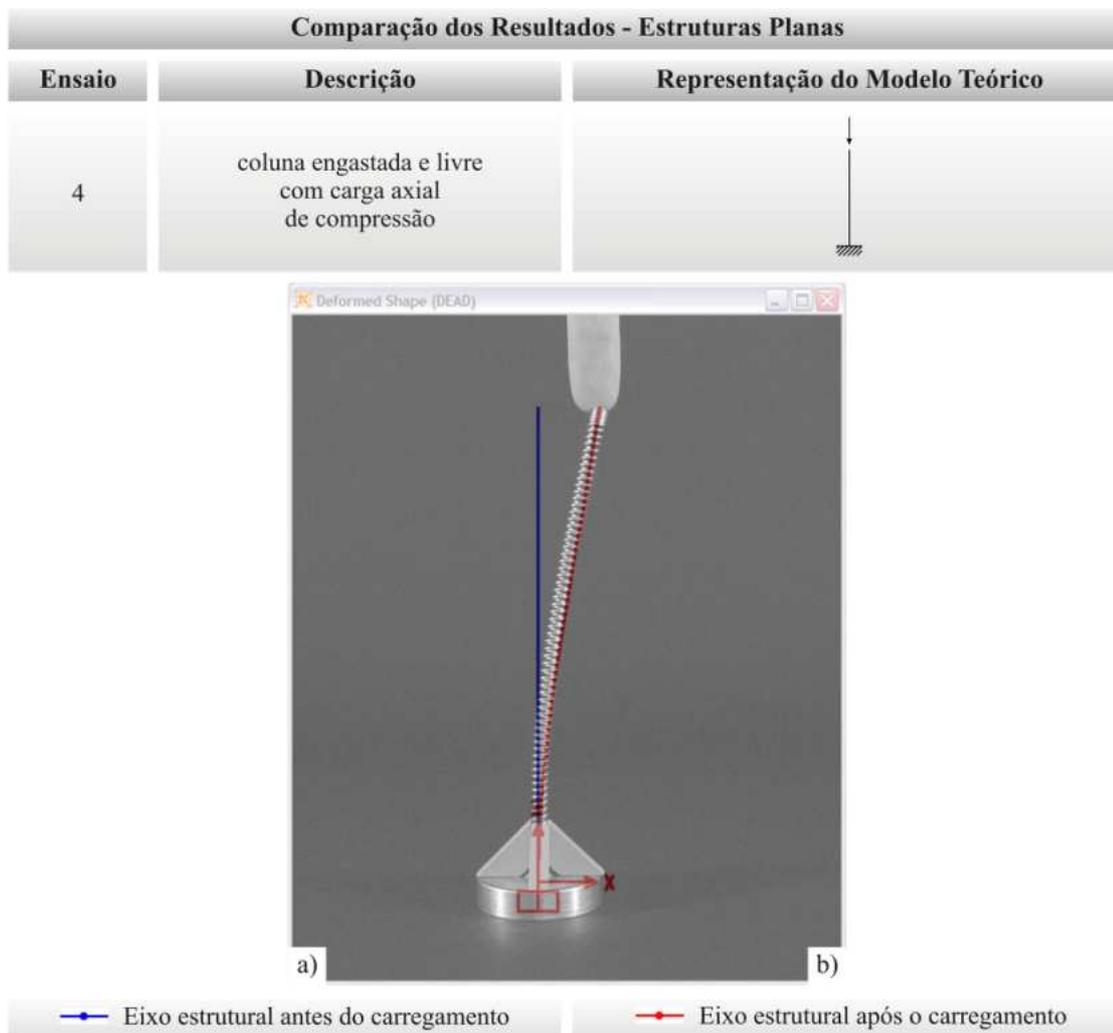


Figura 5.4 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 4
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na coluna engastada e livre, apresentada na Figura 5.4, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, os eixos deformados não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento do elemento analisado. No entanto, diferente dos dois casos anteriores (ensaios 2 e 3) a imprecisão ocorre a meia altura do elemento.

5.2.2 / Viga

Nas Figuras 5.5 a 5.8, que correspondem respectivamente aos ensaios de 5 a 8, são apresentados os resultados para uma viga submetida a um carregamento concentrado no

meio do vão. Para cada ensaio foram consideradas condições de contorno diferentes para o mesmo elemento estrutural.

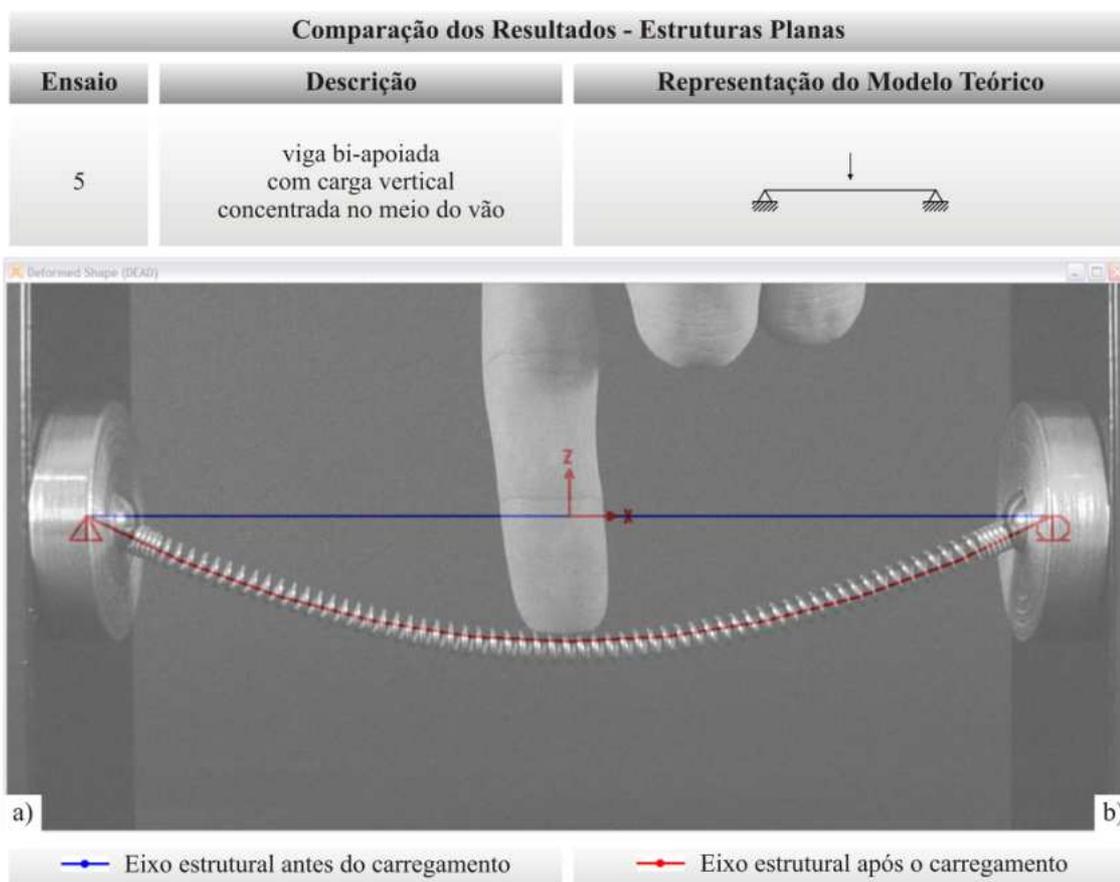


Figura 5.5 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 5
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Observa-se com a sobreposição das imagens na Figura 5.5 que para a viga bi-apoiada montada com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é a mesma da simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento do elemento analisado, mostrando um bom desempenho das ligações rotuladas e da peça (mola) utilizada para esse tipo de análise.

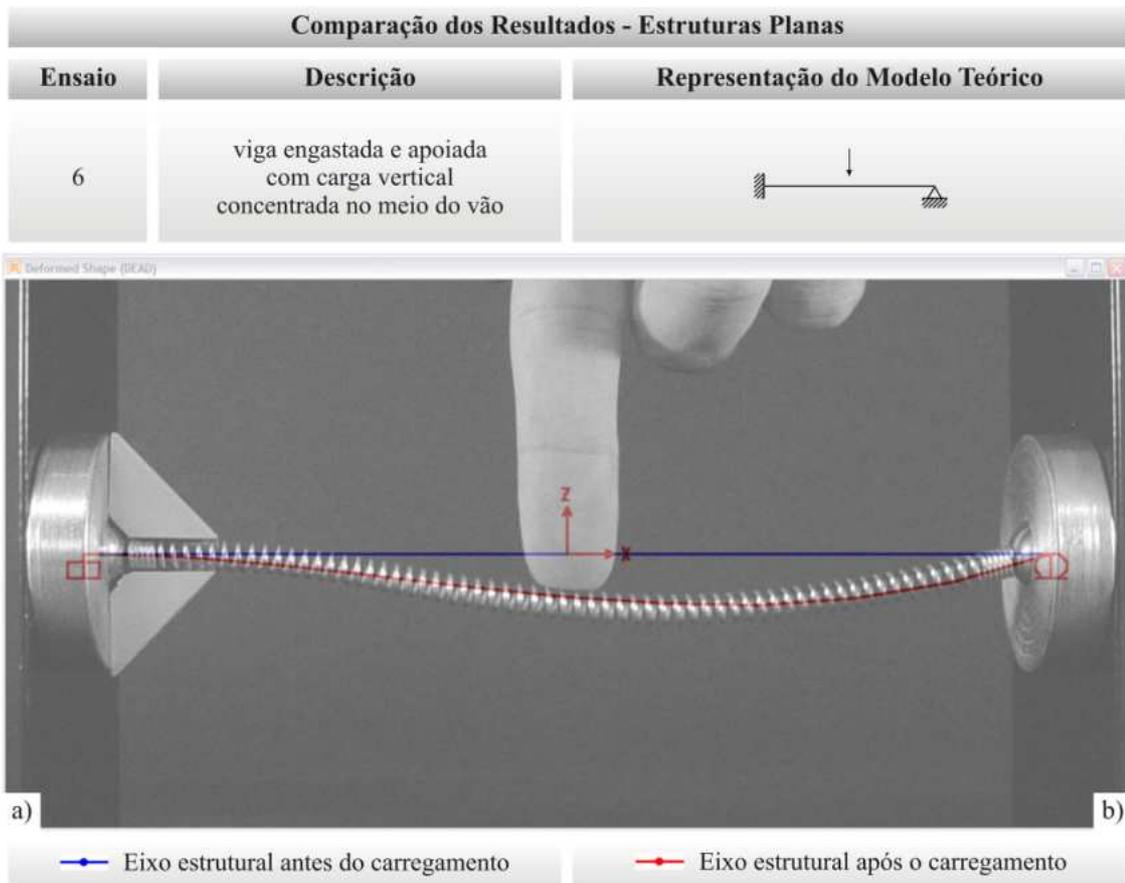


Figura 5.6 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 6
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na viga engastada e apoiada, apresentada na Figura 5.6, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, os eixos deformados não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento do elemento analisado, existindo uma imprecisão próxima a ligação engastada e na parte mediana do vão. Assim como nos ensaios 2 a 4 da coluna mostrada anteriormente, essas imprecisões ocorrem devido ao fato de que as peças de ligação rígida, em função da sua dimensão, ao engastarem a viga, apresentam um travamento de um trecho do elemento ao invés de apenas a seção da extremidade. Essas imprecisões aumentam com o aumento do carregamento e conseqüentemente da deformada.

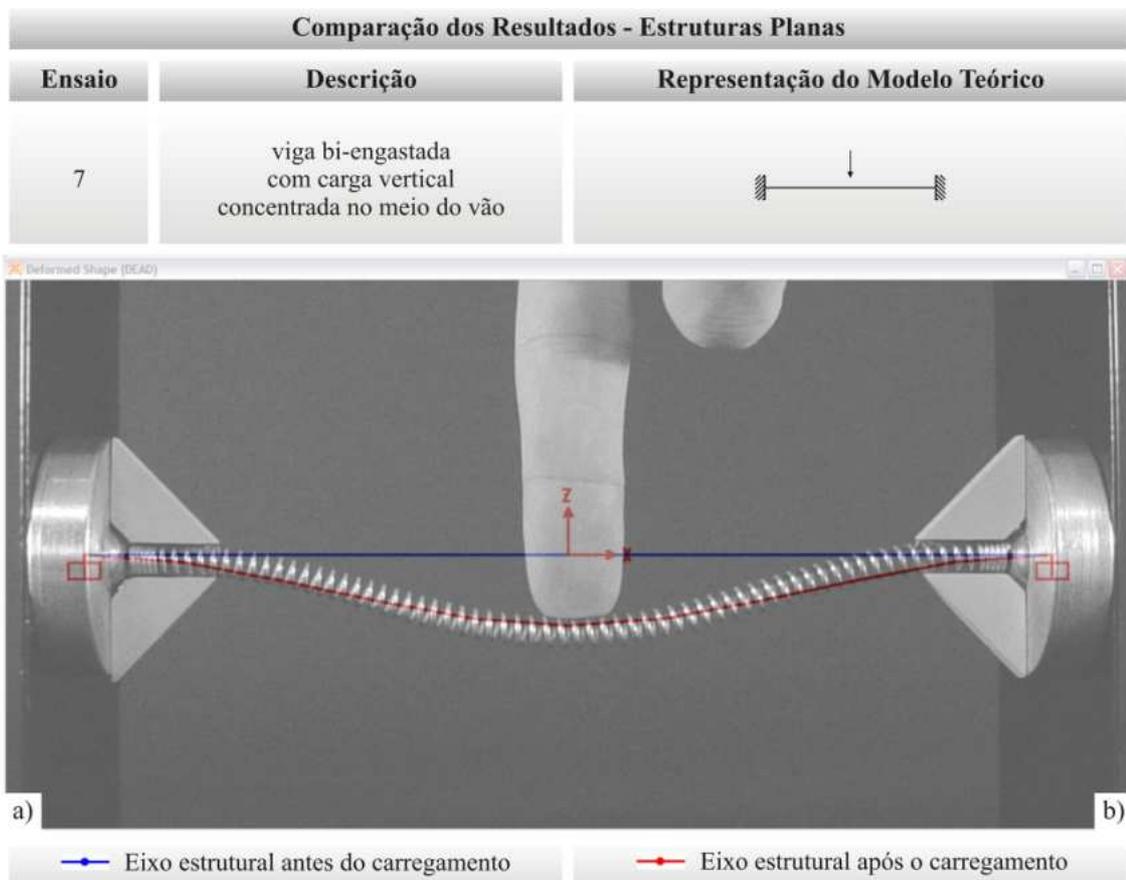


Figura 5.7 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 7
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na viga bi-engastada, apresentada na Figura 5.7, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, assim como no caso anterior (ensaio 6) os eixos deformados não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento do elemento analisado, existe uma imprecisão nas partes próximas as ligações engastadas e no meio do vão.

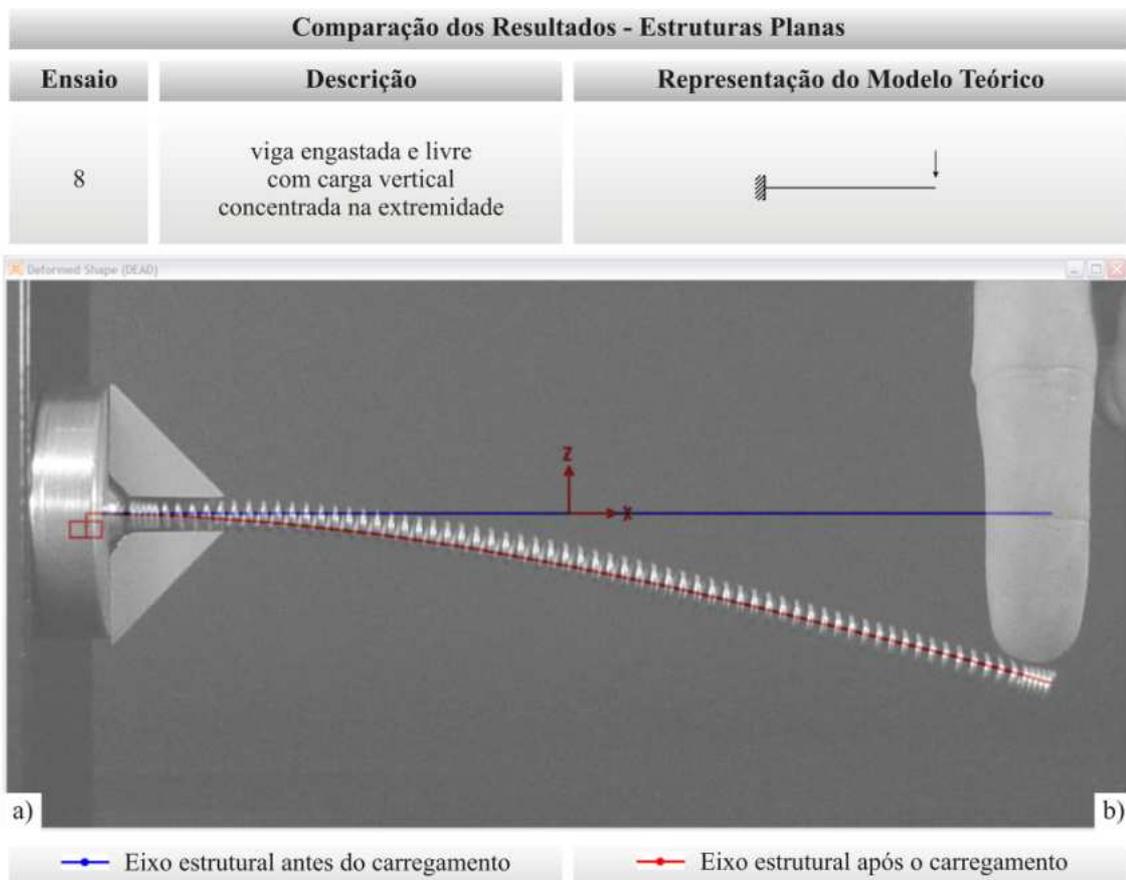


Figura 5.8 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 8
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na viga engastada e livre, apresentada na Figura 5.8, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, os eixos deformados não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento do elemento analisado. Diferente dos dois casos anteriores (ensaios 6 e 7) a imprecisão acontece somente no trecho entre a ligação rígida e a metade do elemento em função da não existência de outro apoio na extremidade livre.

5.2.3 / Pórtico

Nas Figuras 5.9 a 5.15, que correspondem respectivamente aos ensaios de 9 a 15, são apresentados os resultados para um pórtico submetido a dois tipos de carregamento concentrado, um vertical no meio do vão e outro horizontal no nó superior. Para cada

ensaio foram consideradas condições de contorno diferentes para o mesmo sistema estrutural.

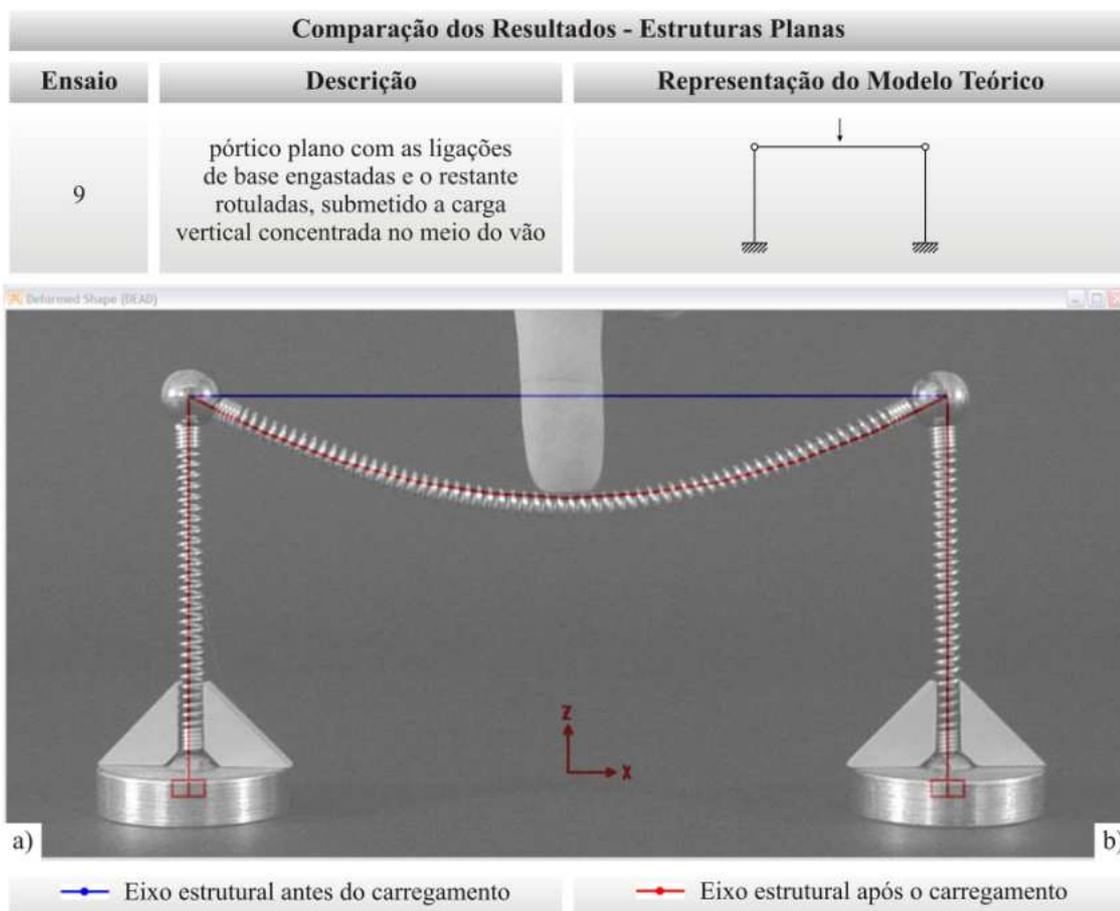


Figura 5.9 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 9
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Observa-se com a sobreposição das imagens na Figura 5.9 que para o pórtico montado com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é bem similar a simulação computacional. Os eixos estruturais deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais, mostrando um bom desempenho das ligações rotuladas, que neste caso não transmitem momento para as colunas.

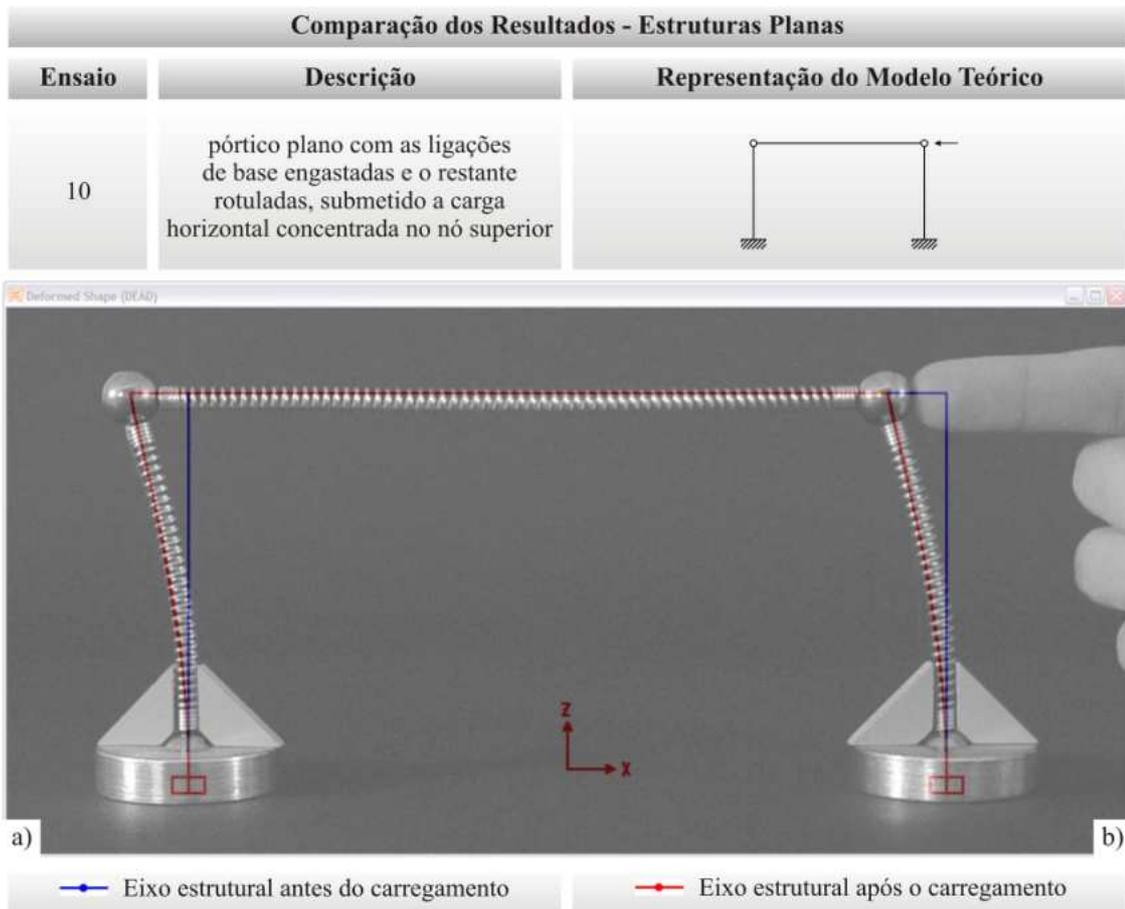


Figura 5.10 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 10
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Para o pórtico apresentado na Figura 5.10, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, os eixos deformados das colunas não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento do elemento analisado, existindo uma imprecisão nas colunas próxima as ligações engastadas. Assim como nos ensaios de colunas e vigas mostrados anteriormente, essas imprecisões estão associadas às peças de ligação rígida.

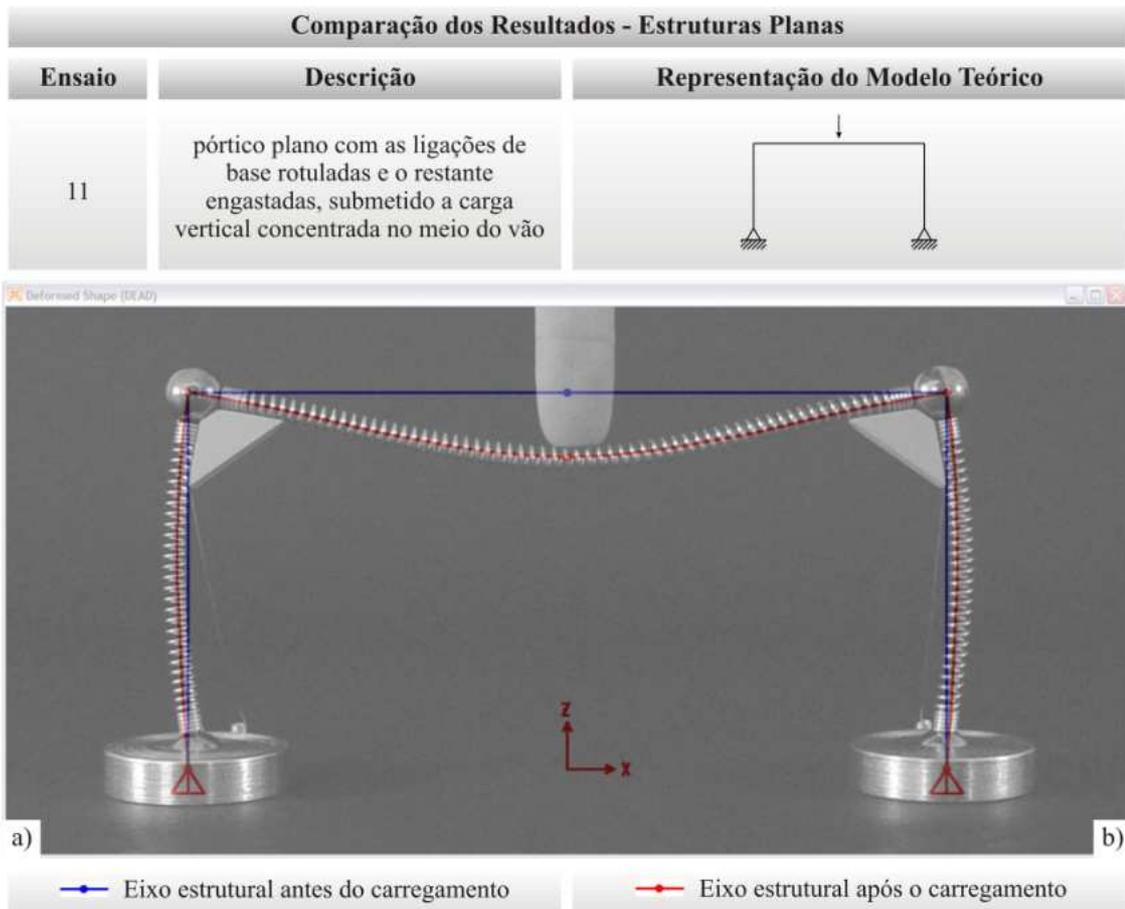


Figura 5.11 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 11
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Para o pórtico apresentado na Figura 5.11, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Percebe-se a transmissão do momento para as colunas. Diferente de todos os ensaios já apresentados, as imprecisões associadas às peças de ligação rígida não ocorrem de forma tão acentuada. Isso se deve ao fato de que, neste caso, essas peças engastadas são dois elementos flexíveis (mola – coluna e viga), e não a um elemento flexível (mola) com um elemento rígido (ligação de base) conforme os casos anteriores. Nestes casos só ocorrem imprecisões com carregamentos muito elevados.

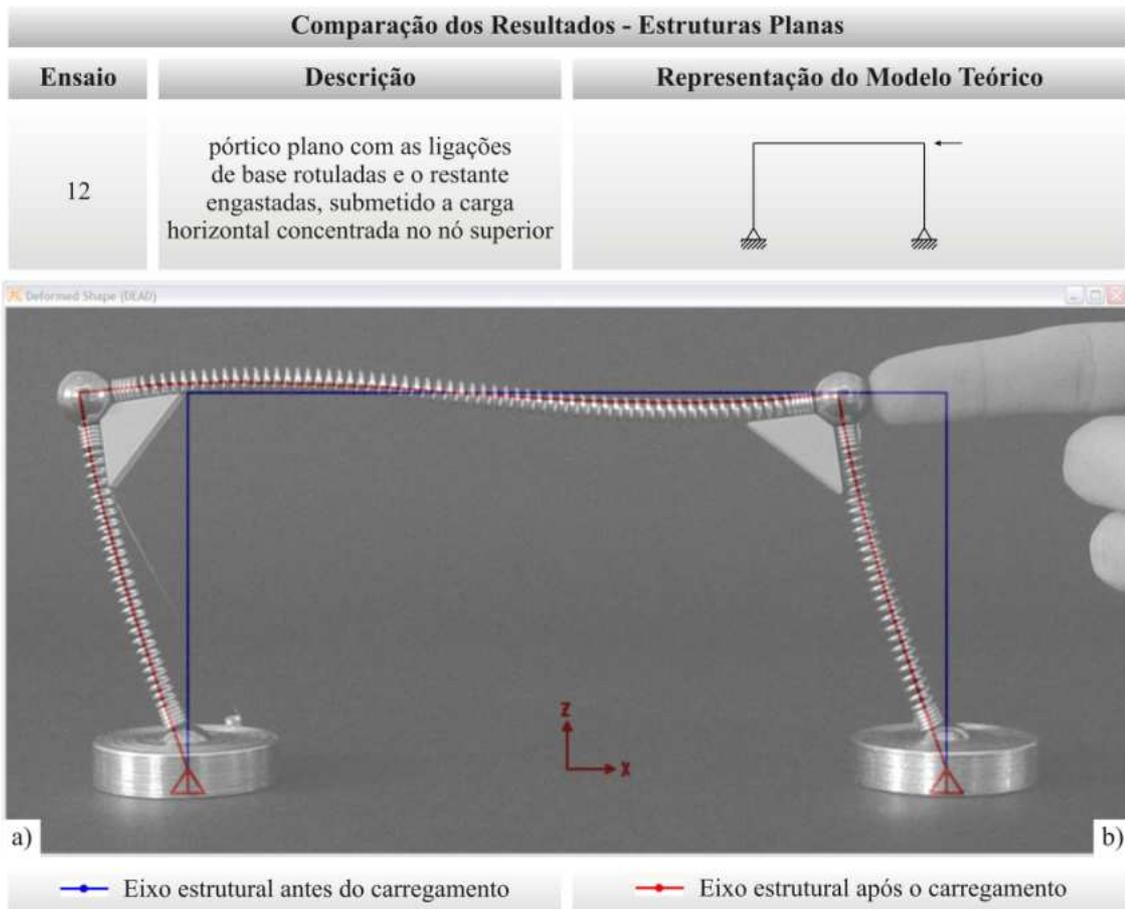


Figura 5.12 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 12
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Para o pórtico apresentado na Figura 5.12, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Percebe-se a transmissão do momento para a viga. Assim como no ensaio anterior (ensaio 11) as imprecisões associadas às peças de ligação rígida só ocorrem com carregamentos muito elevados.

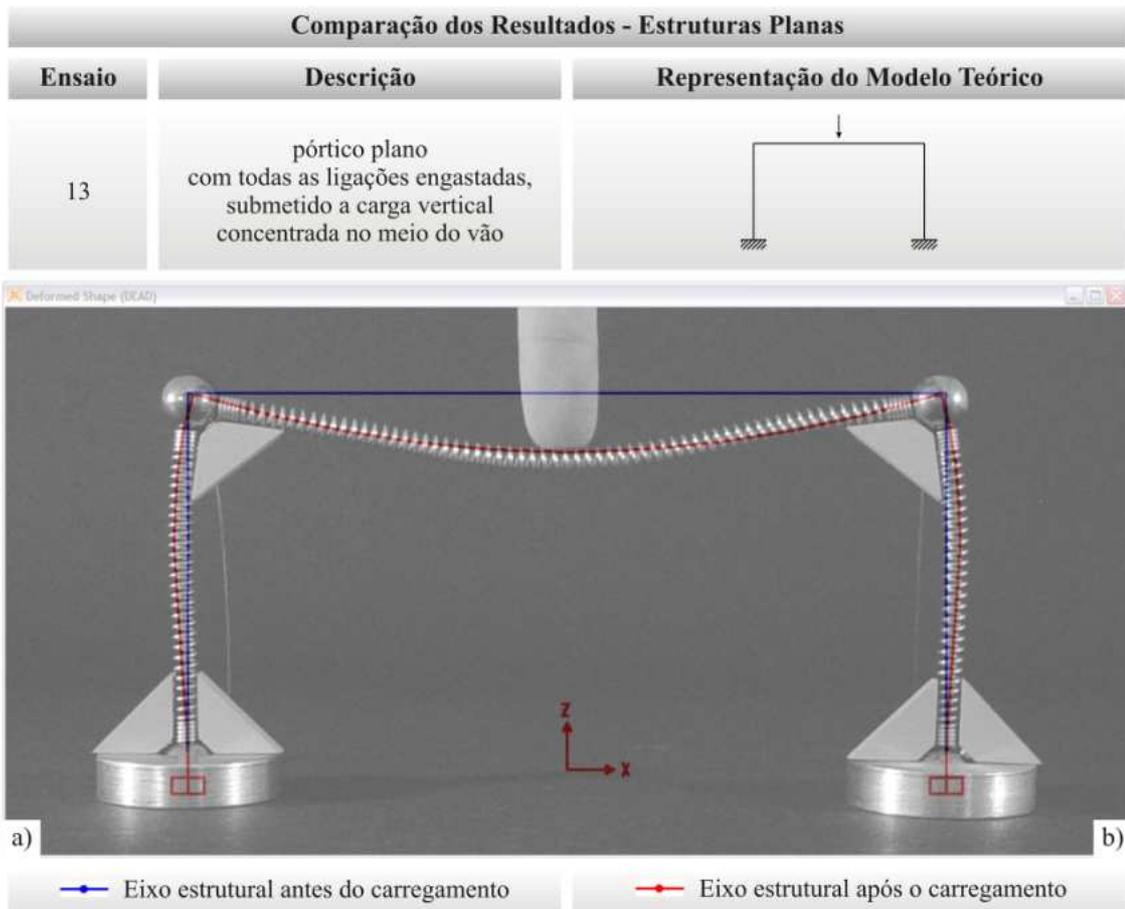


Figura 5.13 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 13
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Para o pórtico apresentado na Figura 5.13, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, os eixos deformados não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento dos elementos analisados, existe uma imprecisão no meio do vão da viga e a meia altura das colunas. Essas imprecisões estão associadas às peças de ligação rígida, principalmente as conectadas a base.

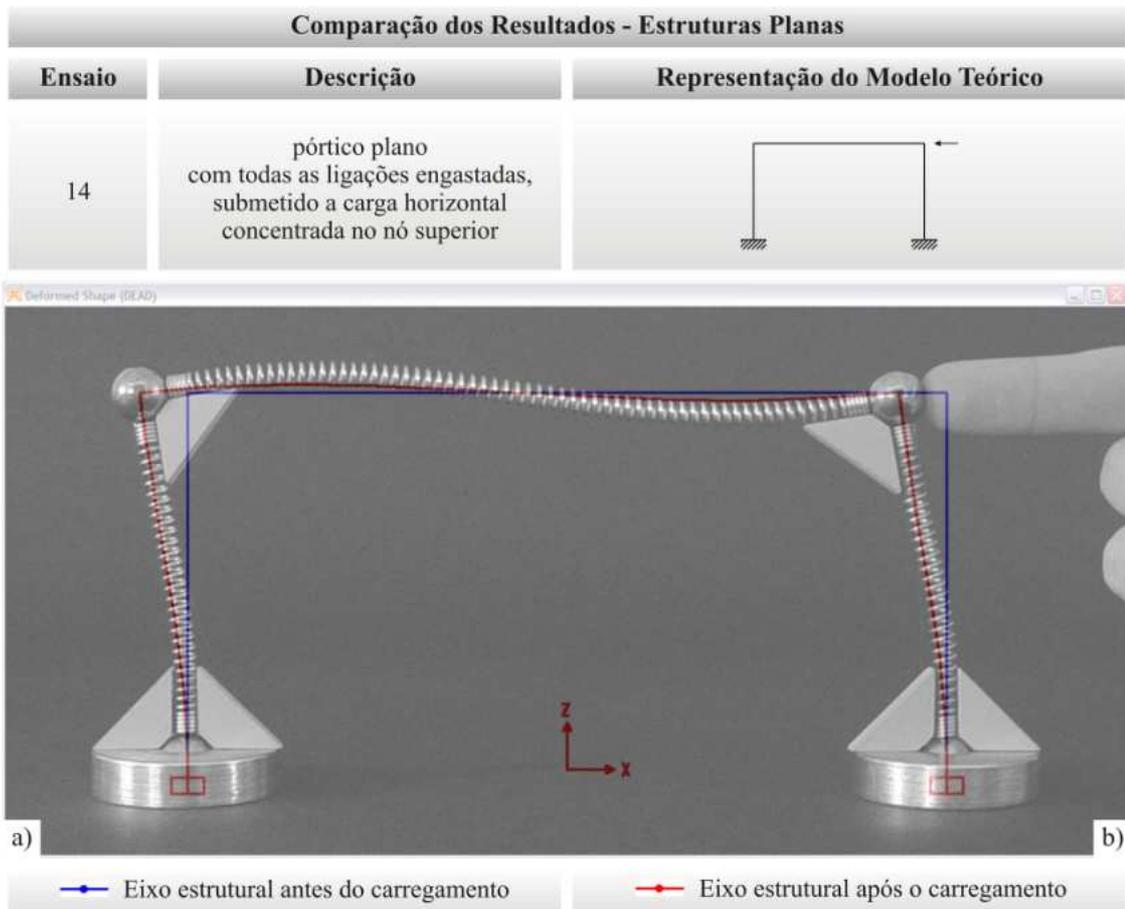


Figura 5.14 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 14
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Para o pórtico apresentado na Figura 5.14, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, porém, os eixos deformados não coincidem exatamente ao longo de todo o comprimento dos elementos analisados, existe uma imprecisão maior ao longo de toda a viga com exceção do ponto no meio do vão, e a meia altura das colunas uma imprecisão menor. Essas imprecisões estão associadas às peças de ligação rígida.

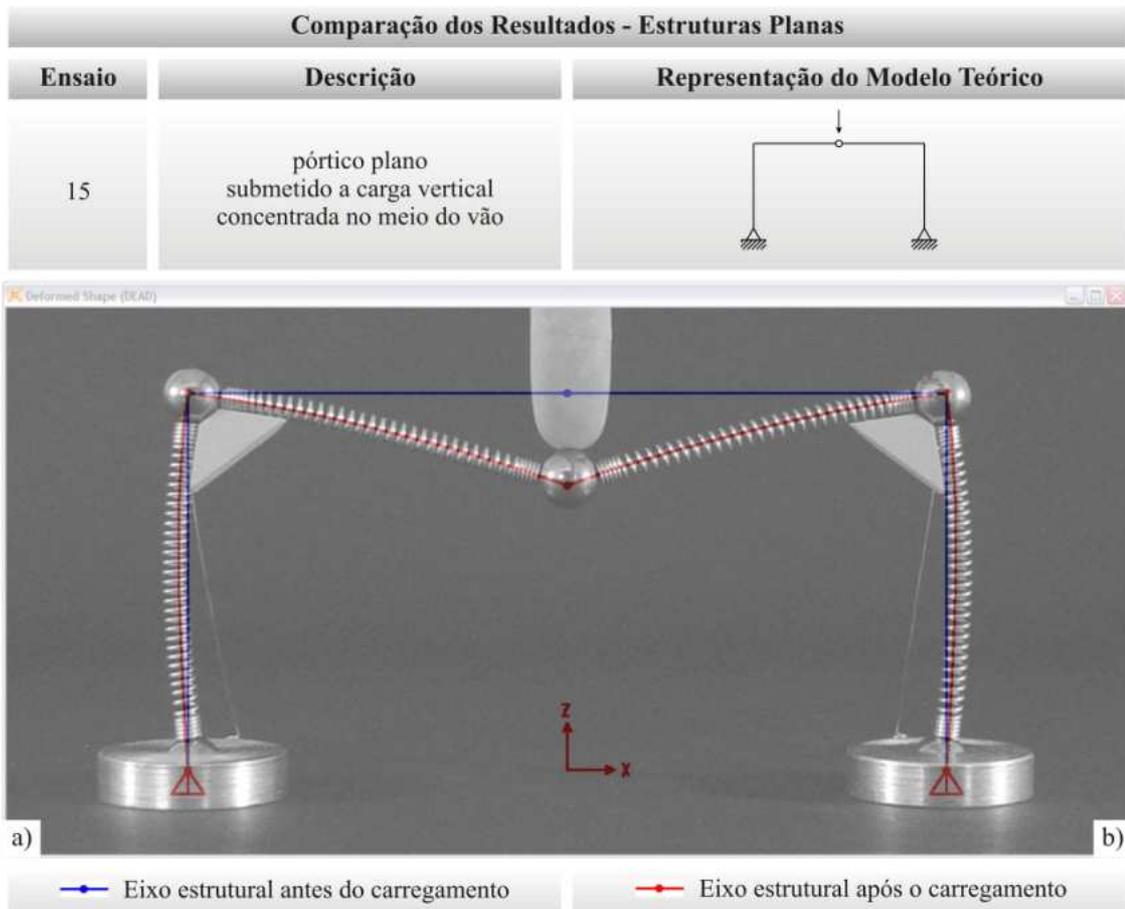


Figura 5.15 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 15
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

No pórtico apresentado na Figura 5.15, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Percebe-se a transmissão do momento para as colunas. Assim como no ensaio 11, as imperfeições associadas às peças de ligação rígida não ocorrem de forma tão acentuada. Isso se deve ao fato de que, neste caso, essas peças estão conectadas a dois elementos flexíveis (mola – coluna e viga), e não a um elemento flexível (mola) com um elemento rígido (ligação de base) conforme os casos anteriores. Neste caso só ocorrem imprecisões com carregamentos muito elevados.

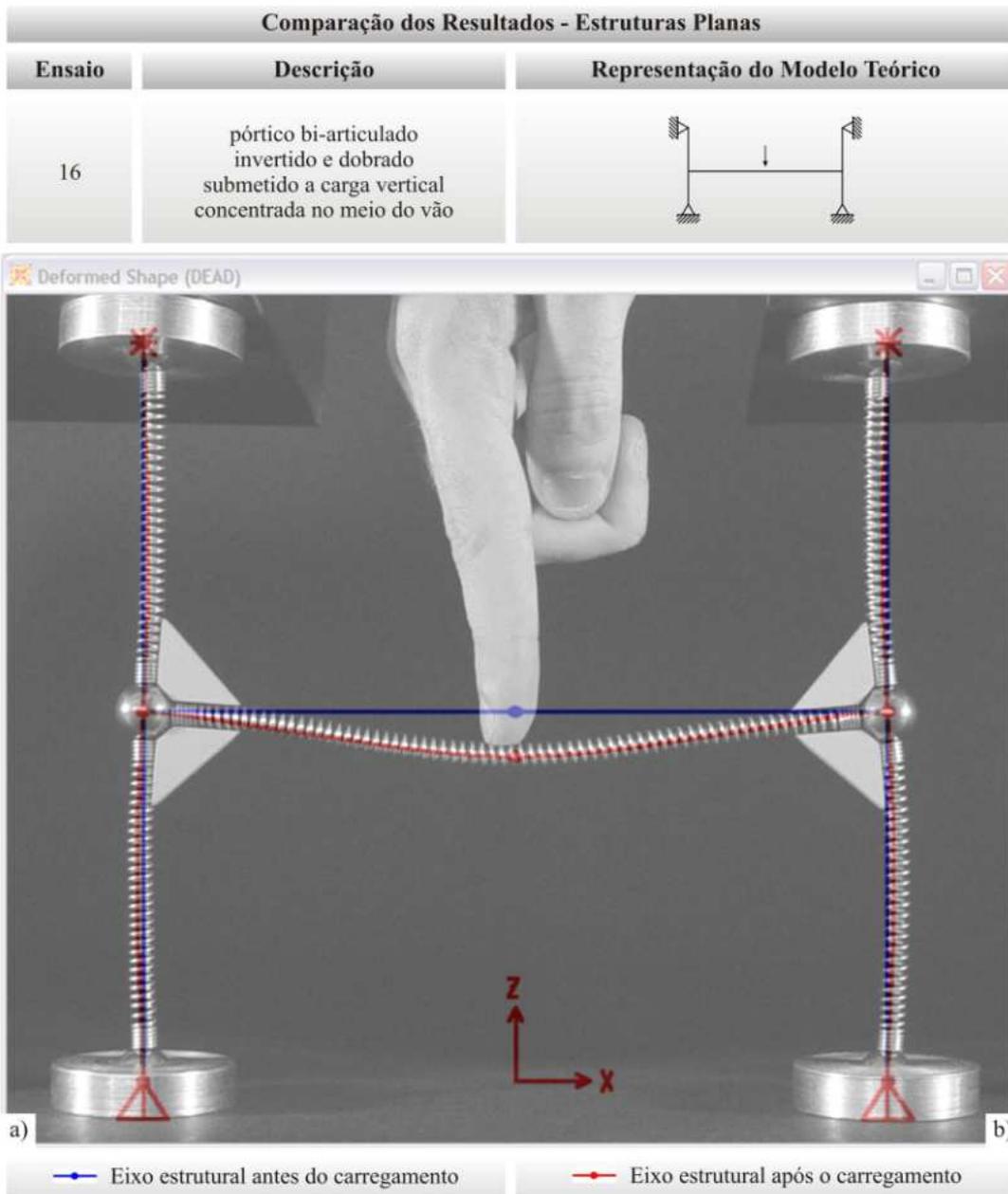


Figura 5.16 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 16
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

No pórtico apresentado na Figura 5.16, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Percebe-se a transmissão do momento para as colunas.

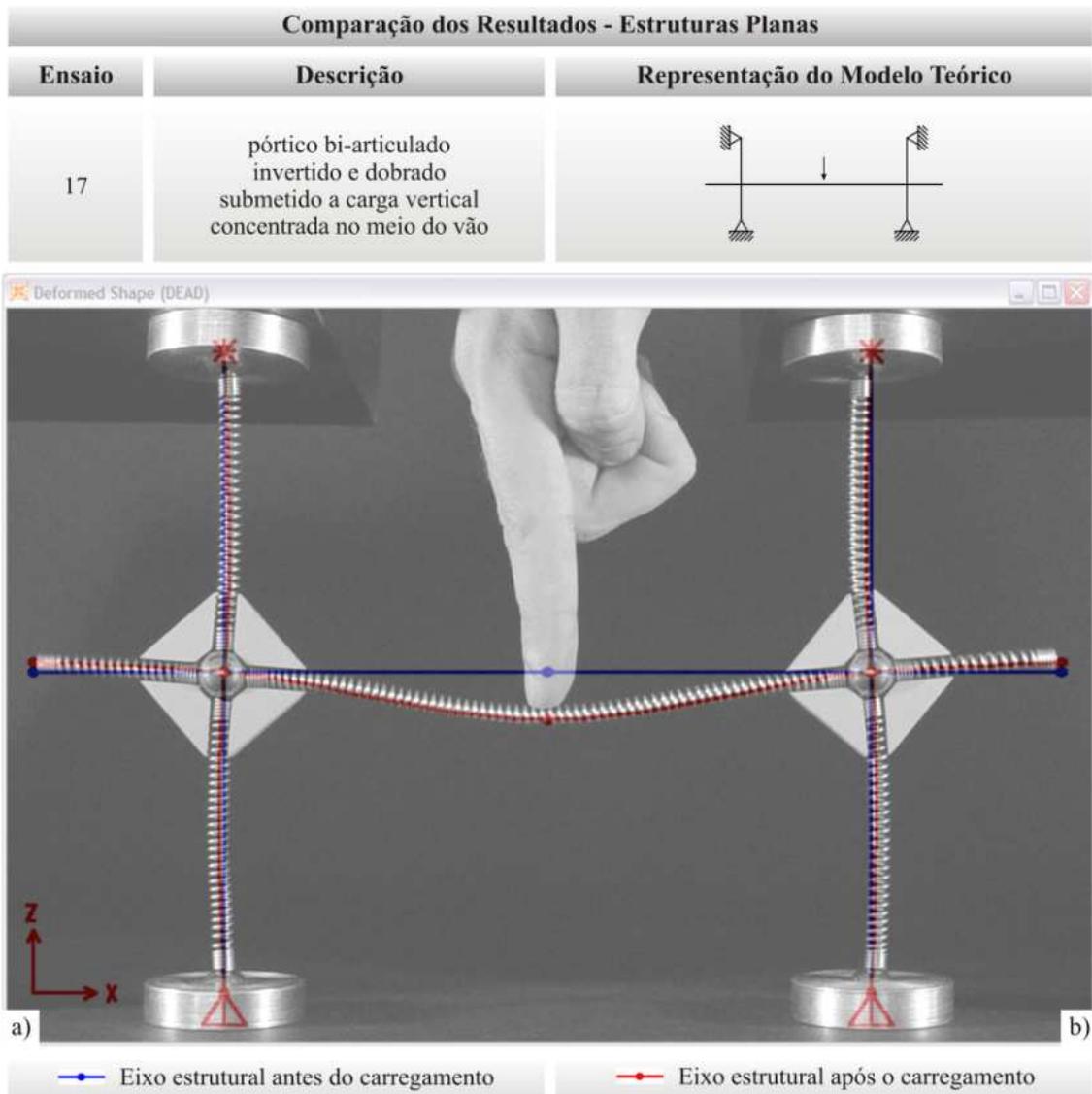


Figura 5.17 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 17
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

No pórtico apresentado na Figura 5.17, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Percebe-se a transmissão do momento para as colunas.

5.2.4 | Viga contínua

Na Figura 5.18 e 5.20 (ensaio 18 e 20) tem-se a representação de duas vigas visando a comparação com as chamadas de vigas contínuas e representadas nas Figuras 5.19 e

5.21, que correspondem respectivamente aos ensaios de 19 e 21. Foi utilizado um carregamento vertical concentrado no meio do vão, e analogamente aos itens anteriores, foram consideradas condições de contorno diferentes para o mesmo sistema estrutural.

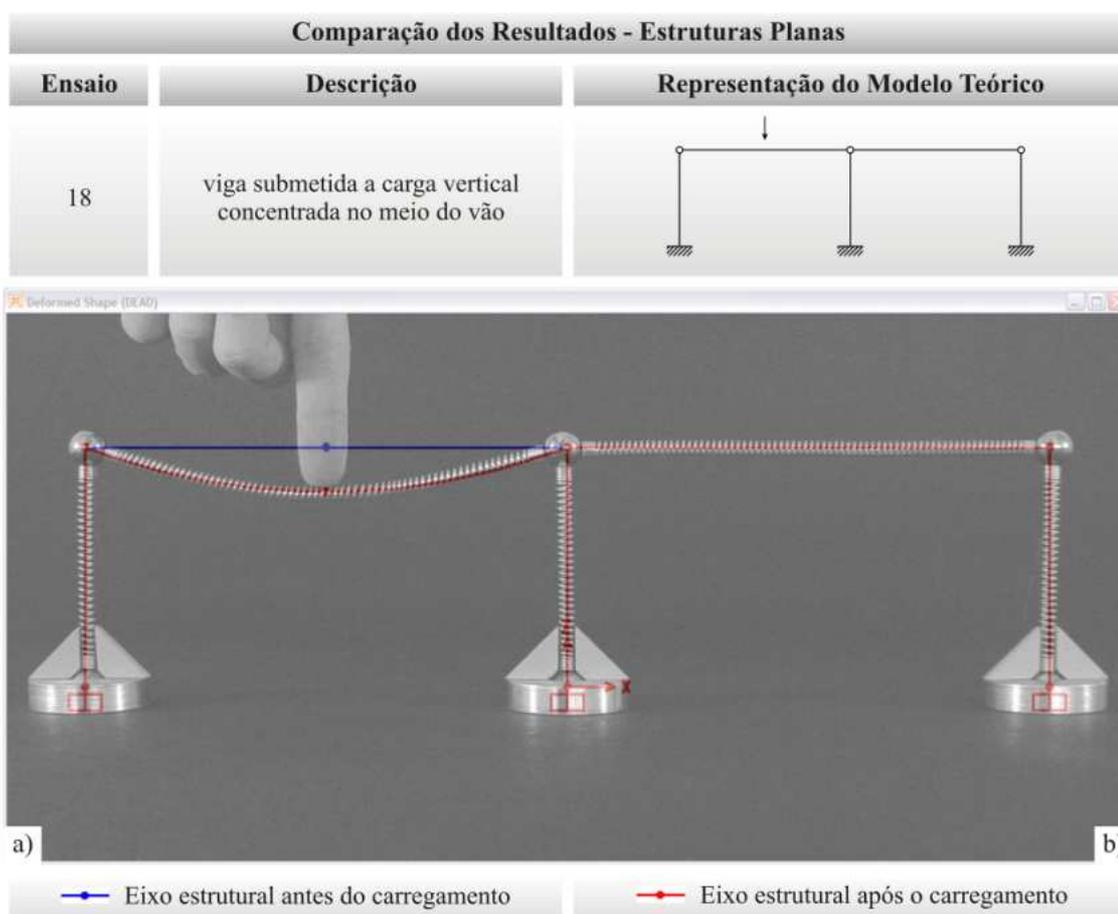


Figura 5.18 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 18
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Observa-se com a sobreposição das imagens na Figura 5.18, que para os pórticos montados com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é bem similar a simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Percebe-se que o carregamento aplicado na viga do pórtico do lado esquerdo não é transmitido para a viga seguinte, que compõe o pórtico ao lado direito, pois não existe continuidade entre as mesmas.

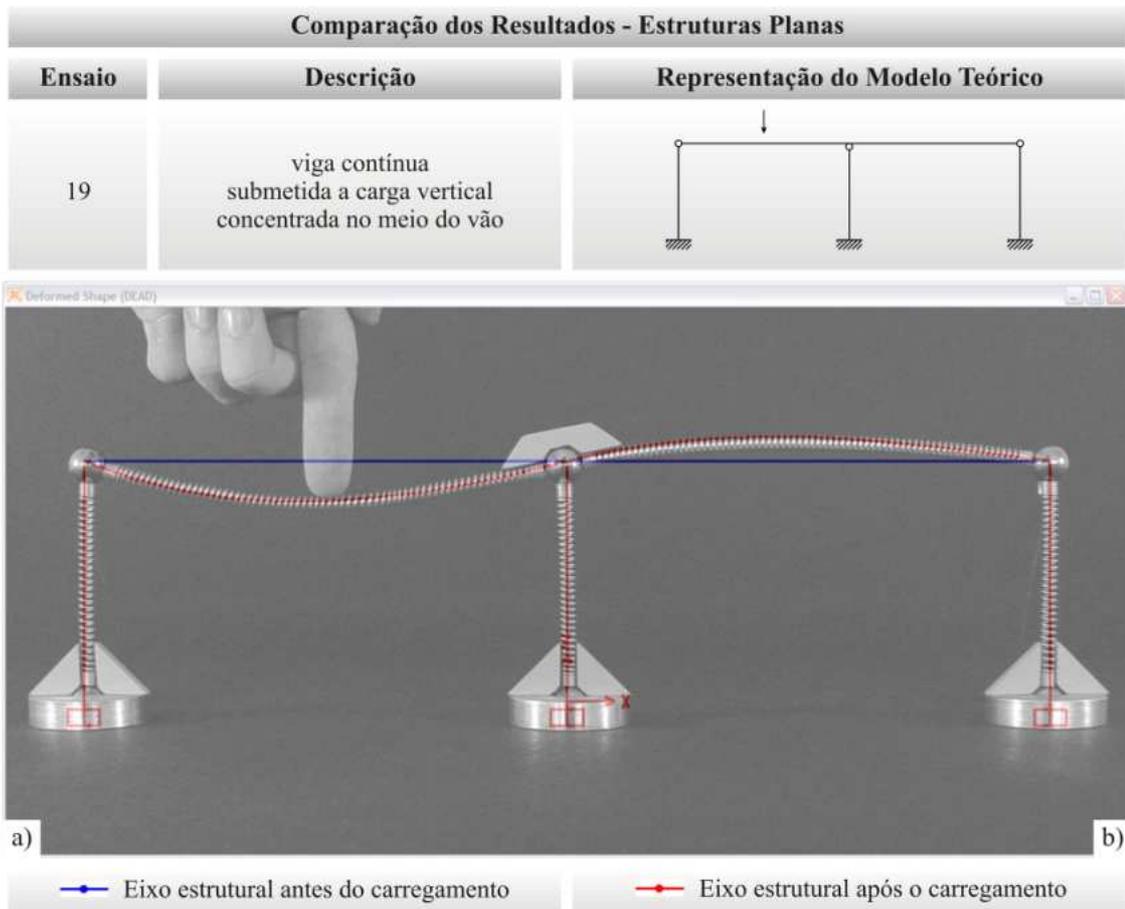


Figura 5.19 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 19
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na estrutura apresentada na Figura 5.19, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar a simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Diferente do ensaio anterior (ensaio 18) o carregamento aplicado na viga do pórtico do lado esquerdo é transmitido para a viga seguinte que compõe o pórtico do lado direito, pois existe continuidade entre as mesmas. Percebe-se que a carga é transmitida, por meio da peça de ligação contínua, entre as vigas sem transmitir momento para a coluna central. Existe um limite de carregamento para a utilização desta peça em particular, este limite está diretamente ligado à força magnética dos ímãs.

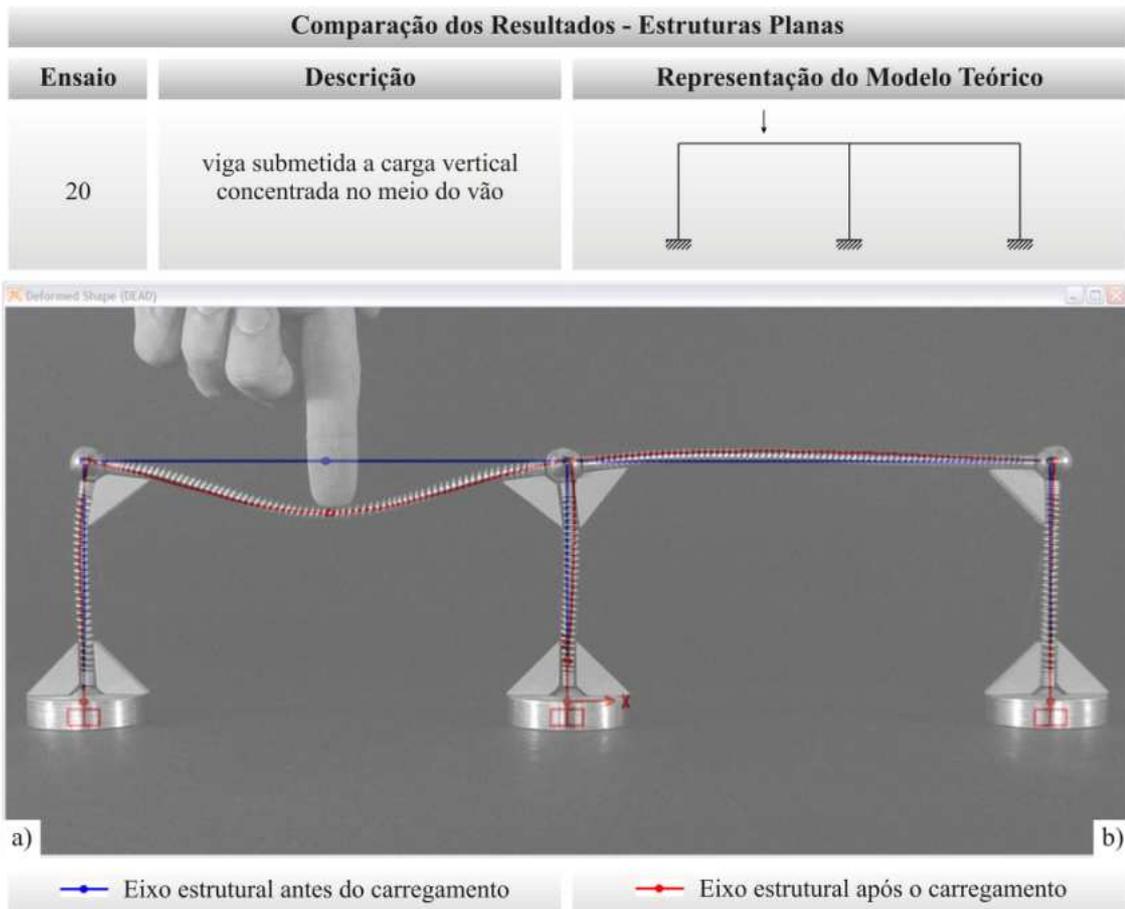


Figura 5.20 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 20
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na estrutura apresentada na Figura 5.20, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, porém, os eixos deformados não coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais, existe uma imprecisão maior no deslocamento do nó superior da coluna central, e nas vigas observa-se uma imprecisão menor próximo às ligações engastadas. Essas imprecisões novamente estão associadas às peças de ligação rígida. Percebe-se, neste caso, que além de transmitir o carregamento entre as vigas dos pórticos, as ligações rígidas transmitem momento para as colunas, diferente da peça de ligação contínua utilizada no ensaio anterior (ensaio 19).

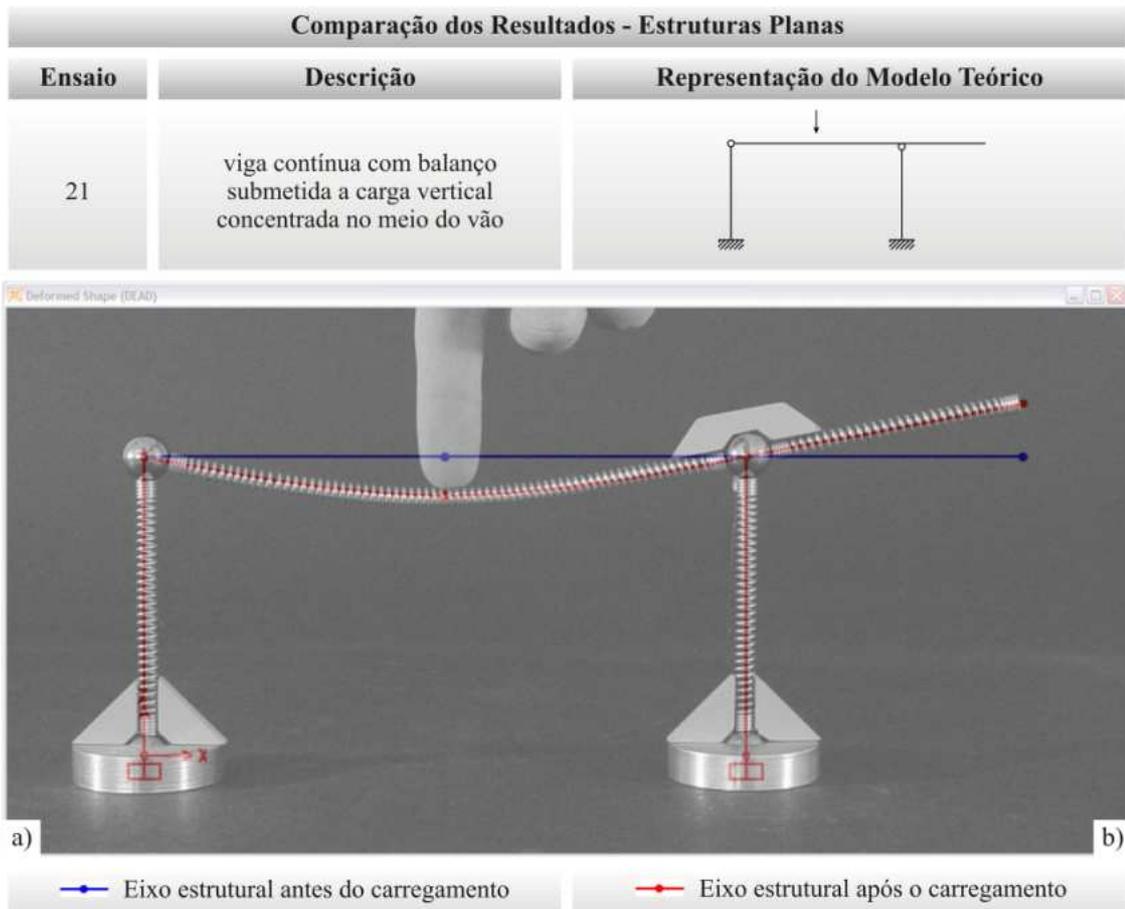


Figura 5.21 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 21
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na estrutura apresentada na Figura 5.21, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Percebe-se que, assim como no ensaio 19, a carga é transmitida, por meio da peça de ligação contínua, sem transmitir momento para a coluna.

5.2.5 / Arco

Nas Figuras 5.22 a 5.25, que correspondem respectivamente aos ensaios de 22 a 25, são apresentados os resultados para um arco submetido a um carregamento concentrado vertical no meio do vão. Para cada ensaio foram consideradas condições de contorno diferentes para o mesmo sistema estrutural.

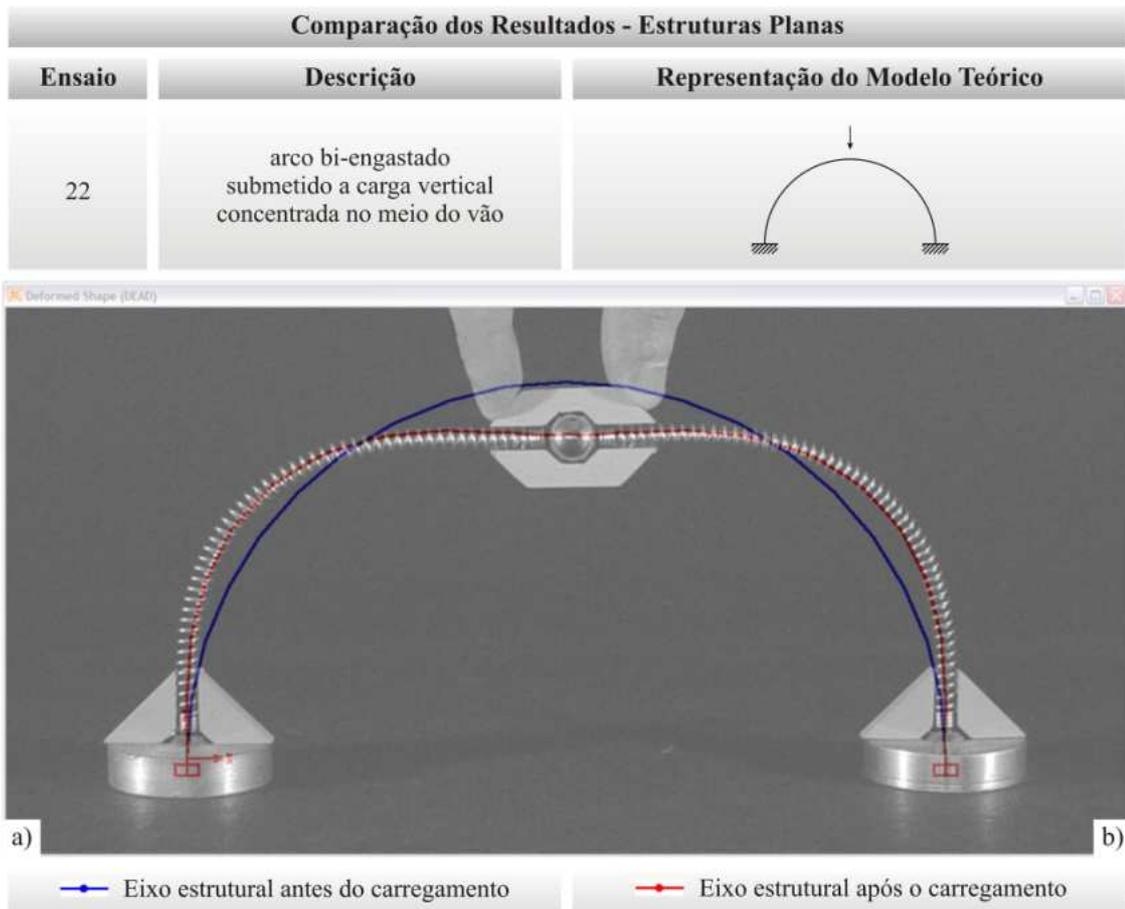


Figura 5.22 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 22

a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Observa-se com a sobreposição das imagens na Figura 5.22 que para o arco montado com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é bem similar à simulação computacional, porém, os eixos deformados não coincidem ao longo de todo o comprimento do elemento estrutural, existem imprecisões próximas às ligações engastadas. Estas imprecisões estão associadas às peças de ligação rígida. Percebe-se que mesmo sendo composto por duas molas, as peças de ligação contínua conectadas no nó central transmitem o carregamento transformando em um único elemento.

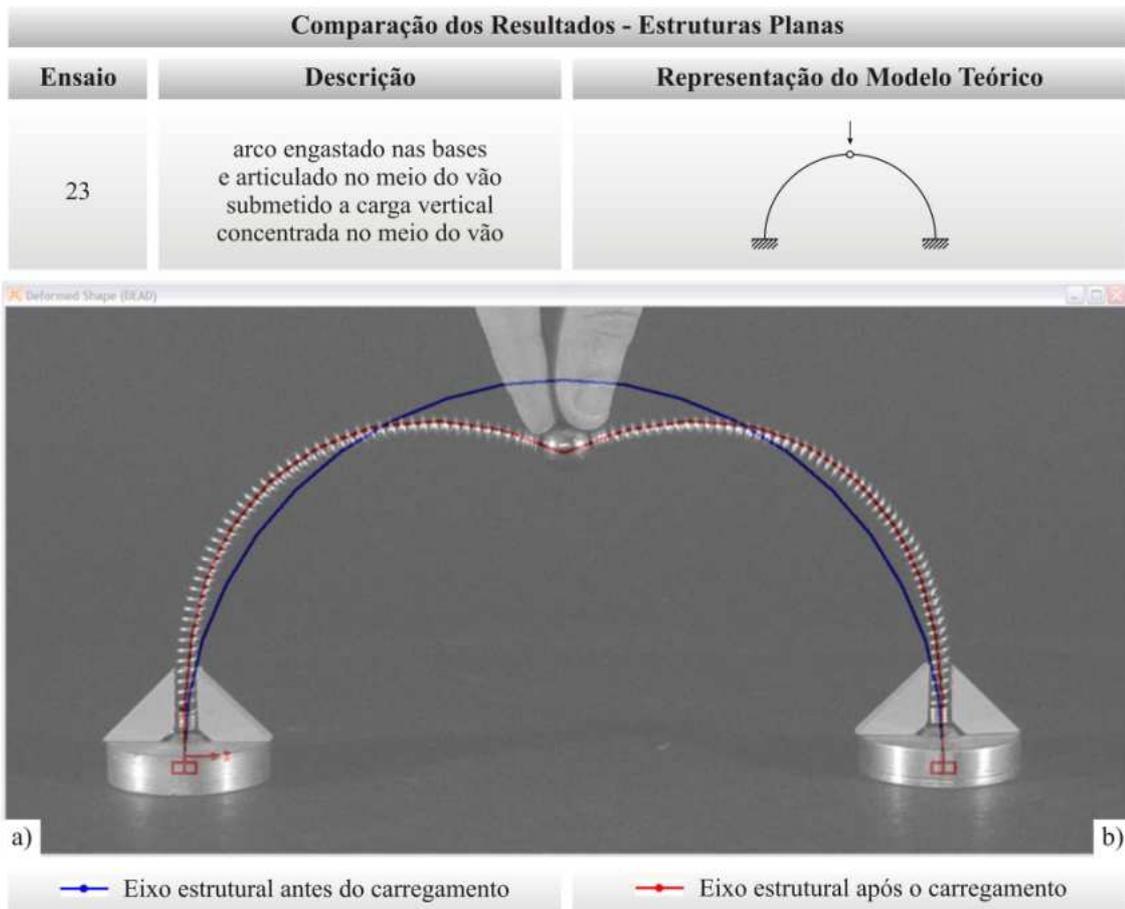


Figura 5.23 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 23
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

No arco apresentado na Figura 5.23, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento do elemento estrutural.

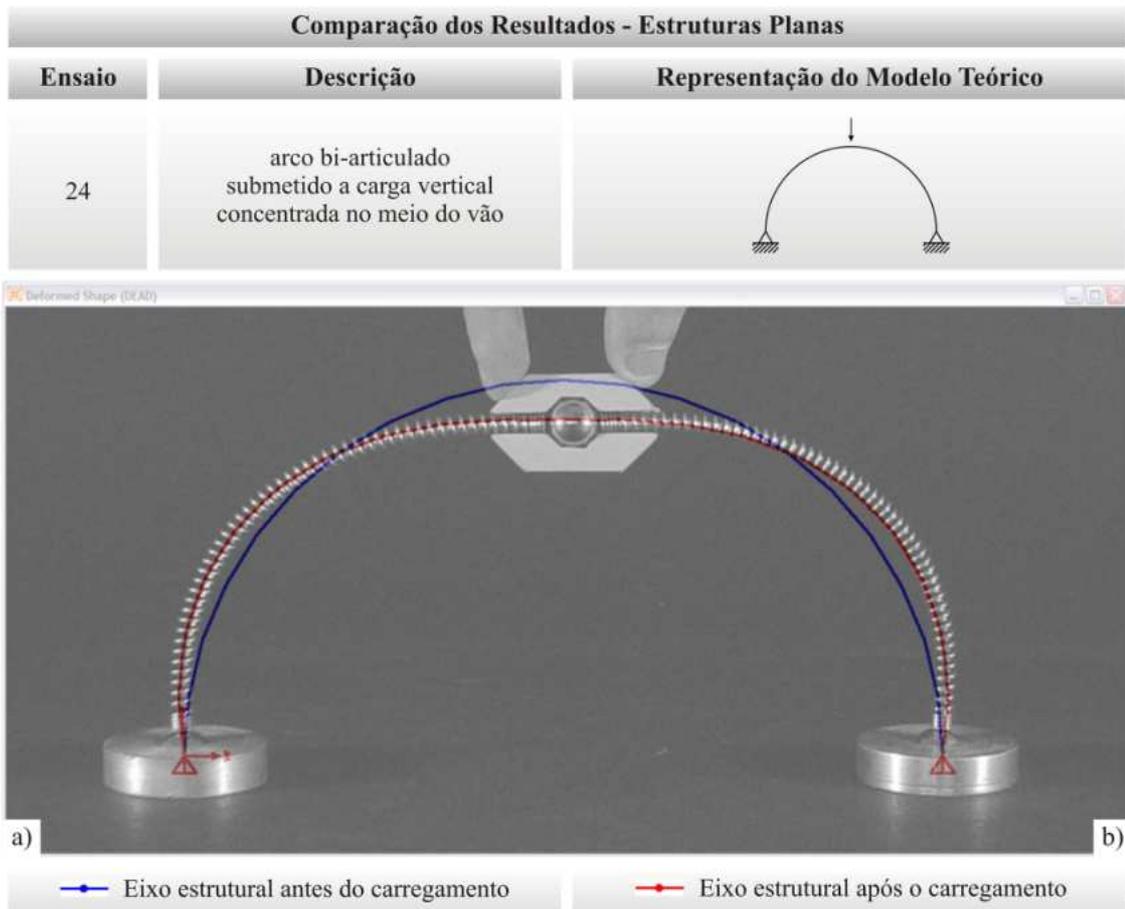


Figura 5.24 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 24
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

No arco apresentado na Figura 5.24, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento do elemento estrutural. Assim como no ensaio 22, as peças de ligação contínua conectadas no nó central fazem a ligação entre os elementos transformando o arco em um único elemento.

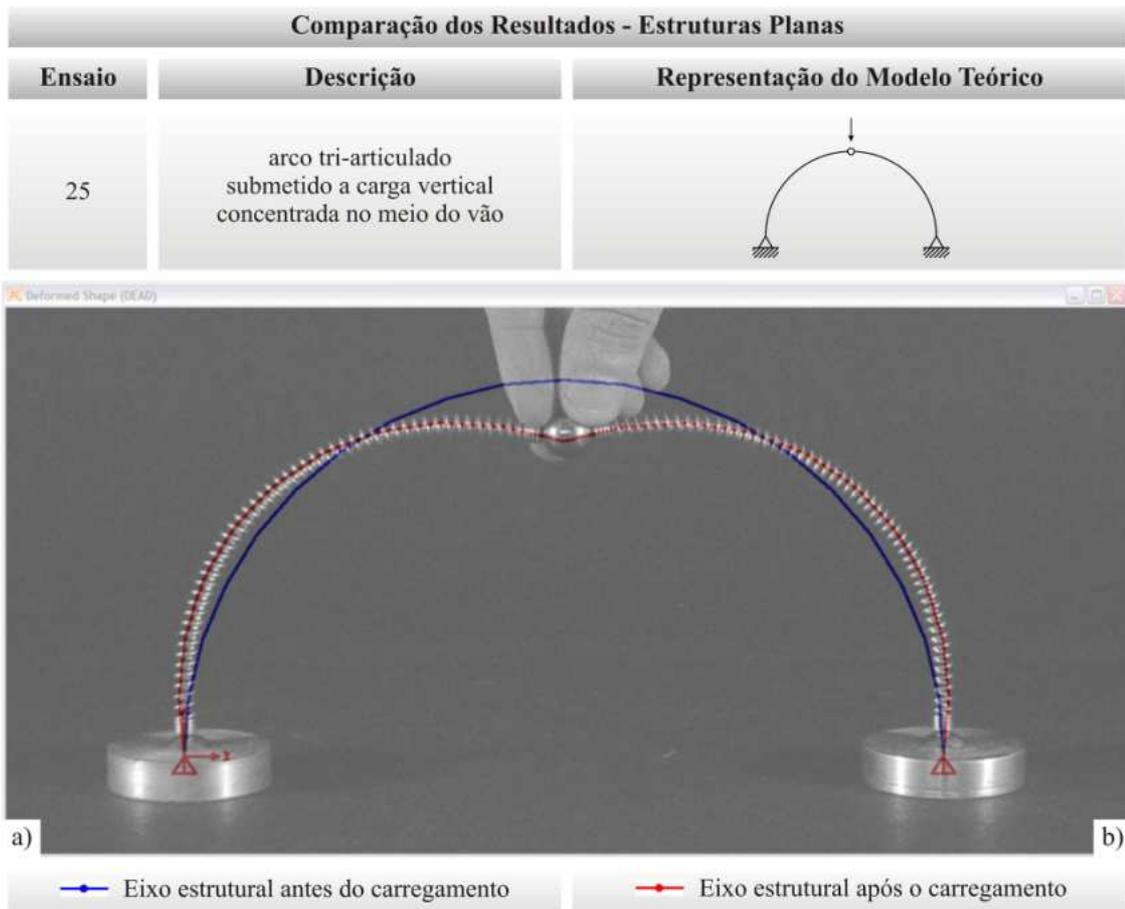


Figura 5.25 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 25
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

No arco apresentado na Figura 5.25, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento do elemento estrutural.

5.2.6 / Treliça

Na Figura 5.26 (ensaio 26) tem-se a representação de um pórtico visando a comparação com as treliças representadas nas Figuras 5.27 a 5.29, que correspondem respectivamente aos ensaios de 27 a 29. Os carregamentos utilizados são verticais, concentrados e aplicados nos nós das treliças.

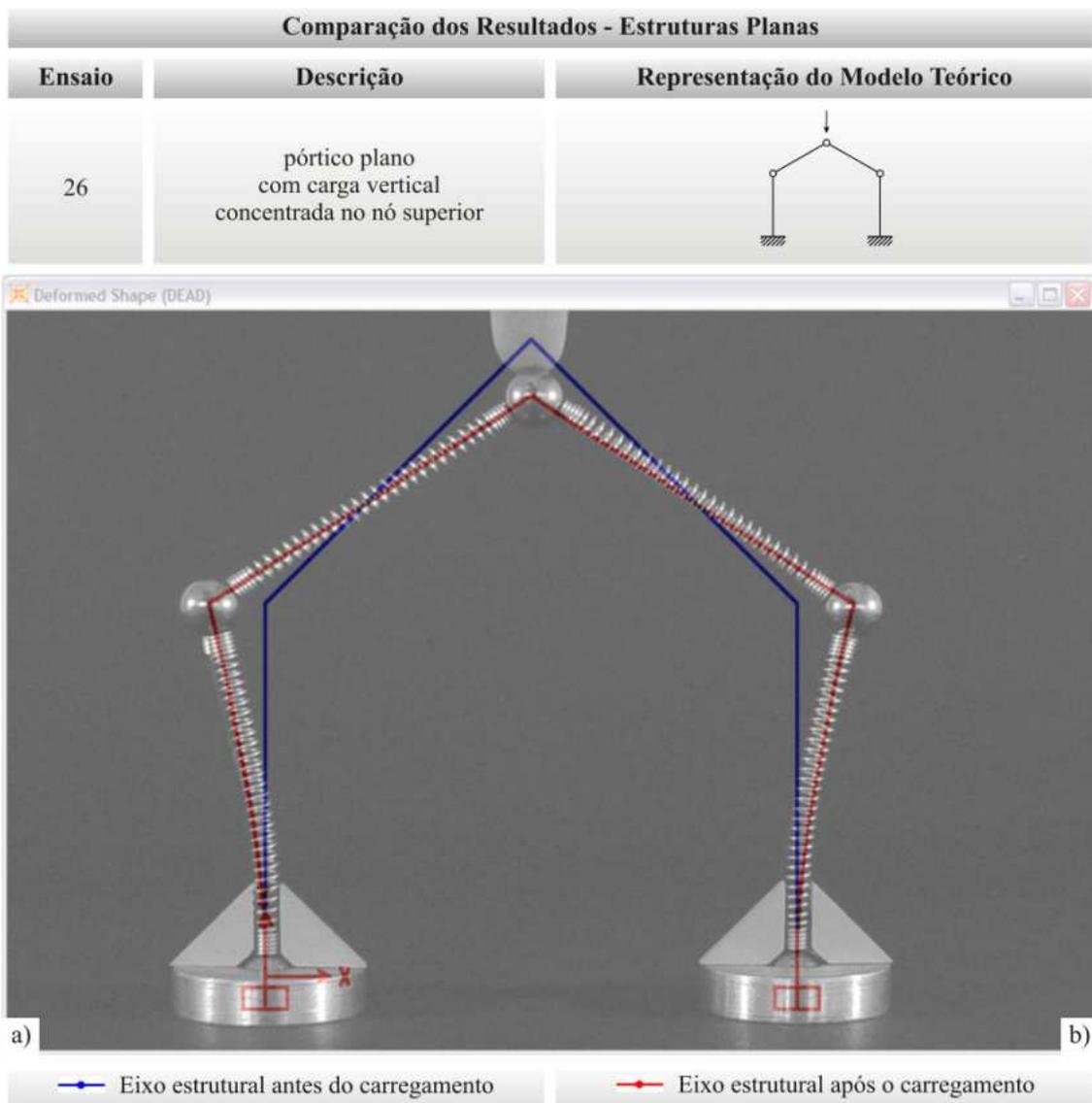
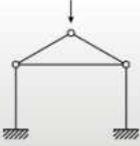


Figura 5.26 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 26
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Observa-se com a sobreposição das imagens na Figura 5.26 que para a estrutura montada com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é bem similar à simulação computacional, porém, com imprecisões nas colunas associadas às peças de ligação rígida.

Comparação dos Resultados - Estruturas Planas		
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico
27	treliça plana com carga vertical concentrada no nó superior	

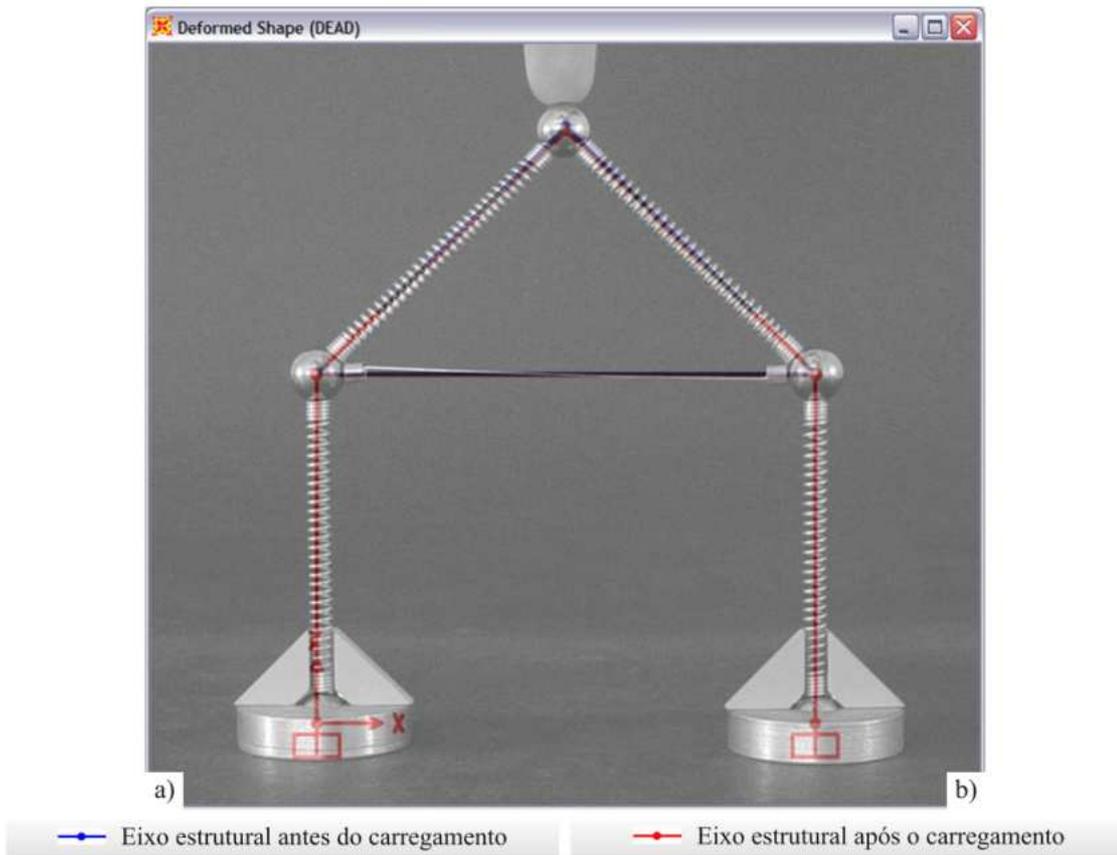


Figura 5.27 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 27
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na treliça apresentada na Figura 5.27, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Percebe-se que neste caso não houve o afastamento entre os nós inferiores da treliça como no ensaio anterior (ensaio 26), devido ao acréscimo de um elemento ligando esses nós. A transformação da estrutura do ensaio 26 em uma treliça fez com que a estrutura não apresente nenhuma deformação visível.

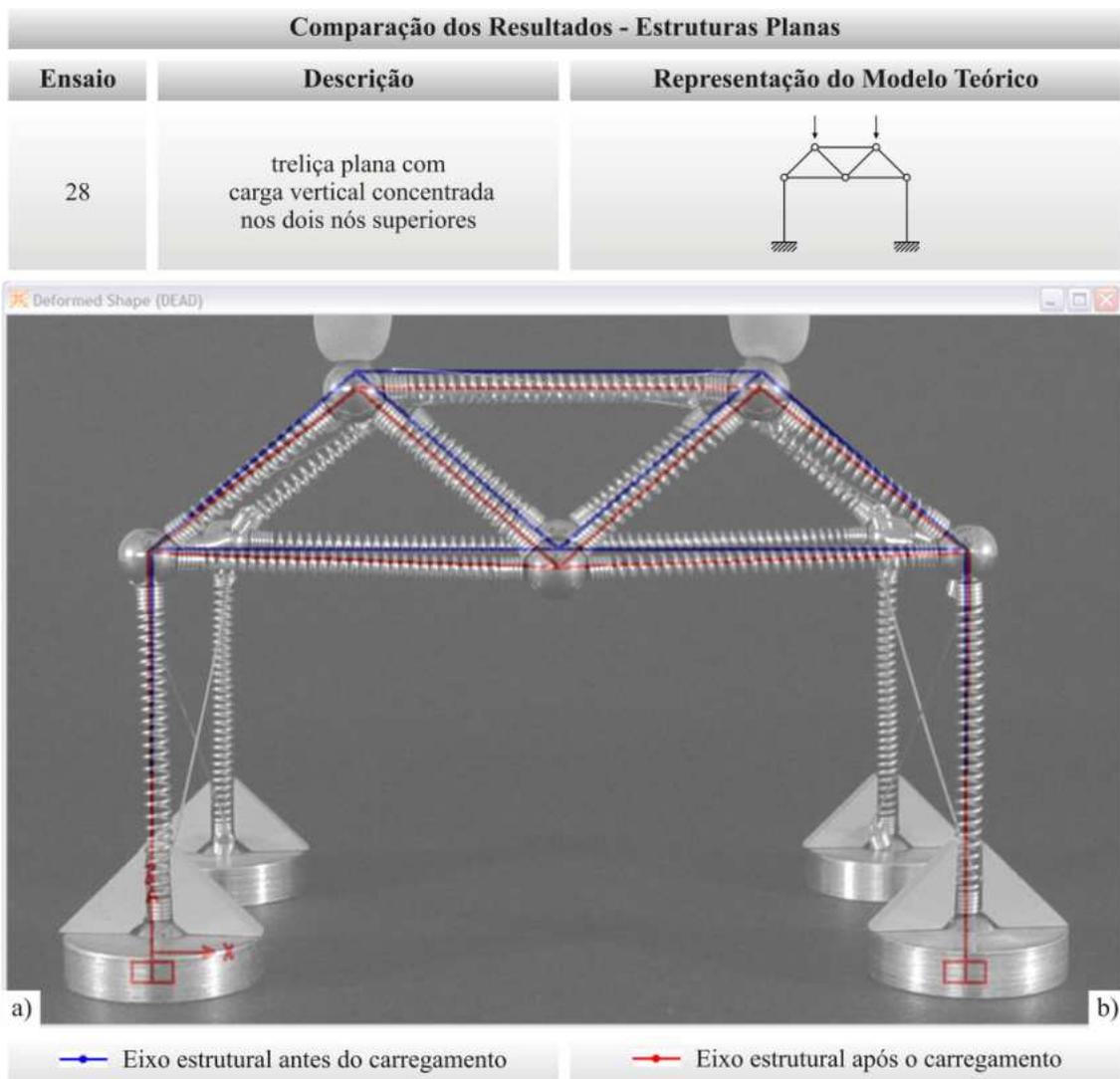


Figura 5.28 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 28
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na treliça apresentada na Figura 5.28, observa-se que para estabilização do sistema a mesma foi montada em dois planos e a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Por ser um sistema estrutural que tem como principal característica a solitação axial dos elementos estruturais, as treliças apresentam pouca deformação dificultando a análise visual.

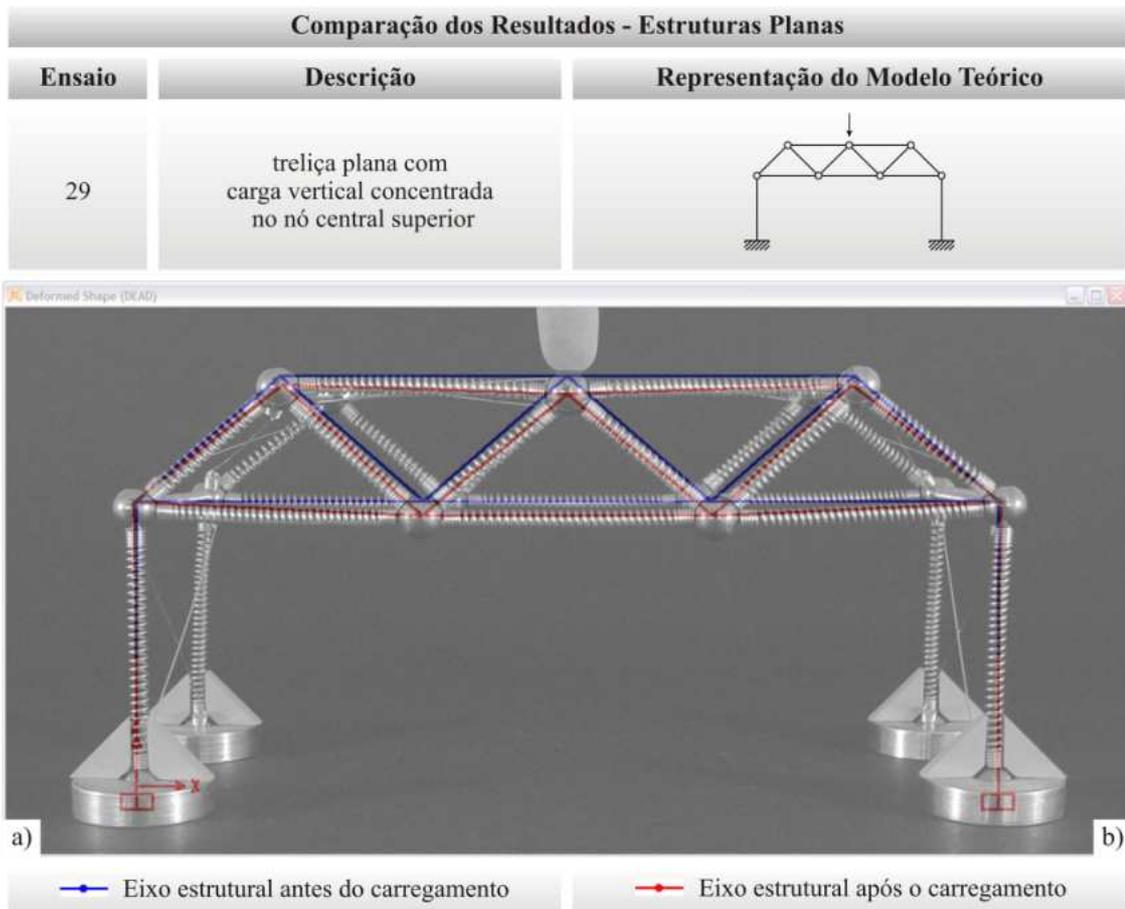


Figura 5.29 – Sobreposição das imagens: estruturas planas - ensaio 29
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na treliça apresentada na Figura 5.29, a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional, os eixos coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais. Neste ensaio também se utilizou uma treliça adicional para estabilização. Percebe-se que mesmo uma treliça vencendo um vão maior que o do ensaio anterior (ensaio 28) ainda assim apresenta pouco deslocamento.

5.3 | Estruturas Espaciais

Conforme mencionado anteriormente, a deformada das estruturas espaciais foi comparada sem a sobreposição das imagens. As estruturas espaciais estão divididas em três grupos listados a seguir:

- Pórtico Espacial 1 (ensaios 1 a 4);
- Pórtico Espacial 2 (ensaios 5 a 8);
- Pórtico Espacial 3 (ensaios 9 a 13);
- Treliça Espacial (ensaio 14).

Para cada grupo foi mantida a mesma escala para representação da deformada na simulação computacional. Este artifício permite uma comparação entre os sistemas de cada grupo.

5.3.1 | *Pórtico Espacial 1*

Nas Figuras 5.30 a 5.33, que correspondem respectivamente aos ensaios de 1 a 4, são apresentados os resultados para o Pórtico Espacial 1 submetido a um carregamento concentrado horizontal em um nó superior. Para cada ensaio foram consideradas condições de contorno diferentes para o mesmo sistema estrutural.

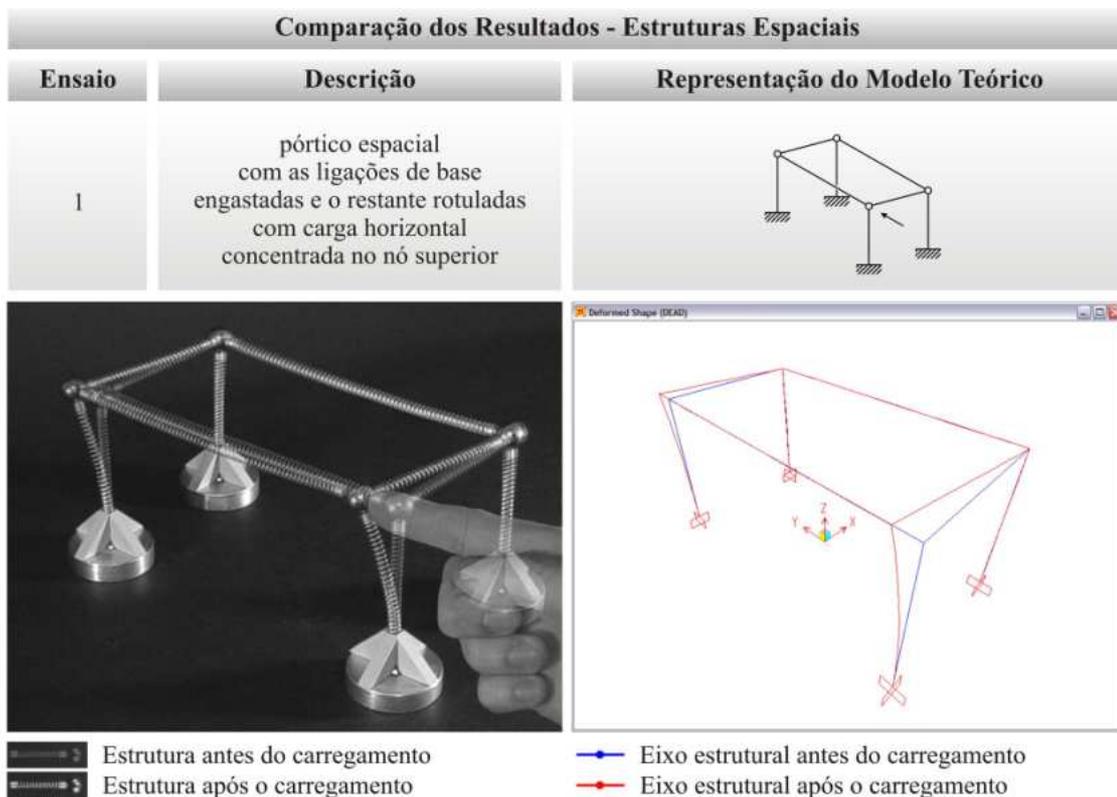


Figura 5.30 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 1

Observa-se com a comparação das imagens na Figura 5.30 que para o pórtico espacial montado com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é similar a simulação computacional. No plano onde é aplicado o carregamento, percebe-se que somente as colunas se deformam, pois estão engastadas na base. O plano oposto não é solicitado, pois as vigas estão rotuladas e assim não transmitem momento para o mesmo.

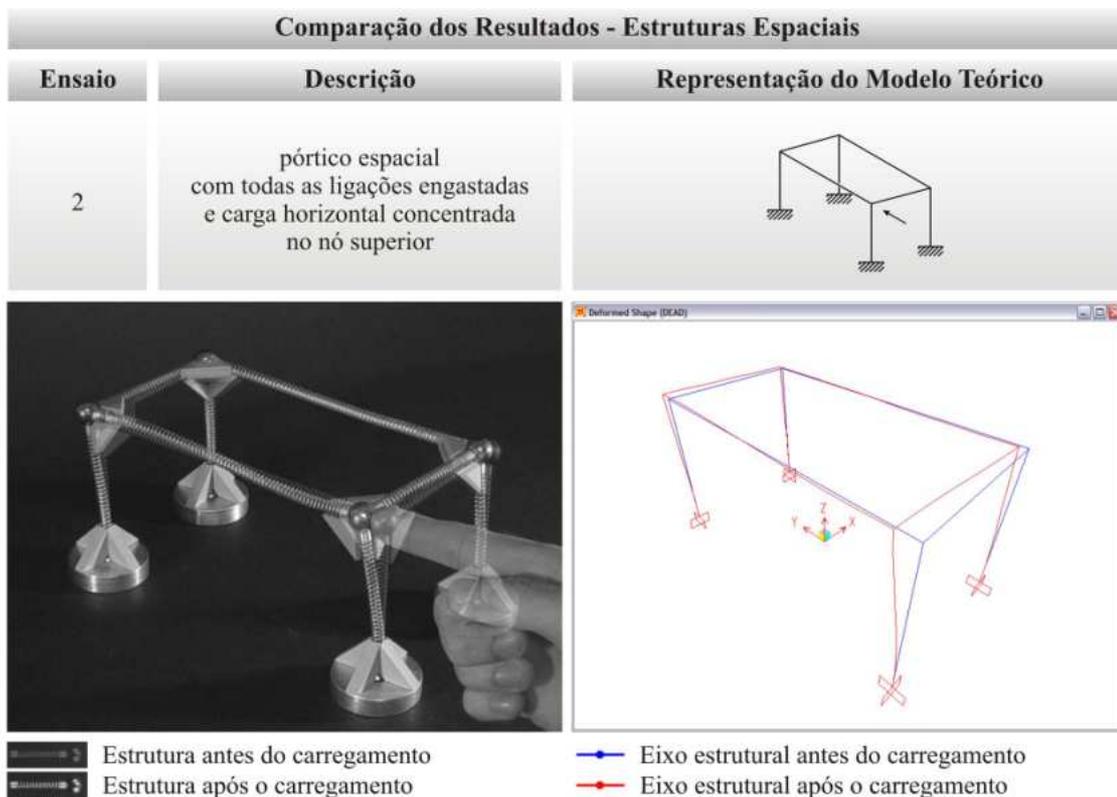


Figura 5.31 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 2

No pórtico espacial da Figura 5.31 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Percebe-se que com todas as ligações engastadas existe a transmissão de momento a todos os elementos estruturais, inclusive os que compõem o plano oposto ao que é aplicado o carregamento. Este caso é diferente do caso anterior (ensaio 1) onde somente as colunas se deformam e o plano oposto ao que é aplicado o carregamento não é solicitado.

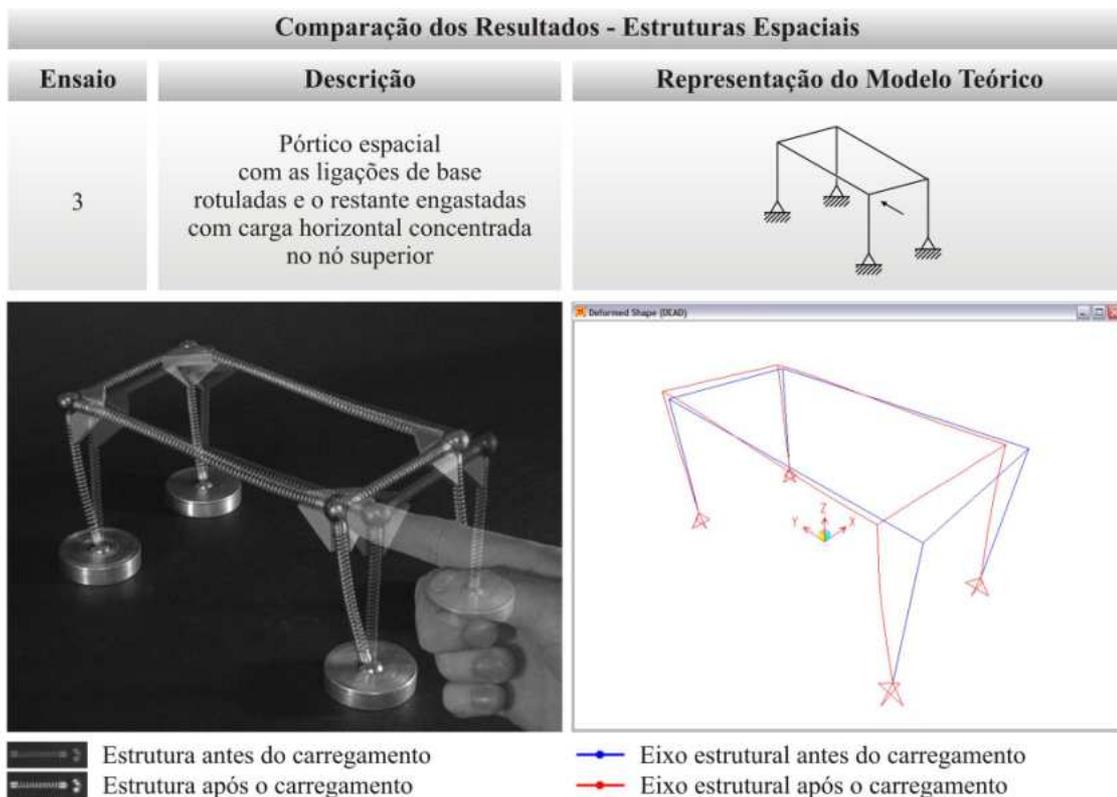


Figura 5.32 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 3

No pórtico espacial da Figura 5.32 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Percebe-se que o comportamento deste pórtico espacial é similar ao caso anterior (ensaio 2). No entanto, devido principalmente as ligações rotuladas das bases das colunas, o pórtico apresenta deslocamentos maiores.

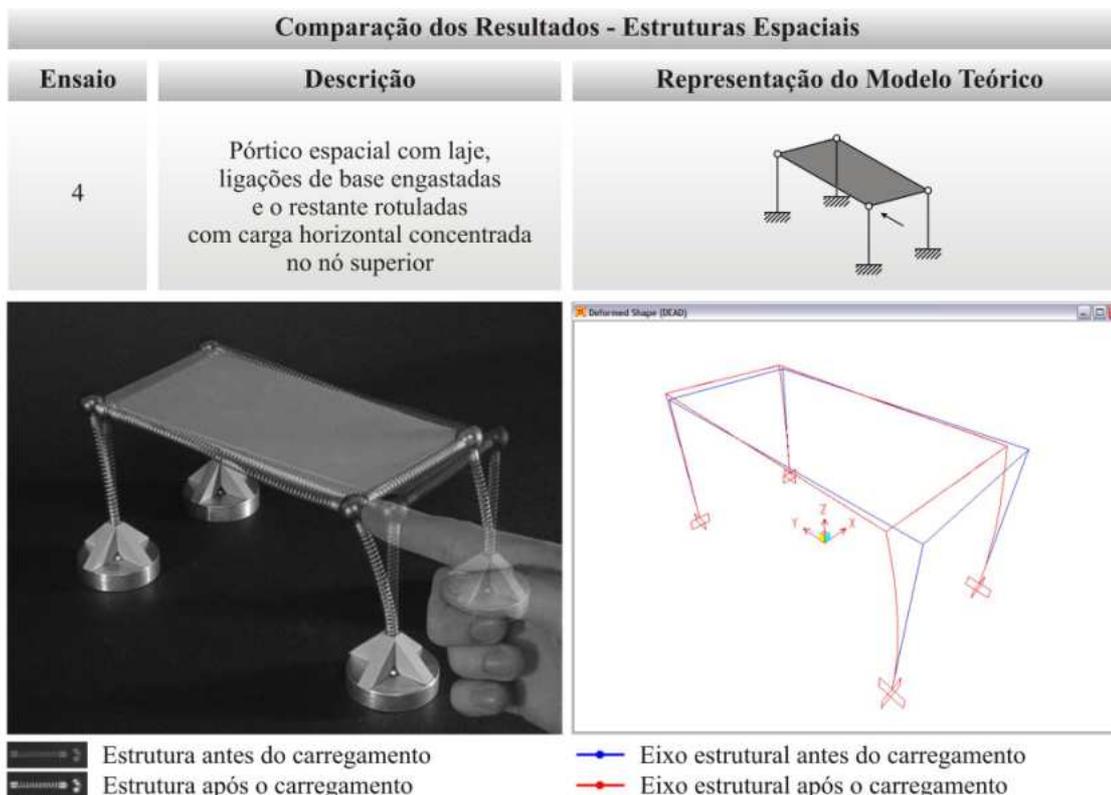


Figura 5.33 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 4

No pórtico espacial da Figura 5.33 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Neste caso, percebe-se a influência da laje no comportamento do pórtico com um todo. Com a mesma configuração das ligações do ensaio 1, este apresenta um comportamento diferente. A laje, funcionando como diafragma horizontal, contraventa o plano horizontal transmitindo a carga para o plano oposto ao carregamento.

5.3.2 / Pórtico Espacial 2

Nas Figuras 5.34 a 5.37, que correspondem respectivamente aos ensaios de 5 a 8, são apresentados os resultados para o Pórtico Espacial 2 submetido a um carregamento concentrado horizontal em um nó superior. Este pórtico difere do anterior pois é composto por um número maior de pórticos planos. Para cada ensaio foram consideradas condições de contorno diferentes para o mesmo sistema estrutural.

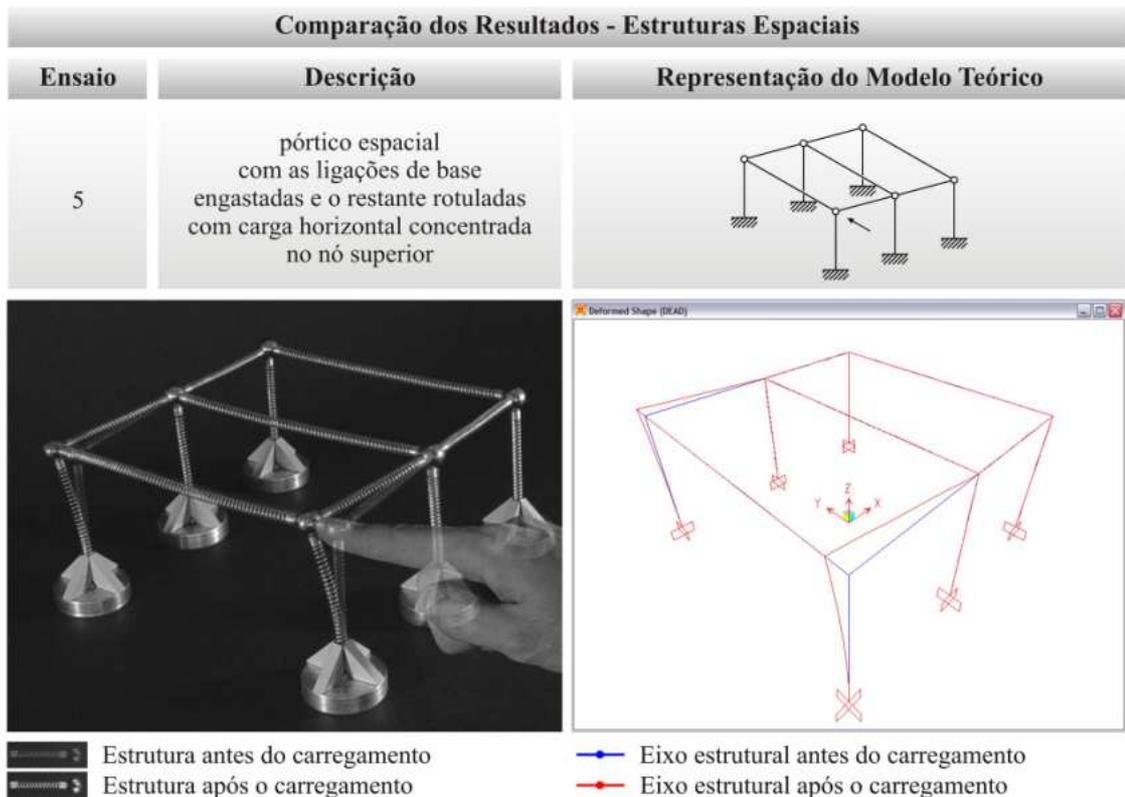


Figura 5.34 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 5

Observa-se com a comparação das imagens na Figura 5.34 que para o pórtico espacial montado com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é similar a simulação computacional. Percebe-se, quando comparado com o ensaio 1, que mesmo com um número maior de pórticos planos, este sistema estrutural apresenta o mesmo comportamento. No plano onde é aplicado o carregamento, somente as colunas se deformam, e os outros planos não são solicitados.

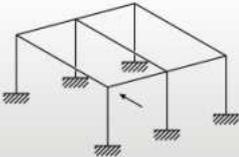
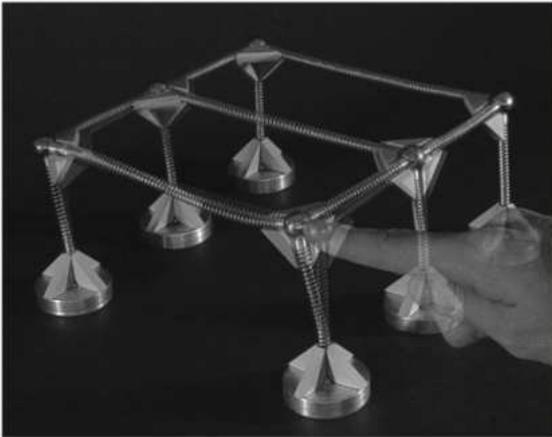
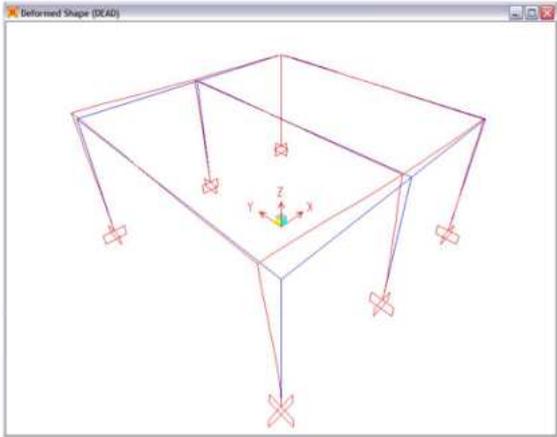
Comparação dos Resultados - Estruturas Espaciais		
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico
6	pórtico espacial com todas as ligações engastadas e carga horizontal concentrada no nó superior	
		
<ul style="list-style-type: none">  Estrutura antes do carregamento  Estrutura após o carregamento 		<ul style="list-style-type: none">  Eixo estrutural antes do carregamento  Eixo estrutural após o carregamento

Figura 5.35 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 6

No pórtico espacial da Figura 5.35 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Percebe-se, quando comparado com o ensaio 2, que mesmo com um número maior de pórticos planos, este sistema estrutural apresenta o mesmo comportamento.

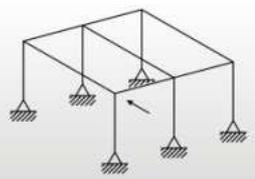
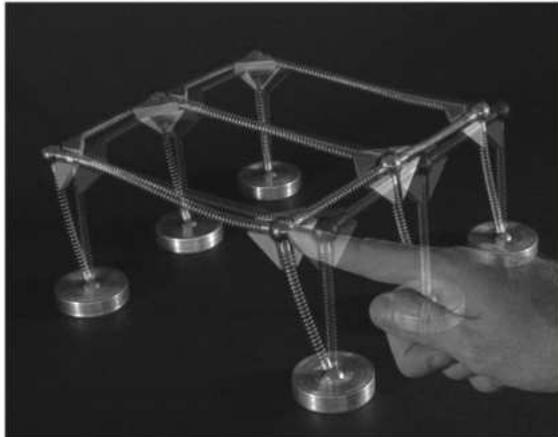
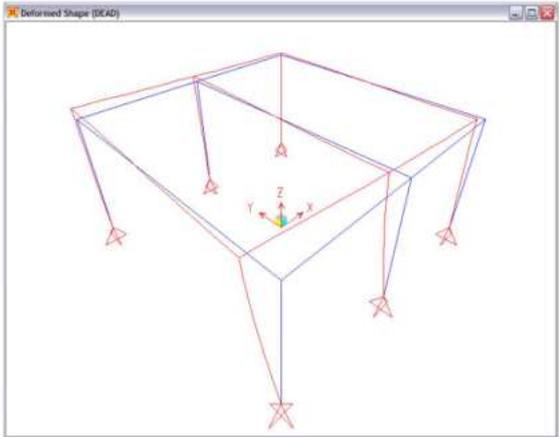
Comparação dos Resultados - Estruturas Espaciais		
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico
7	pórtico espacial com as ligações de base rotuladas e o restante engastadas com carga horizontal concentrada no nó superior	
 <p> <input type="checkbox"/> Estrutura antes do carregamento <input type="checkbox"/> Estrutura após o carregamento </p>		 <p> <input type="checkbox"/> Eixo estrutural antes do carregamento <input type="checkbox"/> Eixo estrutural após o carregamento </p>

Figura 5.36 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 7

No pórtico espacial da Figura 5.36 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Percebe-se, quando comparado com o ensaio 3, que mesmo com um número maior de pórticos planos, este sistema estrutural apresenta o mesmo comportamento. Devido principalmente as ligações rotuladas das bases das colunas, este apresenta deslocamentos maiores que o ensaio anterior (ensaio 6).

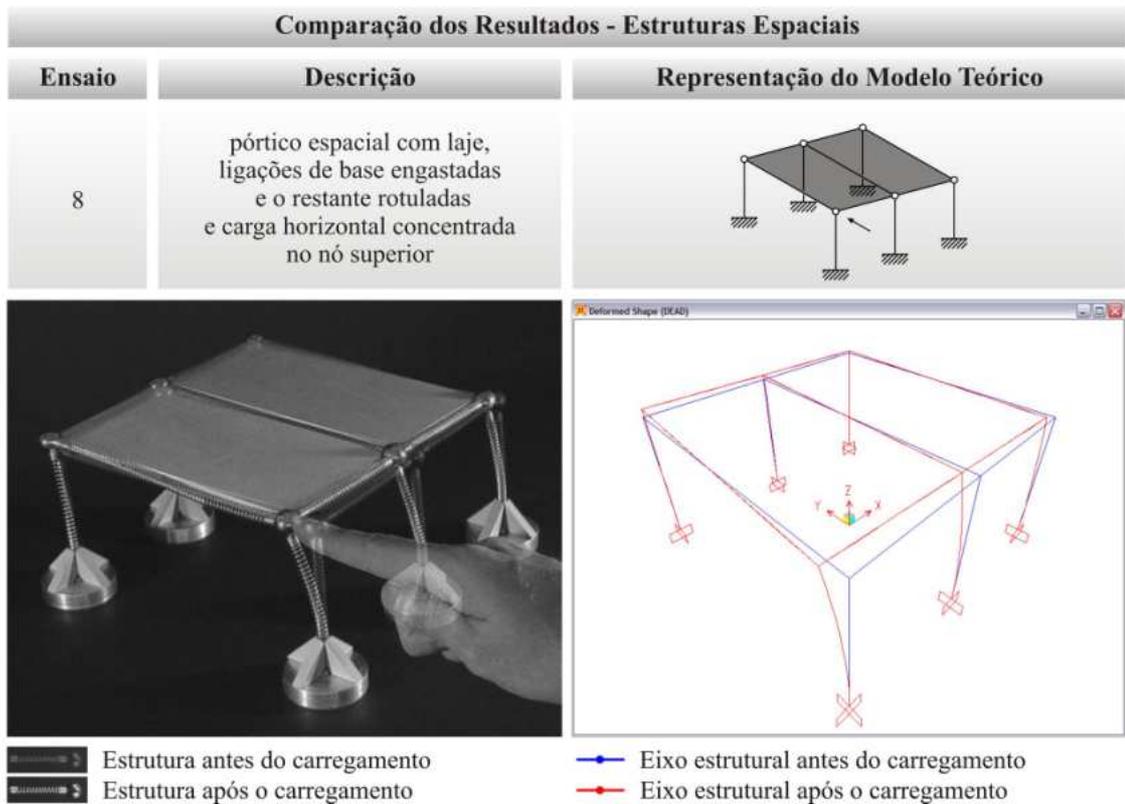


Figura 5.37 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 8

No pórtico espacial da Figura 5.37 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Percebe-se, quando comparado com o ensaio 4, que mesmo com um número maior de pórticos planos, este sistema estrutural apresenta o mesmo comportamento. A laje, funcionando como diafragma horizontal, contraventa o plano horizontal transmitindo a carga para todos os outros planos.

5.3.3 / Pórtico Espacial 3

Nas Figuras 5.38 a 5.42, que correspondem respectivamente aos ensaios de 9 a 13, são apresentados os resultados para o Pórtico Espacial 3, que está associado a estrutura típica de um galpão, submetido a um carregamentos concentrados horizontais. Para cada ensaio foram consideradas condições de contorno e tipos de travamento diferentes para o mesmo sistema estrutural.

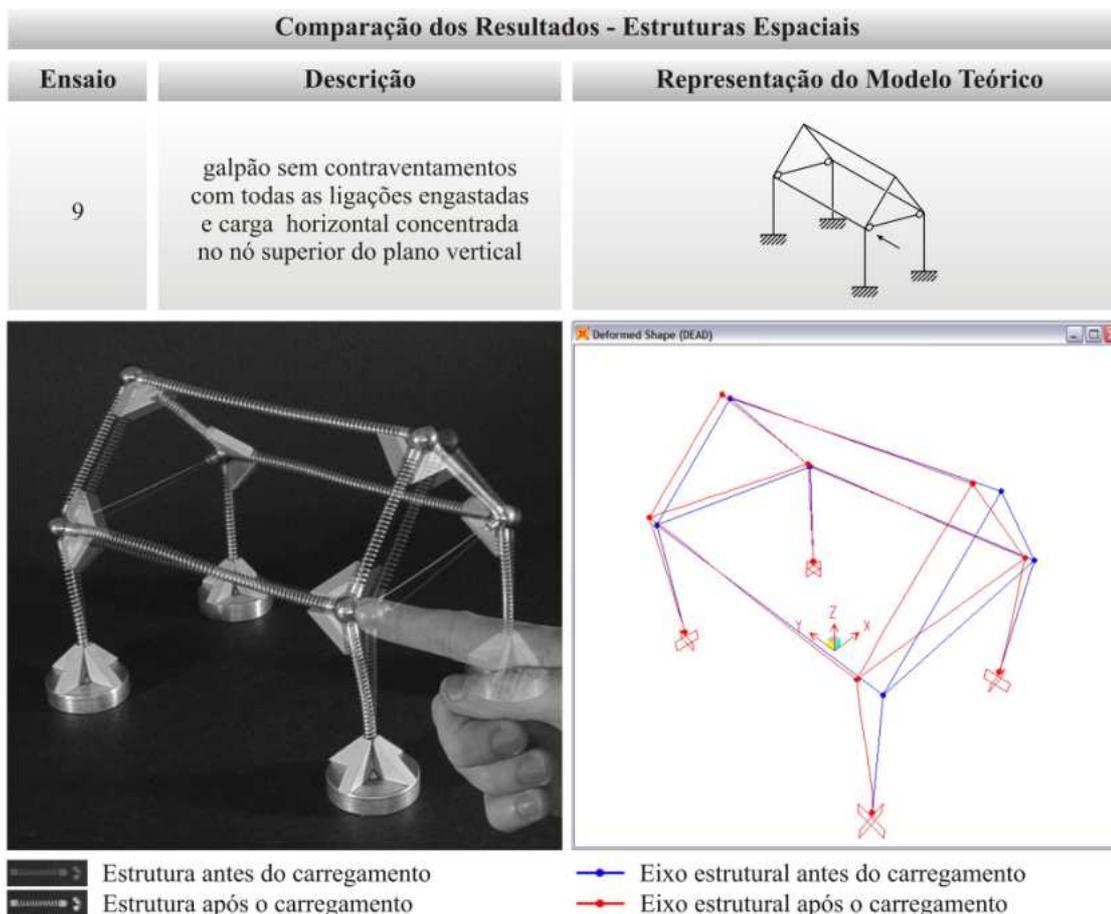


Figura 5.38 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 9

Observa-se, com a comparação das imagens na Figura 5.38, que para o galpão montado com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é similar à simulação computacional. Percebe-se, que com as ligações engastadas existe a transmissão de momento entre os elementos estruturais provocando um deslocamento na estrutura como um todo e deformações maiores nas colunas.

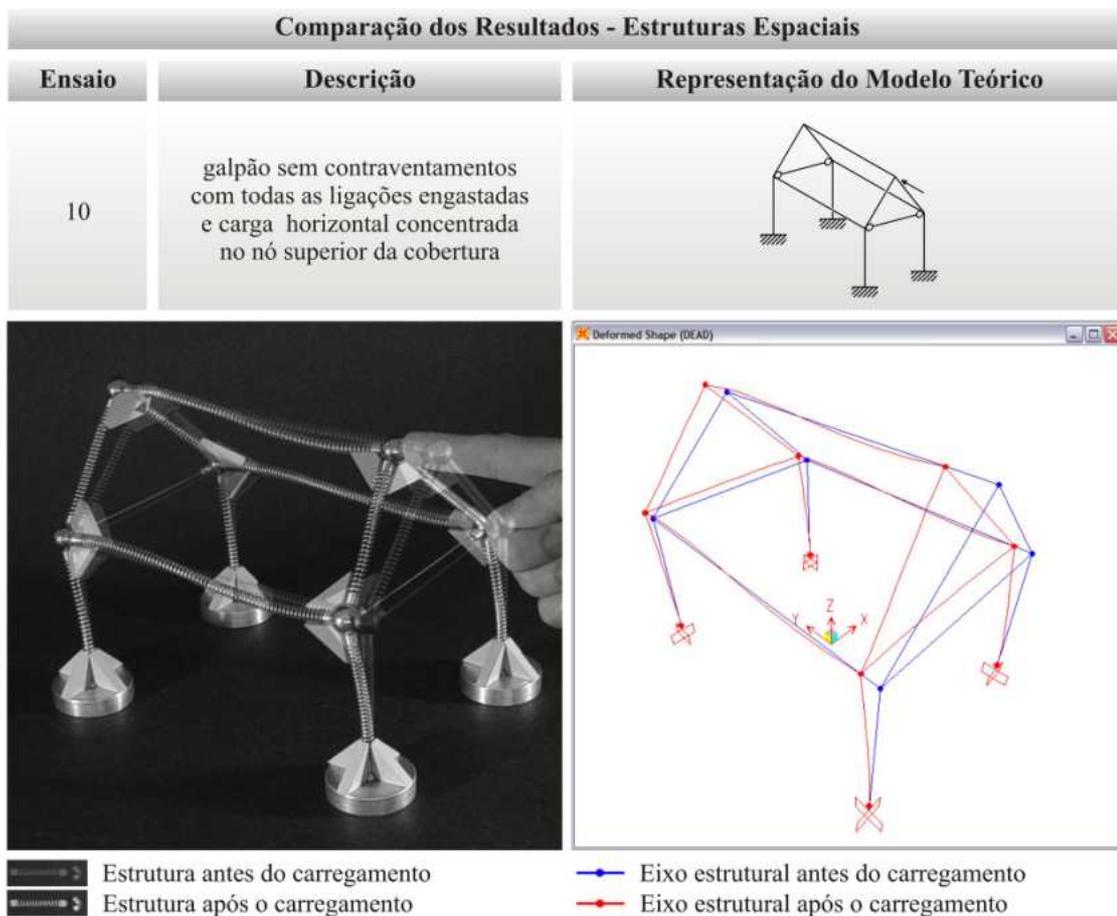


Figura 5.39 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 10

No galpão da Figura 5.39 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é também similar à simulação computacional. Percebe-se, quando comparado com o ensaio anterior (ensaio 9), que ligações engastadas também transmitem momento entre os elementos estruturais, entretanto com o carregamento no nó superior da cobertura o deslocamento da estrutura e a deformação das vigas são maiores.

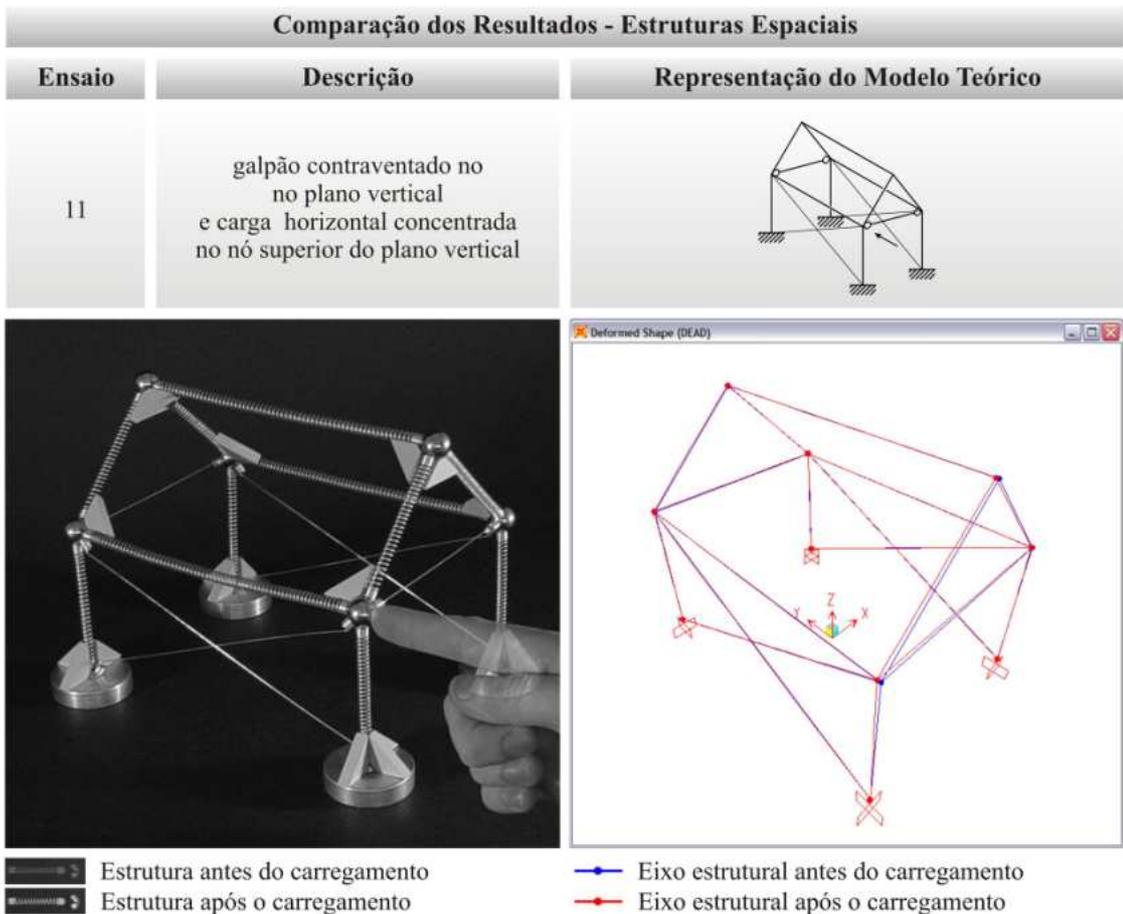


Figura 5.40 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 11

No galpão da Figura 5.40 a configuração da deformada na *Maquete Estrutural* é imperceptível, o deslocamento é muito pequeno. Percebe-se, quando comparado com o ensaio 9, que a utilização de contraventamentos em “x” no plano vertical, trava a estrutura para essa condição de carregamento, transformando os pórticos deslocáveis do ensaio 9 em pórticos indeslocáveis.

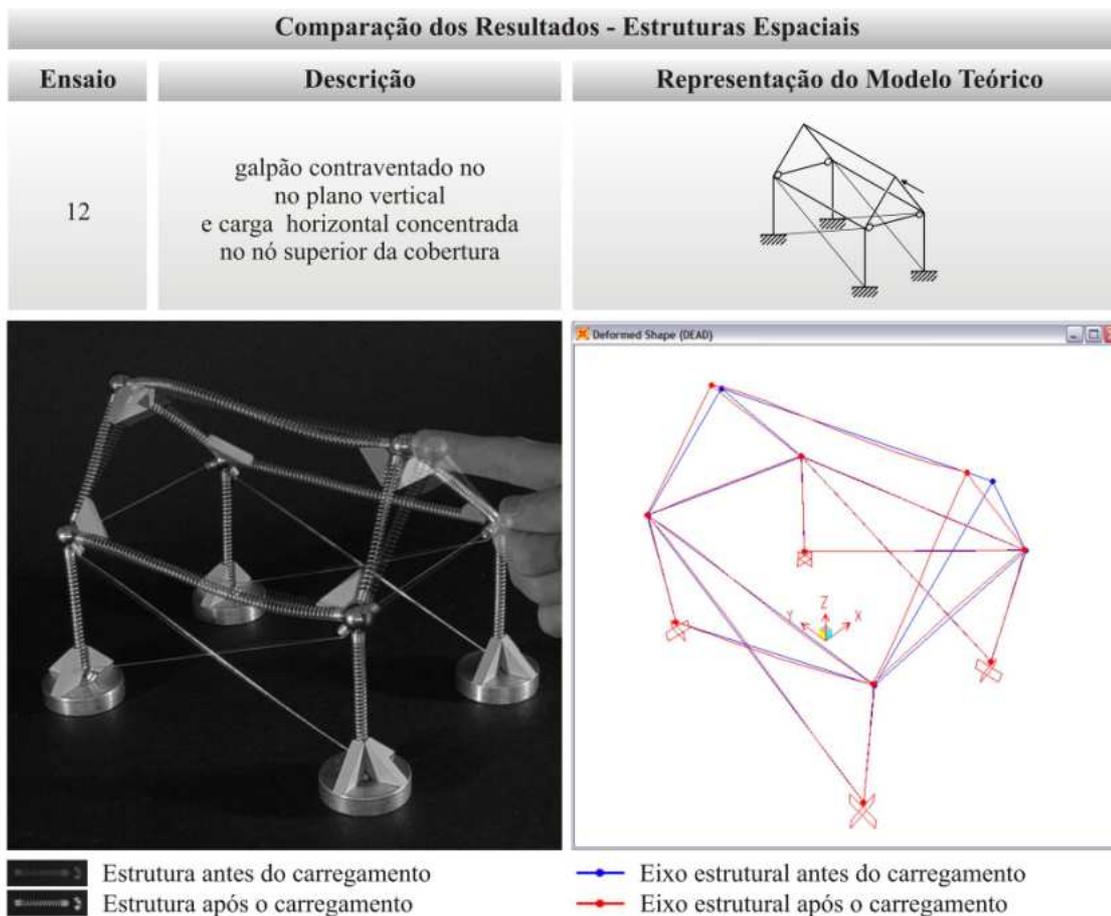


Figura 5.41 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 12

No galpão da Figura 5.41 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é similar à simulação computacional. Percebe-se, quando comparado com o ensaio anterior (ensaio 11), que a utilização de contraventamentos em “x” somente nos planos verticais, não confere o contraventamento de toda a estrutura. Assim, o carregamento no nó superior da cobertura provoca deslocamento nos quadros que compõe a mesma.

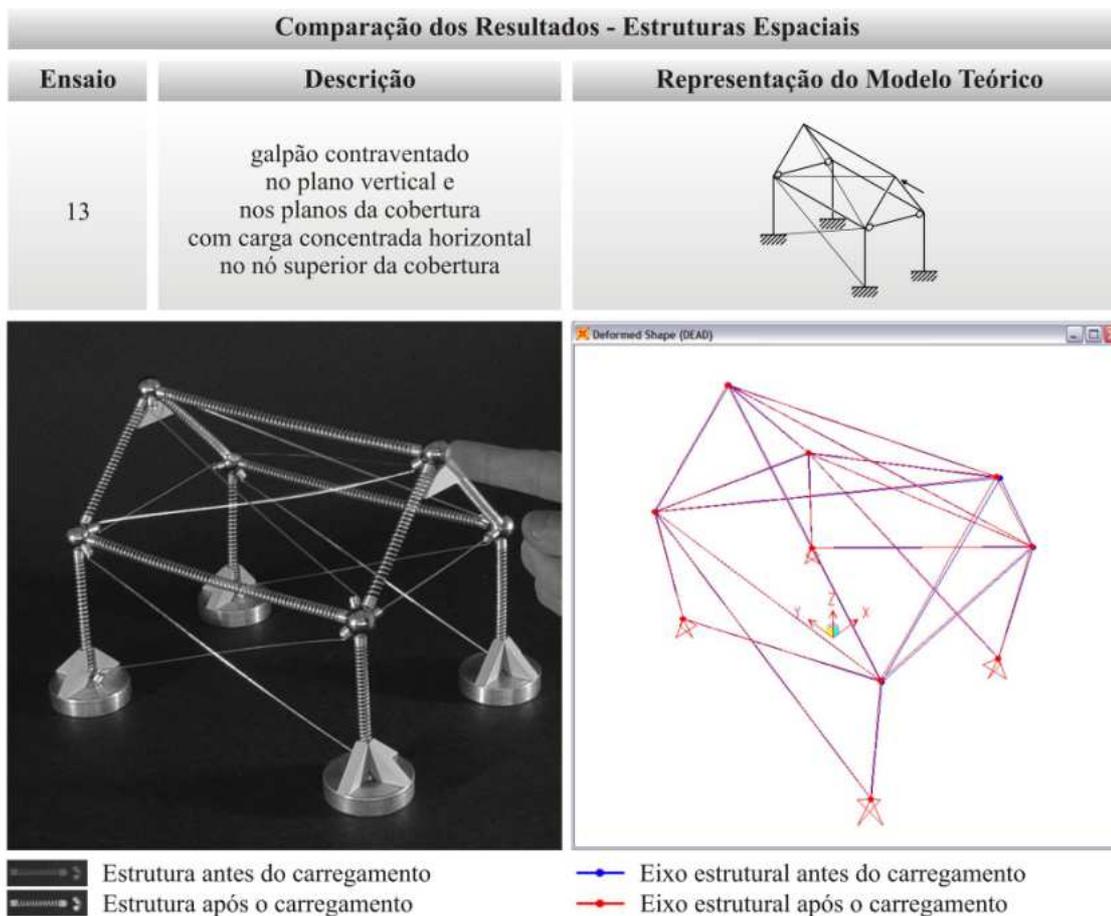


Figura 5.42 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 13

No galpão da Figura 5.42 a configuração da deformada da *Maquete Estrutural* é imperceptível, o deslocamento é muito pequeno. Percebe-se, quando comparado com o ensaio anterior (ensaio 12), que a utilização de contraventamentos em “x” nos planos horizontais e da cobertura confere o travamento de toda a estrutura.

5.3.4 | Treliça Espacial

Na Figura 5.43, que corresponde ao ensaio 14, é apresentado o resultado para a treliça espacial com quatro apoios submetida a um carregamento concentrado horizontal.

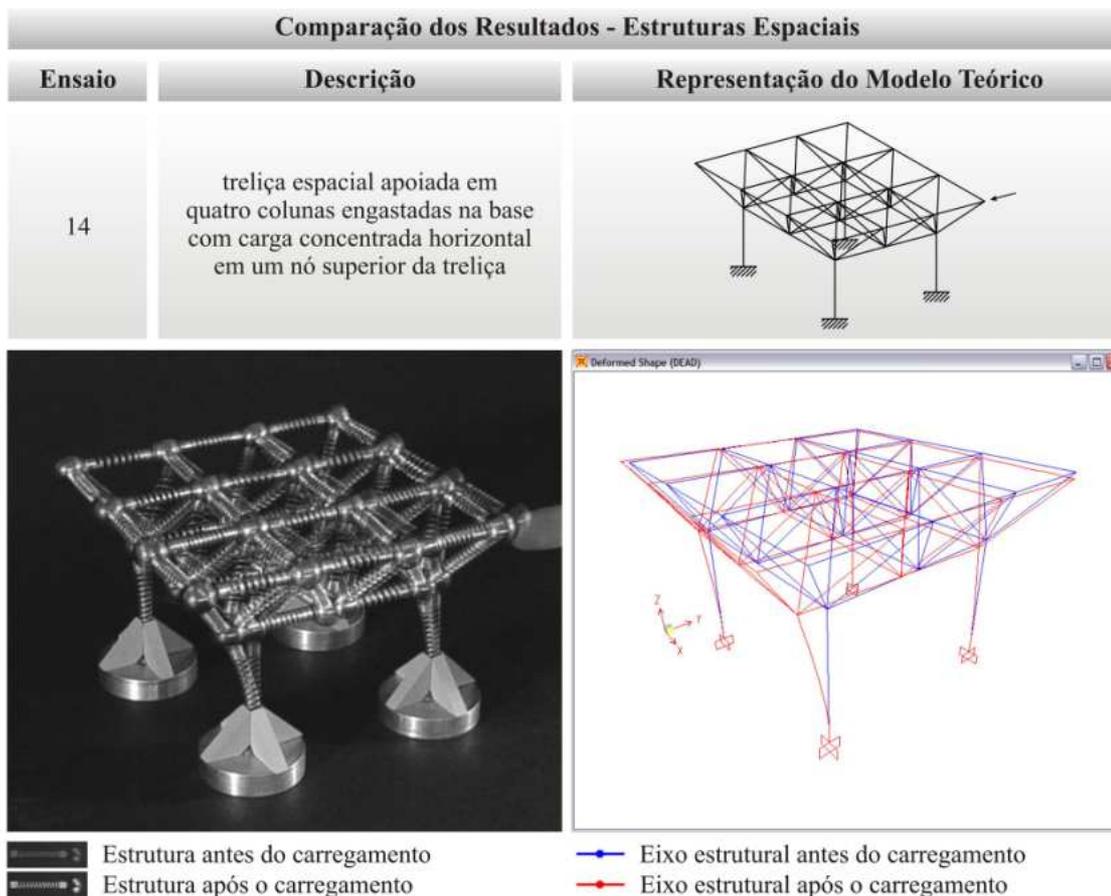


Figura 5.43 – Comparação dos resultados: estruturas espaciais - ensaio 14

Observa-se com a comparação das imagens na Figura 5.43, que para a treliça espacial montada com a *Maquete Estrutural* a configuração da deformada é similar à simulação computacional. Para o carregamento indicado há um deslocamento da estrutura com rotação da mesma em relação a um eixo vertical e ainda deslocamento nas colunas.

Capítulo 6 | Aplicações da Maquete Estrutural em Estruturas Metálicas

6.1 | Introdução

Em uma estrutura metálica determinar rigorosamente a capacidade resistente de seus elementos não é suficiente se os esforços não forem adequadamente avaliados. A análise global do comportamento de uma estrutura, em particular uma estrutura metálica, depende fundamentalmente das suas características de deformabilidade e rigidez, da estabilidade global, da estabilidade dos seus elementos, do comportamento das ligações e do comportamento das seções transversais. Assim, na análise de uma estrutura metálica devem-se considerar todos estes aspectos (SIMÕES, 2007).

Para representar a aplicabilidade, confiabilidade, versatilidade e praticidade da *Maquete Estrutural* na simulação do comportamento de estruturas metálicas, três estudos foram realizados. No Estudo 1 tem-se a avaliação da influência das ligações e travamentos em uma estrutura pré-existente, o Estudo 2 avalia a influência do arranjo de barras, representados pelas molas, em sistemas estruturais. No Estudo 3 é representada uma edificação em que a estabilidade global e efeitos de segunda ordem, usuais em estruturas metálicas, podem ser observados. A seguir têm-se a descrição e os resultados dos três estudos.

6.2 | Estudo 1 - Influência das ligações

Para análise de uma estrutura metálica é importante prever a influência das ligações entre os elementos estruturais no comportamento da estrutura como um todo. Estas ligações podem influenciar nos valores e na transmissão dos esforços e/ou na deslocabilidade/estabilidade da mesma. A escolha da ligação é feita na etapa inicial do projeto e o seu dimensionamento é realizado após a avaliação dos esforços da estrutura. A ligação dimensionada é avaliada de forma a garantir se o comportamento da mesma reflete ou não a ligação prevista na etapa inicial do projeto.

Com o objetivo de representar a etapa de escolha da ligação entre os elementos de uma estrutura no processo de concepção estrutural, foi simulada na *Maquete Estrutural* uma

única estrutura com diferentes condições de contorno e tipos de travamento, e assim avaliado qualitativamente a influência das ligações no comportamento da mesma.

Para validar o comportamento da *Maquete Estrutural* e comprovar a eficiência do modelo como ferramenta do processo de concepção estrutural de edificações foi utilizada a mesma metodologia apresentada no item 4.2. Portanto todas as configurações da estrutura montada com o modelo foram simuladas no *software* SAP2000 e posteriormente comparadas.

Para este estudo utilizou-se uma residência estruturada em aço localizada na cidade de São Paulo, conforme as imagens da Figura 6.1. A edificação foi construída em 1980 com projeto arquitetônico de Arnaldo Martino e Eduardo de Almeida, e está localizada em um terreno de acentuado declive conforme pode ser visto na Figura 6.2 através da planta da estrutura do primeiro pavimento e do corte longitudinal da edificação.



Figura 6.1 – Imagens da residência utilizada no estudo 1
Fonte: DIAS, 2002a, p. 47 e 50

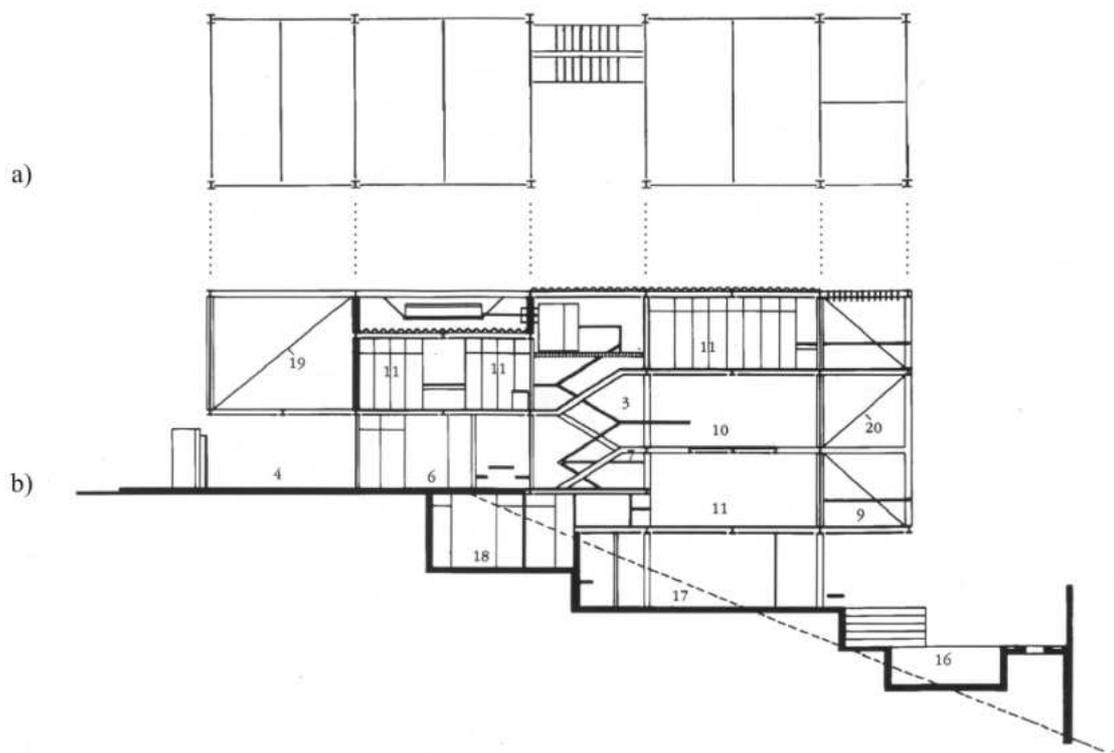


Figura 6.2 – Desenhos esquemáticos do projeto da residência utilizada no estudo 1

a) Planta da estrutura do primeiro pavimento, b) Corte longitudinal

Fonte: DIAS, 2002a, p. 48 e 49

Para facilitar a montagem com a *Maquete Estrutural* foram feitas algumas adaptações no projeto. Foi desconsiderado o desnível do terreno e o balanço dos fundos, e a modulação da estrutura foi padronizada para tornar mais visível as deformadas e deslocamentos e assim facilitar a análise dos resultados. A Figura 6.3 mostra, na planta da estrutura do primeiro pavimento e no corte longitudinal, a parte da estrutura utilizada na simulação. Na Figura 6.4 são apresentadas, a estrutura simulada no *software* e a montada com a *Maquete Estrutural*.

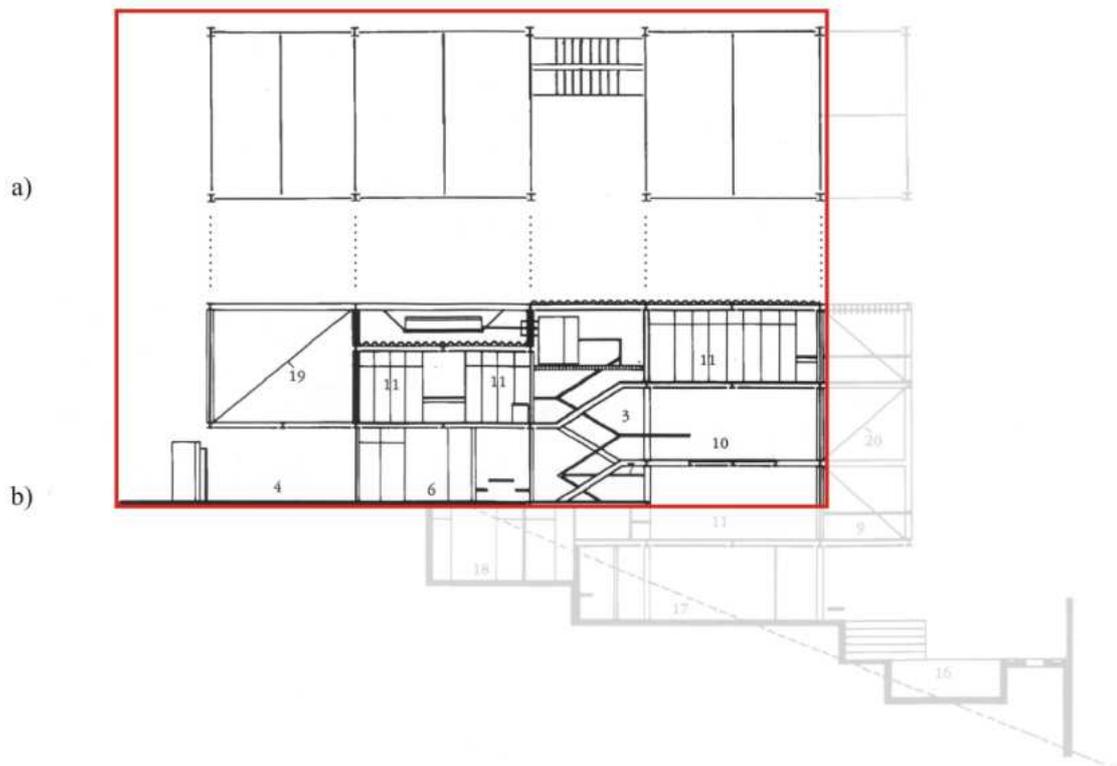


Figura 6.3 – Parte da estrutura da residência utilizada na simulação
 a) Planta da estrutura do primeiro pavimento, b) Corte longitudinal

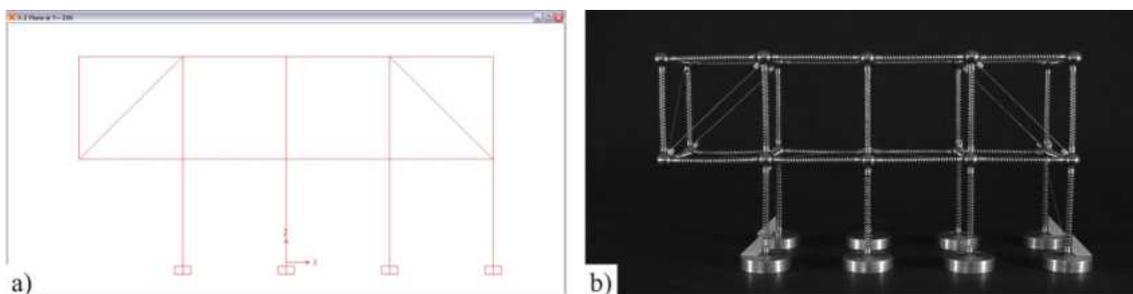


Figura 6.4 – Estrutura utilizada para a simulação
 a) Estrutura simulada no SAP2000, b) Estrutura montada com a Maquete Estrutural

Para a avaliação do comportamento da estrutura em questão foram feitas análises em um único plano, fachada longitudinal, tendo como prioridade a influência do balanço no comportamento da estrutura como um todo.

Nas Figuras 6.5 a 6.10, são apresentados os resultados para a estrutura submetida a um carregamento vertical concentrado nos nós superiores do balanço sob diferentes configurações alterando as condições de contorno e tipos de travamento. Observa-se com a sobreposição das imagens que para todas as estruturas montadas com a *Maquete*

Estrutural, a configuração das deformadas são similares à simulação computacional, os eixos estruturais praticamente coincidem ao longo de todo o comprimento dos elementos estruturais.

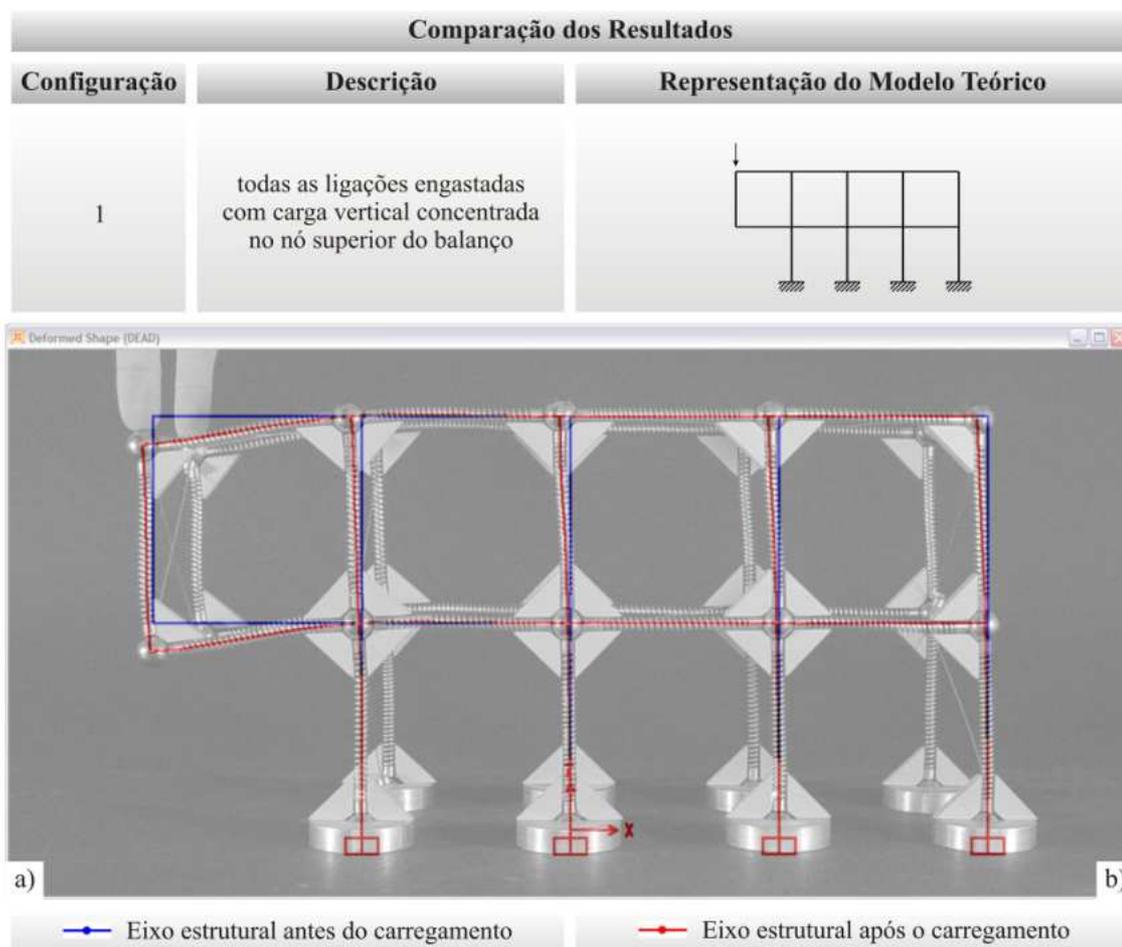


Figura 6.5 – Sobreposição das imagens: configuração 1
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Percebe-se na estrutura da Figura 6.5, configuração 1, que devido ao fato de todas as ligações serem engastadas existe a transmissão de momento entre todos os elementos estruturais e conseqüentemente deformações a flexão desses elementos. Os elementos que compõem a parte da estrutura em balanço apresentam deformações bem mais elevadas que o restante da estrutura.

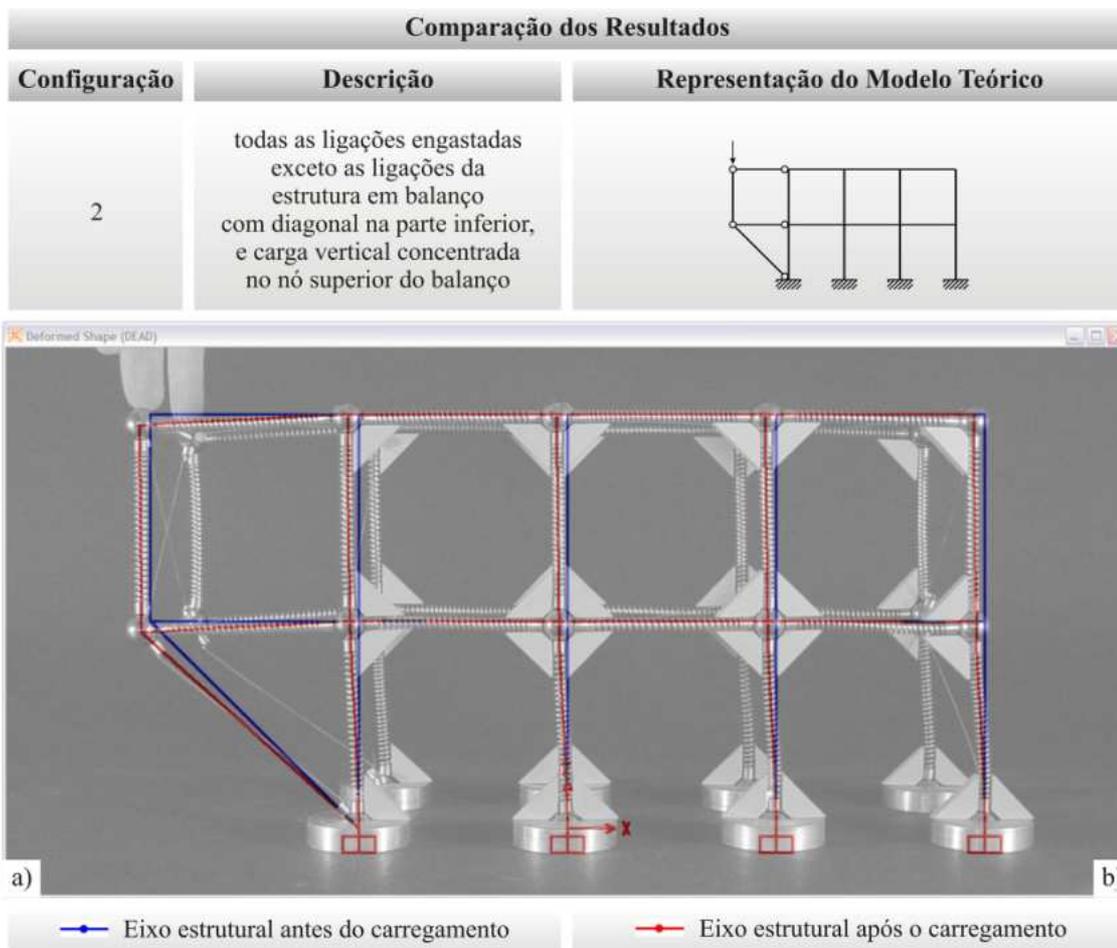


Figura 6.6 – Sobreposição das imagens: configuração 2

a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na configuração 2 apresentada na Figura 6.6, observa-se que na parte superior das colunas tem-se um deslocamento menor quando comparado com a deformada da configuração 1. Os elementos que compõem a parte da estrutura em balanço não apresentam deformações devido ao fato das ligações estarem rotuladas. Porém, nesta configuração, percebe-se um deslocamento lateral da estrutura como um todo maior do que no caso anterior (configuração 1).

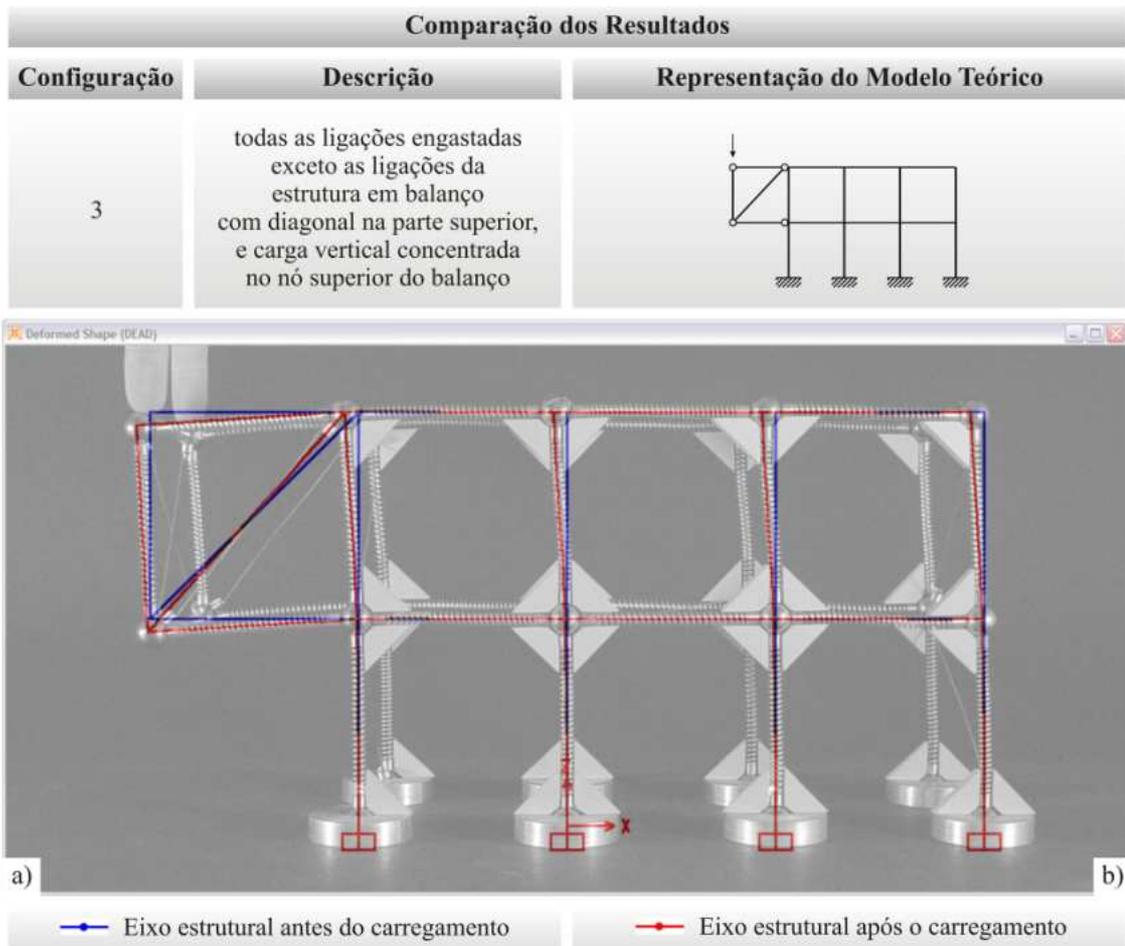


Figura 6.7 – Sobreposição das imagens: configuração 3
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na estrutura apresentada na Figura 6.7, percebe-se que com as diagonais na parte superior do balanço, funcionando como tirantes, o deslocamento horizontal da estrutura como um todo é maior que no caso anterior (configuração 2). Neste caso a deformada é similar à deformada da configuração 1, porém, com deslocamento bem menor no ponto extremo do balanço.

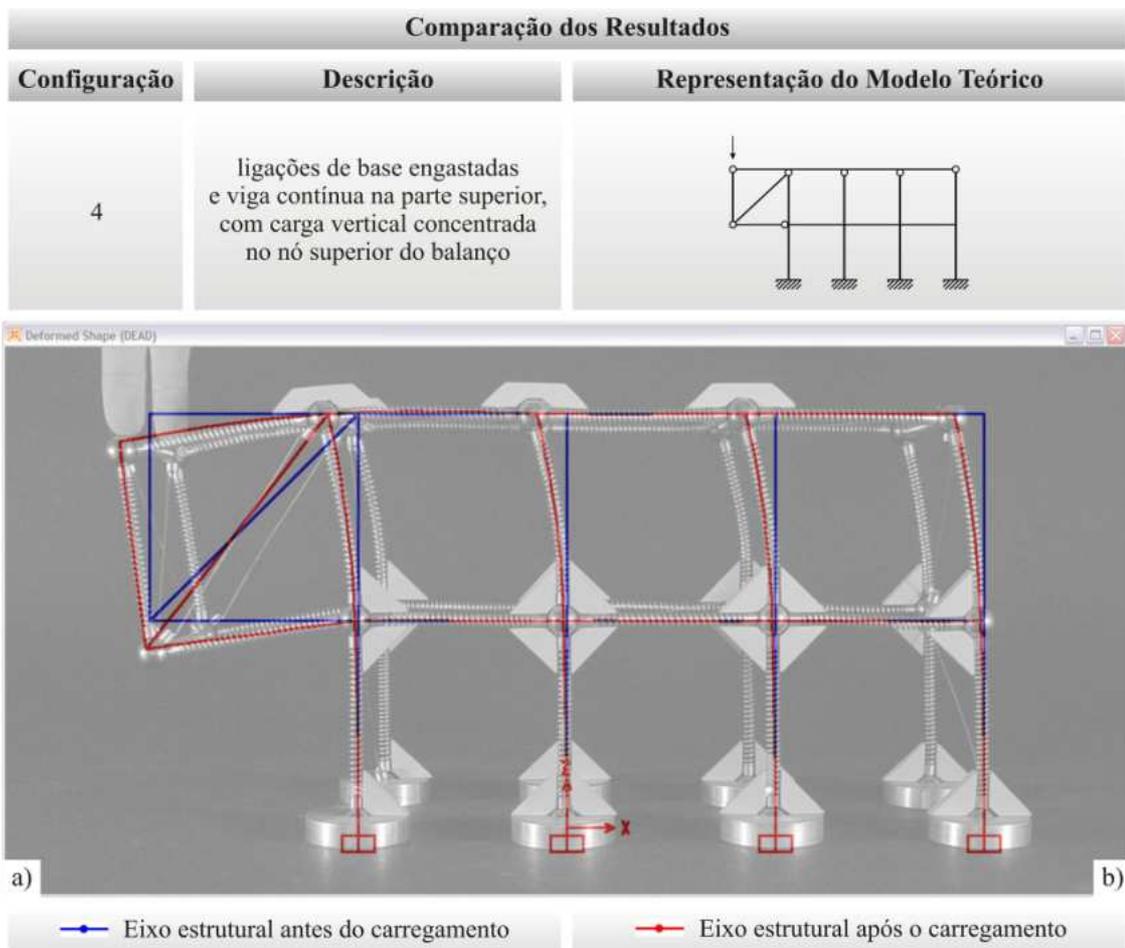


Figura 6.8 – Sobreposição das imagens: configuração 4
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na estrutura apresentada na Figura 6.8, percebe-se um deslocamento bem maior na extremidade superior das colunas, quando comparado com as configurações 1, 2 e 3. Isto ocorre devido à viga superior estar rotulada à coluna nesta configuração e consequentemente o deslocamento da extremidade do balanço também é elevado.

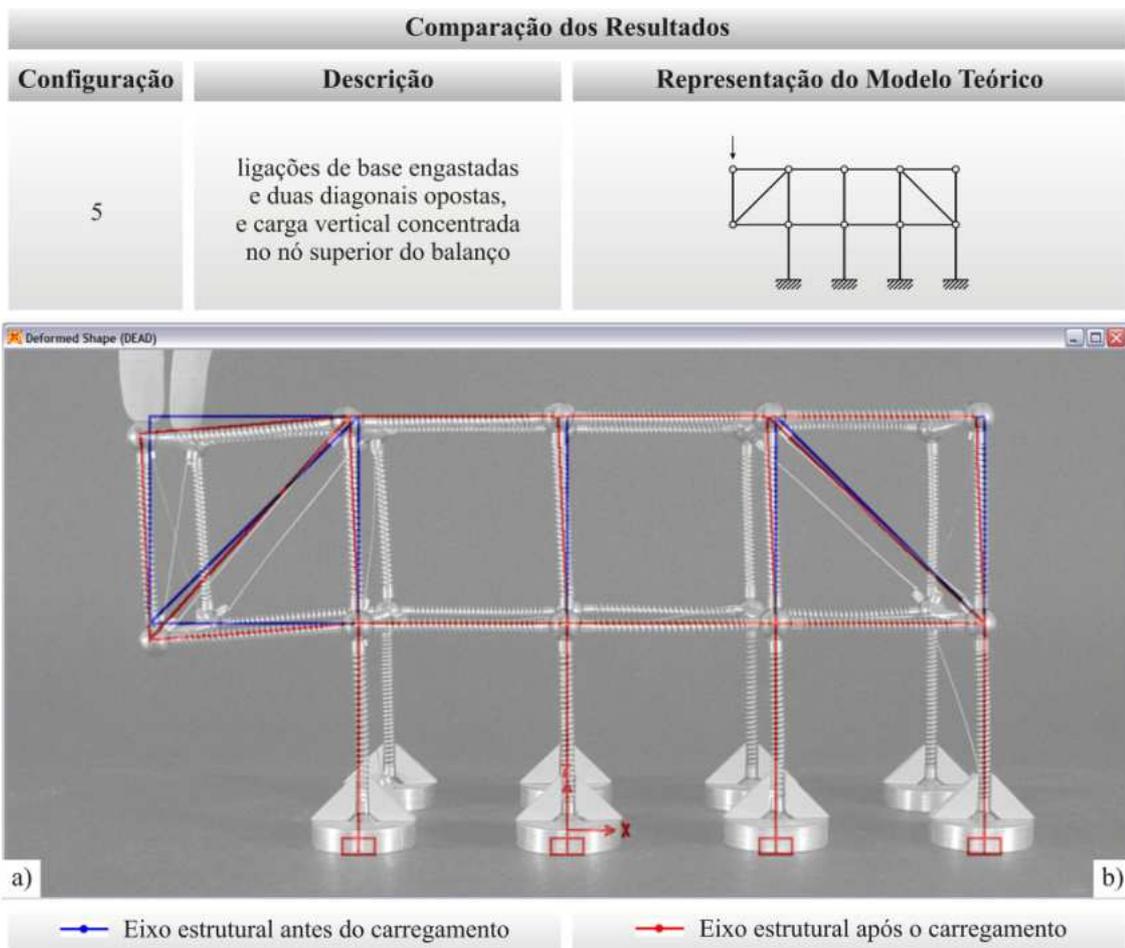


Figura 6.9 – Sobreposição das imagens: configuração 5

a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na estrutura apresentada na Figura 6.9, percebe-se que o acréscimo de outra diagonal na extremidade oposta ao balanço resulta em pouco deslocamento lateral da estrutura. Esta configuração, mesmo com um número reduzido de ligações engastadas, quando comparada com as já apresentadas, percebe-se a existência de pouca deformação a flexão dos elementos estruturais.

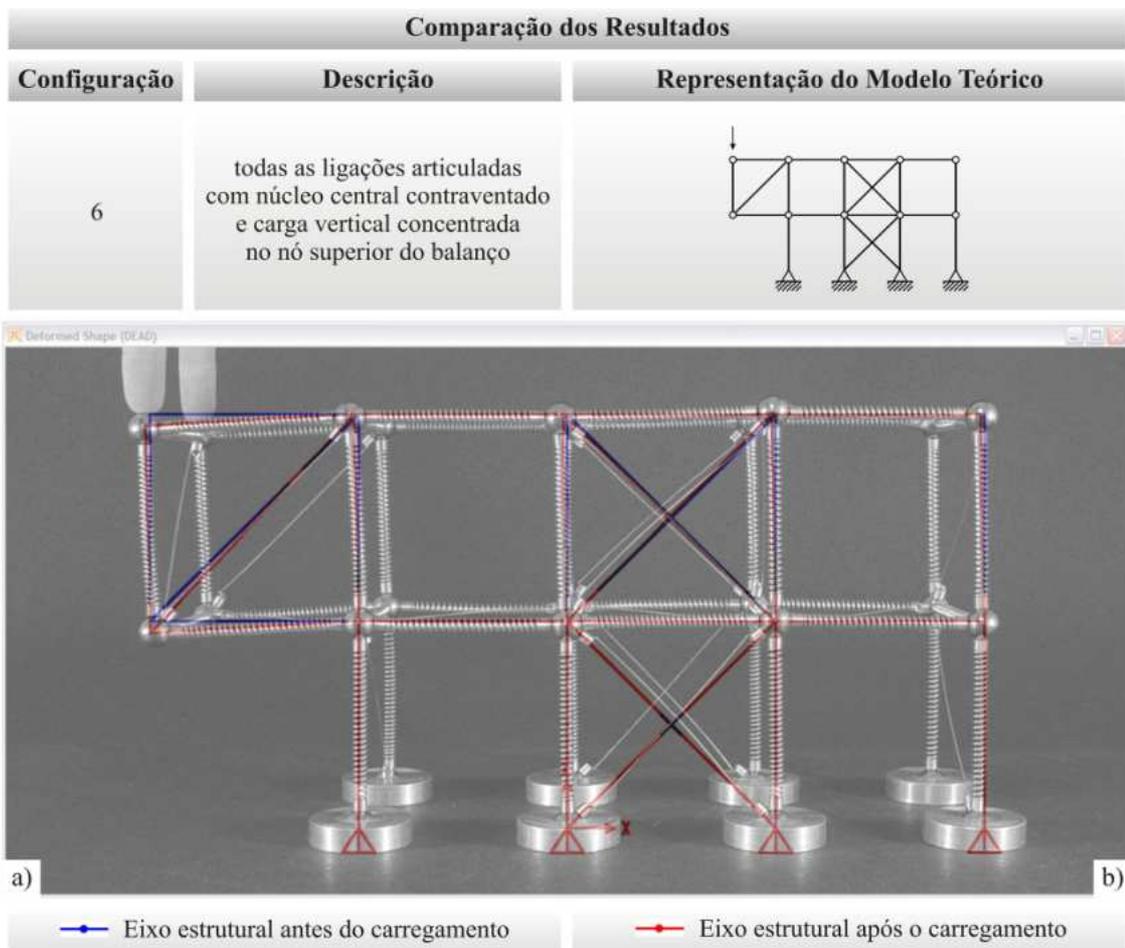


Figura 6.10 – Sobreposição das imagens: configuração 6
a) Imagem do modelo deformado, b) Deformada gerada pelo software impressa em transparência

Na estrutura mostrada na Figura 6.10, percebe-se que o acréscimo de um núcleo central contraventado fornece bastante rigidez a estrutura que mesmo com todas as ligações rotuladas apresenta pouco deslocamento. A ausência de ligações rígidas faz com que ocorram poucas deformações a flexão dos elementos e somente deformações axiais.

Após a análise das seis configurações para a mesma estrutura, percebe-se a forte influência das ligações no comportamento da mesma. O travamento do balanço diminui o deslocamento vertical do mesmo, mas não é suficiente para conter o deslocamento de toda a edificação. O uso de engastes conduz a deformações nos elementos (vigas e colunas) o que não ocorre quando o travamento é utilizado. Assim, a configuração 6 é a que apresenta melhor resultado quanto à deslocabilidade da edificação, pois possui travamento no balanço e núcleo central contraventado.

6.3 | Estudo 2 - Influência do arranjo na estabilidade de sistemas

A disposição dos elementos de uma estrutura, em geral, é responsável pela distribuição dos esforços externos entre os mesmos, de forma a manter a estrutura em equilíbrio. A Figura 6.11 ilustra a redistribuição de forças externas entre os elementos que compõem uma treliça plana por meio da disposição adequada de barras.

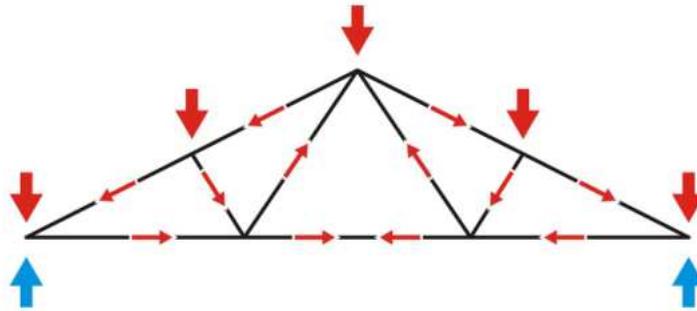


Figura 6.11 – Redistribuição de forças em uma treliça plana

Para demonstrar a influência do arranjo de barras na estabilidade de sistemas estruturais, foram analisadas estruturas de viga, para dois vãos livres de comprimentos diferentes, com a variação do arranjo de seus elementos.

Foram definidas comparações entre quatro arranjos de sistemas estruturais. No primeiro uma viga bi-apoiada, no segundo uma treliça plana vencendo o mesmo vão da viga (chamado de vão menor), no terceiro uma treliça plana com um vão maior que o anterior (chamado de vão maior), e o quarto uma treliça multiplanar com o mesmo vão do terceiro arranjo.

A metodologia empregada foi a comparação visual entre vista frontal, vista superior e perspectiva de cada sistema deformado. A Tabela 6.1 ilustra os sistemas após a deformação.

Tabela 6.1 - Apresentação dos resultados

	Vista Frontal	Vista Superior	Perspectiva
Vão Menor	<p>1</p>		
	<p>2</p>		
Vão Maior	<p>3</p>		
	<p>4</p>		

Observa-se, na vista frontal do arranjo 1, que a viga bi-apoiada com carregamento de apenas uma esfera metálica e um imã (elementos componentes da *Maquete Estrutural*) concentrado no meio do vão apresenta uma deformação por flexão (flecha) acentuada. A vista superior mostra que não há perda de estabilidade lateral.

Nos arranjos seguintes (arranjo 2, 3 e 4) foi considerado o peso próprio das estruturas como carregamento.

Na vista frontal do arranjo 2, percebe-se que a treliça plana apoiada nas extremidades vence o mesmo vão da viga anterior sem apresentar flecha visível. A vista superior mostra que também não há perda de estabilidade lateral.

Nas imagens do arranjo 3, observa-se que, com o aumento do vão, a treliça plana também é aumentada (em relação ao arranjo 2), perdendo estabilidade lateral conforme a vista superior.

No arranjo 4, para o mesmo vão do arranjo 3, tem-se a treliça multiplanar sem flecha visível e sem perda de estabilidade lateral.

Percebe-se com esta simulação, que os sistemas estruturais treliçados em aço apresentam como características principais estruturas esbeltas e resistentes, mas propícias a problemas de estabilidade. A disposição dos elementos compondo a forma da estrutura mostrou-se fundamental na estabilidade global da mesma. O arranjo 4 propiciou maior rigidez no plano perpendicular ao do carregamento, gerando estabilidade lateral e, ainda, a redução da flecha.

Este é apenas um exemplo da influência do arranjo dos elementos no comportamento das estruturas, esses princípios se aplicam não somente aos sistemas treliçados, mas também a qualquer outra criação de forma que torne a estrutura mais estável.

6.4 | Estudo 3 - Estabilidade global e efeitos de segunda ordem

As estruturas metálicas têm como característica leveza e esbeltez de elementos se comparada com estruturas convencionais como as em concreto armado. Devido à

esbeltez de seus elementos e a grande deslocabilidade da estrutura, a análise dos esforços e deslocamentos em uma estrutura metálica pode ser de primeira ou de segunda ordem. Na análise de primeira ordem, os esforços internos e os deslocamentos são obtidos a partir da geometria inicial não deformada da estrutura, na análise de segunda ordem, os esforços internos são influenciados pela configuração deformada da estrutura. Em uma estrutura apertada, com elementos submetidos a esforços axiais, os efeitos de segunda ordem são geralmente designados por efeitos $P-\Delta$ (efeitos globais) ou efeitos $P-\delta$ (efeitos locais ao nível do elemento). Conforme apresentado na Figura 6.12, estes efeitos ocorrem devido aos deslocamentos do pórtico que geram esforços adicionais, alterando os valores dos próprios deslocamentos (SIMÕES, 2007).

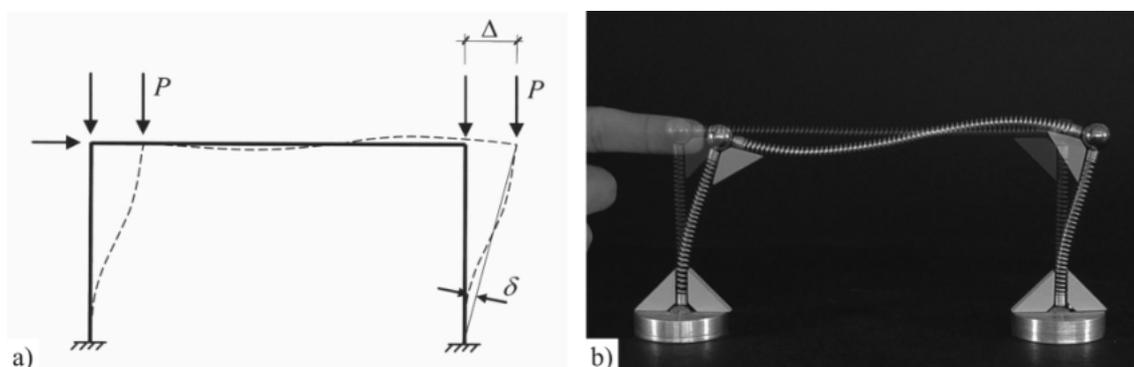


Figura 6.12 – Efeitos de segunda ordem (efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$) em estruturas metálicas
a) Representação do modelo teórico, b) Representação com a Maquete Estrutural

Na prática, as estruturas que podem ser verificadas através da análise de primeira ordem, são classificadas como “estruturas indeslocáveis”, e as estruturas que não podem ser verificadas apenas através da análise de primeira ordem, são classificadas como “estruturas deslocáveis”, logo mais sensíveis aos efeitos de segunda ordem. A rigidez aos deslocamentos laterais em uma estrutura metálica, pode ser obtida por meio da triangulação de elementos estruturais, utilização de ligações rígidas, colunas engastadas na base, etc., ou a partir de sistemas de contraventamento ou, ainda, paredes e núcleos rígidos (SIMÕES, 2007).

Com o objetivo de demonstrar a eficiência da *Maquete Estrutural* na avaliação de estruturas sujeitas aos efeitos de primeira e segunda ordem, foi montada uma edificação de três pavimentos, com três configurações diferentes e submetida a um carregamento horizontal concentrado no nó superior. Na Figura 6.13, tem-se a representação das

configurações analisadas. A primeira, com todas as ligações engastadas, a segunda, com sistema de contraventamento em “X” e a terceira, com núcleo rígido.

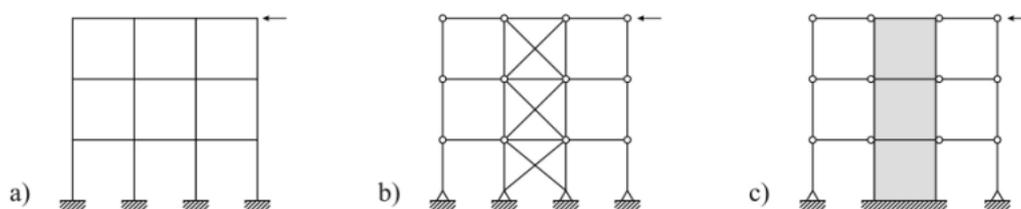


Figura 6.13 – Representação das configurações para a edificação de três pavimentos
a) Estrutura com todas as ligações engastadas, b) Estrutura com contraventamento em “X”, c) Estrutura com núcleo rígido

Nas Figuras 6.14 e 6.15 são apresentados os resultados da estrutura com todas as ligações engastadas, conforme a representação da configuração mostrada na Figura 6.13a.

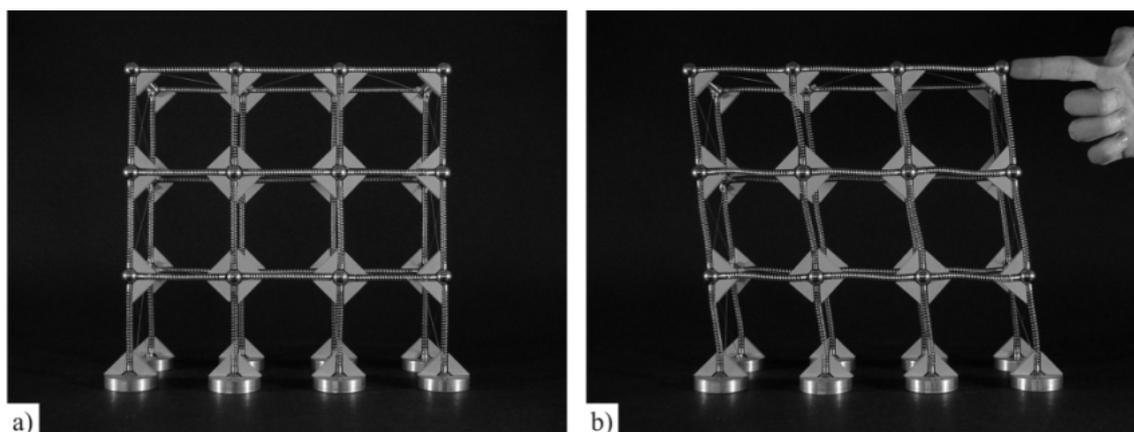


Figura 6.14 – Estrutura com todas as ligações engastadas
a) Modelo sem carregamento lateral, b) Modelo com carregamento lateral

Observa-se na Figura 6.14b, que a estrutura apresenta um deslocamento lateral elevado quando comparada com a posição inicial apresentada na Figura 6.14a, caracterizando o efeito P- Δ . Além do comportamento global da estrutura, percebe-se que os esforços internos nos elementos isoladamente são influenciados pela configuração deformada da estrutura. Observando a parte central da estrutura deformada (Figura 6.15), percebe-se o efeito P- δ e conseqüentemente a influência do efeito de segunda ordem na deformada dos elementos que compõe a estrutura.

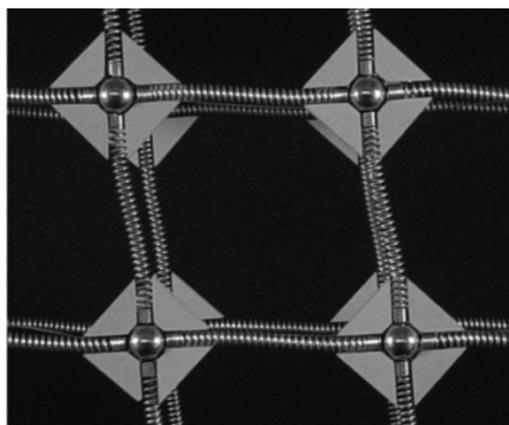


Figura 6.15 – Detalhe do pórtico central da estrutura deformada

Na Figura 6.16, é apresentado o resultado da estrutura com sistema de contraventamento em “X”, conforme a configuração mostrada na Figura 6.13b.

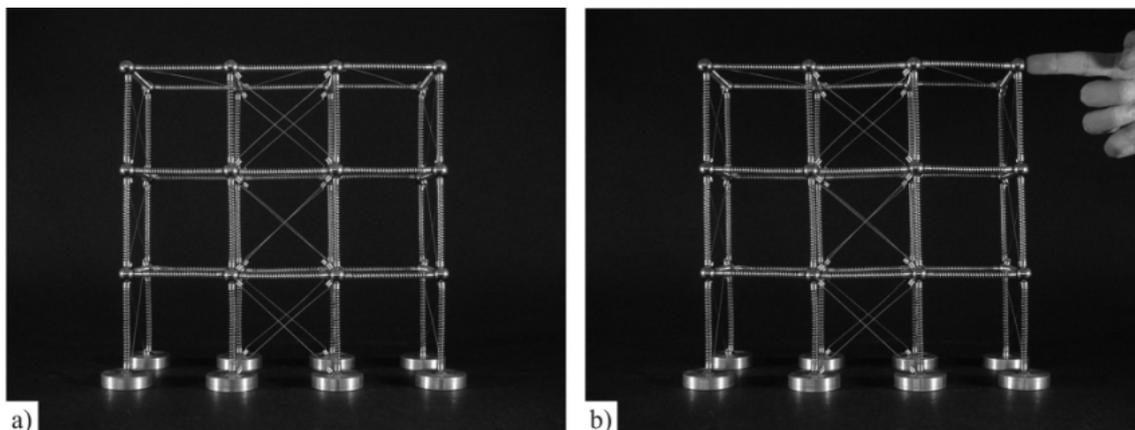


Figura 6.16 – Estrutura com sistema de contraventamento em “X”
a) Modelo sem carregamento lateral, b) Modelo com carregamento lateral

O sistema de contraventamento utilizado na estrutura da Figura 6.16b, aumenta a rigidez da estrutura, o deslocamento lateral é imperceptível quando comparado com a estrutura antes da aplicação do carregamento (Figura 6.16a). A rigidez dos elementos a deformação axial, como os contraventamentos da Figura 6.16b, é muito maior que a rigidez dos elementos a deformação por flexão, como as colunas e vigas da Figura 6.14b. Percebe-se neste caso que as forças horizontais são absorvidas pelo sistema de contraventamento, assim a estrutura é considerada indeslocável podendo ser realizada uma análise de primeira ordem.

Em estruturas metálicas a forma de contraventamento em “X” é a mais usual, por ser mais eficiente e conseqüentemente mais econômica. Mas outras formas podem ser adotadas como as apresentadas na Figura 6.17 que representam duas formas de contraventamento tipo “K”.

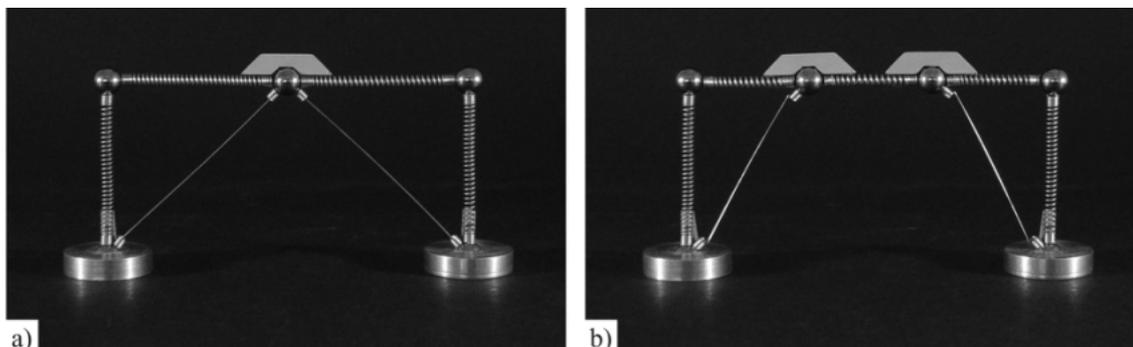


Figura 6.17 – Contraventamentos tipo “K” representados com a Maquete Estrutural

Além dos sistemas de contraventamento mostrados anteriormente, outros sistemas de estabilização lateral são utilizados em estruturas metálicas, caracterizando um núcleo rígido. Na Figura 6.18, a estrutura em questão é apresentada com conjunto de paredes funcionando como núcleo central rígido conforme a configuração da Figura 6.13c.

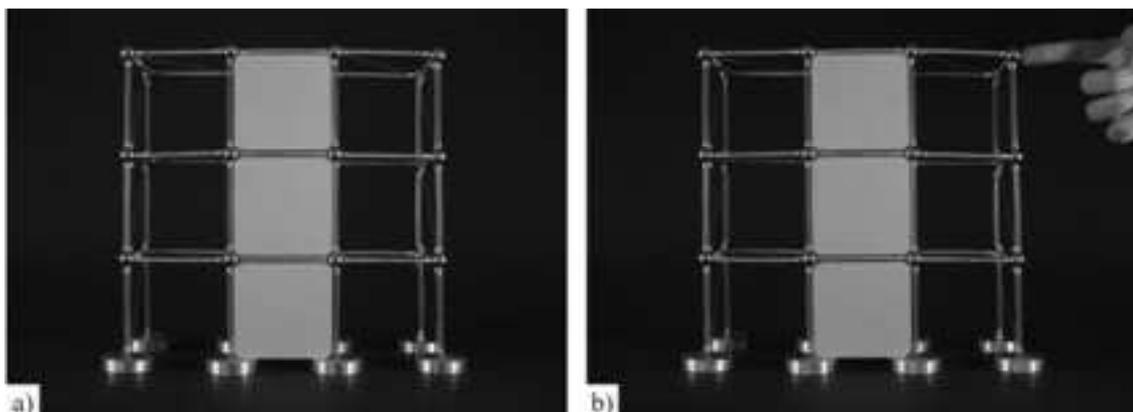


Figura 6.18 – Estrutura com núcleo central rígido
a) Modelo sem carregamento lateral, b) Modelo com carregamento lateral

Percebe-se na Figura 6.18b que o núcleo central rígido, assim como o sistema de contraventamento em “X” do caso anterior, aumenta a rigidez da estrutura. O deslocamento lateral é imperceptível, quando comparado com a estrutura antes do carregamento, caracterizando também uma estrutura indeslocável.

Segundo o *ECCS Technical Committee 8 – Stability*¹⁷ (apud SIMÕES, 2007), independente do tipo de estabilização lateral utilizado, uma estrutura só é considerada “contraventada”, que implica na dispensa da inclusão dos efeitos de segunda ordem, quando o sistema de contraventamento adotado reduzir a flexibilidade lateral em pelo menos 80%.

Após a análise das três configurações, constata-se que o modelo demonstra claramente o comportamento tanto de estruturas “deslocáveis”, mais sensíveis aos efeitos de segunda ordem (Figura 6.14), como também as estruturas “ind deslocáveis” que podem ser verificadas através da análise de primeira ordem (Figuras 6.16 e 6.18).

¹⁷ *ECCS Technical Committee 8 – Stability – Rules for Member Stability in EN 1993-1-1: Background documentation and design guidelines*, nº 6 (p.242), 1975.

Capítulo 7 | Avaliação de Edificações Existentes

7.1 | Introdução

Neste capítulo, serão apresentadas algumas simulações, realizadas com a *Maquete Estrutural*, do princípio estrutural de edificações existentes. Essas simulações têm como objetivo comprovar a versatilidade do modelo, que mesmo limitado por apenas quatro peças (molas) de dimensões diferentes, conforme mostrado no capítulo 3, pode representar, devido sua coordenação modular, uma grande variedade de sistemas estruturais respeitando suas características e proporções.

Quanto à escolha das edificações a serem simuladas, procurou-se definir as que fossem estruturadas em aço e que tivessem a estrutura como destaque, de forma que fosse possível a compreensão do sistema estrutural apenas com imagens da obra finalizada, sem que houvesse a necessidade de recorrer a informações de projeto.

Todas as comparações foram feitas a partir de fotos das edificações, em alguns casos, quando disponível e necessário, foram utilizados desenhos esquemáticos das estruturas e fotos durante a construção da obra. Toda imagem ou desenho das edificações é seguido por uma imagem da *Maquete Estrutural* representando o mesmo sistema estrutural. Seguem as edificações simuladas.

7.2 | Apresentação das edificações

- Escritório de Arquitetura

Arquitetura: Siegbert Zanettini. Colaboração: Ubirajara de Freitas. Estrutura: Ernesto Tarnoczy Jr. Fabricação e Montagem: ALUFER. Construção: 1988. Local: São Paulo – SP (DIAS, 2002a).

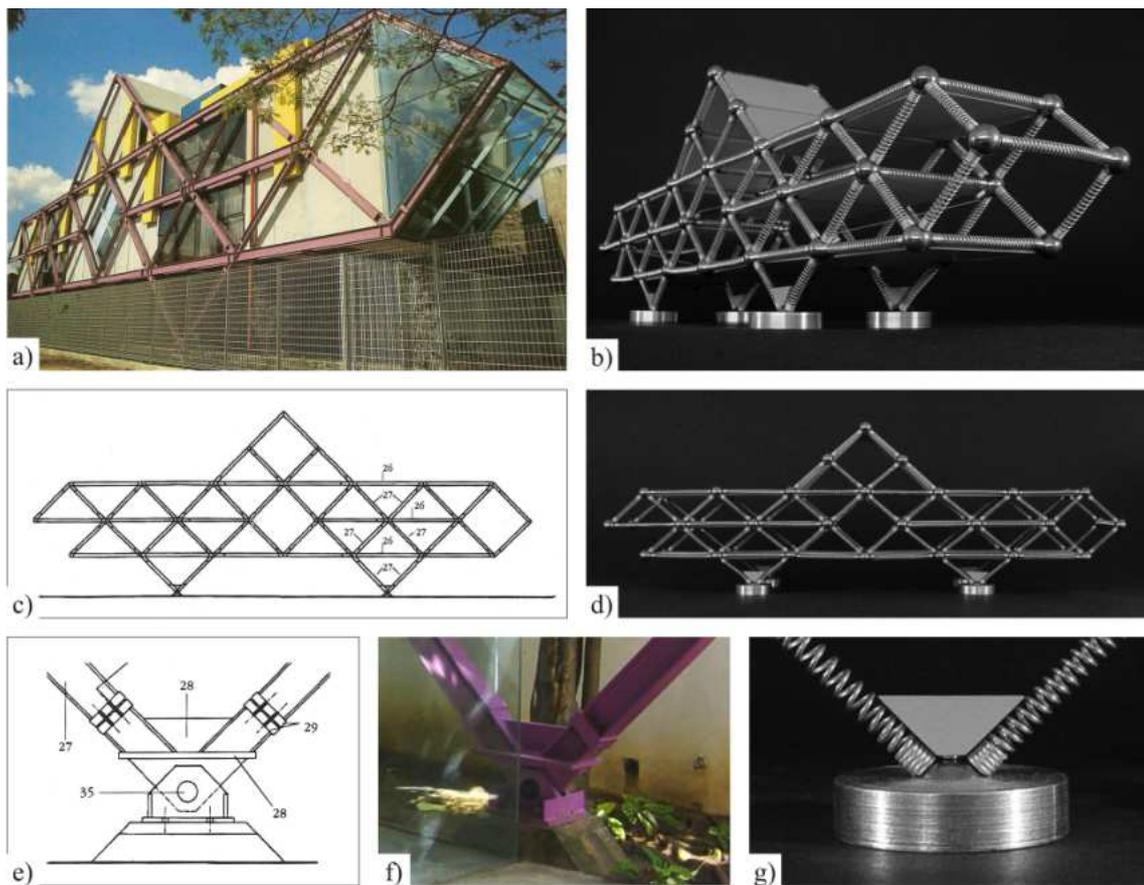


Figura 7.1 – Escritório de arquitetura representado com a Maquete Estrutural
Fonte: a), c), e) DIAS, 2002a, f) Arquivo pessoal

- Aeroporto Internacional Pinto Martins

Arquitetura: Francisco Luiz Muniz Deusdara, Francisco Expedito Muniz Deusdara e Daniela Alcântara. Estrutura: Paulo André Brasil Barroso. Fabricação e Montagem: Alusud e Cibresme. Construtora: Queiroz Galvão. Cliente: Infraero. Construção: 1998. Local: Fortaleza – CE (DIAS, 2001).

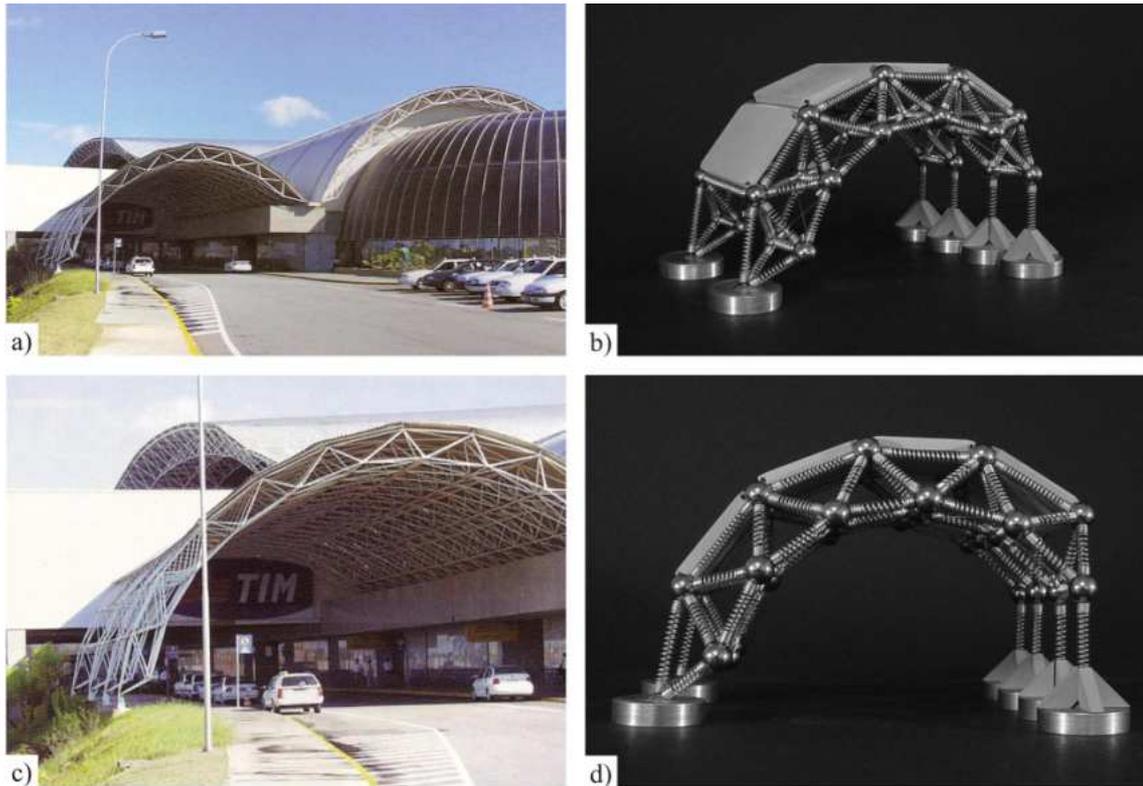


Figura 7.2 – Aeroporto Internacional Pinto Martins representado com a Maquete Estrutural
Fonte: a), c), DIAS, 2001, p.80

- Tribunal de Contas da União no Estado de Alagoas

Arquitetura: João Filgueiras Lima, Lelé. Estrutura: Roberto Vitorino. Fabricação, Montagem e Construção: CTRS. Cliente: Tribunal de Contas da União. Construção: 1997. Local: Maceió – AL (DIAS, 2001).

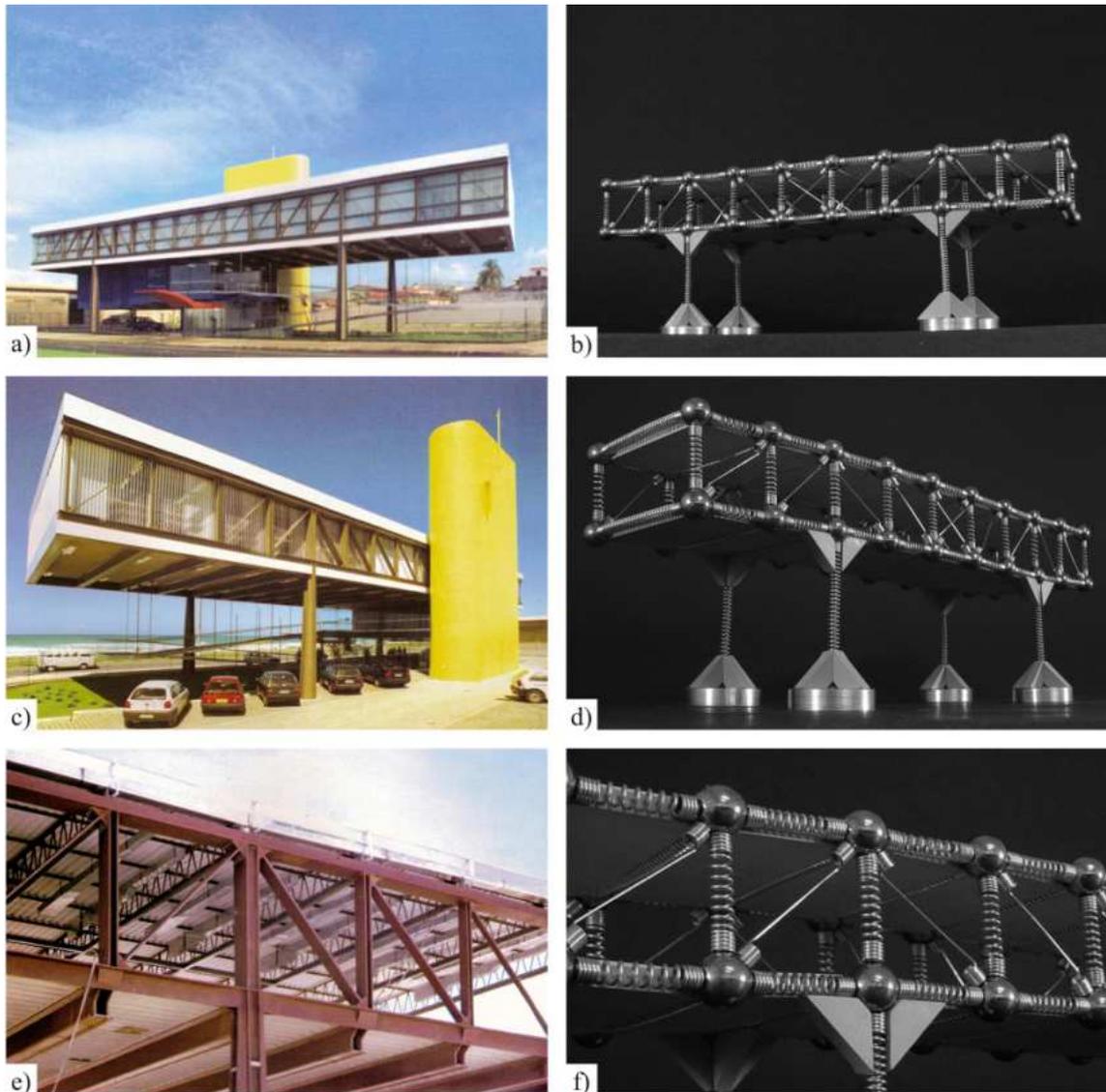


Figura 7.3 –Tribunal de Contas de Alagoas representado com a Maquete Estrutural
Fonte: a), c), e) DIAS, 2001.

- Edifício Sede da ABM

Arquitetura: Plínio Croce, Roberto Aflalo, Gian C. Gasperini. Estrutura: Figueiredo Ferraz. Fabricação e Montagem: FEM. Construtora: LM. Construção: 1984. Local: São Paulo – SP (DIAS, 2002a).

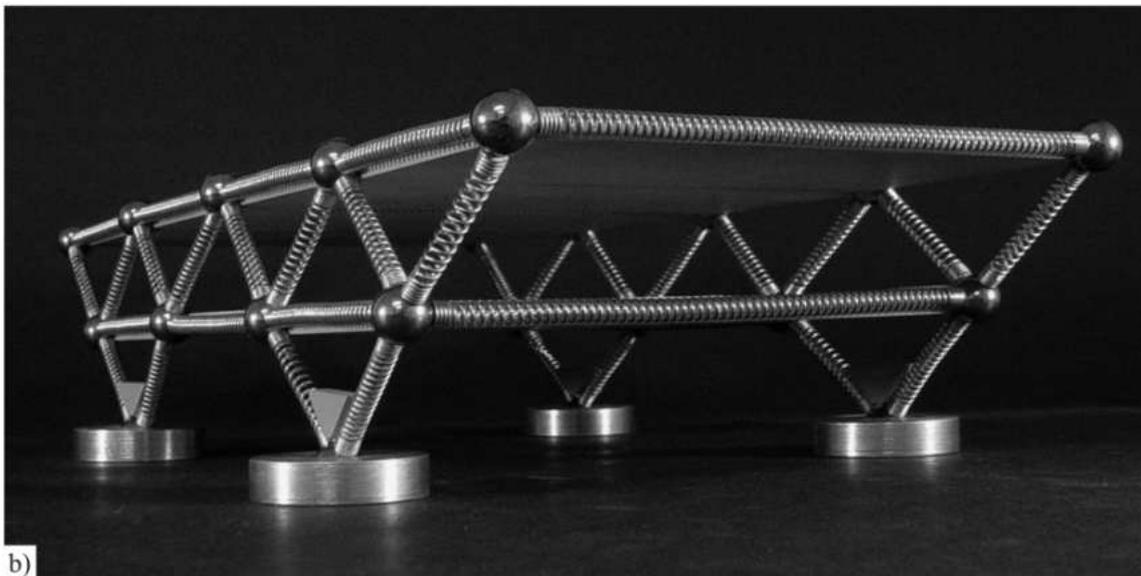


Figura 7.4 – Edifício sede da ABM representado com a Maquete Estrutural
Fonte: DIAS, 2002a.

- London Eye.

Arquitetura: Marks Barfield. Estrutura: Jane Wernick de Ove Arup, Babbie Allot & Lomax, Infra Groep. Construção: 2000. Local: Londres, Inglaterra.

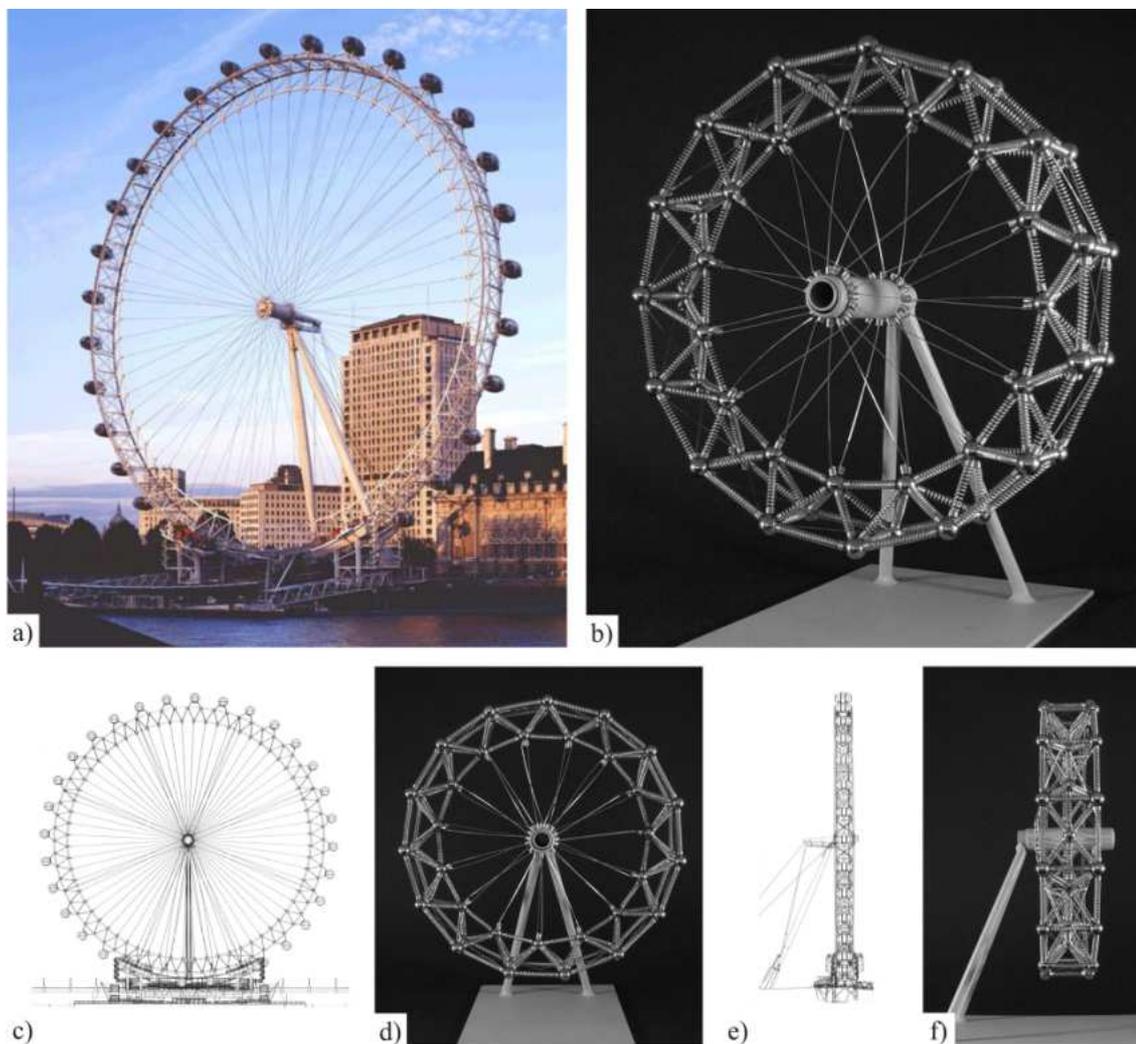


Figura 7.5 – London Eye representado com a Maquete Estrutural
Fonte: a) Disponível em: <<http://www.marksbarfield.com/project.php?projectid=10>> . Acesso em: 1 mar. 2008. c), e) LYALL, 2002.

- New Millennium Experience Dome

Arquitetura: Richard Rogers Partnership. Estrutura: Buro Happold. Construção: 1996 – 1999. Local: Londres, Inglaterra.

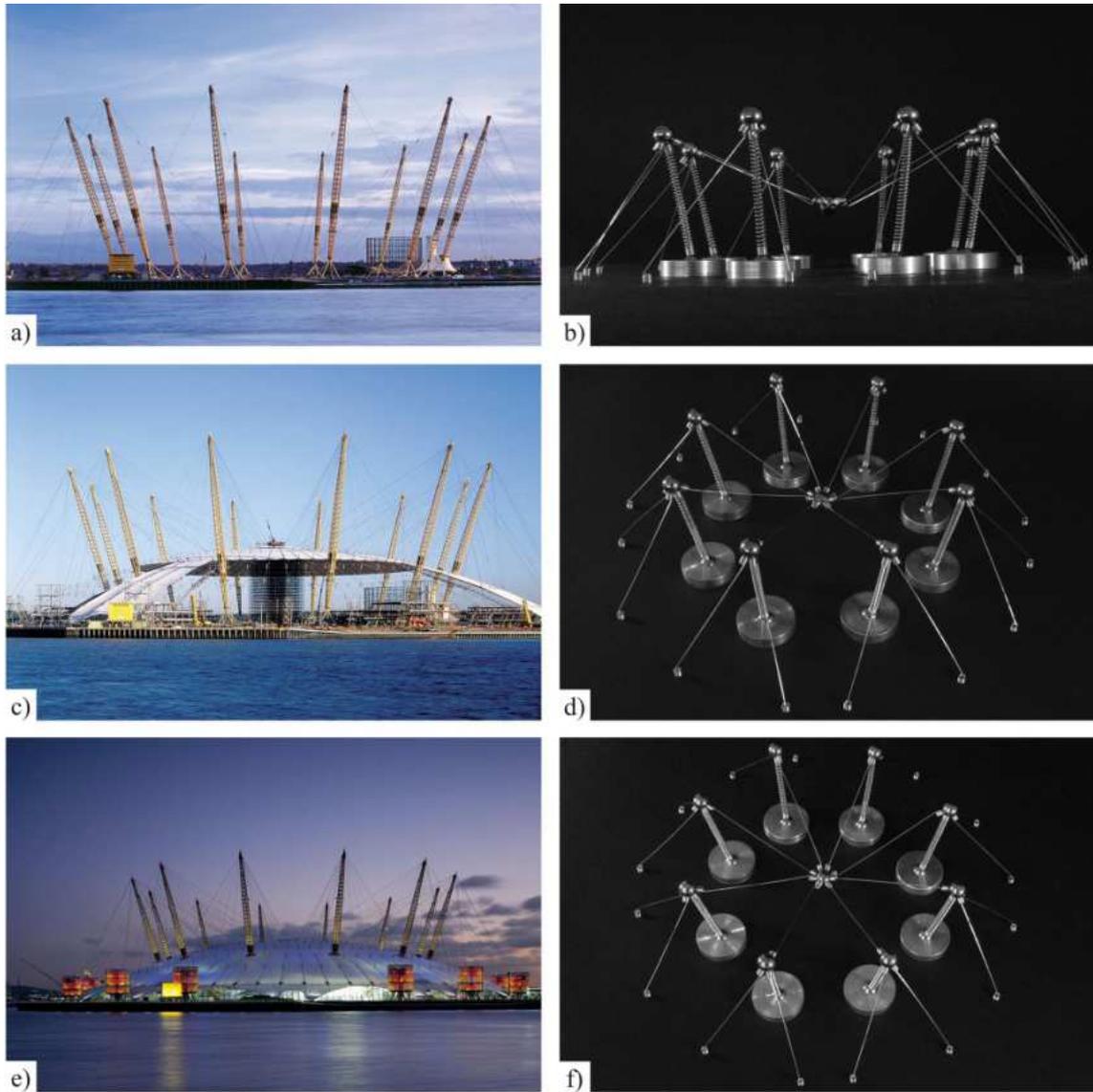


Figura 7.6 – New Millennium Experience Dome representado com a Maquete Estrutural
Fonte: a), c), e) Disponível em: <<http://www.richardrogers.co.uk>>. Acesso em: 8 mar. 2008.

- Forth Railway Bridge.

Estrutura: John Fowler, Benjamin Baker. Construção: 1883 – 1890. Local: Escócia – Reino Unido.

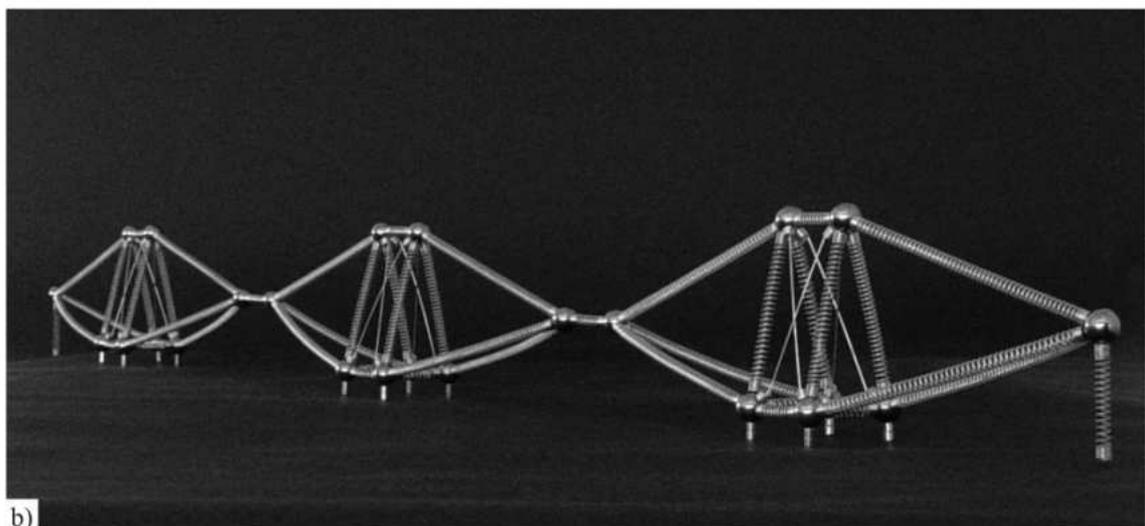


Figura 7.7 - Forth Railway Bridge representada com a Maquete Estrutural
Fonte: a) Disponível em: <<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=5582>>. Acesso em: 21 dez. 2007.

- Passarela Estaiada

Estrutura estaiada, simétrica com dois portais em Arnheim na Holanda, próxima à divisa com a Alemanha (MEYER, 1996).

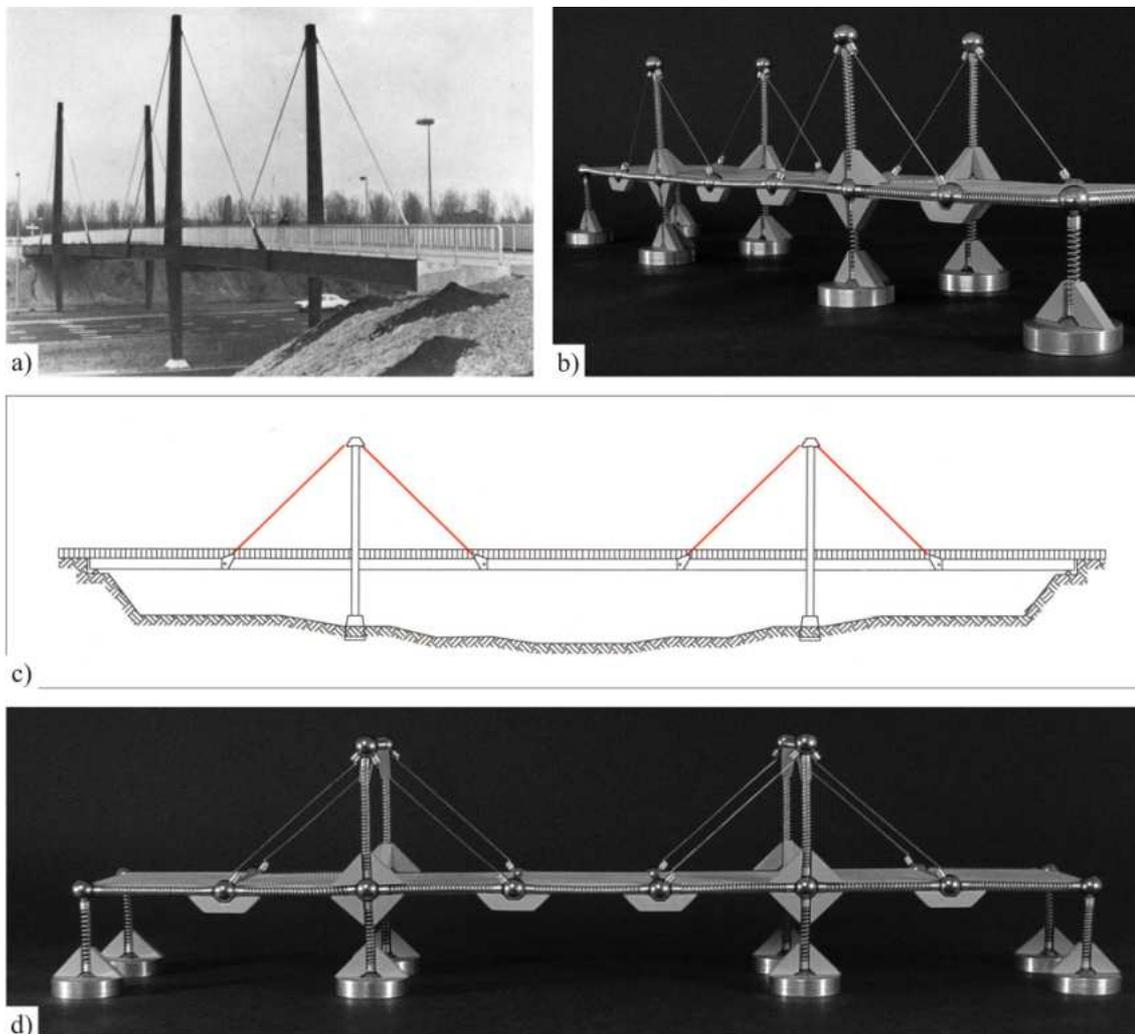


Figura 7.8 – Passarela estaiada representada com a Maquete Estrutural
Fonte: a), c) MEYER, 1996.

- Ponte Ferroviária

Ponte ferroviária treliçada sobre o canal de Erie em Nova York, Estados Unidos.

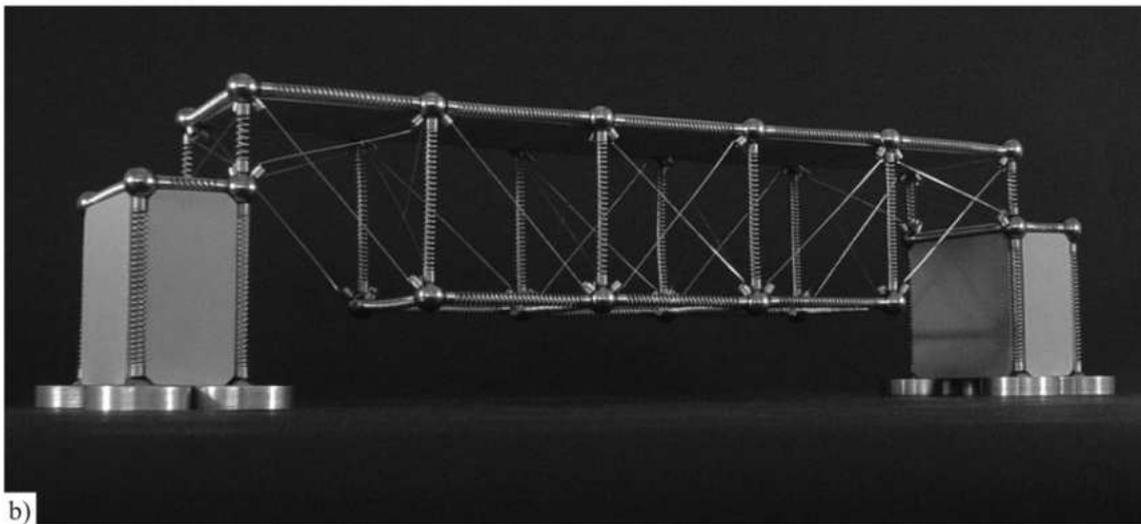
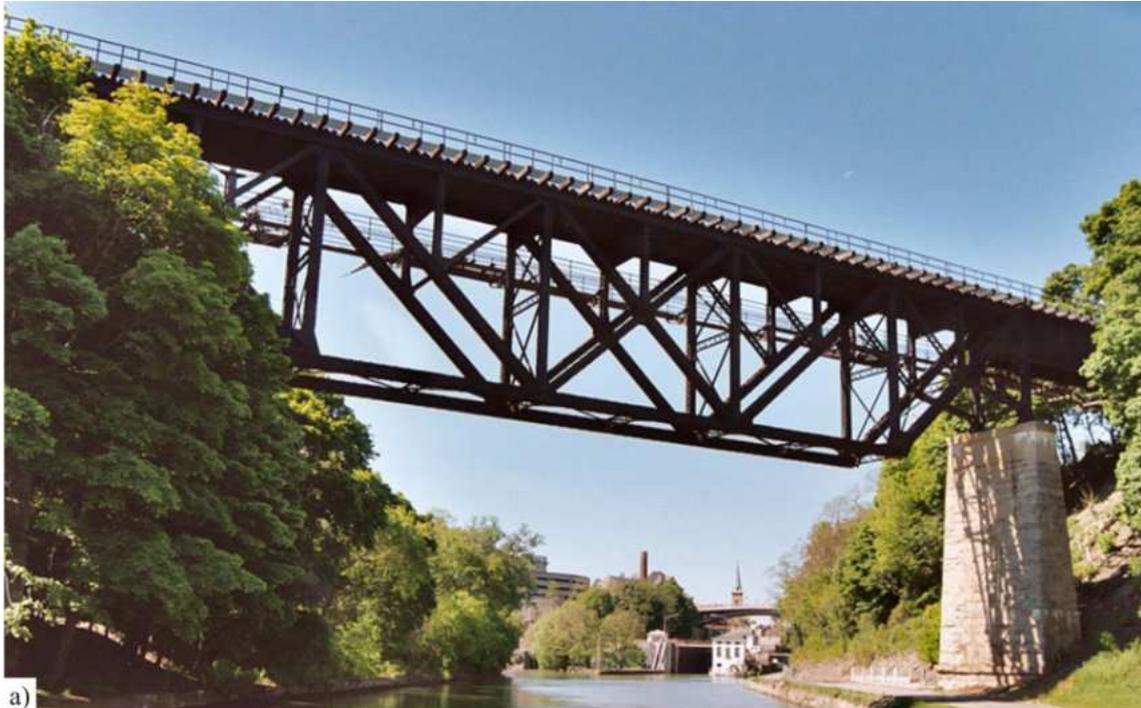


Figura 7.9 – Ponte ferroviária representada com a Maquete Estrutural
Fonte: a) Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:ErieCanalRRBridge04_1A.jpg>. Acesso em: 28 jun. 2008.

- Renault Distribution Centre

Arquitetura: Norman Foster. Construção: 1980-1982. Local: Swindon, Inglaterra.

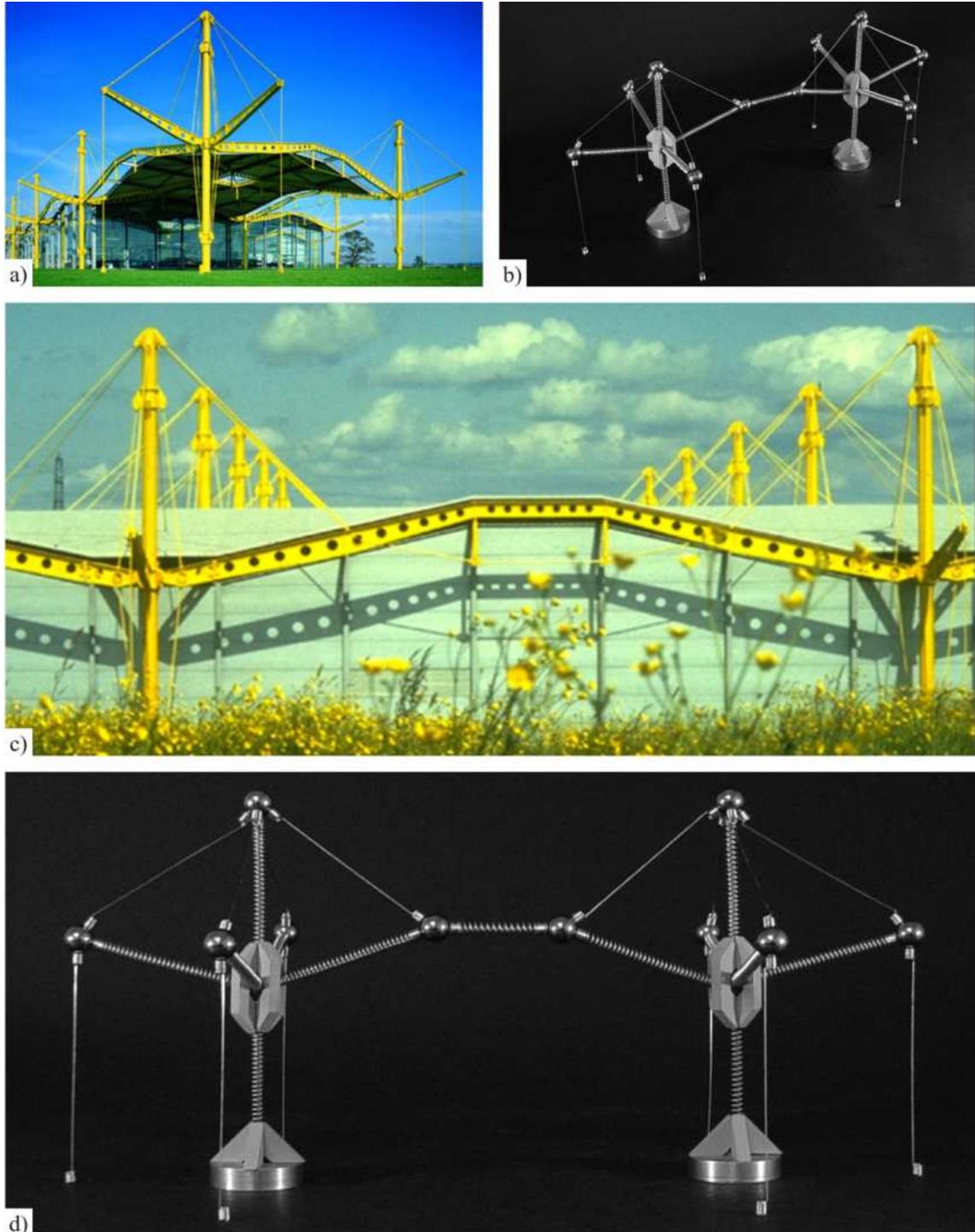


Figura 7.10 - Renault Distribution Centre representado com a Maquete Estrutural
Fonte: a), c) Disponível em: <<http://www.fosterandpartners.com/Projects/0295/Default.aspx>>. Acesso em: 16 jun. 2008

- HongKong and Shanghai Banking Corporation Headquarters

Arquitetura: Norman Foster. Construção: 1981 – 1986. Local: Hong Kong.

A estrutura desta edificação em particular não foi montada com a *Maquete Estrutural* devido a quantidade de peças necessárias. No entanto foi feita uma modelagem virtual de todas as peças para representar uma possível montagem desta estrutura. As imagens mostradas na Figura 7.11 foram geradas no *software* 3ds Max (2005).

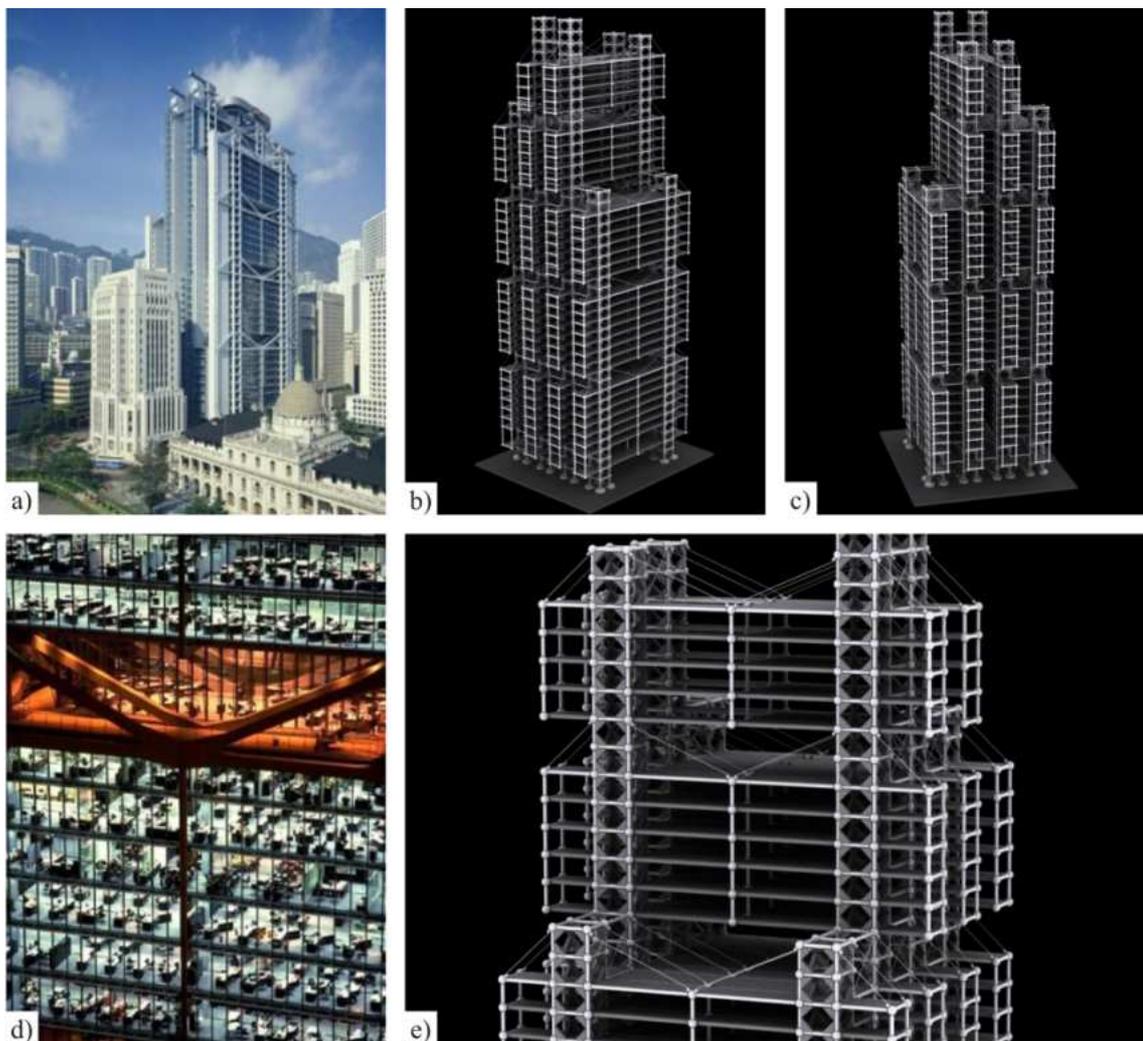


Figura 7.11 – HSBC em HongKong representado virtualmente com a Maquete Estrutural
Fonte: a), d) Disponível em: < <http://www.fosterandpartners.com/Projects/0501/Default.aspx>>. Acesso em: 2 mar. 2007.

Capítulo 8 | Considerações Finais

8.1 | Conclusões

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de um modelo estrutural qualitativo, denominado *Maquete Estrutural*, através de comparações com simulações computacionais. As simulações validaram o modelo como instrumento para a pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas.

Os resultados obtidos comprovam a eficiência do modelo para a pré-avaliação do comportamento de sistemas estruturais. O modelo mostrou-se bastante eficiente, quando comparado a outros modelos estruturais qualitativos existentes, pois permite a avaliação do comportamento de diferentes estruturas sob diversos aspectos, levando em conta conceitos de estabilidade estrutural; visualização dos deslocamentos e deformadas; comportamento quanto ao tipo de carregamento e condições de contorno; a influência da forma e do arranjo dos elementos, além do processo de montagem. O modelo possui praticidade de montagem e manuseio, e, ainda, fácil compreensão do funcionamento da conexão de seus elementos.

O manuseio da *Maquete Estrutural*, desde a montagem até a aplicação do carregamento, mostrou-se muito importante na compreensão do comportamento das estruturas analisadas, pois acrescenta a influência do tato ao entendimento do nível de rigidez das estruturas e dos elementos. Esse entendimento aproxima a grandeza dos fenômenos manifestados à percepção dos sentidos humanos, uma vez que nas estruturas reais, em geral, nossos meios de percepção são incapazes de registrar estes valores.

A metodologia da análise experimental, aplicada a esta pesquisa, se concentrou na comparação de imagens das deformadas dos sistemas estruturais ensaiados com simulações computacionais. Essa metodologia mostrou-se eficiente para este tipo de análise, onde não existe a quantificação das grandezas físicas envolvidas, mas somente a análise da configuração das deformadas das estruturas. Porém, dependendo da quantidade e da disposição dos elementos que compõem a estrutura estudada, a visualização é dificultada e conseqüentemente a aplicação da metodologia.

Em todas as estruturas analisadas, tanto planas quanto espaciais, a representação através da *Maquete Estrutural* mostrou-se eficiente e representativa. Isto foi observado tanto nos elementos estruturais quando isolados (colunas, vigas e arcos), como nos sistemas estruturais (pórticos planos e espaciais e treliças planas e espaciais). Entretanto, existem algumas limitações e detalhes que precisam ser destacados.

A deformabilidade das molas utilizadas na construção das peças do modelo mostrou-se determinante na representação do comportamento das estruturas analisadas. O elemento na forma de mola representa, também, a região de esforços comprimidos e tracionados de um elemento estrutural real.

As peças de ligação representam bem a transmissão dos esforços e deslocamentos em uma estrutura real. No entanto, a peça Ligação Rígida foi o elemento que mostrou maior interferência na configuração da deformada das estruturas. Essa interferência é maior quanto maior for o carregamento, e quanto menor for o elemento engastado, visto a região travada pela peça de Ligação Rígida. Esta influência é mais significativa nos apoios, quando a peça em questão conecta-se a peça Ligação de Base.

Estas imprecisões oriundas das peças de Ligação Rígida são mínimas e não interferem nos resultados de uma análise qualitativa, a qual o modelo se propõe. Além disso, essas peças se mostraram, ao longo dos ensaios, muito práticas em sua utilização. Portanto, neste caso, mais vale a praticidade de utilização da peça do que uma precisão maior da configuração da deformada.

A esfera metálica mostrou-se eficiente como elemento de ligação, entretanto seu peso é elevado quando comparado ao peso de outros elementos da *Maquete Estrutural*. Dependendo da estrutura modelada e da quantidade de esferas utilizadas, o uso desta pode ser um fator limitador de criação, visto o aumento do peso próprio da estrutura.

As placas de MDF se mostraram eficientes quando utilizadas como elemento rígido para o travamento de quadros estruturais, tanto em planos horizontais (lajes), como também nos planos verticais (paredes). No entanto, a simulação da transmissão das cargas em uma estrutura, das lajes para as vigas, não pode ser observada, pois as placas de MDF são conectadas diretamente às esferas metálicas.

Pôde-se perceber durante os ensaios com a *Maquete Estrutural* que os sistemas estruturais apresentam um comportamento similar quando comparados aos deslocamentos e deformadas. Contudo, a resistência dos sistemas estruturais montados não foi quantificada, pois está diretamente ligada à força magnética dos imãs que fazem as ligações entre os elementos estruturais. Portanto, em geral, o modo de colapso da *Maquete Estrutural* não corresponde à situação real, o que inviabiliza este tipo de análise.

A padronização, referente à dimensão das peças, criada na construção da *Maquete Estrutural* mostrou-se eficiente, visto a variedade de sistemas estruturais montados respeitando as dimensões e proporções reais desses sistemas em estruturas metálicas.

Para a utilização da *Maquete Estrutural* é necessário que o usuário tenha prática com o modelo. Dependendo da complexidade da estrutura, leva-se tempo para a montagem, logo é preciso que haja um planejamento para a utilização do modelo. Em relação às dimensões do modelo, é importante destacar que o mesmo deve ser utilizado por apenas uma pessoa ou por pequenos grupos, uma vez que sua escala não é adequada para demonstrações. Até mesmo porque, como mencionado anteriormente, o manuseio da *Maquete Estrutural* é fundamental para o entendimento das estruturas modeladas.

Esta pesquisa comprova a aplicabilidade, confiabilidade, versatilidade e praticidade da *Maquete Estrutural* usada para simular o comportamento de sistemas estruturais aplicados a estruturas metálicas. O modelo mostra, clara e qualitativamente, que a análise global do comportamento de sistema construtivo em aço depende fundamentalmente das suas características de deformabilidade, rigidez, estabilidade global, estabilidade dos seus elementos e do comportamento das ligações. Assim, determinar rigorosamente a capacidade resistente de seus elementos não é suficiente se os esforços, os deslocamentos e a influência destes não forem adequadamente avaliados. A análise de uma estrutura metálica deve considerar todos estes aspectos.

8.2 | Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se destacar:

- Desenvolvimento de outros componentes para a *Maquete Estrutural*, como por exemplo, peças de ligação rígida e contínua ajustáveis a várias inclinações;
- O aperfeiçoamento dos componentes existentes, através de pesquisas de materiais mais adequados para execução dos mesmos, de forma a tornar a *Maquete Estrutural* mais leve;
- Desenvolvimento de um *software* para auxiliar na quantificação das peças e na montagem de estruturas que utilizem um número elevado de elementos com a *Maquete Estrutural*, fornecendo lista de peças, planta, vistas, cortes e perspectivas da estrutura modelada;
- A partir da *Maquete Estrutural*, avaliar a sua possibilidade, e as modificações necessárias para ter-se um modelo reduzido.
- Estudo e desenvolvimento de outros modelos estruturais qualitativos abrangendo outras características das estruturas, como por exemplo, a análise de problemas localizados e a influência da forma da seção transversal dos elementos no comportamento das estruturas, muito comum em estruturas metálicas.

Referências Bibliográficas

3DS MAX. Autodesk, Inc. Release 8.0, 2005.

ADOBE PHOTOSHOP CS. Adobe Systems, Inc. Version 8.0, 2003.

ARRUDA, José R. de F. *Introdução histórica à mecânica dos sólidos*. Notas de aula do curso de História da Mecânica ministrado na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas FEM-UNICAMP. Campinas, 2001.

BROHN, David. *Understanding structural analysis*. 3rd ed. London: New Paradigm Solutions, 2005.

BUSSEL, Abby. Super Mario. *Progressive Architecture*, 1995. Disponível em: <http://www.salvadori.org/library/documents/1995_super_mario.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2008.

CALATRAVA, Santiago. *Santiago Calatrava conversa com estudantes*. Conferências do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Tradução de Lya Luft. Barcelona: Gustavo Gili, 2003.

CARNEIRO, Fernando Lobo. *Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996.

CARTER, Brian. Peter Rice: Building to a Human Scale. *The Journal of the International Institute*. Michigan, vol. 2, n. 3, Spring 1995. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2027/spo.4750978.0002.309>>. Acesso em: 27 abr. 2007.

CHAMBERLAIN, Z. M. P.; BORDIGNON, R. Modelos intuitivos para ensino de estabilidade das estruturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 18., 2000, Ouro Preto, Minas Gerais. *Anais...* 1 CD. Disponível em: <<http://www.lese.upf.br>>. Acesso em: 28 fev. 2007.

CHAMBERLAIN, Z. M. P.; ORLANDO, D. Modelos Qualitativos de Treliças Planas: Construção e Aplicação no Ensino da Análise e Comportamento Estrutural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA (COBENGE), 19., 2001, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. *Anais...* 1 CD. Disponível em: <<http://www.lese.upf.br>>. Acesso em: 14 mai. 2007.

CHELLA, Márcia R.; OTA, José J.; POVH, Paulo H. Simulação física do transporte de sedimentos e assoreamento em reservatórios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 15., 2003, Curitiba – Paraná. *Anais...* Disponível em: <http://www.lactec.org.br/OInstituto/downloads/Biblioteca/2003/066_2003.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2008.

DIAS, Luís Andrade de M. *Aço e arquitetura: estudo de edificações no Brasil*. São Paulo: Zigurate, 2001.

_____. *Edificações de aço no Brasil*. 3. ed. São Paulo: Zigurate, 2002 a.

_____. *Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem*. 4. ed. São Paulo: Zigurate, 2002 b.

ENGEL, Heino. *Sistemas estruturais*. Ed. castelhana/portuguesa. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.

FRANCO, Mário. O papel da história no ensino da teoria das estruturas. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974a, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

_____. Notas para um curso de estruturas em faculdades de arquitetura. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974b, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

_____. *Arquitetura e estrutura: experiências e perspectivas*. 1995. Palestra. Disponível em: <<http://www.idea.org.br/programas/06.doc>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

FRIEDRICH, Gerhard; PREISS, Gerhard. Ciência do aprendizado. *Revista mente e cérebro*, São Paulo, 2007. Parte integrante da edição especial como o cérebro aprende, n. 8, p. 6-13. Tradução de Sérgio Tellaroli.

FIRMO, Célio da Silveira. *Estruturas tubulares enrijecidas por superfícies de dupla curvatura (hiperbólicas)*. 2003. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

GALILEI, Galileu. *Discorsi e dimostrazione matematiche intorno a due nuove scienze*. 1638. E-text, 1 ed. eletrônica, 1998. Disponível em: <<http://www.e-text.it/>>. Acesso em: 27 mar. 2007

HARRIS, Harry G.; SABINS, Gajanan M. *Structural modeling and experimental techniques*. 2nd ed. Florida: CRC Press LLC, 1999.

HEWITT, Paul G. *Conceptual physics*. 8th ed. USA: Addison Wesley, 1997.

HILSON, Barry. *Basic structural behaviour via models*. London: Crosby Lockwood, 1972.

HOSSDORF, Heinz. *Model analysis of structures*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1974.

JURJO, Daniel L. B. R.; MAGLUTA, Carlos; ROITMAN, Ney; GONÇALVES, Paulo B. Identificação estrutural de colunas esbeltas sujeitas ao peso próprio utilizando técnicas de processamento e imagens digitais. In: JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 32., 2006, Campinas. *Anais...* Campinas, 2006. 1 CD-ROM.

LYALL, Sutherland. *Maestros de la estructura: La ingeniería em las edificaciones innovadoras*. Espanha: Editora Blume, 2002.

MACDONALD, Angus J. *Structure & Architecture*. 2nd ed., 2001.

MAGLUTA, Carlos; GADÉA, Anderson de S. M.; ROITMAN, Ney. Identificação de danos em plataformas fixas de petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 2., 2003, Rio de Janeiro. *Anais...* Disponível em: <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/2071.pdf>>. Acesso em: 6 jun. 2008.

MARGARIDO, Aluizio Fontana. Pesquisa experimental aplicada ao ensino de estruturas nas escolas de arquitetura. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

_____. *Fundamentos de estruturas: um programa para arquitetos e engenheiros que se iniciam no estudo das estruturas*. São Paulo: Zigurate, 2001.

MENEZES, Márcia Veloso. *Estruturas Metálicas: comportamento de estruturas de aço sujeitas a solicitações*. Belo Horizonte, 2003. CD-ROM.

MEYER, Karl Fritz. *Estruturas Metálicas: passarelas e pontes para dutos*. Nova Lima: KM Engenharia Ltda., 1996.

NUNES, Eliana Ferreira. *Tensoestruturas – cabos e elementos metálicos associados a membranas*. 2008. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

OLIVEIRA, Márcio Sequeira de. Monografia do curso de especialização em arquitetura das construções metálica (CEACOM III). Universidade Federal de Ouro Preto em parceria com o Instituto Metodista Izabela Hendrix, Belo Horizonte, 2005.

_____. Maquete Estrutural: um instrumento para o ensino de estrutura em escolas de arquitetura. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA (CICOM), 3., 2006, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto, 2006. 1 CD-ROM.

OTTO, Frei; TROSTEL, R. *Tensile structures: Volume 1: Pneumatic Structures*. The M.I.T. Press, Cambridge, 1969.

_____. *Tensile structures: Volume 2: Basic concepts and survey of tensile structures*. The M.I.T. Press, Cambridge, 1969.

PINHEIRO, Paulo César da Costa. Desenvolvimento de protótipos: instrumento de motivação e ligação das disciplinas do curso de engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA (COBENGE-2000), 28., 2000, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto, ABENGE, Associação Brasileira de Ensino de Engenharia, 2000. 1 CD-ROM.

PIPPARD . A. J. S. - *The experimental study of structures*. London: Edward Arnold & Co., 1947.

POLILLO, Adolpho. [Sem título]. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

REBELLO, Yopanan C. P. *Contribuição ao ensino de estrutura nas escolas de arquitetura*. 1992. 107p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

_____. *A concepção estrutural e a arquitetura*. São Paulo: Ziguarte, 2000.

_____. *Questões sobre o processo de concepção da arquitetura e estrutura*. Parte 1. Palestra da Ycon Formação Continuada. [200-?a]. Disponível em: <http://www.construtek.com.br/w2/noticias_59.php>. Acesso em: 18 mar. 2007.

_____. *Questões sobre o processo de concepção da arquitetura e estrutura*. Parte 2. Palestra da Ycon Formação Continuada. [200-?b]. Disponível em: <http://www.construtek.com.br/w2/noticias_60.php>. Acesso em: 18 mar. 2007.

_____. [Sem título]. Entrevista concedida ao Ycon Formação Continuada. São Paulo. [200-?c]. Disponível em: <http://www.ycon.com.br/entrevista_01_master.htm>. Acesso em: 18 mar. 2007.

_____. *Projetar não é apenas realizar uma tarefa*. Artigo. [200-?d]. Disponível em: <http://www.ycon.com.br/artigo_06_master.htm>. Acesso em: 18 mar. 2007.

REBELLO, Yopanan C. P.; BOGÉA, Marta. Exercícios de estrutura. *Revista ProjetoDesign*, out. 2001. Parte integrante da edição 260. Disponível em: <<http://arcoweb.com.br/debate/debate17a.asp>>. Acesso em: 18 mar. 2007.

RODRIGUES, Paulo F. N. *Aspectos do ensino de sistemas estruturais nos cursos de formação de arquitetos: uma estrutura para a faculdade de arquitetura da UFRJ*. Arquitetura e ensino - Reflexões para uma reforma curricular. Rio de Janeiro: FAU/UFRJ, p. 156-161, 2003. Disponível em: <<http://www.fau.ufrj.br/apostilas/mse/pdf/rodrigues.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2008.

RODRIGUES, Paulo F. N.; HERMIDA, Adriana da S. Modelagem de elementos básicos de estruturas para a análise qualitativa do comportamento estrutural. *Revista de Ciência e Tecnologia*, Universidade Iguazu, v. 6, n. 1, jun. 2006. Disponível em: <http://www.fau.ufrj.br/apostilas/mse/pdf/facet_v6_n1.pdf> . Acesso em: 20 abr. 2008.

SALES, José Jairo et al. *Sistemas estruturais: teoria e exemplos*. São Carlos: SET/EESC/USP, 2005.

SALVADORI, Mario. A life in education. *The Bridge*. National Academic of Engineering, v. 27, n. 2, summer 1997. Disponível em: <<http://www.salvadori.org/library/documents/marioalifeineducation.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2008.

SANDAKER, Bjorn N.; EGGEN, Arne Petter. *The structural basis of architecture*. Translation by Steven Kirwin. New York: Watson-Guptill, 1992.

SANTOS, José Amaro dos. *Sobre a concepção, o projeto, a execução e a utilização de modelos físicos qualitativos na engenharia de estruturas*. 1983. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EPUSP, São Paulo, 1983.

SAP2000. Structural Analysis Program. Computers and Structures, Inc. Advanced 10.0.1 version, 2005.

SCHWARK, Martin Paul. *Sugestões para um curso intuitivo de teoria das estruturas*. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

SICILIANO, Paulo Cesar. Sistematização Filosófica – Processo de Aprendizagem. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

SIMÕES, Rui A. D. *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas*. 2. ed. Coimbra: CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, 2007.

SOUZA, Acir M. L.; ROCHA, Marcelo M.; NÚNES, Gustavo J. Z.; CARPEGGIANI, Elvis A.; PALUCH, Mário. Estudo em túnel de vento da resposta dinâmica do complexo viário jornalista Roberto Marinho. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 33., 2008, Santiago. *Anais...* Santiago, 2008. 1 CD-ROM.

TARRAGÓ, Salvador. Gaudí entre la estructura y la forma. *A+U Architecture & Urbanism*. Antonio Gaudí. Tokyo: A+U Publishing Ltda., n86, nov. 1977. 292p. Edição especial.

TIMOSHENKO, Stephen P. *History of strength of materials*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1953.

TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava: The Poetics of Movement*. London: Editora Thames & Hudson, 1999.

VIEIRA, Inaldo Ayres. Sugestões para o ensino de estruturas ao arquiteto. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

VITORINO, Roberto. Engenharia x Arquitetura [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <marciosequeira@hotmail.com> em 9 maio 2007.

WISE, Chris. We have more than enough engineers. We need magical conjurers. *The Guardian*. UK, 14 nov. 2007. Disponível em: <<http://www.guardian.co.uk/commentisfree/story/0,,2210591,00.html>>. Acesso em: 20 mar. 2008.

ZANETINI, Siegbert. Aspectos do ensino de estrutura para arquitetos. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

ZANETINI, Siegbert; SOPHIA, Paulo. O aço na visão dos arquitetos Paulo Sophia e Siegbert Zanettini. *Revista Construção Metálica*, São Paulo, edição 70, p. 8, 2005.

Apêndice

Tabela A1 – Lista de ensaios de estruturas planas

LISTA DE ENSAIOS - ESTRUTURAS PLANAS			
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico	
Coluna	1	coluna bi-apoiada com carga axial de compressão	
	2	coluna engastada e apoiada com carga axial de compressão	
	3	coluna bi-engastada com carga axial de compressão	
	4	coluna engastada e livre com carga axial de compressão	
Viga	5	viga bi-apoiada com carga vertical concentrada no meio do vão	
	6	viga engastada e apoiada com carga vertical concentrada no meio do vão	
	7	viga bi-engastada com carga vertical concentrada no meio do vão	
	8	viga engastada e livre com carga vertical concentrada na extremidade	
Pórtico	09	pórtico plano com as ligações de base engastadas e o restante rotuladas, submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	10	pórtico plano com as ligações de base engastadas e o restante rotuladas, submetido a carga horizontal concentrada no nó superior	

Tabela A1 – Lista de ensaios de estruturas planas (continuação)

LISTA DE ENSAIOS - ESTRUTURAS PLANAS continuação			
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico	
Pórtico	11	pórtico plano com as ligações de base rotuladas e o restante engastadas, submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	12	pórtico plano com as ligações de base rotuladas e o restante engastadas, submetido a carga horizontal concentrada no nó superior	
	13	pórtico plano com todas as ligações engastadas, submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	14	pórtico plano com todas as ligações engastadas, submetido a carga horizontal concentrada no nó superior	
	15	pórtico plano submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	16	pórtico bi-articulado invertido e dobrado submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	17	pórtico bi-articulado invertido e dobrado submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
Viga contínua	18	viga submetida a carga vertical concentrada no meio do vão	
	19	viga contínua submetida a carga vertical concentrada no meio do vão	

Tabela A1 – Lista de ensaios de estruturas planas (continuação)

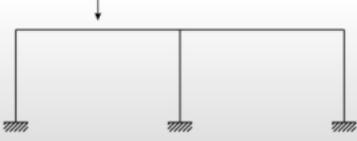
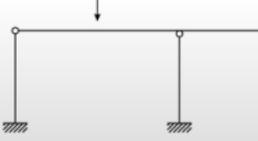
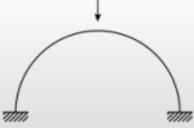
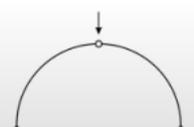
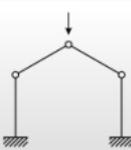
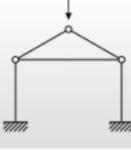
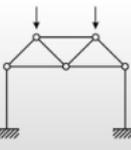
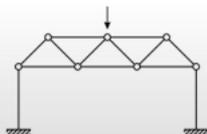
LISTA DE ENSAIOS - ESTRUTURAS PLANAS continuação			
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico	
Viga contínua	20	viga submetida a carga vertical concentrada no meio do vão	
	21	viga contínua com balanço submetida a carga vertical concentrada no meio do vão	
Arco	22	arco bi-engastado submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	23	arco engastado nas bases e articulado no meio do vão submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	24	arco bi-articulado submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	25	arco tri-articulado submetido a carga vertical concentrada no meio do vão	
	26	pórtico plano com carga vertical concentrada no nó superior	
Treliça	27	treliça plana com carga vertical concentrada no nó superior	
	28	treliça plana com carga vertical concentrada nos dois nós superiores	

Tabela A1 – Lista de ensaios de estruturas planas (continuação)

LISTA DE ENSAIOS - ESTRUTURAS PLANAS continuação		
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico
29	treliça plana com carga vertical concentrada no nó central superior	 <p>Diagrama de uma treliça plana com uma carga vertical concentrada no nó central superior. A treliça é composta por 6 nós e 10 membros. Os nós 1 e 2 estão fixados no solo. Os nós 3, 4 e 5 estão alinhados horizontalmente no topo, e os nós 6, 7 e 8 estão alinhados horizontalmente na base. Os membros conectam os nós (1,3), (2,4), (3,4), (4,5), (3,6), (4,7), (5,8), (6,7), (7,8), (6,3), (7,4), (8,5). Uma carga vertical concentrada é aplicada no nó 4.</p>

Treliça

Tabela A2 – Lista de ensaios de estruturas espaciais

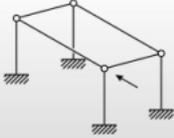
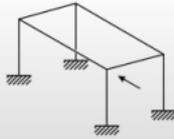
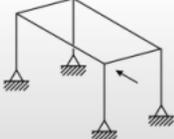
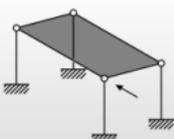
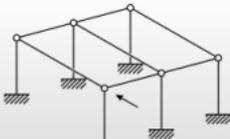
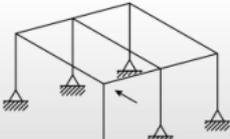
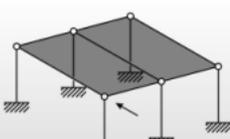
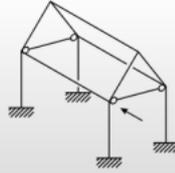
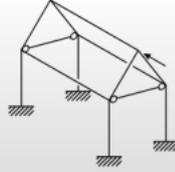
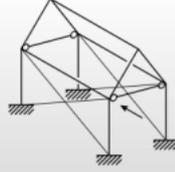
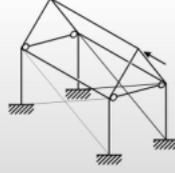
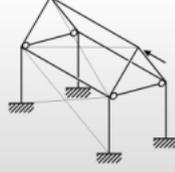
LISTA DE ENSAIOS - ESTRUTURAS ESPACIAIS			
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico	
Pórtico Espacial 1	1	pórtico espacial com as ligações de base engastadas e o restante rotuladas com carga horizontal concentrada no nó superior	
	2	pórtico espacial com todas as ligações engastadas e carga horizontal concentrada no nó superior	
	3	pórtico espacial com as ligações de base rotuladas e o restante engastadas com carga horizontal concentrada no nó superior	
	4	pórtico espacial com laje, ligações de base engastadas e o restante rotuladas com carga horizontal concentrada no nó superior	
Pórtico Espacial 2	5	pórtico espacial com as ligações de base engastadas e o restante rotuladas com carga horizontal concentrada no nó superior	
	6	pórtico espacial com todas as ligações engastadas e carga horizontal concentrada no nó superior	
	7	pórtico espacial com as ligações de base rotuladas e o restante engastadas com horizontal concentrada no nó superior	
	8	pórtico espacial com laje, ligações de base engastadas e o restante rotuladas e carga horizontal concentrada no nó superior	

Tabela A2 – Lista de ensaios de estruturas espaciais

LISTA DE ENSAIOS - ESTRUTURAS ESPACIAIS continuação			
Ensaio	Descrição	Representação do Modelo Teórico	
Pórtico Espacial 3	9	galpão sem contraventamentos com todas as ligações engastadas e carga horizontal concentrada no nó superior do plano vertical	
	10	galpão sem contraventamentos com todas as ligações engastadas e carga horizontal concentrada no nó superior da cobertura	
	11	galpão contraventado no plano vertical e carga horizontal concentrada no nó superior do plano vertical	
	12	galpão contraventado no plano vertical e carga horizontal concentrada no nó superior da cobertura	
	13	galpão contraventado no plano vertical e nos planos da cobertura com carga horizontal concentrada no nó superior da cobertura	
Treliça Espacial	14	treliça espacial apoiada em quatro colunas engastadas na base com carga concentrada horizontal em um nó superior da treliça	