



ENSINADO ESTRUTURAS NOS CURSOS DE ENGENHARIA E NO CURSO DE ARQUITETURA E URBANISMO

Maria Betânia de Oliveira – betania@fau.ufrj.br
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo,
Departamento de Estruturas
Av. Pedro Calmon, 550
Ilha do Fundão, CEP 21941-901, Rio de Janeiro, RJ

***Resumo:** Inicia-se o ensino de Engenharia de Estruturas definindo Estrutura como parte da edificação responsável por sua sustentação. O conceito de sistema é apresentado. Explica-se Estrutura, ou Sistema Estrutural, como conjunto de elementos que viabilizam a criação do espaço útil em uma construção, com segurança e durabilidade. Explicita-se a Estrutura como edificação subtraída dos elementos de função não estrutural. Define-se modelo como representação simplificada de algum fenômeno do mundo real. A modelagem dos Sistemas Estruturais é apresentada como a produção de modelos que podem ser ou físicos ou numéricos. A utilização de modelagem numérica possibilita uma análise estrutural quantitativa. Os modelos numéricos nem sempre conseguem descrever com precisão a realidade. Contudo, a utilização de modelos físicos facilita o entendimento do comportamento estrutural através da visualização dos fenômenos estruturais. Tem o objetivo de mostrar a experiência da autora em mais de dez anos no ensino de Engenharia de Estruturas. Como metodologia de pesquisa emprega experimentação em sala de aula na disciplina intitulada Modelagem dos Sistemas Estruturais oferecida para o primeiro período do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, no Rio de Janeiro, Brasil.*

***Palavras-chave:** ensino de estruturas, engenharia de estruturas, modelagem - estruturas*

1. CONCEITUAÇÃO INICIAL

Os primeiros conceitos abordados na disciplina introdutória de Estruturas, intitulada Modelagem dos Sistemas Estruturais (MSE) sob a responsabilidade da autora e oferecida para o primeiro período do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), são apresentados a seguir.

Estrutura é definida como a parte da edificação responsável por sua sustentação. Sistema como um conjunto de elementos inter-relacionados de qualquer espécie, por exemplo, conceitos, objetos ou pessoas. Então, conceitua-se Estrutura, ou Sistema Estrutural, como conjunto de elementos que viabilizam a criação do espaço útil em uma construção — com segurança e durabilidade. Cabe acrescentar que, definindo-se modelo como

representação simplificada de algum fenômeno do mundo real, a modelagem dos Sistemas Estruturais consiste da elaboração de modelos que podem ser ou físicos ou numéricos.

A utilização de modelagem numérica possibilita uma análise estrutural quantitativa, a qual é importante para as inovações tecnológicas na área de estruturas. Contudo, a utilização de modelos físicos facilita o entendimento do comportamento estrutural através da visualização dos fenômenos estruturais (SARAMAGO, 2011; SALVADORI, 1980).

Em seguida, na disciplina, faz-se uma breve apresentação das estruturas construídas pelos homens e as suas analogias com as estruturas da natureza. Depois, classificam-se os elementos estruturais de acordo com as suas dimensões geométricas: elementos de volume (blocos), elementos de superfície (lâminas) e elementos lineares (barras). Possibilitando, assim, a apresentação de noções sobre as ações que produzem esforços e deformações nas estruturas. A classificação dos elementos estruturais de acordo com os seus principais carregamentos e materiais constituintes, também, é abordada. Tem-se, assim, a definição de cabos, vigas, pilares, treliças, pórticos, grelhas, lajes, paredes, folhas, cascas, membranas e blocos.

Nessa primeira fase da disciplina, como exercício de aprendizagem solicita-se que cada aluno desenhe os tipos de elementos estruturais estudados e seus principais carregamentos.

Conceituam-se, ainda, as forças externas, que podem ser ativas e reativas, e as forças internas (esforços). Os diversos modelos de vinculações da estrutura são mostrados: apoio móvel, apoio fixo e engaste. Ressalta-se a relação do tipo de vinculação com os seus respectivos deslocamentos impedidos e, conseqüentemente, com os tipos de reações de apoio (forças reativas). Faz-se a análise qualitativa de estruturas simples, mostrando os movimentos de translação, rotação e o equilíbrio externo da estrutura. Ressalta-se o fato de que as forças não são visualizadas e que, todavia, as deformações e os deslocamentos decorrentes da atuação das forças podem ser percebidos nos modelos físicos. Para a apreensão dos conceitos de rotação, momento, translação e equilíbrio externo é proposto a análise do comportamento do modelo físico que segue, "Figura 1".

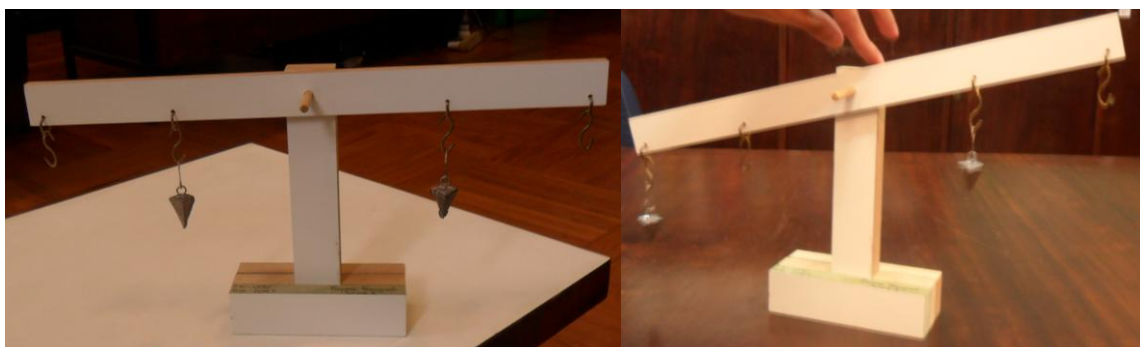


Figura 1: Modelo físico utilizado no ensino/aprendizagem dos conceitos de rotação, momento, translação e equilíbrio externo da estrutura — elaborado por alunos de MSE/FAU/UFRJ no primeiro semestre de 2014.

Define-se, ainda, centro de gravidade (CG) e solicita-se a construção de modelos físicos de placa retangular, placa triangular e disco. Os alunos determinam os centros de

gravidade destas figuras e mostram que, se um apoio estiver no centro de gravidade das placas posicionadas no plano horizontal, os modelos físicos suportam o seu peso sem sofrer giro.

Após esta abordagem inicial, os sistemas estruturais são estudados de acordo com o tipo principal de solicitação. Assim sendo, busca-se o entendimento das estruturas submetidas à tração, à compressão, à flambagem e à flexão. Inicia-se, em seguida, a segunda etapa do curso com o estudo das estruturas tracionadas: os cabos e as membranas.

2. ESTRUTURAS TRACIONADAS

A tração de uma barra é conseguida pela atuação de força normal à seção transversal, aplicada no seu centro de gravidade, na direção do eixo da barra e no sentido em que provoca o alongamento da estrutura. A força de tração simples se distribui na seção da barra, provocando tensões normais de tração uniformemente distribuídas em toda as seções transversais da estrutura.

Os sistemas estruturais tracionadas (OLIVEIRA & BARBATO, 2005), usualmente denominados tensoestruturas, podem ser divididos em duas classes. As estruturas de cabo, formadas por elementos lineares tracionados, e as estruturas de membrana, formadas por elementos de superfície tracionados. Como os cabos e as membranas resistem apenas a esforços de tração, as concepções da forma e da estrutura são naturalmente interdependentes.

2.1. Cabos

As diversas formas que o cabo adquire em função do carregamento denominam-se funiculares das forças que atuam no cabo. Os funiculares são, então, configurações de equilíbrio do cabo. Com o auxílio dos modelos físicos, em MSE, faz-se a análise do comportamento estrutural de cabos livremente suspensos, de pontes pênsil e estaiada e, também, de coberturas suspensas que podem ser compostas por sistemas estruturais com cabos livremente suspensos, com cabos-treliça e por cestas protendidas.

Durante o processo de ensino/aprendizagem das estruturas de cabo, "Figura 2", experimentações são propostas: (i) Construir um modelo de barra para verificar e descrever os fenômenos estruturais de uma barra submetida à tração; (ii) Construir modelos físicos para o estudo do funicular de cabos livremente suspensos; (iii) Construir modelo físico para a análise qualitativa do comportamento estrutural da ponte pênsil; (iv) Construir o modelo de uma cobertura pênsil com planta retangular, buscando referência no Aeroporto Internacional Washington Dulles de 1960, concebido pelo Arquiteto Eero Saarinen. Neste caso, discutir a importância do peso do sistema vedante para o equilíbrio da cobertura e explicar como os pilares inclinados influenciam na sua capacidade de suportar a cobertura.

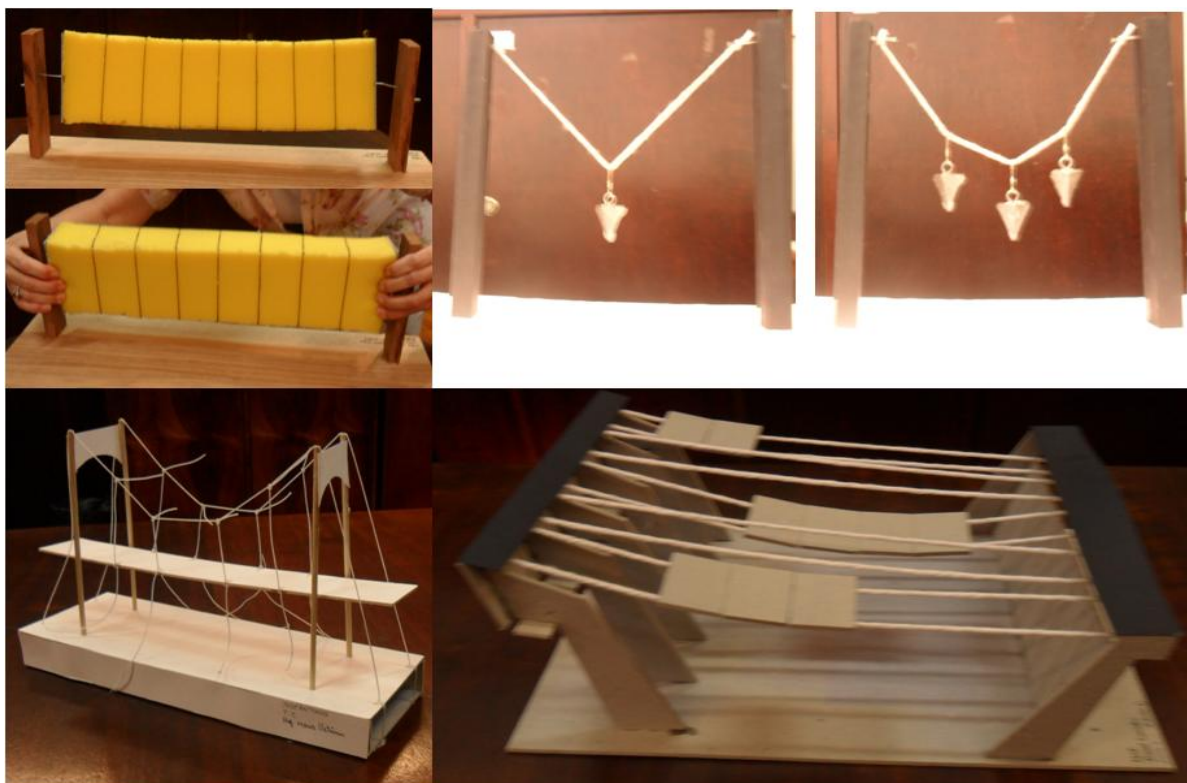


Figura 2: Exemplos de modelos físicos utilizados no ensino/aprendizagem de estruturas tracionadas — elaborados por alunos de MSE/FAU/UFRJ no primeiro semestre de 2014.

2.2. Membranas

Membranas são cascas muito delgadas e, portanto, resistem apenas à forças internas de tração. As membranas resistem às ações externas devido à sua forma, às suas características físicas e ao seu pré-tracionamento. O pré-tracionamento da membrana pode ser alcançado, ou através do seu estiramento por meio de cabos (membranas protendidas por cabos), ou através da atuação da pressão de gases (estruturas pneumáticas).

Para o entendimento do comportamento estrutural das coberturas de membrana, a análise qualitativa dos modelos físicos dos seguintes casos são propostos: (i) cobertura em membrana com dois pontos altos e dois pontos baixos, "Figura 3"; (ii) modelo de membrana esticada e ancorada em um cubo de madeira; (iii) estrutura inflada do Pavilhão da Fuji na Exposição de Osaka; (iv) membrana suportada pelo ar do Pavilhão dos Estados Unidos na Exposição de Osaka.

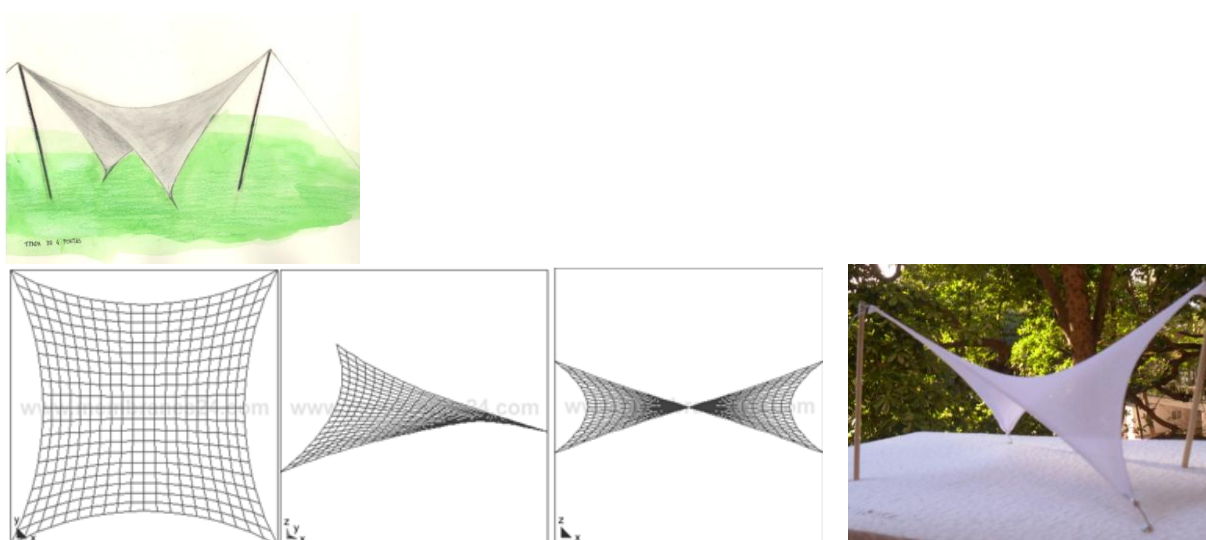


Figura 3: Desenho do partido estrutural da membrana protendida por cabos, definição das coordenadas dos quatro pontos fixos em metros ($X_1=0, Y_1=0, Z_1=0$); ($X_2=15, Y_2=0, Z_2=5$); ($X_3=15, Y_3=15, Z_3=0$); ($X_4=0, Y_4=15, Z_4=5$) e determinação da configuração inicial de equilíbrio da membrana (CRESPO & OLIVEIRA, 2013) e, ainda, construção do modelo físico da cobertura por aluna de MSE/FAU/UFRJ no primeiro semestre de 2014.

3. OUTROS SISTEMAS ESTRUTURAIS ABORDADOS NA DISCIPLINA

De forma similar aos sistemas estruturais tracionados, procura-se o entendimento do comportamento dos arcos, treliças, pilares, vigas, placas e cascas. A seguir apresentam-se alguns dos exercícios de modelagem física propostos em MSE no primeiro semestre de 2014.

3.1. Exercícios de modelagem de arcos

Construir modelo físico e descrever os fenômenos estruturais pertinentes aos casos que seguem: (i) Arcos da Lapa no Rio de Janeiro; (ii) arco da Praça da Apoteose no Rio de Janeiro. Além disso, explicar as seguintes afirmações através da análise de modelos físicos: (iii) afirmação de que o fecho ou chave é o último elemento a ser colocado em um arco e, por fim, (iv) afirmação de Leonardo da Vinci: “O arco não é outra coisa senão uma fortaleza resultante de duas fraquezas”.

3.2. Exercícios de modelagem de treliças

Explicar o comportamento estrutural dos modelos físicos das seguintes estruturas: (i) treliça composta por três triângulos; (ii) treliça do Teatro Olímpico em Vicenza, de Palladio; (iii) treliça do Mercado de Santarém, Portugal; (iv) treliça do Pavilhão de Exposições do Rio Centro.

3.3. Exercícios de modelagem de vigas

Explicar o comportamento estrutural dos modelos físicos das seguintes vigas: (i) viga simplesmente apoiada, "Figura 4"; (ii) viga em balanço e viga contínua; (iii) viga Vierendeel e, ainda, (iv) viga com alma vazada. Acrescenta-se que deve ser realizada a análise qualitativa das deformações verificadas nos modelos e, por consequência, a análise das tensões atuantes nas vigas em função dos tipos de apoios, dos materiais empregados, das forças aplicadas, da área e forma da seção transversal, do momento de inércia das seções e dos vãos livres da estrutura.

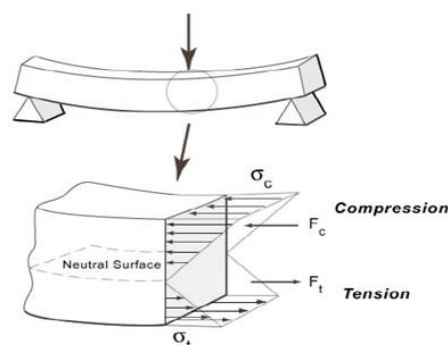
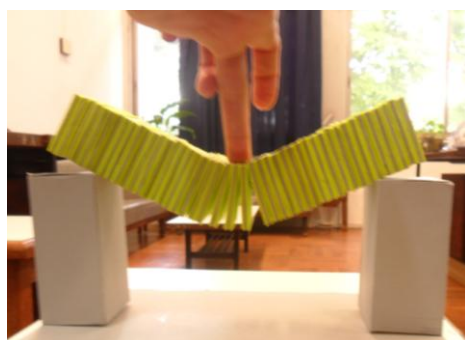


Figura 4: Modelo físico utilizado no ensino/aprendizagem do comportamento de viga simplesmente apoiada submetida à flexão — o carregamento aplicado está perpendicular ao eixo da viga e no sentido de cima para baixo para a verificação dos giros das seções e do alongamento das fibras inferiores da viga conforme sugere o modelo de distribuição de tensões — elaborado por aluno de MSE/FAU/UFRJ no segundo semestre de 2013.

3.4. Exercícios de modelagem de pilares

Compreender o comportamento estrutural de pilares através da análise dos seguintes modelos físicos: (i) pilares do Palácio do Planalto; (ii) barras dos painéis comprimidos do MIT Simmons Hall; (iii) pilares do Aeroporto de Stuttgart e (iv) pórtico plano (vigas e pilares trabalhando em conjunto, "Figura 5"). Acrescenta-se que deve ser realizada a análise qualitativa das deformações verificadas nos modelos físicos e, por consequência, das tensões atuantes em função da deformabilidade dos materiais, do comprimento de flambagem, da intensidade das forças aplicadas e, ainda, da área e forma da seção transversal dos pilares.

3.5. Exercícios de modelagem de placas

Explicar o comportamento estrutural de placas através da análise dos seguintes modelos físicos: (i) laje maciça em concreto armado moldado no local apoiada em quatro vigas; (ii) laje maciça em concreto armado moldado no local apoiada em duas vigas paralelas; (iii) laje do sistema Dom-ino de Le Corbusier e, também, (iv) lajes nervuradas.

3.6. Exercícios de modelagem de cascas

Explicitar os fenômenos estruturais encontrados na análise dos seguintes modelos físicos: (i) casca concebida por Oscar Niemeyer; (ii) casca de Marcos Acayaba; (iii) casca de Félix Candela e (iv) casca simples na forma do funicular invertido de uma tensoestrutura.

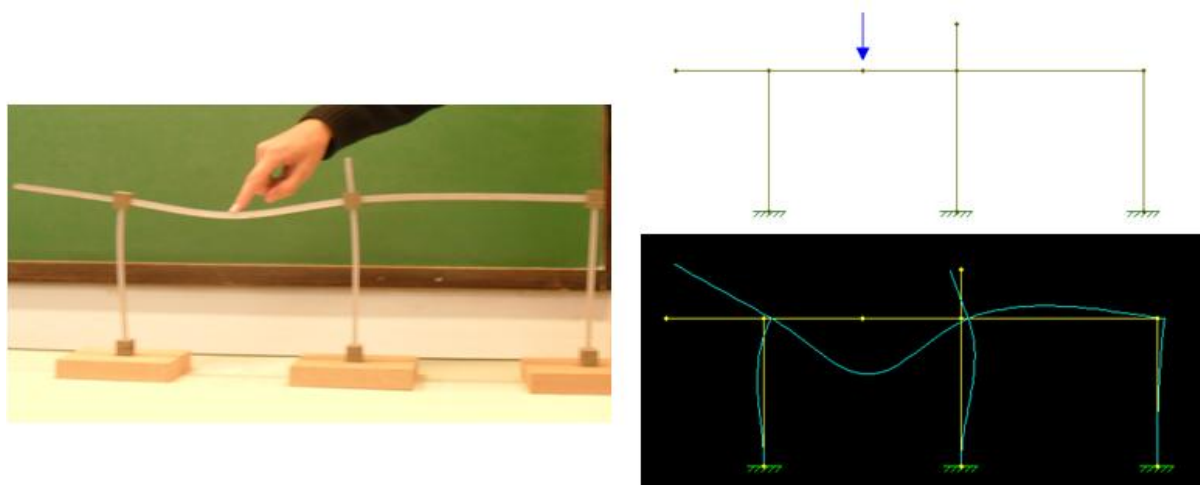


Figura 5: Modelo físico de pórtico deformado devido a aplicação de força concentrada no primeiro tramo — modelo estrutural equivalente e, ainda, estrutura deformada resultante da análise numérica do modelo estrutural equivalente — elaborado pelo monitor de MSE/FAU/UFRJ em 2014.

4. TRABALHO FINAL DA DISCIPLINA

Na última fase da disciplina, os sistemas estruturais são estudados por outro ângulo. Explicitando estrutura como edificação subtraída dos elementos de função não estrutural, solicita-se, como trabalho final de MSE, a confecção e a análise qualitativa de modelos físicos de estruturas de projetos/construções existentes. A “Figura 6” mostra alguns exemplos do trabalho final de MSE, elaborados no segundo semestre de 2013.

Nesta fase, o sistema estrutural se insere no contexto da história da engenharia e da arquitetura e, também, no contexto dos sistemas construtivos — corroborando com o processo de ensino/aprendizagem de estruturas (VIDIGAL, 2010; LINDENBERG NETO, 2002).

Por fim, cabe acrescentar que, neste primeiro semestre de 2014, foram propostos os seguintes temas para o trabalho final de MSE: Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro (Eduardo Reidy); Projetos "Cubo tenso" (tendo como referência as estruturas de Frei Otto); Villa Savoye (Le Corbusier); Museu de Arte de São Paulo (Lina Bo Bardi); Pavilhão de Barcelona (Ludwig Mies van der Rohe); Casa Hélio Olga (Marcos Acayaba); Palácios do Planalto (Oscar Niemeyer); Pórtico e cobertura na Praça do Patriarca (Paulo Mendes da Rocha); Kursaal Auditorium em São Sebastião (Rafael Moneo); Pavilhão de São Cristóvão (Sérgio Bernardes); Cobertura do pavilhão japonês (Shigeru Ban) e, ainda, Edifício Casa Elza Berquó (Vilanova Artigas).

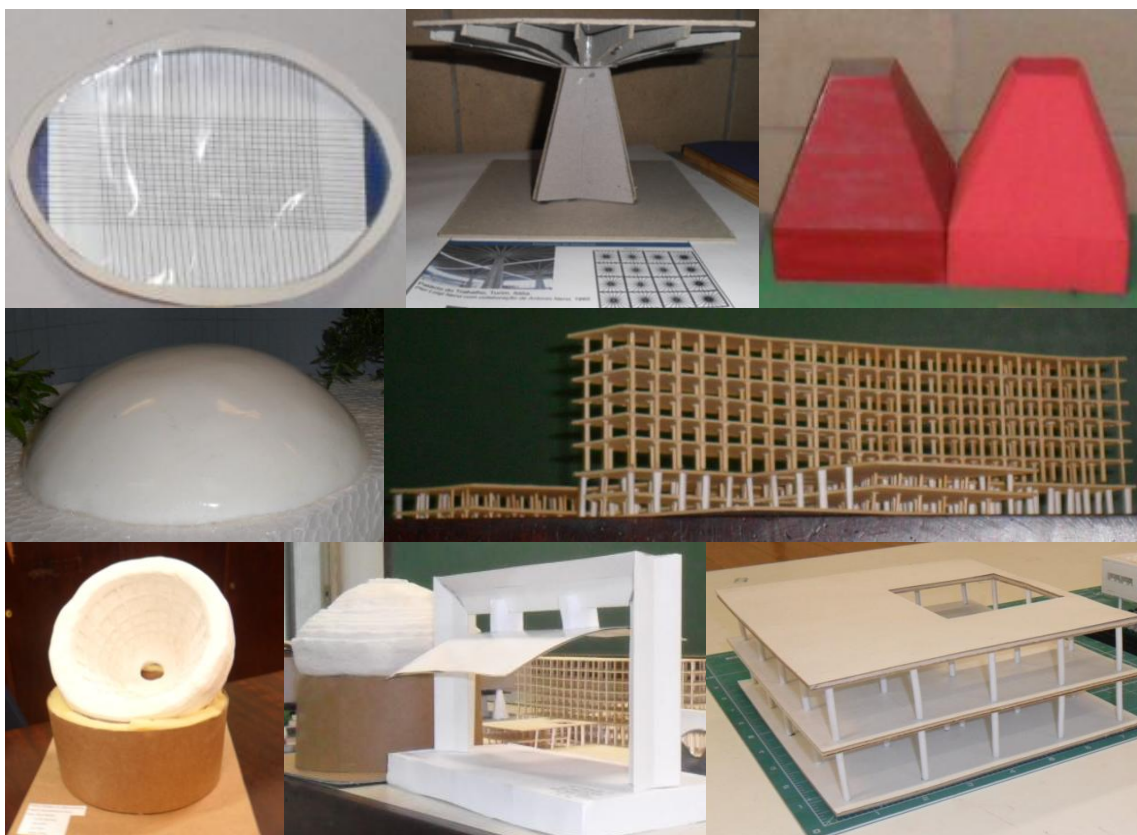


Figura 6: Exemplos de modelos físicos de Sistemas Estruturais de projetos/construções existentes: Cobertura do Pavilhão de São Cristóvão, Pilar do Palácio do Trabalho de Turim, Casa das Histórias Paula Rego, Casca na sede do Partido Comunista Francês em Paris, Edifício da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ, Cúpula do Panteão em Roma, Pórtico e cobertura na Praça do Patriarca e Villa Savoye — elaborados pelos alunos de MSE/FAU/UFRJ no segundo semestre de 2013.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Explorou-se o processo de ensino/aprendizagem de MSE da FAU/UFRJ durante os últimos dois semestres — quando a autora ficou responsável por esta disciplina, cujas aulas estão disponíveis em OLIVEIRA (2014).

Cabe ressaltar que este trabalho deve ser continuado com a criação do Laboratório de Modelagem de Sistemas Estruturais (LabMSE) da FAU/UFRJ. Novos recursos tecnológicos para a modelagem física e numérica de sistemas estruturais devem estar disponibilizados no LabMSE.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CRESPO, B.H.A.; OLIVEIRA, M. B. Tensoestruturas: comportamento estrutural e possibilidades projetuais. Resumos: XXXV – Jornada Giulio Massarine de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural. Rio de Janeiro:UFRJ, 2013.

LINDENBERG NETO, H. Ensinando história da engenharia de estruturas a alunos de engenharia civil. Anais: XXX – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Piracicaba: UNIMEP, 2002.

OLIVEIRA, M. B. Aulas de Modelagem dos Sistemas Estruturais. Disponível em: <<http://mboufrj.weebly.com>> Acesso em: 04 jun. 2014.

OLIVEIRA, M. B.; BARBATO, R. L. A. Estudo das estruturas de membrana: uma abordagem integrada do sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 7, n. 22, p. 107-122, 2005.

SALVADORI, M. Why Buildings Stand Up - The Strength of Architecture. New York: W. W. Norton, 1980.

SARAMAGO, Rita de Cássia Pereira; UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Escola de Engenharia de São Carlos. Ensino de estruturas nas escolas de arquitetura do Brasil, 2011. Dissertação (Mestrado).

VIDIGAL, Emerson José; UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Ensino de projeto arquitetônico: um estudo sobre as práticas didáticas no curso de arquitetura e urbanismo na Universidade Federal do Paraná, 2010. 330f, il. Tese (Doutorado).

TEACHING STRUCTURES IN ENGINEERING AND ARCHITECTURE AND URBANISM COURSES

Abstract: *The teaching of structures engineering begins by defining Structure as a part of the building responsible for its supporting. The concept of system is presented. Structure, or Structural System, is presented as a set of elements which allow the creation of useful space in a building, with safety and durability. Structure is explained as a building subtracted of its elements of non-structural function. Model is defined as a simplified representation of a real world phenomenon. Structure Systems modeling is presented as the creation of models which might be physical or numerical. The usage of a numerical modeling allows a quantitative structural analysis. Numerical modeling can't always describe the reality with the required precision. Nevertheless, the use of physical models helps to understand the structural behavior through visualization of structural phenomena. This work has the objective of demonstrating an experience of over ten years in teaching Structures Engineering. In it, as*



research methodology, was employed the experimentation in classes in the discipline called "Modeling of Structure Systems" - offered to first year students of the Architecture and Urbanism course, in Universidade Federal do Rio de Janeiro, in Rio de Janeiro, Brazil.

Key-words: *teaching of structures, structures engineering, modeling - structures*