

**MODELAGEM dos
SISTEMAS
ESTRUTURAIS**

Maria Betânia de Oliveira

Introdução à
MODELAGEM dos
SISTEMAS
ESTRUTURAIS

Vol.1

LETRACAPITAL



Agradeço à Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo ambiente profícuo ao trabalho e à reflexão.

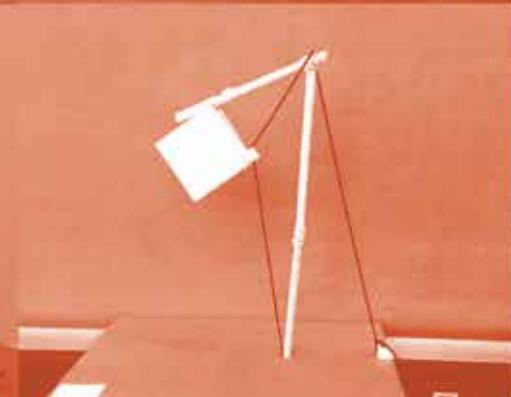
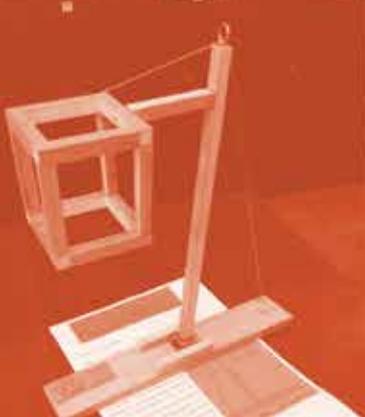
Agradeço à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo pelas posições assertivas sobre ensino de estruturas.

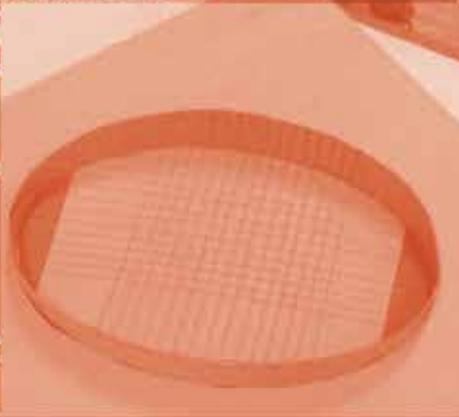
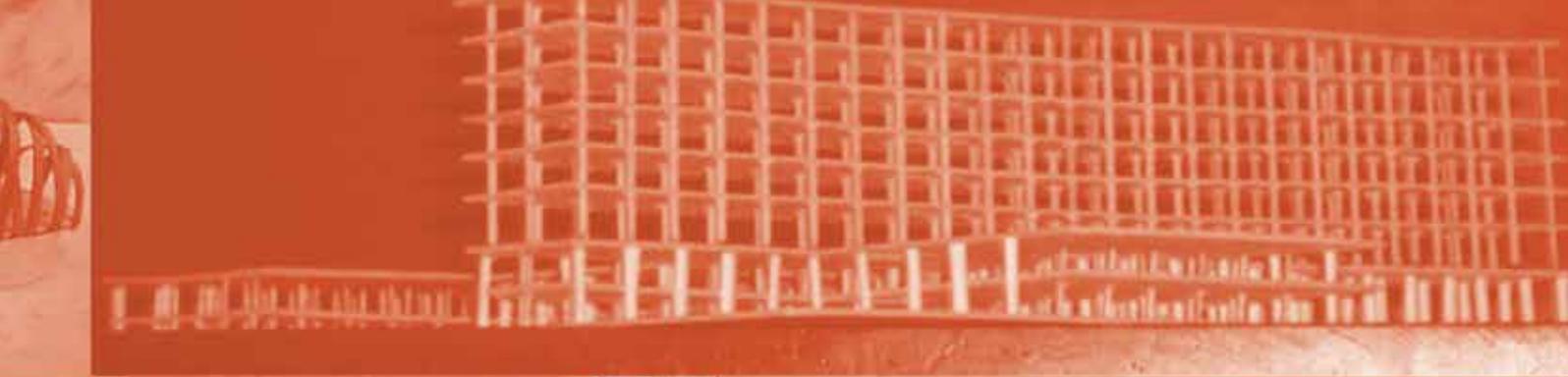
Agradeço ao Departamento de Estruturas pela confiança.

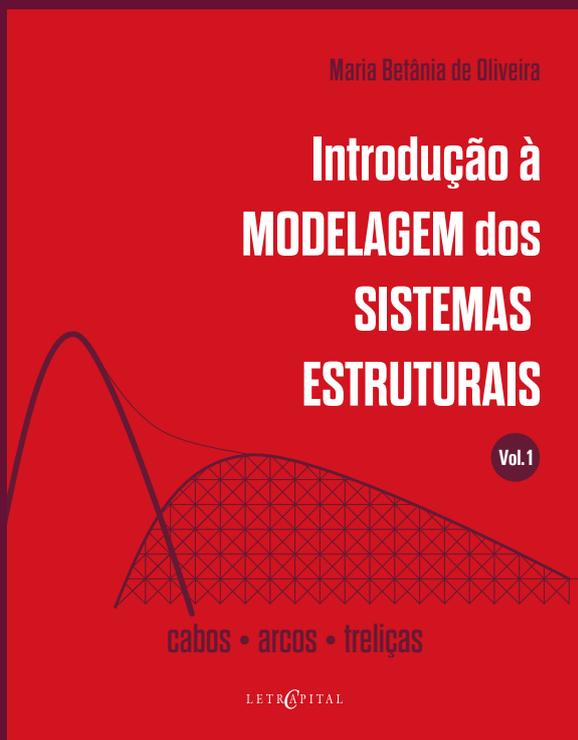
Agradeço à minha família pelo amor e pela dedicação.

Para os estudantes de modelagem dos sistemas estruturais.

Em comemoração aos meus vinte anos de magistério.







EDITOR: João Baptista Pinto

CAPA: Maria Betânia de Oliveira

CONCEITUAÇÃO GRÁFICA: Julia Ungerer

PROJETO GRÁFICO: Maria Betânia de Oliveira

EDIÇÃO DAS FIGURAS: Lucas de Oliveira Peixoto

EDITORIAÇÃO: Luiz Guimarães

REVISÃO DOS ORIGINAIS: Sophia Lang

REVISÃO DE PROVAS: Rita Luppi

LETRACAPITAL

Telefones (21) 22153781 / 35532236

www.letracapital.com.br

SUMÁRIO

- APRESENTAÇÃO _____ **11**
- INTRODUÇÃO _____ **13**
Capítulo 1
- CONCEITUAÇÃO INICIAL _____ **23**
Capítulo 2
- ESTRUTURAS COM CABOS _____ **43**
Capítulo 3
- ESTRUTURAS COM ARCOS _____ **77**
Capítulo 4
- ESTRUTURAS COM TRELIÇAS _____ **115**
Capítulo 5
- CONSIDERAÇÕES FINAIS _____ **155**
Capítulo 6

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA FONTE
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ.

O55i

Oliveira, Maria Betânia de

Introdução à modelagem dos sistemas estruturais, volume 1 / Maria Betânia de
Oliveira. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Letra Capital, 2020.

160 p. ; 21x27 cm.

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-87594-20-0

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Engenharia de estruturas. 3. Modelagem. I. Título.

20-65806

CDD: 624.1

CDU: 624

Camila Donis Hartmann - Bibliotecária - CRB-7/6472

APRESENTAÇÃO



Deixe-me ir
Preciso andar
Cartola (1976)

Este livro apresenta conteúdo das aulas de Modelagem dos Sistemas Estruturais (MSE), ministradas para os estudantes do primeiro ano de graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Ao longo dos últimos oito anos, fui desenvolvendo as aulas e, agora, procuro colocar em movimento os pensamentos desenvolvidos, esperando que permaneçam aqui, mesmo que de modo mais estático.

Por ora, apresento o primeiro livro de três volumes. Confesso que foi difícil começar, mas, com a insistência, a escrita foi tornando-se mais natural.

Este livro é voltado aos que estão iniciando no estudo sobre a modelagem dos sistemas estruturais, de modo que considero que o leitor jamais tenha feito alguma disciplina na área de estruturas. Isso não significa que fui menos exigente comigo, pois tratei o assunto com o rigor necessário – dentro das minhas limitações de expressão. Todavia, as pessoas mais avançadas no assunto podem se beneficiar da abordagem qualitativa deste trabalho que, decerto, é capaz de lhes proporcionar interessantes *insights*.

Bons estudos e reflexões.

Maria Betânia de Oliveira

Professora da FAU/UFRJ

Doutora em Engenharia de Estruturas pela EESC/USP

Engenheira Civil pela UFU

INTRODUÇÃO

● ● ● ● ● ● CAPÍTULO 1

Viver é defender uma forma

(hoelderlin via webern) em

Augusto de Campos - viv (1992)*

Estrutura é o que mantém uma forma. A palavra estrutura pode ser empregada em diversos campos do conhecimento; assim, podemos tratar da estrutura de uma música, da estrutura do pensamento, da estrutura de poder em uma empresa e, igualmente, dizemos que todo objeto tem uma estrutura.

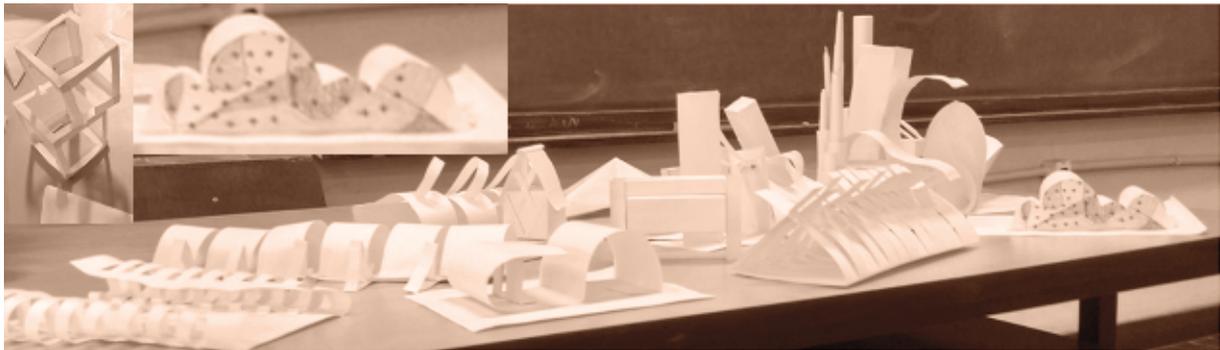
No contexto das edificações, o que é estrutura?

Nas edificações, a estrutura, como nós a entendemos hoje, é o lugar ou o caminho das forças na matéria (REBELLO, 2001; FRANCO, 1995). Segundo Amorim (2014), a forma é a expressão plástica do desejo arquitetônico e a estrutura deve garantir a existência da forma idealizada.

Há uma simultaneidade entre forma e estrutura. A Figura 1.1 ilustra o resultado de experimentação realizada durante a primeira aula da disciplina Modelagem dos Sistemas Estruturais (MSE).¹ Esse exercício consiste da construção de uma estrutura com uma folha de papel, sendo a limitação inicial o recurso material. Qual forma é mais agradável? Qual é a estrutura mais resistente? Todas as estruturas são elaboradas com a mesma quantidade e qualidade de matéria? Qual estrutura vence o maior vão livre? Qual estrutura é mais alta? Quais são as forças que atuam nos modelos? As estruturas estão em equilíbrio? Há uma resistência dada pela forma? Essas são questões para reflexão e discussões iniciais.

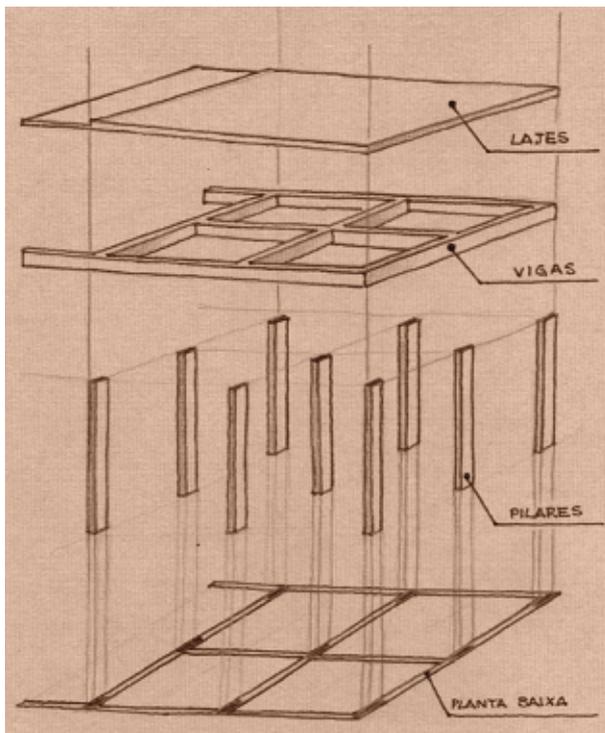
* viv (1992) é um poema de Augusto de Campos, recentemente reeditado no livro intitulado *Despoesia: Augusto de Campos*. São Paulo: Perspectiva, 2016.

¹ Modelagem dos Sistemas Estruturais (MSE) é uma disciplina oferecida para o primeiro ano da graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU/UFRJ.



[Figura 1.1] Construção de estrutura com uma folha de papel durante a primeira aula da disciplina Modelagem dos Sistemas Estruturais (MSE), oferecida para o primeiro ano da graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU/UF RJ.

Considera-se, também, estrutura como sinônimo de sistema estrutural que consiste do conjunto de elementos estruturais inter-relacionados e responsáveis pela sustentação de uma edificação, com segurança, ao longo do tempo (Figura 1.2): assim, as lajes, as vigas e os pilares compõem o sistema básico de uma edificação.



[Figura 1.2] Perspectiva explodida de sistema estrutural básico do tipo laje, viga e pilar. Desenho a lápis.

Cabe acrescentar que há projetos com pouquíssimo conteúdo estrutural, como o projeto usual de uma residência simples (FRANCO, 1995), e outros em que o conhecimento amplo de estruturas possibilita expressões mais criativas e soluções mais eficazes.

O estudo do comportamento das estruturas é realizado com auxílio de modelos. Modelo é a representação simplificada de algum fenômeno do mundo real; portanto, a modelagem dos sistemas estruturais consiste da representação simplificada dos sistemas estruturais.

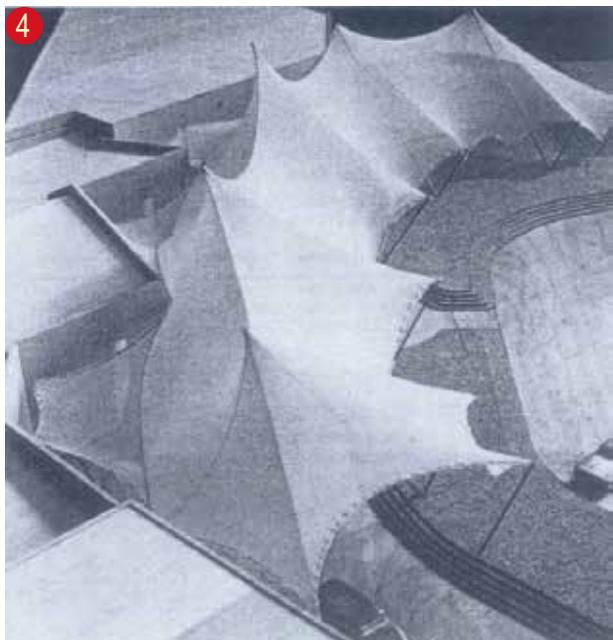
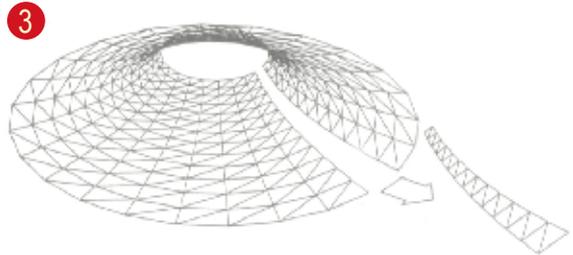
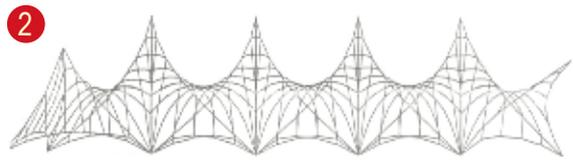
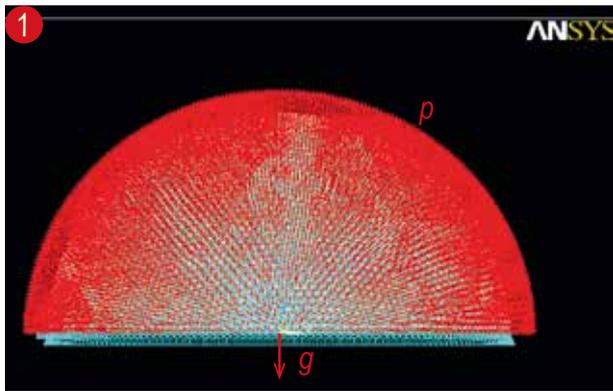
A modelagem dos sistemas estruturais pode ser dividida em duas classes: os modelos físicos e os modelos matemáticos. Os modelos matemáticos são baseados em formulação matemática que expressa os fenômenos estruturais; e os modelos físicos representam a realidade por meio de modelos reduzidos em escala. A precisão da modelagem depende da fase do projeto (ou do estudo) e, também, do conteúdo estrutural da edificação.

Com o intuito de facilitar o entendimento do que sejam as modelagens matemática e física dos sistemas estruturais, a Figura 1.3 mostra:

- (1) esquema estrutural de cobertura pneumática resultante de modelagem matemática via ANSYS;²
- (2) desenho resultante de modelagem matemática para a definição da forma e padrão de corte com propriedades geodésicas;
- (3) desenho resultante de modelagem matemática para a definição da forma e planificação da superfície 3D; e
- (4) modelagem física para determinação do modelo da ação do vento em estrutura flexível.

A modelagem dos sistemas estruturais (MSE) envolve a definição da forma estrutural, das forças externas atuantes no sistema, do comportamento dos materiais de construção empregados na produção da estrutura e dos métodos de análise estrutural adequados a cada tipo de projeto. Essa modelagem envolve, ainda, a verificação da segurança, necessária para garantia de riscos aceitáveis; e o desenho detalhado da estrutura, suficiente para sua execução com qualidade.

² O ANSYS é um sistema computacional de simulação para engenharia (engenharia assistida por computador, CAE). Site oficial: <<https://www.ansys.com/products/structures>>. Acesso em: 7 dez. 2019.



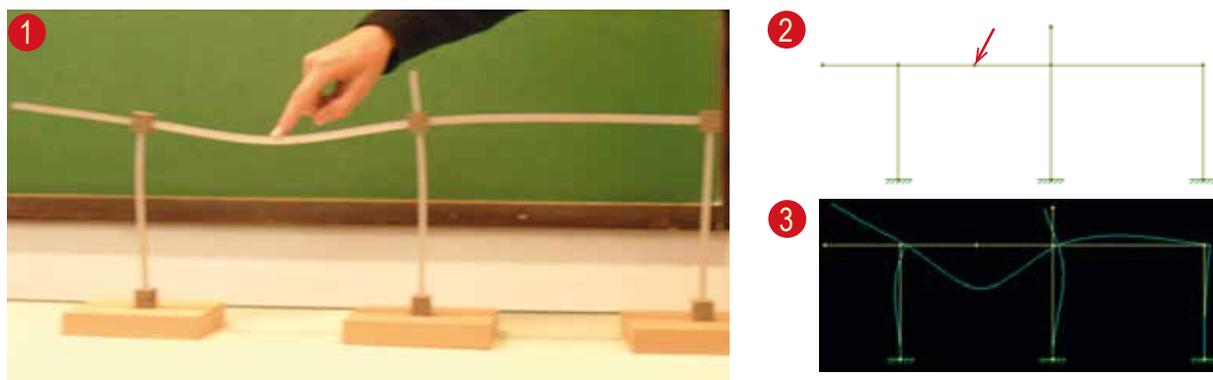
[Figura 1.3] Modelagem matemática e modelagem física: (1) desenho resultante de modelagem matemática de estrutura pneumática, submetida à ação da gravidade g e à pressão interna p (OLIVEIRA, 2001); (2) desenho resultante de modelagem matemática para a definição da forma e do padrão de corte com propriedades geodésicas (BARNES, 1988); (3) desenho resultante de modelagem matemática para a definição da forma e planificação da superfície 3D (MONCRIEFF & TOPPING, 1990); e (4) modelagem física para determinação do modelo para a ação do vento na estrutura flexível (BARNES & WAKEFIELD, 1988). Figura da autora.

A este trabalho interessa uma modelagem dos sistemas estruturais que permita a análise qualitativa dos fenômenos estruturais: a forma, o equilíbrio, os deslocamentos, as deformações, a estabilidade e a resistência das estruturas.

O atual processo de ensino/aprendizagem empregado na disciplina Modelagem dos Sistemas Estruturais (MSE) é caracterizado pela utilização de modelagem física que possibilita o entendimento dos fenômenos estruturais. A Figura 1.4 ilustra essa abordagem:

- (1) modelagem física mostrando um pórtico na posição deformada;
- (2) esquema estrutural equivalente ao modelo físico;
- (3) posição inicial do pórtico (em amarelo) e posição deformada (em azul), obtidas com a modelagem matemática via *software* de análise estrutural.

É possível perceber que a posição deformada da estrutura representada pela modelagem física é análoga à posição deformada resultante da modelagem matemática: portanto, podemos discutir diversos fenômenos estruturais com a modelagem física, na qual podemos visualizar as deformações e os deslocamentos da estrutura modelada e, com esses parâmetros, inferir sobre as forças, sobre a relação entre forma e comportamento estrutural; e sobre o equilíbrio, a estabilidade e a resistência do sistema em análise, entre outros aspectos, inclusive construtivos.



[Figura 1.4] Modelagem de pórtico simples: (1) modelagem física que mostra o pórtico na posição deformada; (2) esquema estrutural do modelo físico do pórtico; e (3) posição inicial do pórtico e posição deformada (em escala exagerada), obtidas com a modelagem matemática via *software* para análise estrutural. Figura da autora, modelo físico elaborado por alunos de MSE e modelagem matemática elaborada com o auxílio do Ftool.³

³Ftool. A Graphical-Interactive Program for Teaching Structural Behavior. Disponível em: <<https://www.ftool.com.br>>. Acesso em: 2 abr. 2019.

Em MSE, os modelos físicos são criados para representar um ou mais fenômenos estruturais que são posteriormente observados, analisados e relatados em sala de aula. Os modelos são de estruturas simples e também podem ser de sistemas estruturais mais complexos, com conteúdo estrutural acima do usual.

A motivação para o ensino e a aprendizagem dos sistemas estruturais surge porque esse conhecimento é aplicado ao longo de todo o processo de produção de uma edificação: durante a concepção, o projeto, a execução, a manutenção e, também, o restauro ou a demolição. Ressalte-se que os projetos de edificações podem ser de novas edificações, de alteração da forma de uma edificação existente, de alteração do uso de uma edificação existente, de manutenção e restauração (Figura 1.5). Podemos concluir, então, que o sistema estrutural deve ser considerado em todos os tipos de projeto, inclusive durante a própria produção da edificação.



[Figura 1.5] Tipos de projeto de edificações. Figura da autora.

Não é difícil, portanto, perceber os motivos para estudar e compreender o comportamento dos sistemas estruturais. Ademais, como já ressaltado, há a simultaneidade entre forma e estrutura. Então, pergunto: quem cria a estrutura? Quem cria a forma cria a estrutura resalta Rebello (2001).

Criar a estrutura é o mesmo que concepção estrutural. Criar a forma e a estrutura não é achar formas em tabelas e em *softwares* clássicos de cálculo estrutural. A concepção estrutural não é pré-dimensionamento, não é lançamento estrutural, não é o projeto da estrutura.

Conceber a estrutura é: ter consciência da possibilidade da sua existência, perceber a relação do sistema estrutural com o espaço gerado, perceber os sistemas capazes de transmitir as forças à fundação, identificar os materiais de construção capazes de garantir a existência da forma idealizada (REBELLO, 2001). Cabe destacar que as atividades a serem desenvolvidas para a concepção estrutural dependem do conteúdo estrutural de cada projeto.

Por outro lado, o projeto da estrutura consiste da modelagem do sistema estrutural em um nível que possibilite adequada análise estrutural para o dimensionamento e detalhamento da estrutura para produção, viabilizando a garantia da segurança e durabilidade ao longo do tempo. Por isso, tanto os projetos com elevado conteúdo estrutural, quanto os típicos, devem ser executados por agentes com amplos e profundos conhecimentos na área de estruturas.

Após essa breve introdução, no Capítulo 2 apresentam-se a identificação e as classificações dos elementos e sistemas estruturais básicos de edificações de acordo com a forma (ou geometria) da estrutura e de acordo com a forma (ou desenho) das forças externas atuantes. O Capítulo 3 é dedicado ao estudo da modelagem de cabos. No 4, a partir dos fenômenos estruturais apresentados nas estruturas com cabos, apresenta-se a modelagem de arcos. E, após a apresentação do comportamento estrutural dos cabos e dos arcos, faz-se a análise qualitativa de treliças no Capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6, as considerações finais sobre o trabalho são apresentadas.

Exercício 1.1

Caminhe pela cidade e tire fotos de estruturas. Monte um painel A4 com algumas dessas fotos e faça uma breve descrição das estruturas mostradas.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, A. M. C. Diálogos entre forma arquitetônica e sua concepção estrutural. In: PERRONE, R. A. C.; VARGAS, H. C. (Orgs.) *Fundamentos de projeto: arquitetura e urbanismo*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2014.
- BARNES, M. R. Computer aided design of the shade membrane roofs for EXPO88. *Structural Engineering Review*, v. 1, p. 3-13, 1988.
- BARNES, M. R.; WAKEFIELD, D. S. Form-finding, analysis and patterning of surface-stressed structures. *Proceedings of the 1st International Oleg Kerensky Memorial Conference on Tension Structures*, London, UK. Session 4, p. 8-15, 1988.
- FRANCO, M. Palestra intitulada “Arquitetura e Estrutura: experiências e perspectivas”. IDEA, IE-SP, 25 set. 1995.
- MONCRIEFF, E.; TOPPING, B. H. V. Computer methods for the generation of membrane cutting patterns. *Computer and Structures*, v. 37, n. 4, p. 441-450, 1990.
- OLIVEIRA, M. B. *Estudo das estruturas de membrana: uma abordagem integrada do sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise*. São Carlos: EESC/USP, 2001. Tese (doutorado).
- REBELLO, Y. C. P. *A concepção estrutural e a Arquitetura*. São Paulo: Zigate Editora, 2001.