

# Considerações sobre o Ensino e Aprendizagem de Estrutura nas Escolas de Arquitetura

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira<sup>1</sup>  
LEITE, Maria Amélia Devitte Ferreira D’Azevedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>YCON Engenharia Ltda, São Paulo, Brasil. yopa@ycon.com.br

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica de Campinas, São Paulo, Brasil. melarquiteturamel@gmail.com

## Resumo

O artigo discute aspectos intervenientes no ensino e na aprendizagem de estrutura nas escolas de Arquitetura, com vistas ao seu aprimoramento. Demonstra a relação intrínseca entre forma arquitetônica e estrutura, e a responsabilidade do arquiteto como conceitor da obra em sua totalidade. Profissionais e projetos exemplares são apresentados como referências. São analisadas as possíveis razões históricas para justificar a dúvida recorrente sobre a competência do arquiteto para resolver a estrutura, face à coexistência profissional com o engenheiro no mesmo campo de atuação. Apresentam-se propostas de procedimentos didáticos para as disciplinas de estrutura, com ênfase nos desafios da vida profissional, em especial, a clareza sobre as etapas de desenvolvimento do projeto estrutural e o diálogo com os demais projetistas em busca de qualidade e inovação.

**Palavras-Chave:** concepção estrutural; ensino de estrutura; aprendizagem de estrutura; estrutura arquitetônica

## Abstract

The article discusses aspects involved in teaching and learning structure in the schools of Architecture, aiming to its improvement. It is demonstrated the intrinsic relationship between architectural forms and structure, and also the architect responsibility as designer of the building in its entirety. Exemplary professionals and projects are presented as references. Possible historical reasons to justify the doubts about the competence of the architect to solve the structural issues given the coexistence with the engineer in the same playing field are analyzed. Some proposals for didactic procedures are presented, with emphasis on the challenges of working life, in particular the development stages of structural design and the necessary dialogue with other related designers aiming to quality and innovation.

**Key-Words:** structural design; teaching in structure; learning in structure; architectural structure

## 1. À guisa de introdução

Quem concebe a estrutura de uma edificação? Não raro, a resposta à pergunta é: “o calculista (ou engenheiro...) de estrutura”. Será mesmo?

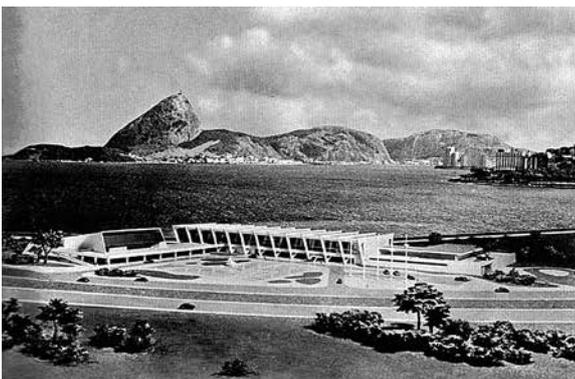
Toda e qualquer forma arquitetônica para ser mantida no espaço requer uma estrutura, e deverá estar dotada de requisitos formais e materiais que garantam sua sustentação permanente e a condução das cargas incidentes até o solo, bem como a limitação das deformações nos patamares aceitáveis por norma, e, desejavelmente, o atendimento aos critérios de economia na execução e na manutenção da obra.

Assim, como em um corolário de arquitetura, podem-se considerar indissociáveis a forma e a estrutura de uma edificação. E, portanto, o criador da primeira – o arquiteto – será, inevitavelmente, o criador da segunda. Sobra como questão efetiva a verificar apenas quão intencional no projeto foi o resultado apresentado após a construção. Seja esse bom, ou nem tanto.

Há casos em que a simbiose entre arquitetura e estrutura é de tal evidência que, de fato, nem chega a ser objeto de diferenciação. O MAM-Rio, Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, de autoria de Affonso Eduardo Reidy, e o Centre Georges Pompidou de Paris, também conhecido por Centre Beaubourg, projetado por Renzo Piano e Richard Rogers, representam brilhantemente essa relação intrínseca. Nas duas obras, a estrutura é a própria arquitetura; a arquitetura se expressa pela estrutura, faz desta a sua linguagem. Nada falta, nada excede.

A “estrutura arquitetural” do MAM-Rio, expressão cunhada pelo próprio autor no Memorial descritivo da obra em 1953, além de cumprir sua finalidade precípua de sustentação do edifício, harmoniza a intenção estético-formal de inserção suave do Museu na paisagem circundante e o equilíbrio dos esforços nos elementos estruturais, com absoluta esbelteza e excelente desempenho das características resistentes do concreto armado.

**Figura 1:** Visão de conjunto do MAM-Rio



Fonte: COELHO, 2010

Os catorze pórticos de formato particular contêm a precisa condição estática para a condução das forças ao solo. Os tramos inclinados inferiores de apoio à laje de piso do primeiro pavimento fornecem o momento necessário nos apoios para aliviar o esforço em sentido contrário advindo dos planos superiores, e permitindo assim o alívio das cargas horizontais nesses pontos, aspecto fundamental para uma obra construída em solo aterrado:

Em novembro, finalmente a prefeitura doou uma área de 40 mil metros quadrados ao museu. Só que o terreno, na verdade, ainda estava por surgir, e àquela altura nada mais era do que uma porção da baía da Guanabara à espera da terra provinda do desmonte do morro de Santo Antônio.

Foi, portanto, sobre a água que surgiram os primeiros esboços do projeto, confiado a Reidy e desde logo inscrito no seu conjunto de propostas para o Rio. (Ana Luiza Nobre, em COELHO, 2010, p. 113)

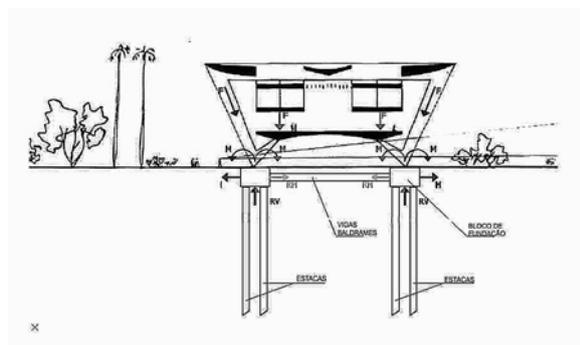
**Figura 2:** O MAM-Rio no Aterro do Flamengo (em verde)



Fonte: Autora e Ricardo dos Santos da Silva sobre base de COELHO, 2010

Garantindo o funcionamento perfeito do conjunto para qualquer alternância de carregamentos, as vigas de travamento transversais (nível dos baldrames) que unem os blocos de estacas fecham com “chave de ouro” a sincronia do sistema estrutural proposto.

**Figura 3:** Comportamento estático da estrutura do MAM-Rio



Fonte: Autora e Ricardo dos Santos da Silva sobre base de COELHO, 2010

Inaugurado em 1977, o edifício parisiense, por sua vez, constitui até hoje um marco referencial de arquitetura e engenharia, embora inicialmente tenha sido objeto de grande polêmica na comunidade local, que o classificou de “refinaria petrolífera” ou “monstro com as vísceras à mostra”. Inserido em um tecido urbano histórico dos mais antigos da cidade<sup>1</sup>, o projeto vencedor de um concurso internacional com 681 concorrentes de 49 países é emblemático por sua linguagem construtiva franca, caracterizada pela explicitação de todos os subsistemas componentes: estrutural, vedos, instalações prediais, condicionamento de ar, comunicações e circulações.

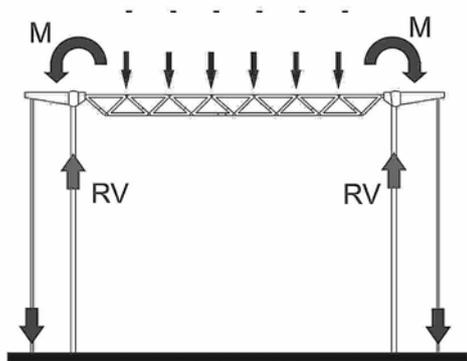
**Figura 4:** O Centre Georges Pompidou, em Les Halles, Paris



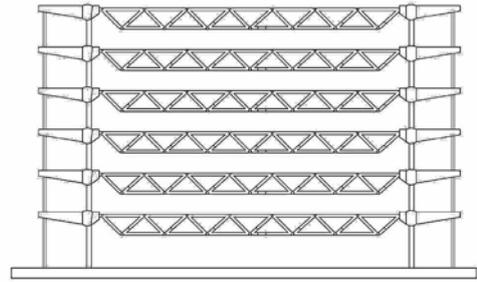
Fonte: PROCESS: Architecture, 1992

Internamente, os pavimentos com largura de 48 metros são completamente livres de apoios, condição esta possibilitada por um sistema estrutural de catorze linhas de treliças planas em aço, cujos esforços de momento fletor nos nós são sutilmente equilibrados pela ação de dois braços de alavanca – as gerberettes – um em cada extremidade, ativados por tirantes ancorados em blocos de fundação, possibilitando, assim, a transmissão exclusivamente de cargas verticais aos elegantes pilares de seção circular vazada. O resultado é um interessante e esbelto pórtico de vínculos articulados.

**Figura 5:** Comportamento estático da estrutura do



<sup>1</sup> A região denominada Quartier des Halles, onde se situa o Centre Georges Pompidou, tem reminiscências desde o século XII com a instalação dos mercados que abasteciam de alimentos da cidade, fato que lhe valeu a expressão “estômago de Paris” dada pelo escritor Émile Zola.

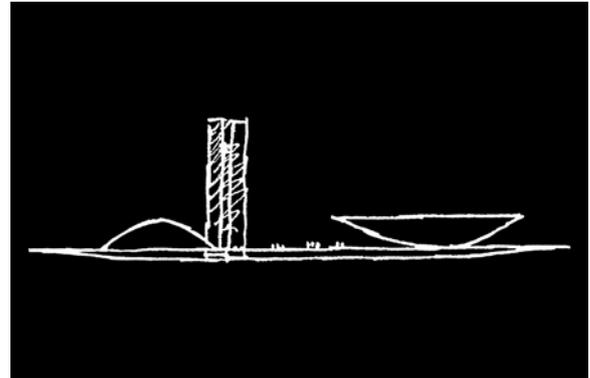


Fonte: Autora e Ricardo dos Santos da Silva

Há outras circunstâncias em que a obviedade e a incoerência podem ser os parâmetros que levem à constatação de quão preponderante deve ser o domínio da concepção estrutural para o arquiteto na prática do ofício. Ou seja, a demonstração evidente de saber sobre o que se está fazendo. E como poucas, talvez, a obra do Congresso Nacional (1958) em Brasília, de Oscar Niemeyer, exemplifique tão claramente tal pensamento.

Concebido para ser um marco monumental na paisagem da nova capital do país, o conjunto composto pelas torres verticais ladeadas pelas cúpulas audaciosamente invertidas, foi objeto de infindáveis análises teóricas por sua arquitetura marcante, e polêmicas discussões técnicas devido à inusitada solução estrutural dada pelo arquiteto em conjunto com o engenheiro de estruturas Joaquim Cardozo.

**Figura 6:** Croquis de Oscar Niemeyer da obra do Congresso Nacional



Fonte: PETIT, 1995

O caráter particular da obra pode ser avaliado pelas palavras de Yves Bruand:

A estética do Palácio do Congresso baseia-se inteiramente num equilíbrio perfeito na distribuição de massas, associado com originalidade barroca, de solidez com leveza, de estabilidade com dinamismo. A harmonia geral é tal que se poderia crer que existe uma simetria impecável, mas esta, embora existente, está longe de ser absoluta; pelo contrário, ela é fruto de um jogo muito engenhoso de com-

pensações. (Ives Bruand, 1997; em REBELLO, Y. C. P.; LEITE, M. A. D. F. O engenheiro de estruturas das curvas de Brasília. Revista AU – Arquitetura e Urbanismo, Editora PINI, São Paulo, nº 165, dezembro 2007, p. 94)

O mesmo entusiasmo, entretanto, não era unanimidade na área de estruturas. O proeminente engenheiro italiano Pier Luigi Nervi foi um dos profissionais a questionar a viabilidade de execução do projeto, com a concepção do conjunto e as seções resistentes propostas por Cardozo para a cúpula invertida.

Um modelo físico simples, representado através de metades de laranjas cortadas em gomos explica facilmente a provável razão da dúvida.

**Figura 7:** Modelo representativo do comportamento das cúpulas do Congresso

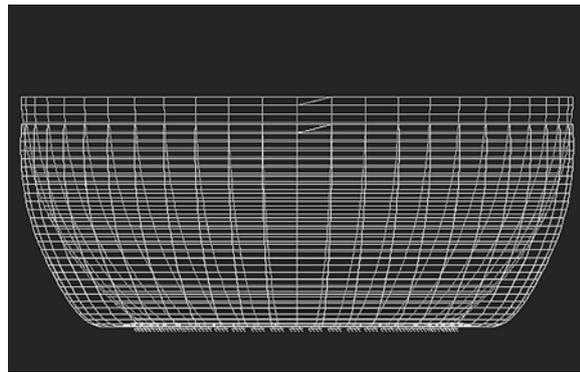
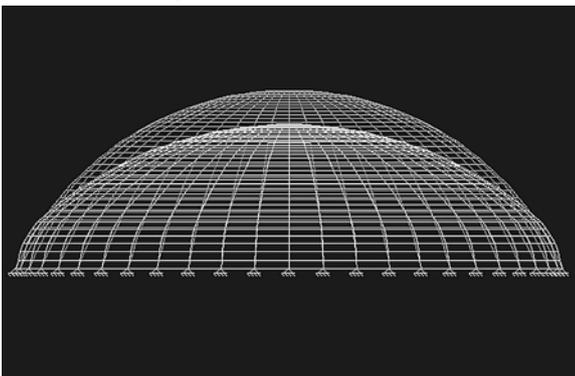


Fonte: Foto do autor

Percebe-se que a cúpula cujo centro de curvatura está voltado para baixo estabiliza-se com facilidade, enquanto a outra tende a abrir como uma flor, revelando estar submetida a esforços de tração.

Nos gráficos computadorizados abaixo, os diagramas das linhas de contorno das duas cúpulas do Congresso permitem visualizar as distintas tendências de deformação e os esforços incidentes. O aumento de tamanho da cúpula invertida, verificado pela diferença de posição entre as linhas em amarelo e em púrpura, revela a predominância de tração na forma invertida.

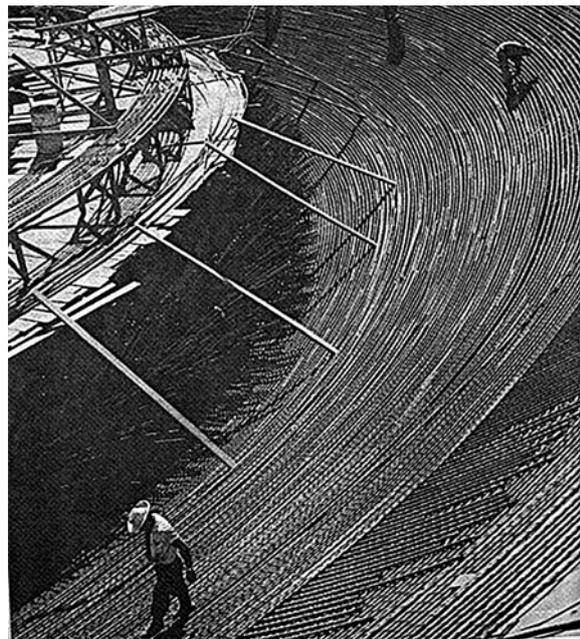
**Figura 8:** Gráficos dos diagramas de esforços nas duas Cúpulas do Congresso



Fonte: Equipe técnica da Ycon Engenharia

No modelo da laranja, para se recuperar a estabilidade da metade invertida basta uma “amarracção”, no caso unindo-se os gomos com uma fita adesiva. Na obra do Congresso, uma intensa armação de aço cumpre o papel desempenhado pela fita no modelo, o que motivou diversos questionamentos técnicos quanto à densidade de armadura verificada, muito acima do permitido por norma.

**Figura 9:** Armadura da cúpula invertida do Congresso



Fonte: MODULO, 1986

A tese aventada por estudiosos do assunto, incluindo os autores do presente artigo, é que Joaquim Cardozo, estimulado pelo desafio do arquiteto, tenha aplicado à concepção estrutural da cúpula invertida o conceito de uma malha de barras de aço enrijecida com concreto, não sendo possível, portanto, analisar o resultado pela ótica dos parâmetros resistentes do concreto armado. Bastante questionados à época, pagaram os dois profissionais o preço do ineditismo de suas propostas e da cumplicidade na construção de um conhecimento novo.

Vale ressaltar que, alguns anos depois, o mesmo conceito foi adotado por Eero Saarinen para a cobertura do Aeroporto de Dulles (1962/63) em Washington D. C. e, mais recentemente, por Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura no Pavilhão de Portugal na EXPO 98, em Lisboa.

**Figura 10:** Aeroporto de Dulles em Washington D. C., EUA



Fonte: SHARP,1972

**Figura 11:** Pavilhão de Portugal na EXPO 98 em Lisboa



Fonte: Foto da autora

Inúmeros são os casos a descrever no sentido de traçar a linha indivisível que une forma e estrutura no pensamento criador do arquiteto, muitas vezes, inclusive, na busca de novas fronteiras da concepção estrutural.

Por que, então, a dúvida inicial?

## 2. A concepção estrutural na formação profissional do arquiteto

A nebulosa fronteira entre o campo de conhecimento técnico de arquitetos e engenheiros, que tem raízes históricas nos últimos três séculos, parece se colocar como tema futuro por algum tempo ainda. E, certamente, reside aí grande parte da celeuma sobre a competência para resolver a estrutura.

Curiosamente, a tradição milenar da construção, caso observada, não revelaria qualquer hesitação, dado que a leitura histórica sobre a profissão aponta o arquiteto como o efetivo responsável

por este campo do conhecimento humano há, pelo menos, seis milênios, notadamente em relação às edificações de porte e programas mais complexos. Registros das civilizações egípcia e mesopotâmica apontam a proeminência deste profissional considerado “mestre-construtor”, cuja formação se dava em um circuito muito restrito, semelhante à iniciação sacerdotal, através da transmissão de conhecimentos considerados sagrados. Durante os mil anos em que perdurou o Império Romano, a Arquitetura foi elevada ao mais alto grau de importância, pois dominar territórios tinha estreita correlação com o ato de edificar. (LEITE, 1998)

Em verdade, é apenas na Renascença que, por razões de ascensão social, a categoria opta por seu afastamento das atividades da construção. Surge pela primeira vez o “arquiteto-desenhador”, dissociado do canteiro e distante do que lhe era historicamente peculiar: conceber, conduzir a execução e concluir a obra.

Como marco dessa nova versão da profissão, a criação da Académie Royale d’Architecture por Louis XIV em 1671, em Paris, considerada a primeira escola oficial de Arquitetura, consolida a composição estético-formal como a finalidade precípua do trabalho do arquiteto, passando os habituais conhecimentos sobre a construção - execução de alvenarias, carpintaria, canalizações, etc. - à competência de outros profissionais.

De área específica na origem francesa, entretanto, a formação do arquiteto via escola nos séculos seguintes passa a compor ora parte do ensino das Belas Artes, ora parte do ensino politécnico, voltado a partir do século XIX ao desenvolvimento das especialidades da Engenharia, profundamente influenciadas pelas demandas da revolução industrial.

Fortalece-se, então, também no campo da construção, a figura do engenheiro, profissional de origem mais recente <sup>2</sup>, associado até o século XVII exclusivamente aos construtores de máquinas, engenhos bélicos, obras de arte e artifícios hidráulicos, artes essas, diga-se de passagem, antes e imemorialmente atribuídas aos arquitetos. (LEITE, 1998)

As estratégias militares de dominação territorial encontraram campo fértil nas cidades, com demandas por serviços e trabalhos públicos, e os engenheiros dos anos 1700 participaram ativamente na implementação de uma política estatal de controle e planejamento global do território.

<sup>2</sup> A concepção moderna de engenheiro encontra sua fonte no campo militar. O termo surgido no século XVI deriva diretamente da palavra francesa *engin* (correspondente em português a “engenho”, “mecanismo”), no sentido de “máquina de guerra”.

Os arquitetos, por sua vez, tenderam a acentuar sua condição de profissionais liberais, relacionados a projetos pontuais e ainda ligados atavicamente às questões de estilo e de composição formal. (LEITE, 1998)

Tal cenário relativo à prática das duas categorias, revela correspondências na formação profissional, com a superação da Académie Royale d'Architecture como modelo único de ensino pela criação das grandes escolas politécnicas francesas - École de Ponts et Chaussées (1747), École de Génie de Mézières (1748), École des Mines (1783) e École Polytechnique (1794) - caracterizadas por um ensino eminentemente científico, aspecto que passa a ser a marca registrada da atuação dos engenheiros: técnica baseada em princípios científicos.

A dicotomia entre os dois padrões de formação profissional - Arquitetura como manifestação de arte plástica nos tradicionais moldes acadêmicos, e Engenharia como campo científico-matemático voltado aos meios industriais de produção - persiste até praticamente meados do século XX, tendo como talvez o único evento tentativo de integração, ou novo caminho, a instalação do Departamento de Arquitetura da Bauhaus em 1919. O marco cravado pela nova escola na linha do ensino pode ser sucintamente descrito como o ideal da obra de arte total sob a diretriz da arte de construir. Nesta perspectiva, mesmo que com certa dubiedade quanto à sua destinação - ensino, experimentação ou atendimento da produção de mercado - o aprendizado em oficinas surge como um caráter particular e inédito, bem como a ênfase em uma formação teórico-científica.<sup>3</sup>

Na continuidade até o cenário contemporâneo, pode-se traçar o percurso da formação profissional do arquiteto pela permanência por algumas décadas ainda no formato bi-partido entre o ensino artístico e o politécnico, até a configuração das escolas autônomas vigente na atualidade. O que se verá, entretanto, é a manutenção, ainda, de conflitos didáticos de origem, e com evidentes consequências no aprendizado da concepção estrutural.

De forma geral, e na realidade brasileira por influência da Reforma de 1962 na FAUUSP, o ensino nas escolas de Arquitetura foi organizado em três grandes áreas ou departamentos: Projeto, História e Tecnologia. Esta divisão, antes de promover efetivamente uma organização, provocou

<sup>3</sup> Considerado como um dos pilares básicos do ensino da Bauhaus, esta formação abrangia as disciplinas básicas da tecnologia, história da técnica, anatomia do corpo humano e conceitos básicos de economia empresarial. (LEITE, 1998)

algumas distorções no tocante ao aprendizado. Primeiramente, gerou uma partição quase hermetica de matérias afins. Por exemplo, matérias consideradas "técnicas" foram enclausuradas nos Departamentos de Tecnologia, destino esse dado ao estudo das estruturas.

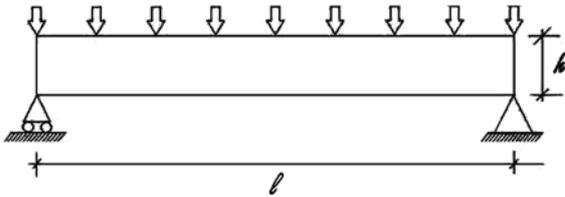
A departamentalização incorreu também em um isolamento das disciplinas das três grandes áreas e a ausência quase total de relações entre as mesmas. Além disso, por serem consideradas "técnicas", as disciplinas alocadas nos Departamentos de Tecnologia foram submetidas a professores oriundos de outras áreas como Matemática, Física, Engenharia, entre outras.

As disciplinas da área de estrutura, assim, são geralmente ministradas por engenheiros civis, considerados, por sua formação técnica, mais habilitados para tal. Com frequência, vê-se aí um engano, pois a formação excessivamente matemática e afastada da concepção de projeto que lhes é inculcada faz com que, ao transmitirem os conhecimentos, não se preocupem em fazê-lo de modo a permitir que os alunos estabeleçam a conexão desses com o projeto de arquitetura.

A formação do engenheiro civil também é deficiente, pois se verifica igualmente a falta de uma ligação mais clara entre teoria e realidade; é comum um engenheiro recém formado não saber por onde começar a lançar a estrutura quando lhe é apresentado um projeto de arquitetura. Assim, no âmbito das duas formações profissionais, não é difícil se identificarem lapsos didáticos nos processos de ensino.

Em uma aula típica de Resistência dos Materiais, disciplina clássica da sequência de estruturas, é comum o professor representar uma viga através de uma solitária linha, os apoios por estranhos triângulos e o carregamento por flechas, sem sequer atentar para o fato de que se devem discutir antes outras questões, como: para que serve uma viga?; o que representa um apoio no conjunto da estrutura?; de onde se origina a carga que solicita a viga? O aluno menos curioso até aprende o mecanismo de resolver o problema, calculando os valores de misteriosas entidades matemáticas como "momento fletor" e "força cortante", e completando a façanha com o desenho dos respectivos gráficos de variação. Mas não é raro que pouco tempo depois tudo seja esquecido, dado não representar qualquer significado para o que se pretende afinal, isto é, a criação de espaços para as atividades humanas.

**Figura 12:** Representação teórica de uma viga bi-apoiada com carga distribuída



Fonte: Desenho da autora e Ricardo dos Santos da Silva

Subtrai-se ao aluno o fato de que o espaço criado tem uma forma e que esta terá, obrigatoriamente, uma estrutura para se manter estável ao longo do tempo. Também não lhe é dito que tudo ao seu redor possui uma estrutura, inclusive seu próprio corpo; e que lidar com estruturas faz parte do cotidiano das pessoas. Desde o nascimento, enfrenta-se o desafio da ação da gravidade sobre os corpos e objetos, com desdobramentos deste simples conceito em todas as áreas do conhecimento.

O referido distanciamento entre disciplinas causado pela departamentalização do ensino só agrava o problema. A formação exageradamente técnica dos professores provoca nos alunos a sensação de que lhes está sendo ensinado algo desprovido de sentido, uma espécie de cultura inútil.

Muitas vezes, os alunos formados sob essa ótica se tornam depois professores, e é quando o abismo se aprofunda, pois, entendendo que o conhecimento estrutural é algo restrito a pessoas de pensamento matemático, esses novos mestres relegam a estrutura a um segundo plano no programa de ensino de Arquitetura, atribuindo sua resolução para outro profissional, geralmente o engenheiro, seja ainda na escola ou na vida profissional. Esquecem, assim, do que é de fato importante e central: quem realmente cria a estrutura é aquele que cria o espaço, ou seja, o criador da arquitetura.

Outra deficiência que se pode apontar é forma de inserção das disciplinas de estrutura na grade curricular. Na maioria das escolas, a primeira a tratar do assunto - em geral, Resistência dos Materiais - é colocada a partir do terceiro semestre do curso, quando os alunos já tiveram no mínimo um ano de informações sobre projeto de arquitetura e sem qualquer referência a respeito da sustentação estrutural. Partindo-se da premissa que arquitetura e estrutura se retroalimentam na concepção do partido da obra, e de que pensar em um aspecto sem considerar o outro gerará um resultado incipiente, tal procedimento é inconcebível.

É necessário e adequado que o aluno tenha contato com as questões estruturais desde o início de

sua formação. Assim, perceberá que arquitetura e estrutura são aspectos de um único projeto: o projeto da edificação. Viu-se acima que mesmo a coexistência hoje das duas profissões, arquiteto e engenheiro, tem raízes em uma única vertente histórica - resolver a construção. E que sua separação foi em parte uma maneira de se resolver (sic!) a formação acadêmica.

Daí a importância, cada vez mais, de se romper qualquer tipo de fragmentação ou isolamento didático das disciplinas, estabelecendo-se processos didáticos de aprendizado da estrutura, seja no curso como um todo ou nas próprias sequências de estrutura, no sentido de se promoverem efetivas e consistentes interfaces entre as duas vertentes do conhecimento construtivo.

### 3. Por uma conclusão sobre conceitos para a aprendizagem estrutural em Arquitetura

Os avanços obtidos pela Pedagogia permitem hoje se afirmar que, mediante o enfoque didático que se dê para introduzir os conteúdos, pode-se ou não atrair o interesse do aluno e assim promover de maneira eficiente o aprendizado. É fato também que, de pouco ou nada resolvem uma exemplar didática e recursos tecnológicos sofisticados, se o aluno estiver indiferente às informações que lhe são transmitidas, isto é, se apenas usufruir dessas como mero espectador, sem uma efetiva participação no processo de aprendizagem, tendo em vista, apenas, a retenção temporária dos conhecimentos elaborados para atender às exigências imediatas de obtenção de créditos para a aprovação no curso.

O importante é que o aluno se envolva com o ato de aprender e entenda sua importância; faça a correlação do conhecimento estrutural com as demais disciplinas; retenha o conhecimento de forma permanente, relacionando-o com a realidade, e que daí possa propor novas soluções para participar como agente ativo do desenvolvimento da ciência, tornando-se um verdadeiro produtor de conhecimento, e não apenas um mero usuário de informações prontas e acabadas.

O contexto profissional atual revela que poucos são ainda os arquitetos que entenderam a razão da estrutura e sabem manejá-la com maestria em seus projetos<sup>4</sup>. A maioria considera a resolução estrutural como obrigação do engenheiro da área. Ledo engano, pois já se provou anteriormente que quem define a estrutura, conscientemente ou não, é o arquiteto como idealizador da forma arquitetônica.

4 Referências contemporâneas sobre deficiências de domínio tecnológico do arquiteto, em especial no contexto brasileiro, podem ser consultadas na Tese de Doutorado da autora A Aprendizagem Tecnológica do Arquiteto, FAUUSP, 2005.

A qualidade do ensino de estrutura nas escolas de Arquitetura é preocupação recorrente entre professores. Fato positivo hoje é a existência mais numerosa de publicações na área, inclusive dirigida especificamente aos estudantes, embora em grande parte estrangeira. Revela-se, portanto, um campo importante para a pesquisa acadêmica, visto que se registram, de forma específica, apenas dois encontros relevantes de professores de estrutura em escolas de Arquitetura, realizados, respectivamente, na FAUUSP em 1974 e na Universidade Católica de Goiás em 1985. Além de espaçados no tempo, apenas o primeiro gerou uma publicação dos anais; os resultados do segundo, lamentavelmente, ficaram restritos às instituições participantes.

Vê-se, assim, a premência de se investir no aperfeiçoamento do ensino e da aprendizagem da estrutura em Arquitetura, e enunciam-se, a seguir, alguns procedimentos possíveis de inserir nas concepções curriculares com poucos ajustes aos planos de ensino vigentes.

Preliminarmente, algumas questões de base.

É fundamental considerar que, ensinar não é depositar na mente dos alunos o maior número possível de informações, mas sim facilitar o seu aprendizado. Um importante passo para isso é usar como apoio didático problemas que estejam próximos à sua realidade. São tácitas na Pedagogia as máximas “só se aprende o que é significativo” e “só se aprende para resolver problemas”.

Igualmente produtivo é o uso de modelos que representem de maneira qualitativa os fenômenos físicos que ocorrem nas estruturas, incentivando-se nos alunos o hábito da observação do entorno, da teorização sobre o observado, da crítica e da formulação de conclusões próprias que deverão ser encaminhadas para uma discussão com os colegas, sob orientação do professor.

Na avaliação, por sua vez, deve se atribuir igual importância tanto às informações retidas quanto ao processo de elaboração das mesmas. Lembrar que a parte matemática do dimensionamento é importante e não deve ser desprezada no ensino de estrutura; mas, deve ser colocada no momento certo, quando o aluno já houver dominado o conhecimento dos fenômenos físicos que regem as estruturas, e for capaz, então, de traduzi-los em linguagem numérica.

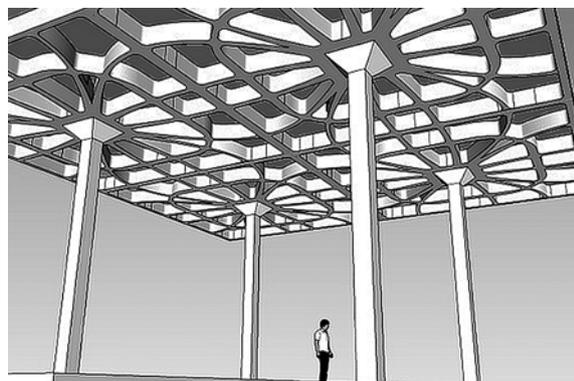
Postos tais preceitos, sugere-se que, para além dos conteúdos consagrados para o ensino de estrutura, e hoje, no Brasil, definidos pelas diretrizes curriculares nacionais, priorizem-se nas concepções curriculares, principalmente, o desenvolvimento das competências que serão ex-

igidas na vida profissional. Dentre essas, pontuam-se aqui a clareza sobre o desenvolvimento do projeto estrutural e a capacidade de construir contínua e conjuntamente o conhecimento.

Uma estrutura bem resolvida é o resultado de um grande esforço intelectual e físico. Sua realização pressupõe uma sequência de fases, geralmente definida por concepção estrutural, pré-dimensionamento, análise e detalhamento.

Entende-se por concepção estrutural a criação de um sistema capaz de manter em equilíbrio estável uma determinada forma arquitetônica. Nesta etapa, define-se a tipologia do sistema, a morfologia de seus elementos e, principalmente, os materiais estruturais.

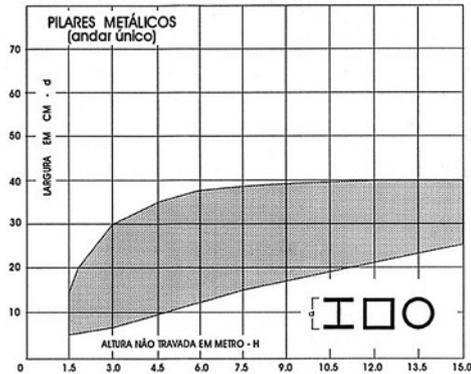
**Figura 13:** Tipologia estrutural de laje cogumelo em grelha de concreto armado com formas em argamassa armada adotado por Pier Luigi Nervi para a Fábrica Gatti em Roma (1951)



Fonte: Autora e Ricardo dos Santos da Silva

A fase de pré-dimensionamento serve para se ter uma avaliação das prováveis dimensões da estrutura, tanto para determinação do seu peso próprio como para verificação das interferências com os espaços arquitetônicos e as instalações. Para pré-dimensionamento dos elementos estruturais, os projetistas podem usar fórmulas empíricas, tabelas e gráficos que hoje estão disponíveis na literatura técnica e aplicados a uma grande diversidade de sistemas. No caso de uma estrutura que foge das soluções conhecidas, o cálculo expedito de uma versão mais simplificada do conjunto pode auxiliar na previsão das dimensões prováveis das seções resistentes dos elementos.

**Figura 13:** Gráfico de pré-dimensionamento de pilares em aço



Fonte: REBELLO, 2000

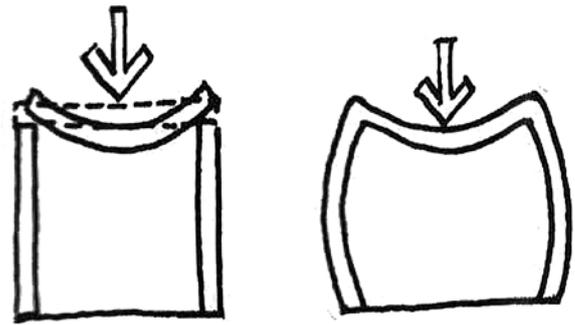
A análise estrutural constitui um momento importante de aprimoramento da concepção estrutural e pode ser dividida em duas etapas: a escolha do modelo teórico que melhor simule o comportamento real da estrutura e o desenvolvimento da análise numérica do modelo escolhido.

O processo de escolha do modelo teórico, também chamado de modelagem estrutural, é executado a partir de modelos reduzidos e protótipos físicos, ou modelos computacionais, e pode ser rápido ou não. Será rápido se a estrutura concebida implicar um modelo estrutural consagrado, por exemplo, uma treliça, cujo comportamento estático é bastante conhecido. No entanto, mesmo sistemas estruturais já explorados, quando analisados em conjunto com outros elementos pertencentes à nova estrutura concebida, podem resultar em modelos mais complexos e que ensejem novas interpretações.

Em um exemplo simples, considere-se o apoio de uma viga em dois pilares, o qual, dependendo da maneira como for projetado, poderá ser interpretado como viga bi-apoiada ou pórtico, minimamente. Qual deles adotar? Para a mesma forma externa, os dois sistemas podem ser aplicados; a variação ocorrerá no comportamento estático da estrutura, pois, no pórtico, vigas e pilares trabalham conjuntamente, possibilitando menores deformações. Por outro lado, deve-se garantir os vínculos engastados entre os elementos. (Figura 14)

Assim, não há receita pronta; há que se avaliar a conveniência de cada sistema para a obra em questão, considerando-se os aspectos construtivos, econômicos e logísticos. O fundamental é saber que o modelo que melhor representar a realidade será o mais adequado para a análise numérica, e com certeza levará a uma solução mais econômica e de melhor desempenho. Interpretações muito afastadas do comportamento real, ou mesmo erradas, podem levar ao super ou ao subdimensionamento da estrutura.

**Figura 14:** Diferença de comportamento estrutural entre viga bi-apoiada e pórtico

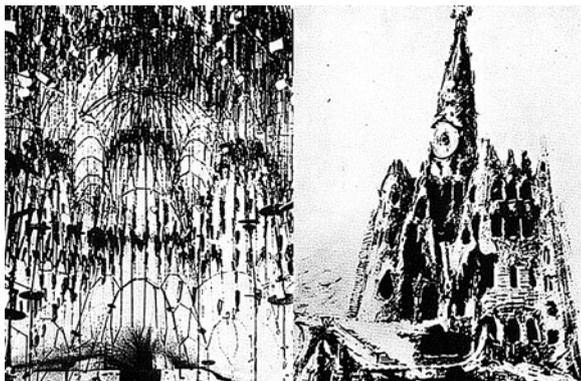


Fonte: Autores e Ricardo dos Santos da Silva

Na fase de modelagem da estrutura, a experiência do profissional, seu bom senso e intuição são de fundamental importância. Profissionais com pouca experiência cometem, muitas vezes, enganos básicos que, felizmente, são absorvidos pelos coeficientes de segurança. Uma formação acadêmica mais voltada para esse tipo de análise seria extremamente desejável. Entretanto, as escolas têm apresentado propostas didáticas mais voltadas para a aplicação de sistemas estruturais padronizados e isolados, e uma preocupação mais evidente com a análise numérica. Em geral, há pouca ou nenhuma atenção à questão da análise sistêmica da estrutura e da sua modelagem, desconsiderando-se a importância desses dois aspectos para a obtenção dos melhores resultados estéticos e econômicos, e que são atingidos com a compreensão mais precisa do comportamento real da estrutura.

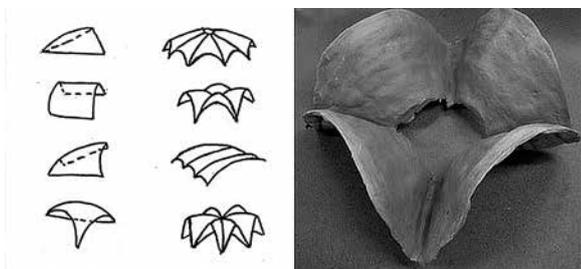
Vale ressaltar os avanços obtidos por projetistas que tinham nos métodos de modelagem uma crença inabalável, por exemplo, Antoni Gaudí e Heinz Isler, que simulavam suas complexas formas arquitetônicas através de modelos em malhas a tração carregadas como na situação real, cuja forma deformada era registrada após o carregamento em fotografias e desenhos, ou ainda em tecidos solidificados com gesso. As formas finais obtidas nos modelos eram aplicadas invertidas nas estruturas reais, predominantemente comprimidas.

**Figura 15:** Modelo funicular para estudo dos arcos e esboço feitos por Gaudí para a capela de Santa Coloma



Fonte: MASINI, 1977

**Figura 16:** Cascas propostas por Heinz Isler e modelo reduzido de estudo



Fonte: Desenho e foto dos autores

A análise numérica, atualmente, é elaborada através de programas de computadores extremamente sofisticados e complexos. Se por um lado isso significa agilidade, por outro pode alijar os usuários – arquitetos ou engenheiros – dos processos matemáticos e lógicos subjacentes ao funcionamento dos programas, incorrendo, eventualmente, em uma má interpretação dos resultados. O profissional inexperiente e sem uma visão crítica apurada, pode aceitar cegamente os resultados fornecidos pelo computador, cometendo erros grosseiros, que podem se traduzir em estruturas de natureza duvidosa ou com excessivo consumo de materiais.

É imprescindível que os recursos computacionais relacionados à concepção estrutural sejam vistos como meio privilegiado para a procura de soluções ótimas e inventividade, e não simplesmente uma ferramenta para diminuir o tempo do trabalho. Reside aí grande parte do sucesso de se fazer do projeto um prazeroso jogo de descobertas e construção do conhecimento, e não meramente uma tarefa a ser cumprida no menor período de tempo.

O detalhamento do projeto na forma de pranchas de desenho é a última fase do processo, mas nem por isso a menos importante. É famosa a frase que diz: “O desenho aceita tudo!”. Portanto, é necessário estar atento ao que se desenha e conhecer o ferramental de execução da estrutura disponível. Nem sempre um detalhe, mesmo bem

resolvido e desenhado, tem possibilidade de ser executado com as ferramentas existentes.

Igualmente relevante é o fato de que os desenhos dos detalhes devem considerar a possibilidade de transmissão dos esforços, tais como verificados no modelo teórico.

Finalmente, deve-se valorizar o aspecto estético dos detalhes executivos, seja em elementos aparentes ou ocultos. A evolução da engenharia de estruturas tem revelado que a qualidade de execução apresenta especial correlação com a beleza dos detalhes executivos dos elementos e vínculos. Um exemplo do gênero pode ser visitado no pavilhão de exposições do Museu Oscar Niemeyer, em Curitiba, onde visores transparentes permitem o conhecimento dos aparelhos de apoio articulados móveis em roletas de aço, originalmente protegidos por venezianas metálicas.

**Figura 17:** Pavilhão de Exposições Museu Oscar Niemeyer – Curitiba



Fonte: Foto da autora

**Figura 18:** Apoios com vínculos articulados móveis – MON Curitiba



Fonte: Foto da autora

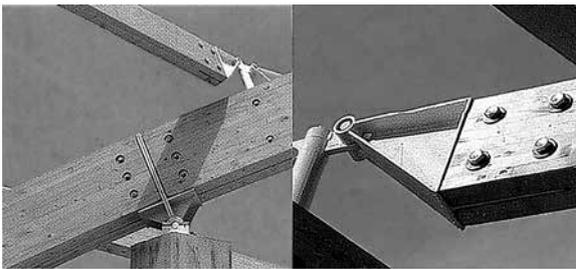
**Figura 19:** Apoio articulado móvel em roletes de aço – MON Curitiba



Fonte: Foto da autora

Também a obra de Renzo Piano traz referências frequentes sobre o enriquecimento formal da arquitetura pela precisão na definição dos vínculos e elementos estruturais, como mostrado na Figura 20.

**Figura 20:** Vínculos aparentes projetados por Renzo Piano, Shopping Center Bercy II, Paris



Fonte: PROCESS: Architecture, 1992

Sem dúvida, bons resultados estruturais e arquitetônicos dependerão de fatores tácitos como a experiência do profissional e seu repertório de soluções, mas também influirão o seu bom senso e – deveras importante! – a sua intuição.

De outro lado, e principalmente na etapa de formulação global do sistema estrutural, é necessário ponderar aspectos bastante objetivos, por exemplo, a economia e as facilidades construtivas, conjuntamente a outros nem sempre fáceis de objetivar, como estética e bem-estar.

Percebe-se, assim, que embora conceber uma estrutura arquitetônica possa ocorrer através de um procedimento bastante pessoal, subjetivo mesmo, a quantidade e a diversidade de variáveis por concatenar podem tornar o processo dificultoso para a geração de critérios objetivos e precisos para identificação de uma boa solução estrutural.

Neste sentido, tão importantes quanto os conteúdos teóricos e a clareza sobre as fases de desenvolvimento de um projeto estrutural, também capacitar o aluno para a discussão de ideias e a troca de experiências é um item primordial para

compor um plano de ensino, com vistas ao desenvolvimento da inventividade estrutural que será vital na vida profissional:

O verdadeiro trabalho criativo é um processo circular, e se um arquiteto se coloca como parte deste processo, ele atingirá a habilidade técnica para realizar em essência o que deve ser seu trabalho.

Criatividade é algo que pode ser atingido através do trabalho em equipe. A expressão “trabalhar em equipe” é outro mistério a respeito do qual muito se fala, mas que poucos praticam efetivamente. Para dizer a verdade, no universo da arquitetura há pouquíssima gente que emprega verdadeiramente o trabalho em equipe em sua atividade profissional. São raras as trocas verdadeiras que ocorrem entre arquitetos, engenheiros e construtores. Mas o trabalho em equipe é essencial para que projetos criativos ocorram. Trabalho em equipe exige habilidade em ouvir e dialogar, e eu não estou querendo ser moralista ao dizer isto. Mergulhe em um ciclo criativo – pense, desenhe, passe um tempo no canteiro de obras, e volte a pensar novamente. Se isto pode ser definido como criação, então não haverá nenhuma contradição entre arte e ciência, modernidade e tradição, liberdade e dever. (Renzo Piano, em “Monólogo”; PROCESS: Architecture, 1992, p. 8).<sup>5</sup>

Uma concepção estrutural criativa exige o diálogo com outras áreas, principalmente entre engenheiros, arquitetos e construtores. É preciso, também, que todos os envolvidos acreditem que o projeto é, em essência, um exercício de pesquisa, de descoberta e investigação conjunta. Os resultados serão, por consequência, de melhor qualidade técnica, artística e econômica.

Para ilustrar o processo de interação proposto, apresenta-se um estudo de caso de projeto, no qual um dos autores participou como engenheiro estrutural e onde houve uma intensa cooperação entre os profissionais envolvidos.

Trata-se do projeto de uma passarela pertencente ao conjunto de edificações que compõem uma residência situada em Barra do Una, localidade no litoral Norte do estado de São Paulo. São autores do projeto os arquitetos Newton Massafumi e Tânia Parma, e o partido adotado para a obra foi gerar o mínimo possível de intervenções no terreno, dado se tratar de área de preservação do bioma da Mata Atlântica. Assim, era fundamental que as edificações tivessem pouco contato com o solo, ou seja, as estruturas deveriam ser projetadas com poucos pontos de apoio.

Com vistas ao melhor resultado possível, estabeleceu-se um processo de trabalho conjunto entre os arquitetos e o engenheiro, em busca de uma solução absolutamente integrada de arquitetura e estrutura.

<sup>5</sup> Tradução livre da autora do texto original em inglês.

Embora ainda pouco frequente, devido a restrições eventuais de prazos e custos, não há dúvidas de que o processo de projetar, quando compartilhado entre esses dois profissionais, cria um resultado sinérgico que, sem dúvida, beneficia ambas as áreas, bem como o contratante da obra.

No caso, a passarela é o elemento integrador entre os diversos blocos da residência, e deveria seguir o mesmo critério de número mínimo de apoios adotado para o conjunto. Em vista dessas condicionantes, a mesma foi projetada inteiramente em madeira roliça certificada, tendo largura de 3,80 metros, altura variável em torno de 4,00 metros acima do solo e apoios espaçados a cada 6,30 metros. Para se criar uma superestrutura de passadiço bastante leve, os vãos de piso não ultrapassam 1,70 metros.

Atendendo a todos os requisitos do programa, a solução estrutural adotada foi de pilares com ramificações, semelhantes a árvores. Desta maneira, apesar do número reduzido de pontos de apoio no solo, junto ao piso a quantidade de linhas de apoio é generosa.

**Figura 21:** Passarela entre blocos da residência



Fonte: Foto do autor

**Figura 22:** Estrutura de apoio do passadiço



Fonte: Foto do autor

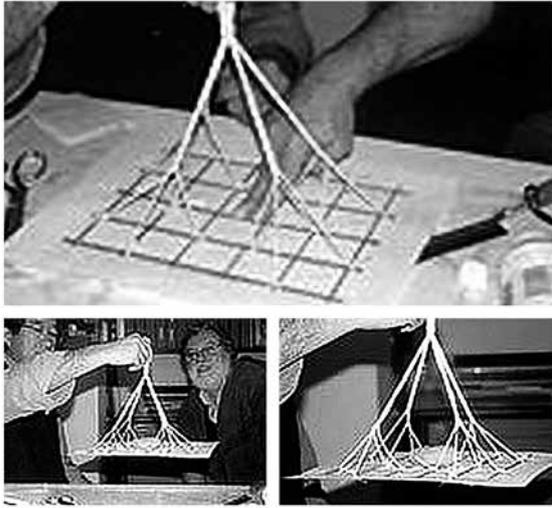
Aparentemente simples, o sistema adotado tem uma questão de base a solucionar: qual a inclinação dos “galhos” estruturalmente mais adequada para os pilares? A resposta está associada à ideia de que a estrutura é o caminho das forças até seu destino último – o solo. A disposição dos “galhos” da passarela deve ser tal que o percurso trilhado pelas cargas até a fundação seja o mais curto possível.

Para se obter essa disposição, lançou-se mão de um ensaio simples com modelo reduzido qualitativo <sup>6</sup>, no qual os “galhos” e “tronco” dos pilares foram simulados com barbantes unidos e untados com cola branca (Figura 23). Em seguida, a trama montada é entregue ao efeito de carregamento de um pequeno peso, quando então, verifica-se a abertura dos ângulos entre os “galhos” que configura a condição de equilíbrio final, com os elementos todos tracionados. Nesta situação, a estrutura é fotografada, e, posteriormente, a foto é reproduzida em desenho de forma invertida revelando a posição que os “galhos” deverão assumir na estrutura real, com as barras todas comprimidas.

<sup>6</sup> Os modelos físicos podem ser entendidos como maquetes onde se imita o comportamento real da estrutura, ou ainda, como uma peça ou conjunto de peças que por suas características tenham analogia com o comportamento real. Também entendidos como modelos experimentais, servem a especulações científicas através da repetição de determinadas situações o comportamento de um fenômeno. (REBELLO, 1991)

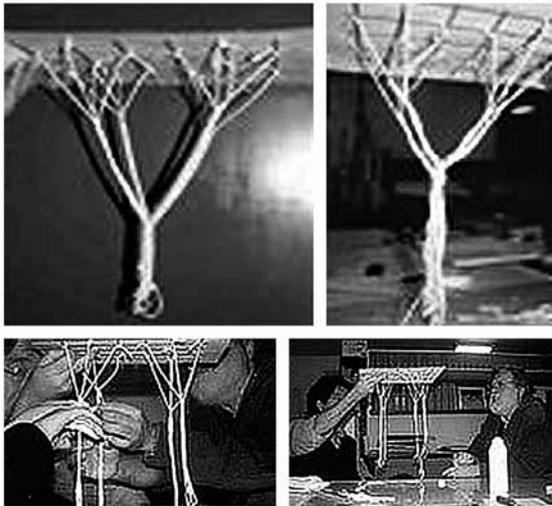
Com esse ensaio foi possível se obter o caminho ótimo de transferência das forças entre todos os elementos estruturais, e, portanto, a solução mais econômica e de melhor desempenho estático.

**Figura 23:** 1ª. etapa do ensaio – modelo a tração



Fonte: Foto do autor

**Figura 24:** 2ª. etapa do ensaio – modelo a compressão e situação final da estrutura



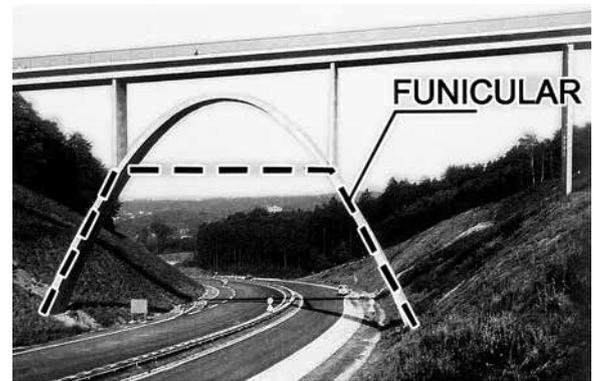
Fonte: Foto do autor

Infelizmente, não é sempre que procedimentos semelhantes a esse acontecem. Muito mais frequente do que se imagina é o desencontro de objetivos entre arquitetos e engenheiros de estrutura.

A obra de uma passarela construída na Alemanha é considerada pela literatura da área como uma das obras mais equivocadas em termos de concepção estrutural. Isso porque sua forma arquitetônica em arco é incompatível com o carregamento pontual gerado pelos pilares de apoio do tabuleiro da passarela. Sabe-se que um bom arco, ou seja, aquele em que predomina o esforço

de compressão, deve ter a forma do funicular das cargas que atuam sobre ele. Neste caso, duas cargas resultariam em um funicular trapezoidal, a qual seria, portanto, a forma ideal para a estrutura de apoio desenvolver apenas compressão simples. (Figura 25)

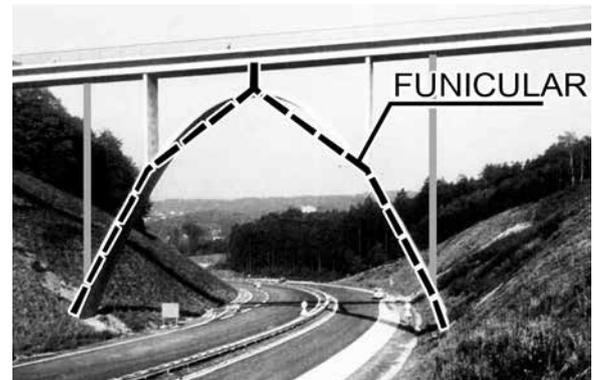
**Figura 25:** Funicular trapezoidal correspondente ao carregamento no arco



Fonte: WITTFOHT, 1977; autora e Ricardo dos Santos da Silva

Claro é que, do ponto de vista estético, a passarela com estrutura de apoio trapezoidal seria bem menos interessante do que com a forma curva. Mas, um bom diálogo entre arquiteto e engenheiro poderia transformar o resultado, procurando-se uma melhor relação entre a estrutura do passadiço e o arco, por exemplo, com o aumento da quantidade de apoios resultando em um carregamento cujo funicular se aproximaria da forma arquitetônica desejada. (Figura 26)

**Figura 26:** Funicular correspondente a maior distribuição do carregamento sobre o arco



Fonte: WITTFOHT, 1977; autora e Ricardo dos Santos da Silva

Quando se trata de estruturas complexas e que fogem das soluções já consagradas, caso das obras mencionadas acima, o uso de modelos reduzidos qualitativos, inicialmente, e quantitativos em um segundo momento, é de fundamental importância na análise estrutural. Algumas vezes, dadas a importância da obra e a disponibilidade financeira intensiva, a construção de protótipos em escala real serve como fonte confiável para

estudo do comportamento real da estrutura e para verificação das hipóteses adotadas na análise teórica. Tais estudos constituirão referências para análises teóricas de estruturas futuras que apresentem semelhança com aquela verificada no protótipo.

Eis aí, assim, o que se acredita ser um efetivo contributo para as formulações curriculares relacionadas ao ensino de estrutura para arquitetos, e, sem dúvida, também para engenheiros.

#### 4. Referências

COELHO, Frederico (org.). Museu de Arte Moderna: arquitetura e construção. Cobogó, Rio de Janeiro, 2010.

LEITE, Maria Amélia D. F. D' A. O Ensino de Tecnologia em Arquitetural e Urbanismo, Dissertação de Mestrado, FAUUSP, São Paulo, 1998.  
- MASINI, Lara V. Antoni Gaudí. Sansoni editore, Firenze, 1977

MÓDULO. Edição 89/90; 70 – 71, jan/ fev/ mar/ abril, 1986.

PETIT, Jean. Niemeyer, poeta da arquitetura. Fidia Edizione d'Arte, Lugano, 1995.

PROCESS : Architecture. Renzo Piano Building Workshop: In search of a balance. Tokio, 1992, nº 100.

REBELLO, Yopanan C. P A Concepção Estrutural e a Arquitetura. Editora Zigurate, São Paulo, 2000.

REBELLO, Yopanan C. P Contribuição ao ensino de estruturas em escolas de Arquitetura, Dissertação de Mestrado, FAUUSP, São Paulo, 1991.

REBELLO, Y. C. P.; LEITE, M. A. D. F. O engenheiro de estruturas das curvas de Brasília. Revista AU – Arquitetura e Urbanismo, Editora PINI, São Paulo, nº 165, dezembro 2007

SHARP, D. História em imágenes de la Arquitectura del Siglo XX. Editorial Gustavo Gili S. A., Madri, 1972.

WITTFOHT, Hans. Puentes – ejemplos internacionales. Gustavo Gili, Barcelona, 1977.