



MODELOS QUALITATIVOS PARA PRÉ-AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS: INSTRUMENTO PARA O ENSINO DE ESTRUTURAS

Bárbara Siqueira – barbara.siqueira7@gmail.com

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT,
Rua Roberto Simonsen, 305, Centro Educacional
CEP: 19060-900 – Presidente Prudente – São Paulo

Cesar Fabiano Fioriti – fioriti@fct.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT,
Departamento de Planejamento Urbanismo e Ambiente
Rua Roberto Simonsen, 305, Centro Educacional
CEP: 19060-900 – Presidente Prudente – São Paulo

Fernando Sérgio Okimoto – okimotofs@fct.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT,
Departamento de Planejamento Urbanismo e Ambiente
Rua Roberto Simonsen, 305, Centro Educacional
CEP: 19060-900 – Presidente Prudente – São Paulo

Resumo: *O trabalho teve como objetivo geral o aprimoramento de uma metodologia experimental alternativa para validar alguns tipos de modelos qualitativos e que consiste basicamente de comparações utilizando imagens digitalizadas, desenvolvido por (OLIVEIRA, 2008). Para isso foram realizados ensaios em modelos qualitativos de vigas, pilares e pórticos planos, onde posteriormente esses ensaios foram comparados com os resultados obtidos a partir de simulações computacionais dos mesmos sistemas estruturais em software comercial. Os resultados comparados foram as deformadas dos sistemas estruturais sob carregamento previamente definido, onde tais resultados experimentais permitiram constatar que o comportamento dos modelos qualitativos utilizados é realmente similar ao comportamento de uma estrutura real.*

Palavras-chave: *Modelos qualitativos, Maquete estrutural, Análise estrutural, Ensino*

1. INTRODUÇÃO

O uso de modelos qualitativos como ferramenta de auxílio no processo de ensino-aprendizagem de estruturas é uma atividade que vem sendo desenvolvida há mais de 70 anos. 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 (HARRIS & SABNIS, 1999).

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 borracha, pois normalmente não necessitam de instrumentação, e o comportamento das estruturas é analisado visualmente por meios de deformações acentuadas (SANTOS, 1983).

De maneira paralela, sabe-se que 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. Afinal, "foi pela intuição, uma das qualidades mais valiosas da inteligência humana, que desde a mais remota antiguidade, o homem conseguiu fazer as suas construções estáveis. Naturalmente, tomando para o modelo as admiráveis e sábias soluções da natureza, que ainda hoje, sugerem os sistemas estruturais modernos" (POLILLO, 1968). Sendo de extrema importância que o profissional envolvido neste processo, seja ele o engenheiro ou o arquiteto, tenha a habilidade de visualizar e compreender o comportamento das estruturas em diferentes circunstâncias.

Pensando nisso, este trabalho reuniu as três metodologias de ensino: a teoria, a prática e a alta tecnologia, com a finalidade de levar o aluno a desenvolver sua sensibilidade, visando à compreensão do comportamento das estruturas, cultivar sua imaginação criadora, tendo como guia a intuição, e principalmente a sua autoconfiança, ao comprovar os resultados de forma mais precisa possível com os softwares oferecidos pela mais alta tecnologia. Assim, unimos o passado intuitivo e sensível do profissional, ao presente teorizado pelo mesmo e ao futuro tecnológico de precisão. Com isso, estaremos auxiliando na formação de profissionais muito mais aptos, precisos e confiantes a conceber estruturas.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo geral o aprimoramento de uma metodologia experimental alternativa para validar alguns tipos de modelos qualitativos e que consiste basicamente de comparações utilizando imagens digitalizadas, desenvolvido por (OLIVEIRA, 2008). Para isso, foram realizados ensaios em modelos qualitativos de vigas, pilares e pórticos planos, onde posteriormente esses ensaios foram comparados com os resultados obtidos a partir de simulações computacionais dos mesmos sistemas estruturais em software comercial.

2. METODOLOGIA

Durante o trabalho foram desenvolvidas atividades divididas em quatro etapas, esquematizadas na Figura 1 e descritas na sequência:

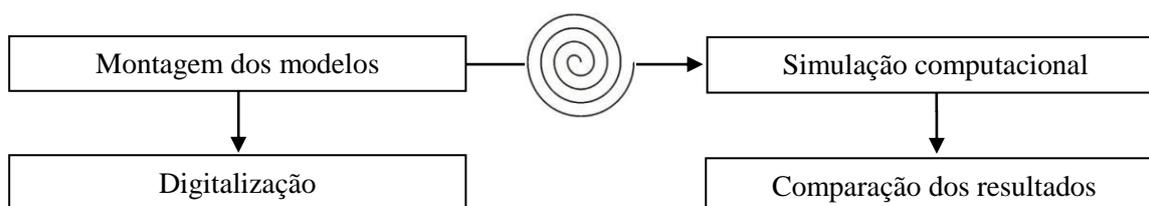


Figura 1 – Etapas desenvolvidas no trabalho.

• 1ª Etapa: Montagem dos modelos qualitativos, onde foi utilizada espuma com seção transversal quadrada, além de cola para fixação das partes. Os materiais constituintes dos modelos foram, basicamente, espuma, bolas de isopor, cola e madeira. Também foram utilizados alguns artifícios como componentes dos modelos produzidos, trata-se de acessórios que serviram como elementos rígidos para a conexão/ancoragem das peças de ligação quando necessários. Os modelos qualitativos foram montados conforme a Tabela 1;

Tabela 1 – Tipos de modelos qualitativos utilizados no trabalho.

Sistemas estruturais	Características dos modelos qualitativos
Pilares	Biapoiado com carga axial de compressão
	Engastado e apoiado com carga axial de compressão
	Biengastado com carga axial de compressão
	Engastado e livre com carga axial de compressão
Vigas	Biapoiada com carga vertical concentrada no meio do vão
	Engastada e apoiada com carga vertical concentrada no meio do vão
	Biengastada com carga vertical concentrada no meio do vão
	Engastada e livre com carga vertical concentrada na extremidade livre
Pórticos	Plano com as ligações de base engastadas submetido à carga vertical concentrada no meio do vão.
	Plano com as ligações de base engastadas submetido à carga horizontal concentrada na parte no nó superior

• 2ª Etapa: Digitalização das imagens, onde foi utilizado um aparato instrumental simples (Figura 2) composto de uma câmera digital com tripé. Para melhorar a qualidade das imagens, utilizou-se um fundo de cor preta para aumentar o contraste com as peças dos modelos qualitativos e eliminar as sobras geradas pelas estruturas sobre a base e o fundo. Portanto, todo manuseio dos modelos, incluindo a aplicação do carregamento, foi realizado manualmente. Nesta etapa foi feita a preparação da instrumentação utilizada e a digitalização das imagens dos modelos. Após a montagem dos modelos, foram aplicadas forças na direção desejada gerando as estruturas deformadas. As imagens foram digitalizadas para posterior avaliação e comparação com a simulação computacional;



Figura 2 – Aparato instrumental e materiais utilizados na montagem dos modelos qualitativos.

- 3ª Etapa: Simulação computacional, onde foram feitas a modelagem e a simulação do mesmo sistema estrutural no software SAP2000. Com este programa foi possível simular estruturas com comportamentos lineares através de análises estáticas. A partir do programa foi gerada uma imagem da deformada de cada estrutura modelada. Com o objetivo de simplificar a simulação computacional e aproximá-la ao máximo das maquetes estruturais, optou-se por utilizar uma única seção transversal, quadrada, para todos os sistemas estruturais. É válido ressaltar, com relação ao sistema estrutural pilar, que por ser o objetivo didático deste trabalho ilustrar o comportamento de pilares sofrendo o efeito de flambagem, e em função dos softwares disponíveis não terem essa capacidade de simular e de compreender tal fenômeno, foi então introduzida uma carga horizontal ou momento de 2ª ordem simulando exatamente o comportamento de flambagem do sistema em questão, atendendo assim, a um dos objetivos propostos;
- 4ª Etapa: Comparação dos resultados a partir das imagens digitalizadas dos modelos qualitativos e os obtidos pelos modelos computacionais. Para garantir uma melhor visualização dos resultados digitalizados, as imagens correspondentes de cada sistema estrutural (vigas, pilares e pórticos), foram colocadas lado a lado. Esta técnica de apresentação permitiu a visualização das duas imagens isoladamente, estabelecendo uma melhor compreensão e comparação dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação dos resultados e consequente análise foram realizadas a partir das imagens entre os resultados obtidos pelos modelos qualitativos e os obtidos pelos modelos computacionais.

3.1. Modelos de vigas

- Viga biapoçada (Figura 3):

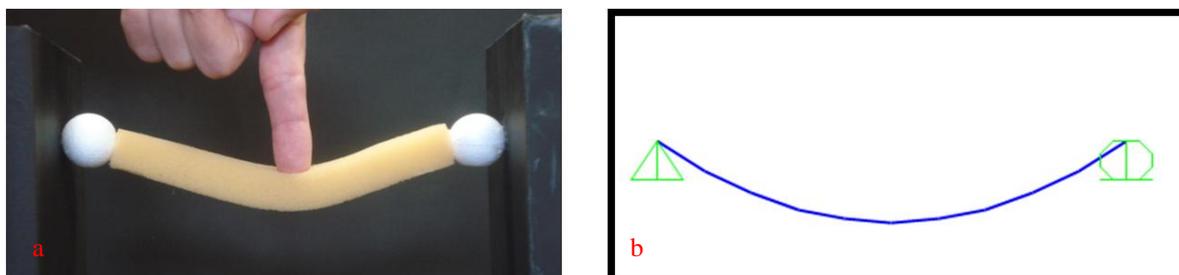


Figura 3 – Viga biapoçada: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

A deformada da viga biapoçada apresentada pela maquete estrutural apresenta a mesma configuração que a simulação computacional, o que pode ser verificado na Figura 3, onde os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento das vigas em análise. Tal fato é facilmente notado principalmente através das flechas geradas, estas, que já começam a se deformar a partir das extremidades das vigas devido à vinculação das mesmas, ou seja, por se tratar de uma viga biapoçada, e por isso apresentar um apoio móvel – que é capaz de impedir o movimento do ponto vinculado do corpo numa direção pré-determinada –, e outro apoio fixo – que impede o movimento em todas as direções, permitindo somente a rotação dos elementos –, a viga fica mais suscetível a deformação.

- Viga apoiada e engastada (Figura 4):

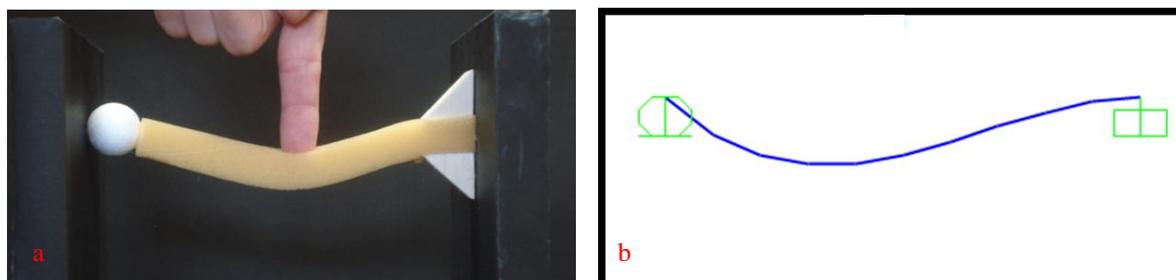


Figura 4 – Viga apoiada e engastada: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

Neste caso podemos mais uma vez identificar a similaridade das deformações observando a Figura 4, onde os eixos coincidem ao longo do comprimento das vigas. Por esta ser uma viga apoiada e engastada, podemos interpretar e analisar sua deformação através dos mesmos motivos apresentados anteriormente com a viga biapoçada. Entretanto, as vinculações do elemento em questão – um apoio móvel e um engaste, este último, que é capaz de impedir qualquer movimento do ponto vinculado do corpo e o movimento de rotação do corpo em relação a esse ponto – são diferentes, o que permite verificar que a deformação é mais acentuada quanto maior sua proximidade com o apoio móvel, enquanto que a proximidade com o engaste minimiza a deformação do sistema, por isso esta é a configuração de tal deformada.

- Viga biengastada (Figura 5):

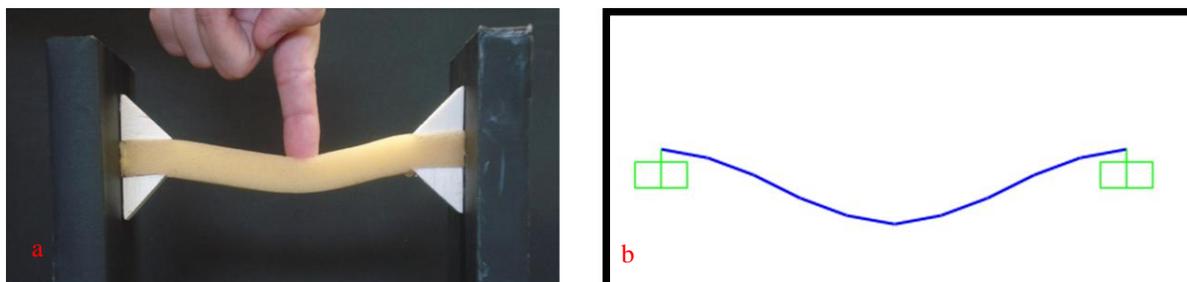


Figura 5 – Viga biengastada: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

A viga biengastada é caracterizada por apresentar o engaste nas suas vinculações. Como já mencionado, o engaste minimiza as deformações de um sistema estrutural, por isso, a viga apresenta uma menor deformação quando comparada com a viga biapoçada, por exemplo. A flecha desse sistema é mais acentuada no “meio” da viga, enquanto que nas extremidades a deformação é minimizada devido aos engastes. Todo esse comportamento pode ser verificado tanto através da maquete estrutural (Figura 5a), quanto pela simulação computacional (Figura 5b). Com isso, é possível observar a similaridade e eficácia dos modelos apresentados.

- Viga em balanço (Figura 6):

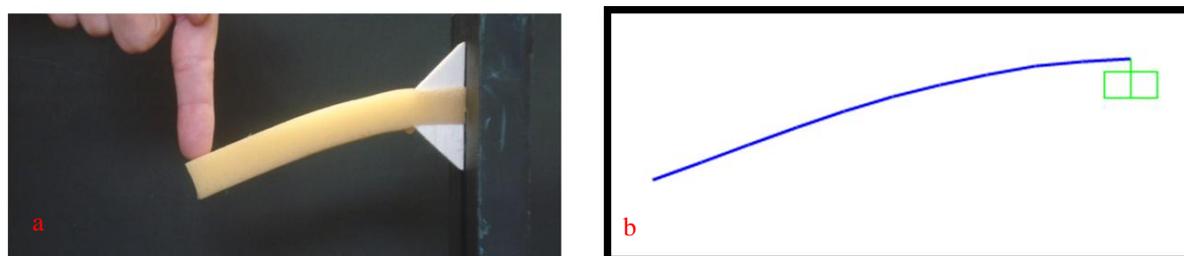


Figura 6 – Viga em balanço: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

Podemos verificar que a deformação da maquete estrutural (Figura 6a) se assemelha muito com a simulação computacional (Figura 6b). O tipo de vinculação que este sistema implica, permite que quanto maior for a proximidade com o bordo livre, mais acentuada é a deformação, em contrapartida, o posicionamento mais próximo ao engaste diminui a mesma.

3.2. Modelos de pilares

- Pilar biapoçado (Figura 7):

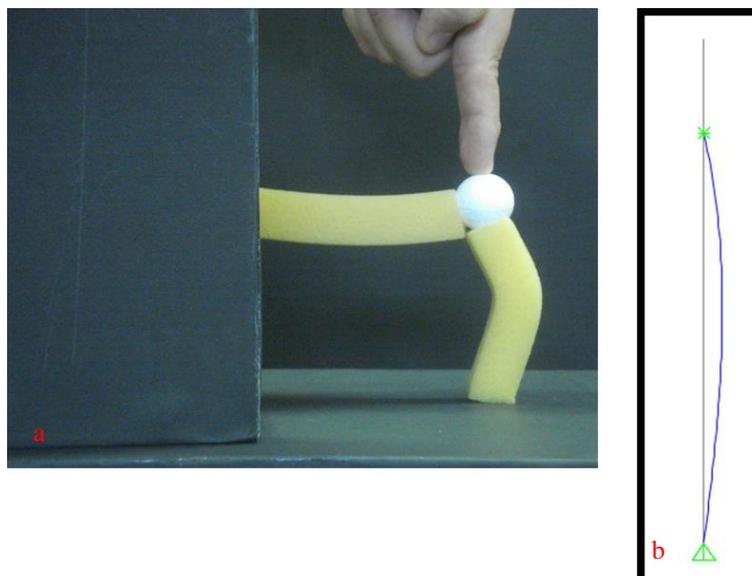


Figura 7– Pilar biapoiado: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

A deformada do pilar biapoiado apresentado pela maquete estrutural apresenta a mesma configuração que a simulação computacional. Isto é facilmente verificado quando observamos a Figura 7, onde os eixos deformados coincidem ao longo de todo o comprimento dos pilares em análise. Este fato é percebido principalmente através das flambagens ocasionadas. Tal fenômeno começa a se deformar a partir das extremidades dos pilares devido à vinculação dos mesmos, ou seja, o pilar em questão apresenta um apoio móvel e outro apoio fixo, sendo assim, fica mais suscetível a deformação. A compressão também pode ser nitidamente observada com a diminuição do comprimento do pilar.

- Pilar engastado e apoiado (Figura 8):

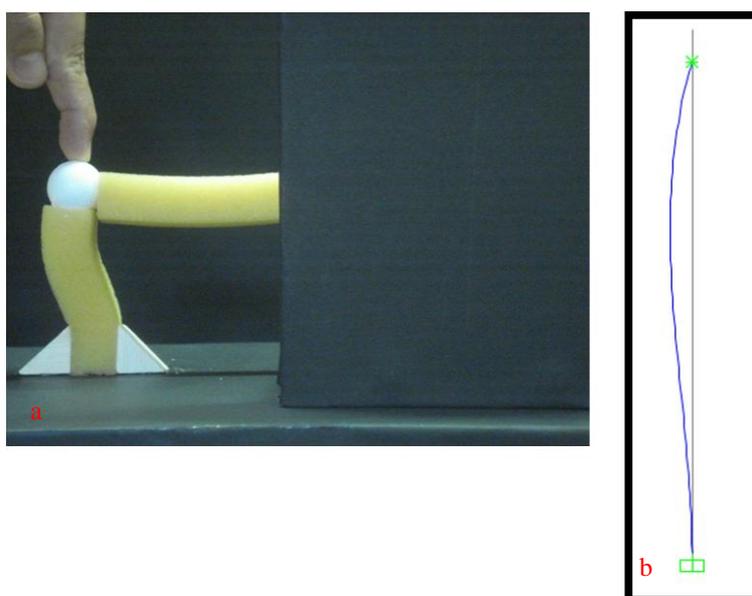


Figura 8 – Pilar engastado e apoiado: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

É possível identificar a similaridade das deformações quando observamos a Figura 8, onde os eixos também coincidem ao longo do comprimento dos pilares. Por se tratar de um pilar engastado e apoiado, podemos analisar sua deformação através dos mesmos motivos apresentados anteriormente com o pilar biapoiado. Entretanto, as vinculações do elemento em questão – um apoio móvel e um engaste – são diferentes, o que nos permite verificar que a deformação é mais acentuada à medida que se aproxima do apoio móvel, enquanto que a proximidade com o engaste minimiza a deformação deste sistema estrutural. Outro fator a ser observado é que por ser um apoio móvel na extremidade superior dos pilares, podemos observar o deslocamento dos mesmos devido à força de compressão neles aplicadas.

- Pilar biengastado (Figura 9):

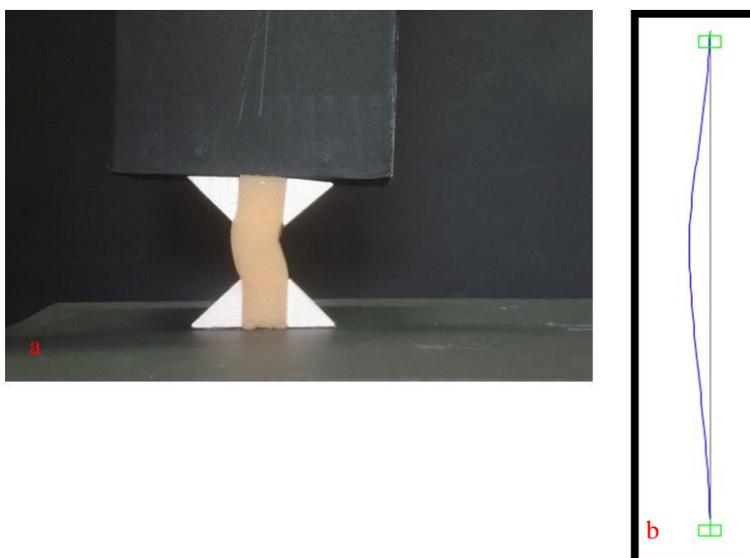


Figura 9 – Pilar biengastado: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

O pilar biengastado apresenta uma menor deformação quando comparado ao pilar biapoiado e ao pilar com apoio e engaste. O fenômeno da flambagem gerado neste caso é mais acentuado no “meio” do pilar, enquanto que nas extremidades a deformação é minimizada devido à presença dos engastes. A Figura 9 demonstra o comportamento dos pilares biengastados após a aplicação de carga. Nota-se que neste modelo de pilar não ocorre deslocamento pela compressão, fato este mais uma vez ocasionado pelo processo de vinculação. Com isso, é possível observar a similaridade e eficácia dos modelos apresentados.

- Pilar engastado e livre (Figura 10):

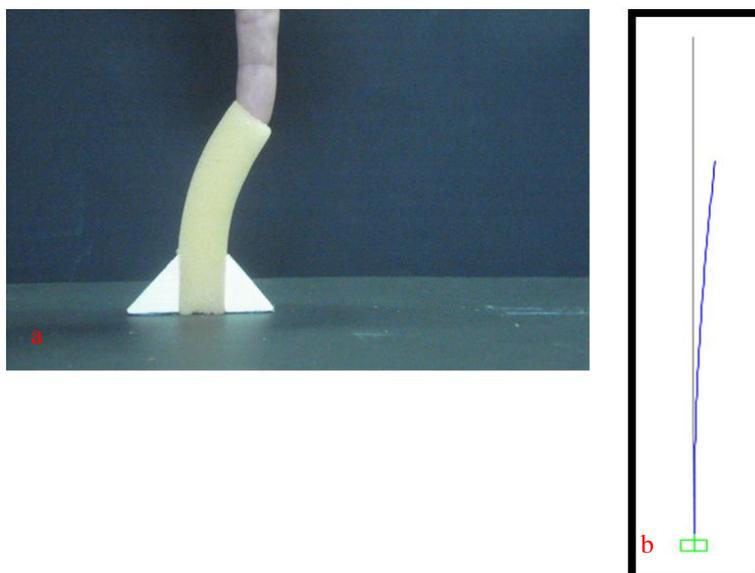


Figura 10 – Pilar engastado e livre: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

Podemos verificar que a deformação da maquete estrutural da Figura 10a se assemelha muito com a simulação computacional da Figura 10b. O tipo de vinculação que este modelo de pilar implica, permite que quanto maior for a proximidade com a extremidade livre, mais acentuada é a deformação, em contrapartida, o posicionamento mais próximo ao vínculo engaste diminui a mesma. Nota-se também o efeito da compressão nos pilares em ambos os modelos.

3.3. Modelos de pórticos

- Pórtico plano submetido à carga vertical (Figura 11):

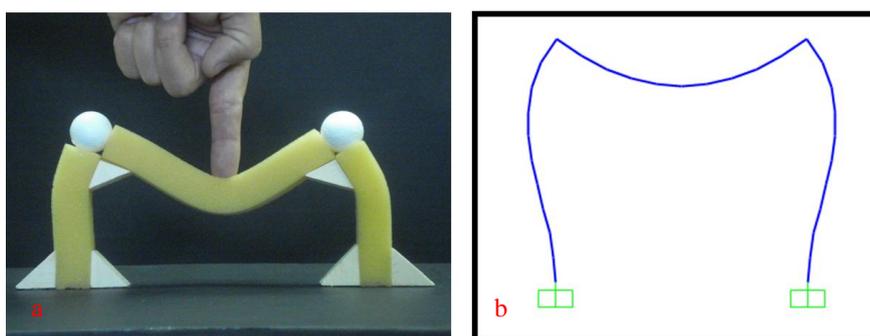


Figura 11 – Pórtico plano com as ligações de base engastadas submetido à carga vertical concentrada no meio do vão: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

- Pórtico plano submetido à carga horizontal (Figura 12):

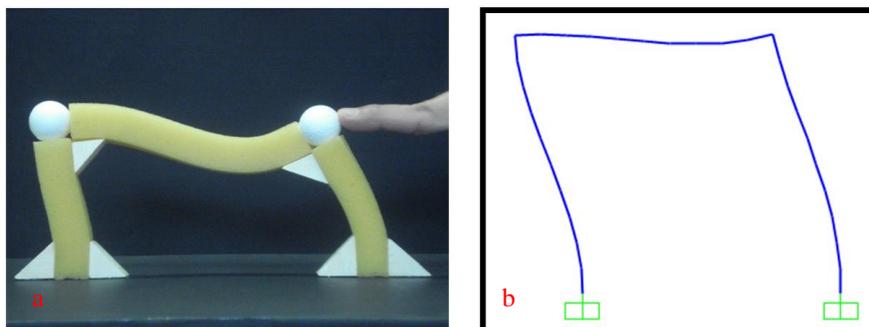


Figura 12 – Pórtico plano com as ligações de base engastadas submetido à carga horizontal concentrada na parte no nó superior: a) maquete estrutural; b) simulação computacional.

O pórtico plano em questão é de modelo único, sendo que a diferença entre eles está no ponto onde a carga foi aplicada. O fato de o pórtico ser um elemento que apresenta todas as ligações rígidas faz com que suas deformações sejam minimizadas, pois quando solicitamos a viga do elemento com a carga concentrada no meio do vão (Figura 11), a mesma não se deforma sozinha, mas “pede” auxílio para os pilares que se deformam também. O mesmo acontece quando o sistema é submetido à carga horizontal concentrada na parte do nó superior (Figura 12), onde também todos os elementos envolvidos são solicitados, e assim a deformação é minimizada, pois agora são os pilares que “pedem” ajuda a viga que por sua vez também se deforma. Isto pode mostrar a similaridade e eficácia dos modelos de pórticos apresentados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento adquirido de forma lógica de experimentação é extremamente importante para a formação de qualquer profissional. Os resultados obtidos neste trabalho comprovam a eficiência dos modelos qualitativos e de maquetes virtuais para a pré-avaliação do comportamento de sistemas estruturais. Os modelos qualitativos mostraram-se bastante eficientes quando comparados aos modelos computacionais elaborados, pois permitiram a avaliação do comportamento de diferentes sistemas estruturais (pilares, vigas e pórticos) sob diversos aspectos, levando-se em conta conceitos de estabilidade estrutural, visualização dos deslocamentos e das deformadas, comportamento quanto ao tipo de carregamento e a influência da forma e do arranjo dos elementos. Todos os modelos qualitativos elaborados possuem praticidade de montagem e manuseio, tanto manualmente, quanto na utilização do software, além de apresentarem fácil compreensão do seu comportamento, e assim, nos permite vivenciar as relações do sistema estrutural com a natureza e seus funcionamentos. Este trabalho conseguiu unir as três metodologias de ensino: a teoria, a prática e a alta tecnologia, alcançando o objetivo de levar o aluno a desenvolver sua sensibilidade, visando à compreensão do comportamento das estruturas, cultivar sua imaginação criadora, tendo como guia a intuição e principalmente a sua autoconfiança, ao comprovar os resultados de forma mais precisa possível com os softwares oferecidos pela mais alta tecnologia. Sendo assim, unimos o passado intuitivo e sensível do profissional, ao presente teorizado pelo mesmo e ao futuro tecnológico de precisão. 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. Tornamos assim, o profissional de engenharia e arquitetura, mais apto para conceber uma estrutura.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão da bolsa de iniciação científica a autora.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HARRIS, H. G.; SABINS, G. M. Structural modeling and experimental techniques. 2^a ed. Florida: CRC Press LLC, 1999, il.

OLIVEIRA, M. S. de. UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, Engenharia Civil. Modelo estrutural para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas, 2008. 172p, il. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

POLILLO, A. [Sem título]. Anais: Encontro de Professores de Estrutura para Escolas de Arquitetura. São Paulo: FAU/USP, 1974.

SANTOS, J. A. dos. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Escola Politécnica. Sobre a concepção, o projeto, a execução e a utilização de modelos físicos qualitativos na engenharia de estruturas, 1983. il. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

QUALITATIVE MODELS FOR PRE-ASSESSMENT OF THE BEHAVIOR OF STRUCTURAL SYSTEMS: INSTRUMENT FOR TEACHING OF STRUCTURES

***Abstract:** The study main objective the improvement of an alternative experimental methodology to validate certain types of qualitative models and consisting primarily of comparisons using scanned images, developed by (OLIVEIRA, 2008). To test this qualitative models of beams, columns and porticos plans where these trials were subsequently compared with the results obtained from computer simulations of the same structural systems in commercial software were performed. The results were compared deformed structural systems under predetermined loading, where such experimental results demonstrated that the qualitative behavior of the models used is actually similar to the behavior of a real structure.*

***Key-words:** Qualitative models, Structural mockup, Structural analysis, Education*