



DESMODELAGEM ESTRUTURAL – ANÁLISE HIERÁRQUICA ESTRUTURAL APLICADA A EDIFÍCIOS ALTOS

Gabriel Castanho Ferro Costa – gabriel.ferro.costa@hotmail.com
Universidade Federal do Paraná
Rua Evaristo F. F. da Costa, 418
80050-540 – Curitiba – Paraná

Nathanael Montes da Silva – nathanaelmontes@hotmail.com
Universidade Federal do Paraná
Rua Evaristo F. F. da Costa, 418
80050-540 – Curitiba – Paraná

Elvidio Gavassoni Neto – gavassoni@ufpr.br
Universidade Federal do Paraná
Rua Evaristo F. F. da Costa, 418
80050-540 – Curitiba – Paraná

Resumo: *O presente artigo descrever o curso de Desmodelagem Estrutural - Hierarquia Aplicada a Edifícios Altos, realizado pelo PET Engenharia Civil UFPR, durante a Semana Acadêmica de Engenharia Civil na Universidade Federal do Paraná. Em grande parte das escolas de Engenharia Civil do Brasil, a Análise hierárquica é feita a partir de estruturas unidimensionais, seguidas de estruturas superficiais e volumétricas. Nesse curso, essa ordem foi invertida para auxiliar os estudantes na visualização global de edifícios altos e sua resposta estática a carregamentos de vento e gravitacional. Para a realização desse curso foram utilizados dispositivos didáticos, como recursos audiovisuais, moldes em cartolina, corpos de prova de concreto, blocos de esponja, Kits Estruturais Mola e o Software Ftool 3.01. Dessa forma, analisou-se a possibilidade de inserção de uma nova abordagem para o ensino de Análise Estrutural nos cursos de Engenharia Civil, e se isso efetivamente facilita a compreensão global do comportamento de edifícios altos.*

Palavras-chave: Visualização global, estruturas unidimensionais, estruturas superficiais, estruturas volumétricas.

1. INTRODUÇÃO

A Engenharia Estrutural, área que lida com o dimensionamento, o projeto, construção, a reabilitação, o monitoramento, a supervisão e a demolição de estruturas, possui imensa importância para a formação do profissional de Engenharia Civil (TOMAZ, 2016). Nesse contexto, o ensino da Análise Estrutural faz-se necessário para o entendimento da estabilidade estrutural, dos deslocamentos e das configurações deformadas, da influência da forma, da resposta ao carregamento, das condições de contorno e dos demais conceitos abordados nas disciplinas de Engenharia Estrutural (OLIVEIRA, 2008).

Na Universidade Federal do Paraná, o ensino da Análise Estrutural é feito, como na maioria das escolas de Engenharia Civil do país. Parte-se de elementos específicos para o

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



UNISOCIESC
Educação e Tecnologia

Promoção



ABENGE
Associação Brasileira de Educação em Engenharia



Sistema Estrutural como um todo. Como introdução ao conhecimento, são estudadas estruturas lineares ou unidimensionais, as quais formam reticulados planos ou espaciais, seguidas de estruturas superficiais ou bidimensionais e estruturas volumétricas ou tridimensionais. Porém, com o avanço da disciplina, os alunos encontram dificuldades no reconhecimento do comportamento das estruturas volumétricas quando submetidas a carregamentos espaciais, bem como na junção dos elementos estudados em separado para a composição final de uma estrutura complexa.

Anualmente é realizada, no curso de Engenharia Civil da UFPR, a Semana Acadêmica de Engenharia Civil. Para criar oportunidades e despertar o interesse dos estudantes pelas diversas áreas desse ramo, são ministrados cursos e palestras, além da realização de visitas técnicas. A adesão dos alunos é de tamanha importância que, durante a Semana Acadêmica, as aulas são suspensas, evitando a sobrecarga de atividades e possibilitando a adesão e participação dos discentes nas várias atividades propostas.

Como uma tentativa de introduzir novas abordagens no ensino da Análise Estrutural, o Programa de Educação Tutorial (PET) Engenharia Civil realizou, na Semana Acadêmica de Engenharia Civil de 2017, o curso “*Desmodelagem Estrutural - Análise Hierárquica Estrutural Aplicada a Edifícios Altos*”. O objetivo do presente trabalho é relatar as razões pelas quais o curso foi realizado, a metodologia utilizada, os conceitos apresentados e os resultados.

2. METODOLOGIA

O Curso foi denominado “*Desmodelagem Estrutural - Análise Hierárquica Aplicada a Edifícios Altos*”, pois visou o ensino da Análise Hierárquica Estrutural de forma reversa, ou seja, ministrando inicialmente estruturas volumétricas, seguidas de estruturas superficiais e unidimensionais. Foram designados dois instrutores integrantes do PET Engenharia Civil e a realização ocorreu no dia 10/05/2017, com início às 10h00, teve duração de duas horas sendo ministrado no bloco didático de Engenharia Civil da UFPR. Foram disponibilizadas 20 vagas para estudantes da graduação.

Inicialmente, estruturas sólidas maciças foram apresentadas como representação de estruturas volumétricas ou tridimensionais, momento no qual foram utilizados corpos de prova de concreto, blocos de espuma e moldes de cartolina. Em seguida, as estruturas superficiais ou bidimensionais foram simuladas também por moldes de cartolina, e, para o ensino de estruturas lineares ou unidimensionais, foram utilizadas 10 unidades do Kit Mola — modelo estrutural de alta deformabilidade desenvolvido pelo arquiteto Márcio Siqueira de Oliveira, que permite a visualização do comportamento estrutural pelo lado qualitativo do fenômeno físico (OLIVEIRA, 2008) — e o software Ftool (Two-dimensional Frame Analysis Tool) 3.01 — programa destinado ao ensino do comportamento estrutural de pórticos planos, cujo idealizador e responsável é o professor Luiz Fernando Martha do Departamento de Engenharia Civil da PUC Rio. Para todos os casos, as estruturas foram submetidas a esforços horizontais, os quais simulam carregamentos de vento, e esforços verticais, simulando carregamento gravitacional, cujas representações práticas são o peso próprio e cargas de utilização.

2.1 Análise de Estruturas Volumétricas ou Tridimensionais

Na Figura 1, uma estrutura sólida elástica sofre flexão quando submetida a um carregamento horizontal. A combinação do esforço de vento e a resistência ao cisalhamento da estrutura gera um binário no sentido horário. Para que a condição de equilíbrio seja

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção

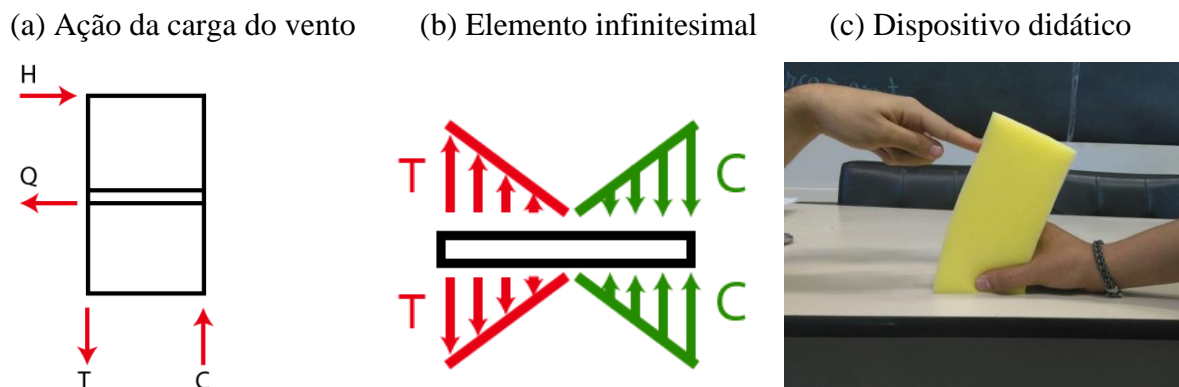




estabelecida, é necessária a existência de um binário no sentido anti-horário, representado na figura 1.a por T e C . Nesse caso, a face da estrutura disponível para aparecimento desse binário é a base por ser a única em contato com a superfície.

No elemento infinitesimal da Figura 1.b, as reações T e C geram, respectivamente, tração à esquerda e compressão à direita da Linha Neutra. Evidencia-se que a espessura à esquerda do elemento infinitesimal é alongada, na linha neutra é mantida a espessura original, e à direita é comprimida. Esse fato evidencia a teoria estudada na disciplina de Resistência dos Materiais: na flexão, as seções horizontais superior e inferior dos elementos infinitesimais sofrem rotação, sem deformação. A rotação das faces superior e inferior de todos os elementos infinitesimais gera a flexão demonstrada no bloco de espuma da Figura 1.c.

Figura 1 - Modelagem de estruturas de edifícios em nível volumétrico



Caso a estrutura não esteja engastada, pode sofrer tombamento e/ou deslocamento horizontal, como mostrado nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Quando a estrutura é dividida em blocos, como na Figura 3, a reação T não é transmitida à porção esquerda da linha neutra da estrutura por não haver aderência suficiente entre os blocos. Logo, não ocorre flexão na estrutura e os blocos separam-se uns dos outros.

Figura 2 – Corpo de prova de concreto Fonte: O autor.

Figura 2.a Tombamento



Figura 2.b Deslocamento Horizontal





CISALHAMENTO

Cisalhamento é a tendência de deslizamento entre duas superfícies. A resistência ao cisalhamento foi representada no curso de duas formas: por atrito e por encaixe.

Figura 3 – Blocos separam-se por aderência insuficiente. Resistência ao cisalhamento por atrito. Fonte: O autor.

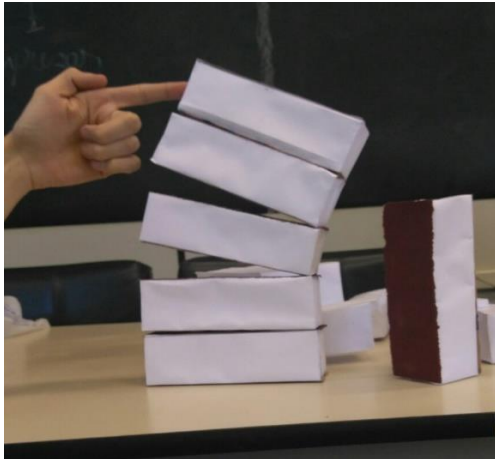
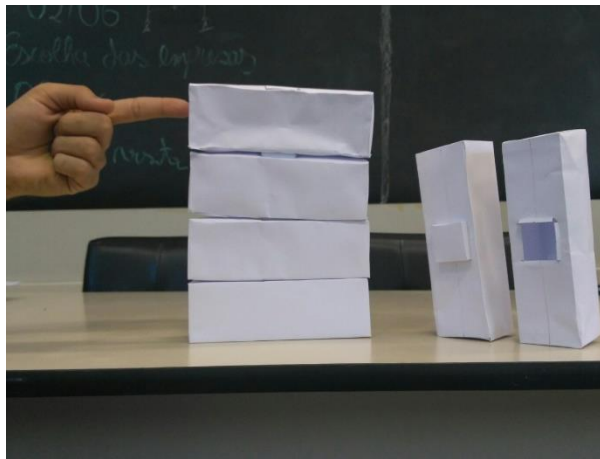


Figura 4 – Resistência ao cisalhamento por encaixe em moldes de cartolina. Fonte: O autor.



Para representação da primeira, foram coladas lixas nas superfícies de contato entre dois blocos de cartolina, o que pode ser observado na Figura 3. Para a segunda, foram colados pequenos cubos de papel na porção inferior de cada bloco, e aberturas na porção superior para encaixe entre os modelos de cartolina. Ver Figura 4.

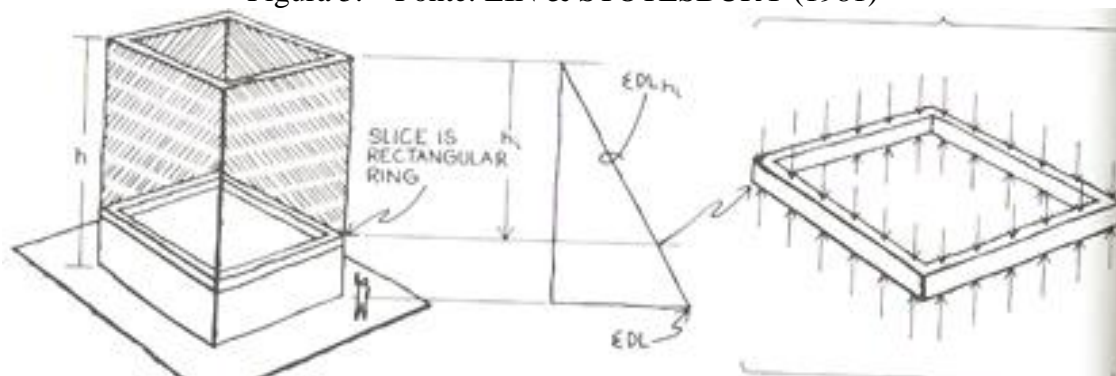
2.2 Análise de Estruturas Superficiais ou Bidimensionais

Na segunda etapa, foram analisados os efeitos do peso próprio e de cargas horizontais em estruturas superficiais. Consideram-se estruturas superficiais aquelas cujos subsistemas estruturais são distribuídos no espaço com o intuito de delimitação e não de preenchimento de vazios. Para ambos os esforços, foram analisados o padrão de distribuição de esforços e a provável deformação da estrutura quando adicionado um subsistema horizontal, o qual representa a laje de uma estrutura real.

Para efeitos de simplificação, considerou-se nesse curso que o carregamento vertical de maior relevância é o peso próprio. Supôs-se, ainda, que o material fosse homogêneo e que a distribuição do peso próprio fosse constante ao longo da estrutura. Para representação dessas condições, apresentou-se o diagrama de corpo livre de uma seção infinitesimal da estrutura, assim como o diagrama de tensões para esse modelo estrutural, como pode ser observado na Figura 5.



Figura 5. – Fonte: LIN & STOTESBURY (1981)



Foi possível, então, analisar como a flambagem sofrida por estruturas muito esbeltas é reduzida por meio da inserção de subsistemas horizontais, os quais melhor distribuem o carregamento ao longo dos andares de um edifício. Ver Figuras 6, 6.1 e 6.2.

Figura 6. Fonte: O autor

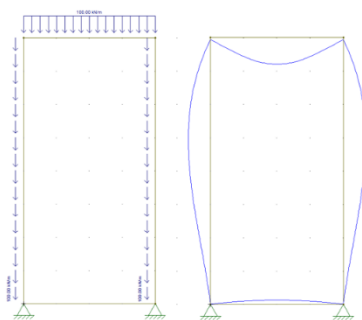


Figura 6.1. Fonte: O autor

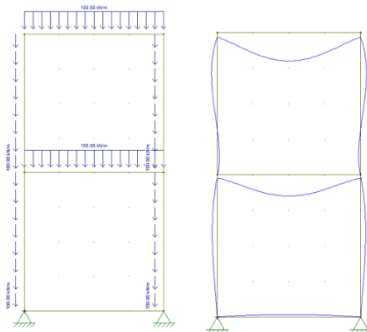
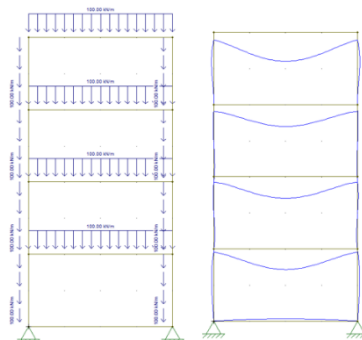


Figura 6.2. Fonte: O autor



Com o uso dos moldes de cartolina, evidenciou-se que carregamentos horizontais exercem efeito similar nas estruturas superficiais. A adição de subsistemas horizontais permite, também nesse caso, melhor distribuição do carregamento ao longo da estrutura, e consequente menor deformação, como pode ser observado nas Figuras 7, 7.1 e 7.2.

Figura 7. Fonte: O autor.



Figura 7.1 – Fonte: LIN & STOTESBURY (1981)

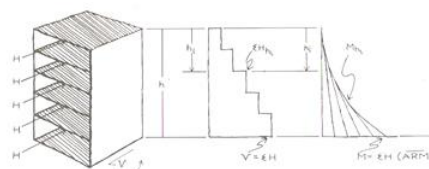
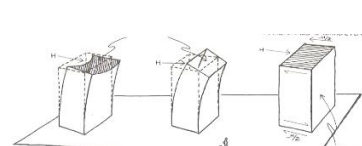


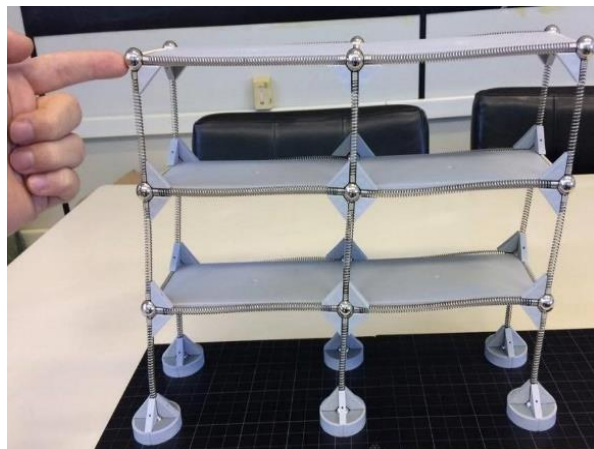
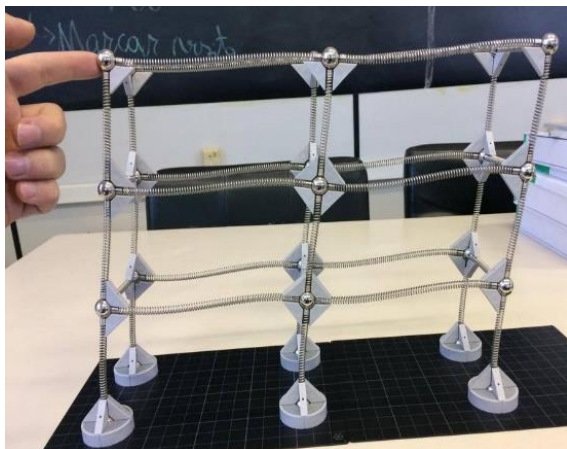
Figura 7.2 - Fonte: LIN & STOTESBURY (1981)



Visando a participação ativa dos alunos, cada equipe recebeu 02 (dois) Kits Mola para montagem da estrutura mostrada na Figura 8. Assim puderam constatar as afirmações anteriores de forma tátil-visual.



Figura 8 – Influência da adição de subsistemas horizontais nas deformações. Fonte: O autor.



2.3 Análise de Estruturas Lineares ou Unidimensionais

Na última etapa, a estrutura mostrada na Figura 8 foi analisada quantitativamente no Software Ftool 3.01, por meio do reticulado plano mostrado na Figura 9. Foram gerados e analisados: o diagrama de esforço normal (Figura 9.1), esforço cortante (Figura 9.2) e momento fletor (Figura 9.3) quando as ligações nos nós são engastadas.

Figura 9 – Desenho esquemático do primeiro projeto analisado e sua respectiva representação no software Ftool 3.01. Fonte: O autor.

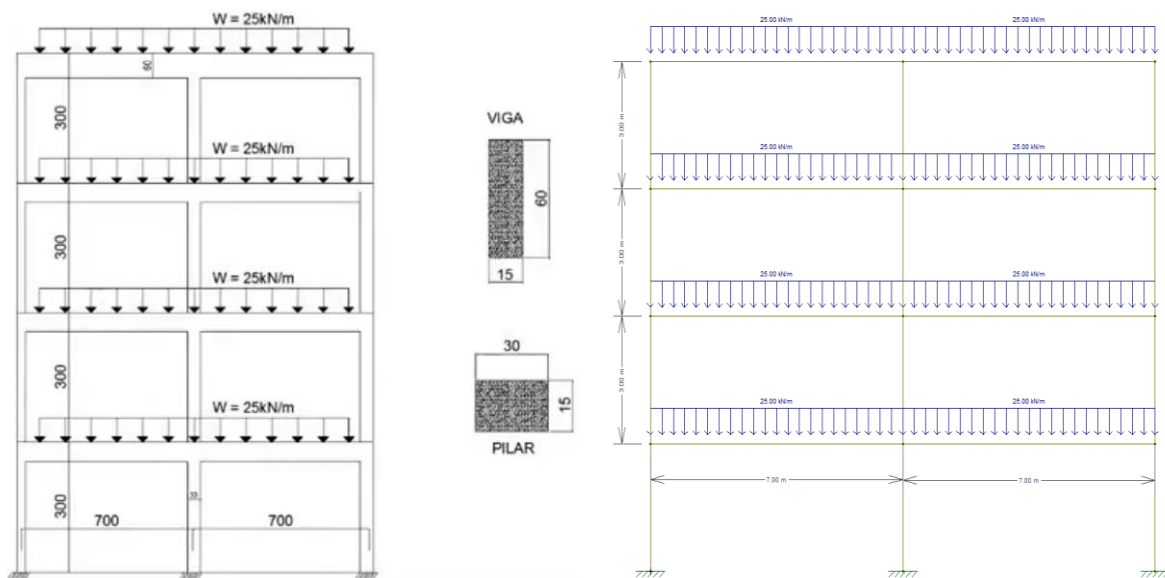




Figura 9.1- Esforço normal.
 Fonte: O autor.

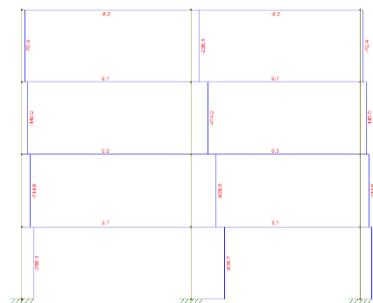


Figura 9.2- Esforço cortante.
 Fonte: O autor.

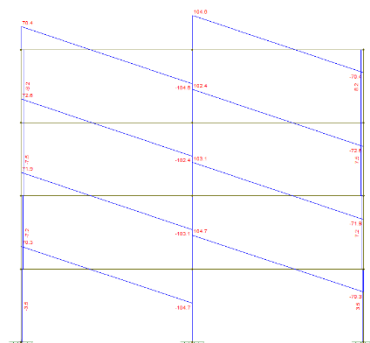
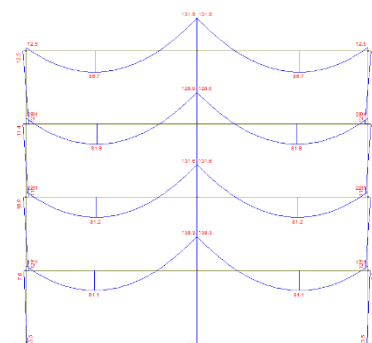
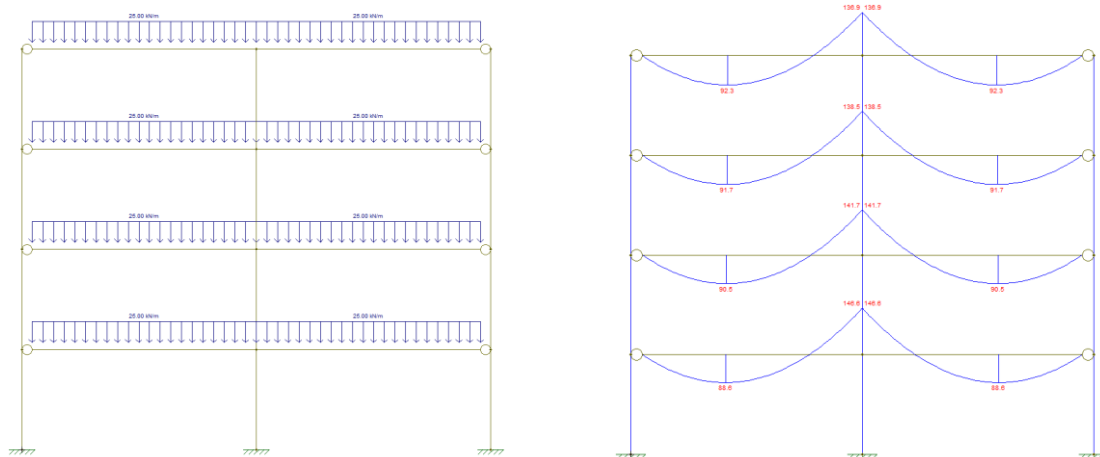


Figura 9.3- Momento fletor.
 Fonte: O autor.



Quando essa estrutura é submetida a carregamento vertical, há excesso de momentos negativos nas interseções entre pilares e vigas. Para estabilização da estrutura, estariam sobrepostas as armaduras negativas do pilar e da viga que está em perspectiva, e isso dificultaria muito a execução do projeto. Uma das soluções possíveis seria adicionar rótulas nessas ligações, eliminando o momento negativo, como mostrado na Figura 11. Essa alteração facilitaria a concretagem, evitando manifestações patológicas que poderiam aparecer pelo excesso de armaduras.

Figura 11- Vigas com ligações rotuladas eliminam o momento negativo nos nós dos pilares laterais. Fonte: O autor.



No entanto, observa-se que o momento positivo ao longo das vigas aumentaria, fazendo-se necessária uma nova análise da estabilidade global da estrutura com a inserção das rótulas. Caso a estabilidade não seja atingida, apresentaram-se aos estudantes as seguintes soluções: mudança na forma ou aumento das dimensões da seção transversal das vigas, ou alteração do material, adotando-se maiores tensões admissíveis.

Na Figura 12, a mesma estrutura foi submetida a carregamentos horizontais provocados pelo vento e pelo empuxo do solo. Para análise do comportamento estrutural, foram alterados os módulos de elasticidade: dos pilares laterais e do pilar central; apenas dos pilares laterais; apenas do pilar central. Notou-se que o aumento da rigidez apenas do pilar central gera



deslocamentos satisfatórios, além da economia de material. Portanto, essa seria a escolha mais adequada para essa estrutura.

Figura 12 - Reticulado plano submetido a carregamentos horizontais de vento e empuxo do solo. Fonte: O autor.



3. RESULTADOS

Com o curso de Desmodelagem Estrutural, tanto os ministrantes quanto os demais alunos tiveram contato com uma abordagem acerca da Análise Estrutural diferente da convencional utilizada nas escolas de Engenharia do país. Evidenciou-se que a adição de subsistemas horizontais gera melhor distribuição do carregamento ao longo da estrutura, e é por isso que as estruturas reais são construídas dessa forma.

O uso de dispositivos didáticos mostrou-se eficaz no auxílio à compreensão dos fenômenos físicos abordados ao longo do curso, pois é uma forma de aprendizagem ativa, feita pela interação tátil-visual dos discentes com os dispositivos, como evidenciado na Figura 13. Foi possível observar que alunos de diferentes períodos tiveram ganhos similares na visualização global do comportamento estrutural.

Figura 13 - Utilização de dispositivos didáticos durante o curso de Desmodelagem. Fonte: O autor.



A falta de recursos tecnológicos foi solucionada com maneiras simples, econômicas e modernas, como o uso de cartolinas e blocos de espuma, os quais permitissem a visualização dos fenômenos provocados por cargas verticais e horizontais em obras de engenharia de forma clara e didática.

4. CONCLUSÃO

Devido aos resultados satisfatórios, concluiu-se que o uso de dispositivos didáticos

Organização



Promoção





auxiliou na compreensão do comportamento global de estruturas tridimensionais, bidimensionais e unidimensionais, quando submetidas a carregamentos horizontais e verticais, por meio de análise qualitativa e quantitativa.

4.1 Desenvolvimentos futuros

O curso de Desmodelagem Estrutural teve sua primeira edição na Semana Acadêmica de Engenharia Civil da UFPR. Dessa forma, em oportunidades futuras há possibilidade de análise do projeto de uma estrutura real, evidenciando-se alterações que poderiam ser feitas na fase de projeto para otimizar o comportamento estrutural e economia de material. É possível, também, o uso de outros recursos didáticos, como documentários nos quais são feitas Análises Estruturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIN, T.Y. STOTESBURY, S.D. **Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers**: Ed. John Wiley & Sons, 1981. p.[52]-97.

TOMAZ, T. P. **Desenvolvimento e uso de dispositivos didáticos no ensino de Mecânica Estrutural**. 137 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <<https://app.box.com/s/1ty89aslzrwumgqyvwjhwz0d8ipaz762/>>. Acesso em: 13 mai. 2017.

OLIVEIRA, M. S. de. **Modelo estrutural qualitativo para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas**. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. Disponível em:

<www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2467/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_ModeloEstruturalQualitativo.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2017.

Abstract: This article aims to make public the course of Structural Disassembly - Hierarchy Applied to High Buildings, carried out by PET Engenharia Civil UFPR, during the Civil Engineering Academic Week at the Federal University of Paraná. In most of the Brazilian Civil Engineering schools, a hierarchical analysis of a structure of one-dimensional structures, followed by surface and volumetric structures. The course was designed to attempt one of the difficulties of teaching in engineering, it is not what is a difficulty in the overall view of tall buildings and their static response to wind and gravitational loads. For an accomplishment of this shipment of audiovisual resources, cartridge molds, concrete test bodies, sponge blocks, Mola Structural Kit and Ftool 3.01 Software. This way it is possible to analyze a possibility of investor order with a qualification concepts are common taught in Civil Engineering courses and if this effectively facilitates an overall understanding of the behavior of tall buildings.

Key-words: Demodulation, Hierarchical Analysis, Tall Buildings, Global View.

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção

