

MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE NUMÉRICA DE MODELOS REDUZIDOS COMO METODOLOGIA DE ENSINO DE ENGENHARIA PARA A ANÁLISE DINÂMICA DE EDIFÍCIOS

Leonardo de Souza Bastos – lbastosjdf@hotmail.com
Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ
Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã
CEP 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva – jgss@uerj.br
Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ
Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã
CEP 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo: Nas últimas décadas foi notável a verticalização urbana no Brasil, em que, inclusive em médias cidades, foi possível observar a construção de edifícios com considerável altura. Usualmente, nas verificações e cálculos estruturais de edifícios, as cargas devido à ação do vento são consideradas puramente estáticas, porém, conforme os edifícios se tornam mais arrojados, esbeltos e altos, podem surgir problemas relacionados a vibrações excessivas, pois a ação do vento tem como natureza um caráter dinâmico. Portanto, de acordo com este cenário, espera-se que os alunos de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil, adquiram os conceitos físicos e matemáticos necessários para a análise dinâmica de edifícios, no que tange à obtenção das frequências naturais e modos de vibração das edificações, tendo em mente a relevância do perfeito entendimento dos conceitos teóricos envolvidos. Assim sendo, visando facilitar o ensino de engenharia, no tocante aos conceitos matemáticos e físicos relacionados à análise dinâmica de estruturas, é proposta neste artigo uma metodologia de ensino de engenharia prática, desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV) da Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Tal metodologia propõe que os estudantes realizem a construção de modelos estruturais em laboratório, representando o comportamento dos edifícios em escala reduzida. Os modelos dos edifícios serão monitorados experimentalmente e modelados numericamente, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF). Ao final da investigação, os resultados serão analisados e confrontados, e espera-se que a metodologia de ensino de engenharia desenvolvida neste estudo auxilie os alunos de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil, em relação a um melhor entendimento dos conceitos físicos associados à análise estrutural dinâmica de edifícios.

Palavras-chave: Ensino de engenharia, Análise dinâmica de edifícios, Monitoração experimental.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas foi notável a verticalização urbana no Brasil, em que, inclusive em médias cidades, foi possível observar a construção de edifícios com considerável altura. Paralelamente a esse processo de verticalização, o avanço tecnológico dos materiais, principalmente do concreto e do aço, permitiu uma significativa diminuição das seções dos elementos estruturais.

Usualmente, nas verificações e cálculos estruturais de edifícios, as cargas devido à ação do vento são consideradas puramente estáticas, porém, conforme os edifícios se tornam mais arrojados, esbeltos e altos, podem surgir problemas relacionados a vibrações excessivas, pois a ação do vento tem como natureza um caráter dinâmico, sendo importante, nestes casos, realizar verificações mais sofisticadas e precisas, com base nas características dinâmicas da estrutura. (BASTOS, 2018)

Portanto, de acordo com este cenário, é de se esperar que os alunos de engenharia civil, tenham contato, ainda na graduação, com análises dinâmicas de edifícios altos e esbeltos. Espera-se que possam compreender os significados dos modos de vibração e respectivas frequências naturais das edificações em estudo, que consigam entender como é possível obter esses dados e que sejam capazes de analisá-los.

Visando facilitar o ensino dos conceitos físicos relacionados às análises dinâmicas das estruturas, é proposta neste artigo uma metodologia de ensino prática, desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV) da Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Tal metodologia propõe que os estudantes realizem a construção de modelos estruturais em laboratório, utilizando HDF (High Density Fiber Board), representando edifícios em escala reduzida. Os modelos reduzidos são de fácil construção e baixo custo.

Os modelos estruturais em escala reduzida serão monitorados experimentalmente, obtendo-se deslocamentos e acelerações ao longo de um intervalo de tempo, para a obtenção dos valores das frequências naturais e das configurações dos modos de vibração. Paralelamente, as mesmas estruturas serão modeladas numericamente, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF). No decorrer deste artigo, tal metodologia de ensino de engenharia será apresentada através do desenvolvimento de modelo exemplo, simulando um edifício de 19 andares. Ao final, os resultados numéricos serão comparados com os resultados experimentais e espera-se que esta metodologia auxilie os alunos de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil a compreenderem melhor o comportamento estrutural dinâmico de edifícios altos.

2 CONSTRUÇÃO DO MODELO REDUZIDO

O modelo estrutural investigado, construído em laboratório utilizando HDF, simula um edifício de 19 pavimentos com altura interna igual a 8,80cm, totalizando 167,20cm de altura. Em planta, os pavimentos tipos possuem 40cm de largura e 20cm de comprimento (Figura 3). Todos os pilares possuem seções de 2cm x 0,3cm e as lajes apresentam espessura de 0,3cm. As peças em HDF, simulando as lajes e os pilares, foram cortadas diretamente na loja em que as mesmas foram adquiridas.

A escolha do HDF deve-se por ser esse material de fácil obtenção e baixo custo, além da facilidade de corte, podendo ser realizado diretamente pelos fornecedores. Outra vantagem do HDF é, por ser um produto industrializado, possuir suas propriedades mecânicas bem definidas. No modelo exemplo investigado neste trabalho, após dois ensaios simples, verificou-se que a densidade do HDF utilizado é igual a 841,32 kg/m³ e o módulo de elasticidade (E) igual a 3272 MPa.

Figura 1 - Construção do Modelo Reduzido em HDF.



a) Planta do modelo estrutural investigado



b) Fabricação do modelo estrutural reduzido

O modelo, facilmente construído pelos próprios alunos (Figura 1), foi montado sobre uma bancada nivelada, utilizando-se esquadros e gabaritos para garantir a precisão nas distâncias entre os pavimentos. As peças (lajes e pilares) foram unidas utilizando apenas cola instantânea (adesivo universal). Na Figura 2 é possível observar o modelo pronto.

Figura 2 - Modelo construído em laboratório com 19 pavimentos em HDF.



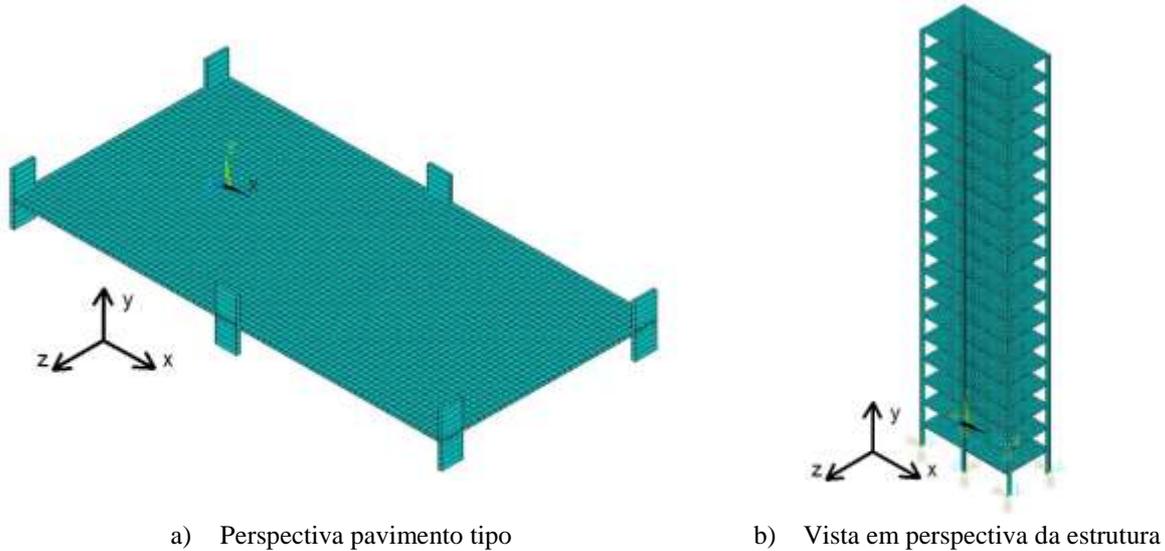
3 MODELO NUMÉRICO DA ESTRUTURA EM ESTUDO

O modelo computacional proposto, desenvolvido para a análise estrutural dinâmica do modelo reduzido real, utiliza como base o método de elementos finitos, adotando técnicas habituais de refinamento de malha e foi implementado utilizando o programa computacional ANSYS. Neste modelo numérico, ilustrado na Figura 3, os pilares foram representados por elementos de vigas tridimensionais (BEAM44), nas quais são considerados os efeitos de flexão e torção. A laje de concreto foi representada por elementos de casca (SHELL63).

Deve ser enfatizado que a conexão entre colunas e lajes utilizou o elemento de restrição multi-ponto (MPC184), conectando uma coluna com três nós da laje. Essa estratégia foi necessária, visando melhorar a modelagem numérica, quando comparada com o comportamento estrutural real

do edifício. Em relação às condições de contorno, é utilizada a hipótese de suporte rígido, em que os pilares foram restritos na base do modelo.

Figura 3 - Modelo estrutural em elementos finitos (MEF).

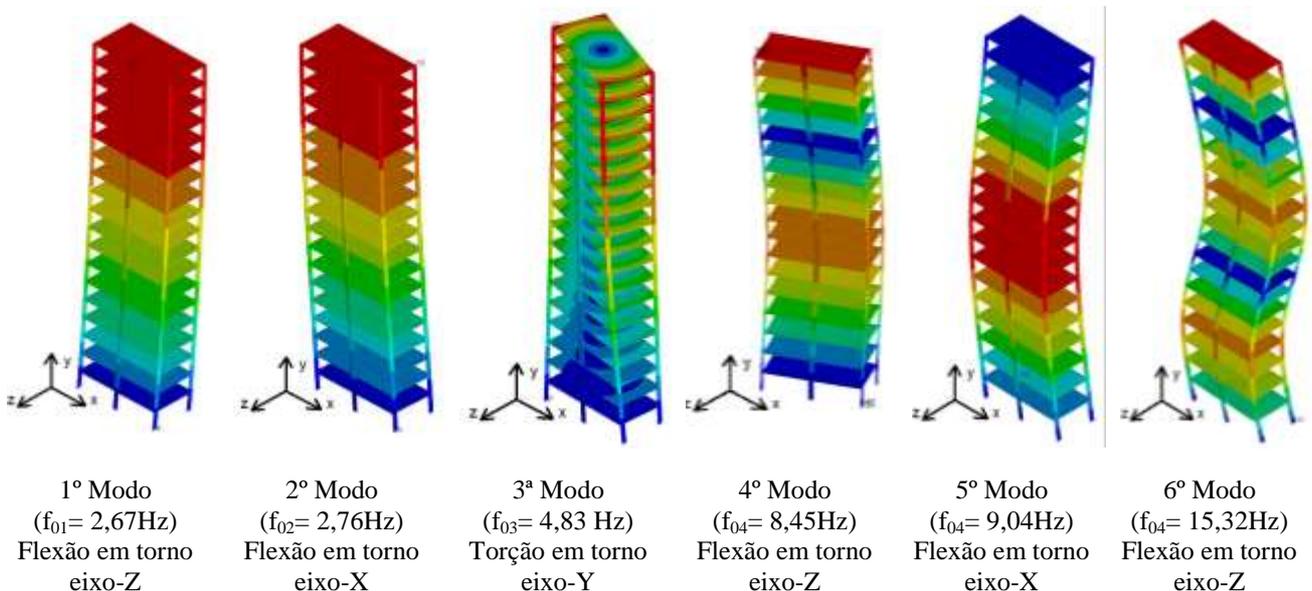


4 ANÁLISE MODAL NUMÉRICA

As frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) da estrutura investigada no presente trabalho de pesquisa foram obtidos com a ajuda de métodos numéricos de extração (análise modal), a partir de uma análise de vibração livre empregando-se o programa computacional ANSYS.

Deve-se enfatizar, junto aos alunos, que o modelo estrutural investigado pode vibrar de muitas maneiras diferentes, e esses diferentes modos de vibração apresentam sua própria frequência natural. Na Figura 4, são apresentados os seis primeiros modos de vibração do modelo estrutural analisado e suas respectivas frequências naturais.

Figura 4 - Modos de vibração e frequências naturais da estrutura.



5 MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZANDO UM TABLET

Com intenção de apresentar a monitoração experimental aos alunos é proposto, inicialmente, um ensaio de vibração livre, em que os resultados podem ser obtidos através de dispositivos móveis (tablets ou celulares) que possuam acelerômetros internos. Este ensaio demonstra que mesmo utilizando esses tipos de equipamentos, pode-se obter as frequências principais da estrutura investigada.

No estudo apresentado neste trabalho foi utilizado o Tablet Galaxy Samsung, com o aplicativo iDynamics previamente instalado. O Tablet (ilustrado na Figura 5), juntamente com o aplicativo, consegue medir as acelerações ao longo do tempo nas direções X, Y e Z e fornecer as respectivas frequências de vibração.

Figura 5 - Ensaio de vibração livre utilizando Tablet Galaxy.

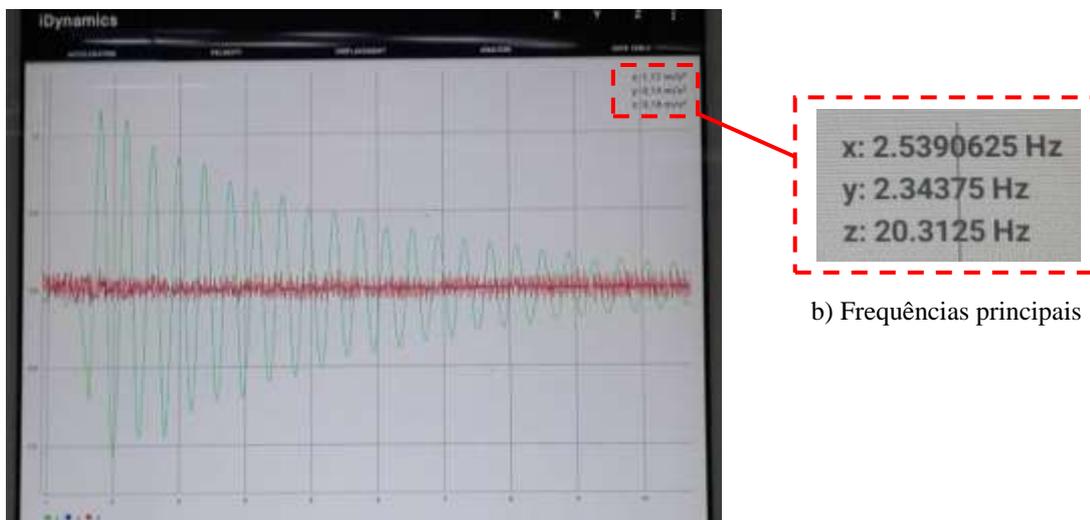


a) Tablet Galaxy Samsung

b) Aplicação de um pequeno deslocamento

O modelo estrutural em HDF foi manualmente deslocado de sua posição inicial e deixado vibrar livremente. Além de mostrar na tela do Tablet os gráficos dos deslocamentos (Figura 6), acelerações e velocidades, o aplicativo gera tabelas de dados que podem ser exportados para o Excel, no qual o aluno será capaz de estudar esses tipos de sinais e compreender, por exemplo, o significado físico do amortecimento estrutural em uma vibração livre.

Figura 6 - Resultados ensaio vibração livre utilizando Tablet.



a) Tela Tablet com acelerações no domínio do tempo

b) Frequências principais

6 MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZANDO ACELERÔMETROS

Na sequência, é apresentado o monitoramento experimental dinâmico utilizando três acelerômetros unidirecionais, visando obter as frequências naturais e os modos de vibração do edifício nas direções X e Z. Os acelerômetros foram posicionados nas alturas de 167,1cm; 144,1cm e 61,6cm da estrutura, modificando a direção dos acelerômetros em cada ensaio experimental. A Tabela 1 apresenta as características gerais dos acelerômetros utilizados.

O teste experimental consiste em causar um pequeno deslocamento no modelo e, em seguida, deixá-lo vibrar livremente. Cada sinal dos acelerômetros foi registrado ao longo do tempo para análise. Na Figura 8 são apresentadas as acelerações no domínio do tempo e o espectro de frequências (obtido através da Transformada de Fourier).

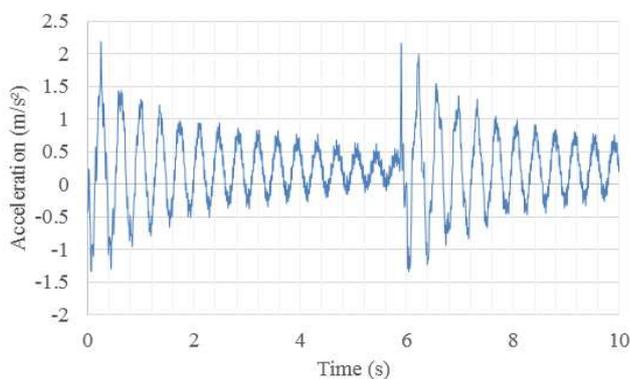
Tabela 1 - Características gerais dos acelerômetros.

Modelo dos Acelerômetros	Faixa de frequência (Hz)	Measurement Range (mV/g)
DYTRAN 7521A1	0-1500	549,27
Modelo dos Acelerômetros	Faixa de frequência (Hz)	Shunt Eng
KYOWA FU 590022	0-41	6,501486
KYOWA FU 590024	0-45	7,233545

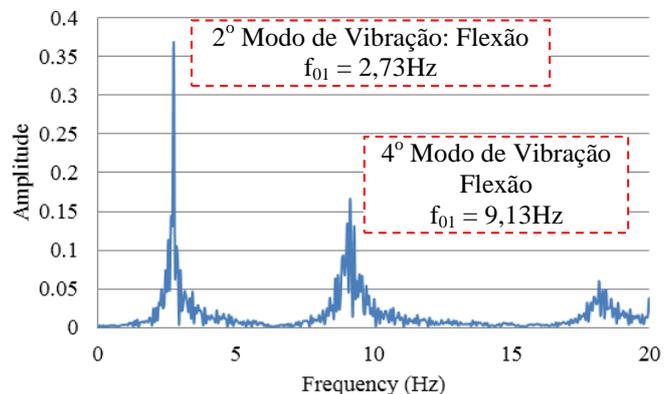
Figura 7 - Posicionamento dos acelerômetros na estrutura investigada.



Figura 8 - Medidas experimentais obtidas no ensaio com acelerômetros.



a) Aceleração domínio do tempo: Direção Z



b) Espectro de frequência: Direção Z

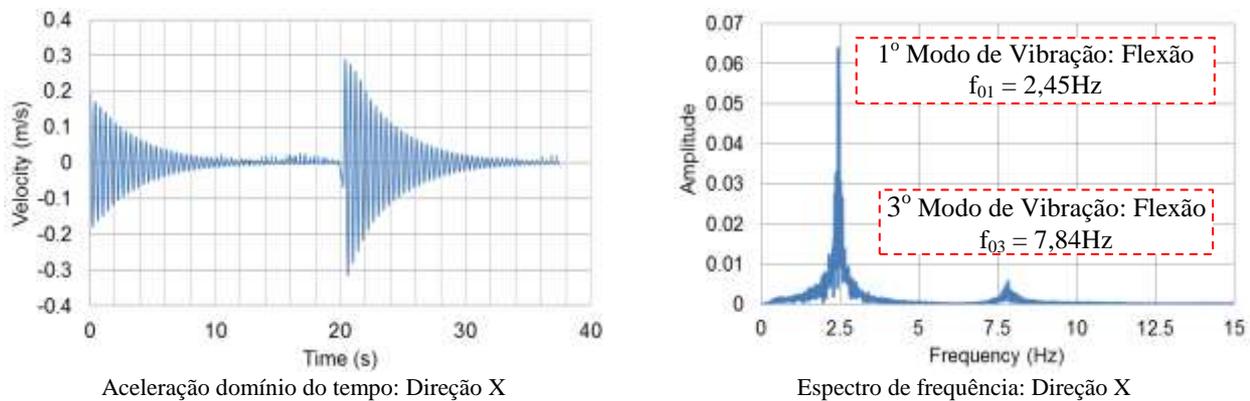
7 MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZANDO VIBROMETRIA A LASER

A fim de verificar a confiabilidade dos resultados experimentais obtidos com base no uso de acelerômetros, os mesmos testes de vibração livre também foram realizados usando o sistema vibrometria a laser PDV (Figura 9). Desta forma, a Figura 10 apresenta o sinal de velocidade, ao longo do tempo, a uma altura de 158,4cm, considerando o modelo em vibração livre paralela à direção X. Com o espectro de frequências obtido é possível identificar as frequências naturais relacionadas ao 1º modo de vibração ($f_{01} = 2,45$ Hz) e ao 5º modo de vibração ($f_{05} = 7,84$ Hz), ambos os modos relacionados à flexão em torno do Eixo Z.

Figura 9 - Vibrometria a laser (PDV).

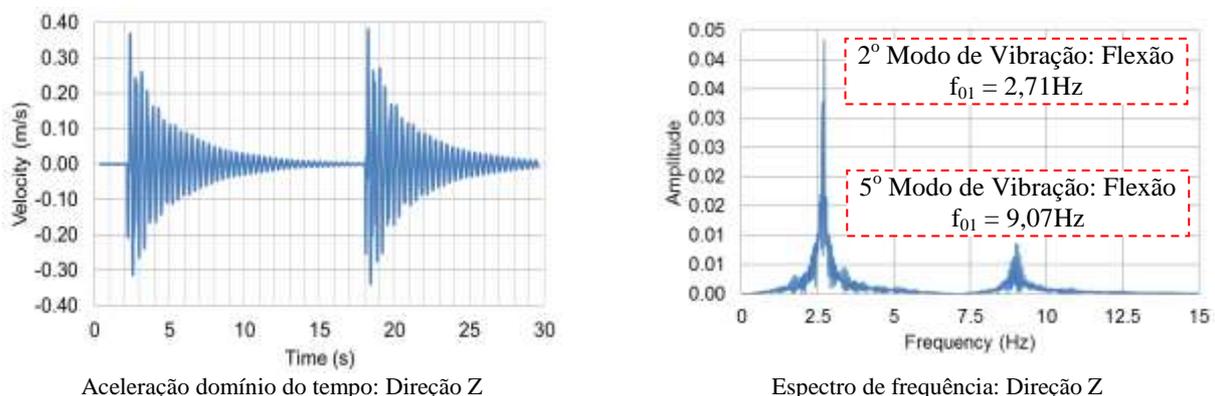


Figura 10 - Medidas experimentais obtidas no ensaio com vibrometria a laser (Direção X).



O mesmo ensaio pode ser repetido para a direção eixo Z, resultados apresentados na Figura 11. Sendo possível obter as frequências naturais referentes ao 2º Modo de Vibração (2,71 Hz) e 4º Modo de Vibração (9,07 Hz).

Figura 11 - Medidas experimentais obtidas no ensaio com vibrometria a laser (Direção Z).



8 ANÁLISES E COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS

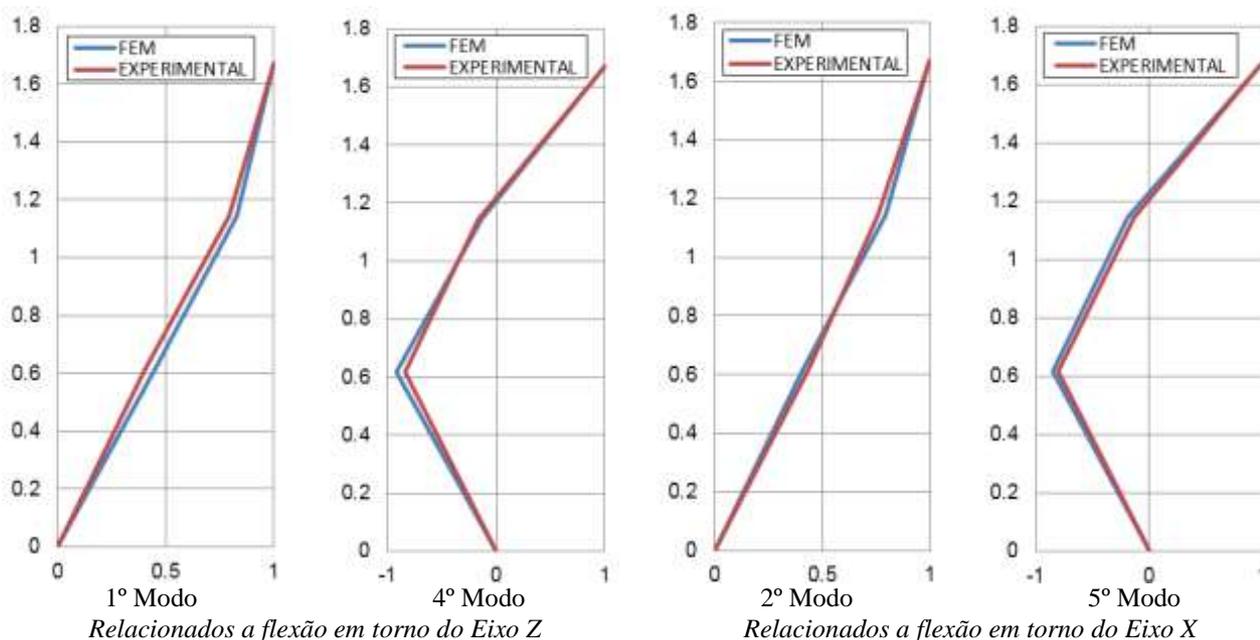
Nesta seção do artigo, os resultados numéricos (MEF) obtidos utilizando o ANSYS (Figura 4) são comparados com os resultados obtidos no monitoramento experimental dinâmico (Figuras 8 a 11). Na sequência, a Tabela 2 apresenta os cinco primeiros modos de vibração e os respectivos valores de frequências naturais, adquiridos através dos ensaios experimentais e calculados com base na modelagem numérica.

Tabela 2 - Frequências naturais.

Modo	Modo de Vibração	Obtidos numericamente (MEF)	Monitoração Experimental	
			Acelerômetros	PDV
1°	Flexão em torno de X	2,67	2,54	2,50
2°	Flexão em torno de Z	2,76	2,73	2,69
3°	Torção em torno de Y	4,83	-	-
4°	Flexão em torno de Z	8,46	8,06	7,81
5°	Flexão em torno de X	9,04	9,13	8,94

Os alunos conseguem verificar que, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, a ordem de grandeza dos valores das frequências naturais numericamente calculados está próxima daqueles obtidos experimentalmente. Com os ensaios realizados com os acelerômetros posicionados em diferentes andares e medidos simultaneamente é possível que os alunos entendam como obter os modos de vibração presentes na estrutura. Com base nas frequências naturais de cada modo, foi possível filtrar os sinais de deslocamento de cada acelerômetro em função da frequência do formato desejado. Através das comparações dos sinais filtrados de cada acelerômetro, relacionadas às diferenças nos valores das amplitudes, foi possível normalizar essas diferenças e então configurar os modos de vibração.

Figura 12 – Comparação entre os modos de vibração obtidos por modelagem numérica e monitoramento experimental.



9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia de ensino desenvolvida neste trabalho de pesquisa teve como objetivo facilitar o entendimento das análises dinâmicas de edifícios altos, a partir das quais o estudante de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil, através da construção em laboratório de modelos estruturais reais, representando edifícios em escala reduzida, pode estudar e compreender os principais conceitos matemáticos e físicos relacionados às características dinâmicas das estruturas.

Deste modo, como exemplo, foi apresentada a investigação do comportamento estrutural dinâmico de um modelo real de 19 andares, construído em laboratório, utilizando-se HDF (High Density Fibreboard). O estudo foi fundamentado através do monitoramento dinâmico experimental e de simulações numéricas, com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Os resultados obtidos neste estudo sobre o modelo estrutural investigado evidenciaram que o edifício desenvolvido numericamente representa a resposta estrutural dinâmica do modelo HDF construído com um excelente grau de confiabilidade. Neste sentido, os alunos de engenharia serão capazes de entender conceitos importantes associados a análises de vibração livre, obtenção de deslocamentos e acelerações no domínio do tempo, amortecimento estrutural, frequências naturais e modos de vibrações.

Espera-se que a metodologia de ensino de engenharia proposta nesta investigação estimule o aprendizado dos alunos de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil, no que diz respeito ao estudo dos conceitos matemáticos e físicos associados à análise dinâmica de estruturas. Tal metodologia propõe que os alunos assimilem a teoria juntamente com a prática. Considerando-se que os modelos reduzidos possuem características e comportamentos semelhantes aos edifícios reais, torna-se possível obter resultados qualitativos semelhantes, auxiliando os alunos a compreenderem melhor as análises estruturais necessárias para o projeto de edifícios. Consequentemente, o futuro profissional de Engenharia Civil estará mais bem capacitado para o desenvolvimento de projetos estruturais de qualidade, mais racionais e econômicos para a sociedade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES, CNPq e FAPERJ, que possibilitaram a realização deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANSYS Swanson Analysis Systems Inc. Theory Reference Manual (R.12.1), 2010.

BASTOS, L.S. Estudo do comportamento estrutural e análise de conforto humano de edifícios de concreto armado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2015.

BASTOS, L.S. Estudo do comportamento dinâmico estrutural não determinístico de edifícios sujeitos a ação do vento e considerando o efeito da interação solo-estrutura. Tese de Doutorado (em desenvolvimento). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2018.

D.J. Ewins. Modal Testing: Theory and Practice. Research Study Press LTD., 1984.

EXPERIMENTAL MONITORING AND NUMERICAL ANALYSIS OF REDUCED MODELS AS AN ENGINEERING EDUCATION METHODOLOGY FOR THE DYNAMIC ANALYSIS OF BUILDINGS

Abstract: *In the last decades it was remarkable the urban verticalization in Brazil, in which, even in medium-sized cities, it was possible to observe the construction of buildings with considerable height. Usually, in the verification and structural calculations of buildings, the loads due to the wind action are considered purely static, but, as the buildings design become more daring and tall, problems related to excessive vibrations can arise, and since the wind action has a dynamic behaviour. Therefore, according to this scenario, it is expected that undergraduate and postgraduate students in Civil Engineering acquire the necessary physical and mathematical concepts for the dynamic analysis of buildings, regarding the calculation of the natural frequencies and vibration modes of buildings, keeping in mind the relevance of the perfect understanding of the theoretical concepts involved. Therefore, in order to facilitate the engineering education, regarding the mathematical and physical concepts related to the dynamic analysis of structures, it is proposed in this paper a practical engineering education methodology, developed within the scope of the Postgraduate Program in Civil Engineering (PGECIV) of Faculty of Engineering (FEN) of the State University of Rio de Janeiro (UERJ). Such methodology proposes that students carry out the construction of structural models in the laboratory, representing the behaviour of buildings on a reduced scale. The models of the buildings will be monitored experimentally and numerically, using the Finite Element Method (FEM). At the end of the investigation, the results will be analysed and compared, and it is expected that the engineering education methodology developed in this study will help undergraduate and postgraduate students in Civil Engineering, in relation to a better understanding of the associated physical concepts to the dynamic structural analysis of buildings.*

Keywords: *Engineering education, Dynamic analysis of buildings, Experimental monitoring.*