

EXPERIÊNCIA METODOLÓGICA ENVOLVENDO UM ESTUDO TEÓRICO PRÁTICO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA PASSARELA

Fábio Raia¹; Marcelo Rassy Teixeira²; Pedro Alfonso de Oliveira Almeida³

¹Universidade Presbiteriana Mackenzie
Rua da Consolação 930
CEP 01302-902 - São Paulo – SP
raia@mackenzie.com.br

² Escola Politécnica da USP, Laboratório de Mecânica Computacional
Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 n. 271
Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-900
mrt@ufpa.br

³ Escola Politécnica da USP, Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais
Av. Prof. Almeida Prado, trav.2, nº. 83
Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-900
palmeida@usp.br

Resumo: *Perante a dinâmica dos currículos escolares, em termos de graduação e pós-graduação, percebe-se uma discussão sobre o excesso de teoria, em detrimento às atividades práticas executadas pelos alunos dentro ou fora da sala de aula. A prática, não é somente aquela voltada somente para o cotidiano do futuro profissional de Engenharia, mas aquela também focalizada na realização de atividades que, necessariamente envolva a análise crítica dos conteúdos teóricos ministrados durante o curso, onde se busca a formação do indivíduo perante ao conhecimento. A proposta, para vencer a pedagogia tradicional, foi fazer o aluno ser o pesquisador dos conteúdos e, apresentá-los como resultado de uma atividade geral. Diante do exposto, objetiva-se descrever uma experiência metodológica desenvolvida durante o curso de Análise Experimental de Estruturas, ministrado no segundo semestre letivo de 2007 na Escola Politécnica de São Paulo, cuja abordagem, dentro do conteúdo programático, foi a análise de vibrações em estruturas. Para tanto, foi proposto o estudo das vibrações causadas pelo caminhar das pessoas sobre uma passarela, cujo tabuleiro foi sensoriado de forma a obter dados consistentes para validar um modelo feito com a técnica dos elementos finitos. Como objetivo específico almejou-se mostrar por meio de ensaios experimentais e numéricos, como o caminhar das pessoas pode acionar modos de vibração desse tipo de estrutura. O universo da pesquisa foi baseado em uma passarela, situada na Universidade de São Paulo (USP), que faz a ligação entre a Escola de Engenharia Civil com a Escola de Engenharia Mecânica.*

Palavras-chave: *passarela, acelerômetro, método numérico, aquisição de dados, experiência metodológica*

1. INTRODUÇÃO

Perante a dinâmica dos currículos escolares, em termos de graduação e pós-graduação, percebe-se uma discussão sobre o excesso de teoria, em detrimento às atividades práticas executadas pelos alunos dentro ou fora da sala de aula. A prática, não é somente aquela voltada somente para o cotidiano do futuro profissional de Engenharia, mas aquela também focalizada na realização de atividades que, necessariamente envolva a análise crítica dos conteúdos teóricos ministrados durante o curso, onde se busca a formação do indivíduo perante ao conhecimento. Essa atitude, para um ensino pedagógico crítico-experimental pode ser visto em RAYS (1990), onde observa-se uma ligação entre a teoria e a prática, como sendo um atalho para o desenvolvimento da didática escolar. A proposta, para vencer a pedagogia tradicional, foi fazer o aluno ser o pesquisador dos conteúdos e, apresenta-los como resultado de uma atividade geral, que no caso foi a busca da validação do confronto teórico-prático, através da análise dos modos de vibrar de uma passarela e, por conseqüência, validar um modelo em elementos finitos frente aos dados práticos.

A experiência metodológica foi realizada no curso de Análise Experimental de Estruturas na turma do 2º semestre de 2007 do curso de pós-graduação na Universidade de São Paulo. Devido ao pequeno número de alunos e disponibilidade de equipamentos e técnicos, essa disciplina mostrou-se adequada para tal experimentação. Mesmo por que, o conteúdo estava vinculado às atividades dos alunos. O curso foi ministrado de acordo com o calendário e, por causa das atividades dos alunos, possibilitou um tempo maior para que a tarefa fosse usada na construção do conhecimento. O trabalho foi executado tomando-se como referência a introdução do curso e suas partes e, então, dividido em duas etapas: a) Instrumentação da passarela e coleta de dados; b) construção do modelo em Elementos Finitos (EF), baseado nas dimensões e propriedades dos materiais tomados em loco.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O comportamento dinâmico de uma passarela está ligado ao carregamento imposto pelo vento, pelas solicitações causadas pelo movimento do terreno conseqüente ao tráfego de veículos o qual a passarela cruza, pelo carregamento gerado pelo caminhar das pessoas ou a combinação destes. Segundo a instrução de projeto IP - 004 (DER, 2005) a passarela é uma estrutura, de forma temporária ou permanente, para a travessia de pedestres sobre uma via de trânsito motorizado. A função básica é separar fisicamente o fluxo de pedestres, para eliminar a colisão entre eles. A passarela pode ser utilizada para vencer acidentes topográficos tais como: riachos ou depressões.

O projeto de uma passarela ou ponte deve ser cercado de várias condições de segurança, no sentido de proteger e facilitar o trânsito do usuário. Para tanto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da norma de código NBR8681, fixa os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil e estabelece definições e critérios de quantificação das ações e das resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações, quaisquer que sejam sua classe e destino (ABNT, 2003). No que se refere à passarela, todos os procedimentos e ações são considerados no todo e, regidos pela norma NBR 7188, que estabelece procedimentos para a construção de pontes e passarelas sobre carga móvel (ABNT, 1984). A preocupação a respeito do comportamento dinâmico sob carregamento induzido por pedestres tem sido alvo de vários trabalhos no decorrer dos anos, motivado por casos como ocorrido, por exemplo na *Millenium Footbridge* (Dias,2006).

Com o crescente aumento do número de veículos em circulação nas grandes cidades (OESP, 2007), e os crescentes aumentos dos congestionamentos forçam o poder público a eliminar semáforos para a travessia de pedestres, com a finalidade de não interromper o fluxo

de veículos e colocar em seu lugar passarelas. Esse tipo de estrutura oferece ao pedestre segurança e conforto durante a travessia de uma via de trânsito de veículos, ou de um acidente geográfico. Várias técnicas construtivas têm sido desenvolvidas para a construção de passarelas, propondo a minimização de custos e, conseqüentemente aumentando a sua utilização (Dias, 2006). Os softwares de simulação numérica, surgidos em escala comercial na década 80, têm proporcionado economia no tempo de projeto da obra, bem como têm favorecido a facilidade de cálculos, por onde os projetistas atuais têm revelado estruturas mais esbeltas e arrojadas. O trabalho de Pletz (2003) descreve técnicas e procedimentos, tipos de passarelas e aborda especificamente o projeto de pontes estaiadas, essas pela sua construção mais suscetíveis a vibrar. Uma única obra desse tipo na cidade de São Paulo está localizada na região da avenida Cidade Jardim, e foi inaugurada no mês de julho de 2006. A figura 1 mostra a característica da passarela e, em detalhe o sistema de apoio e os amortecedores utilizados para minimizar os efeitos indesejados da vibração.

Outro tipo de passarela diferente, mas sujeita a vibrações, tanto que, o projeto original já planejava a colocação de amortecedores, é a passarela Simone de Beauvoir localizada em Paris, cuja figura 2 mostra seu aspecto e formato (Téchné, 2006). As duas concepções buscam não só a interferência paisagista dentro do espaço urbano pelo seu apelo estrutural, mas também cumprem a mesma função em duas situações distintas: uma sobre uma via de tráfego de veículos, e outra sobre um rio navegável. Esses projetos contaram com a ajuda de softwares de simulação, tanto na fase de projeto, como nas fases de análise estática e dinâmica. Porém as validações dessas simulações contaram com a ajuda de procedimentos experimentais por meio de modelos em escala reduzida. Isso pode ser visto no trabalho desenvolvido pelo laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) (Almeida, 2007). Onde modelos físicos foram construídos para verificação de vibrações induzidas pelo carregamento produzido pelo vento na ponte estaiada JK em Brasília DF.

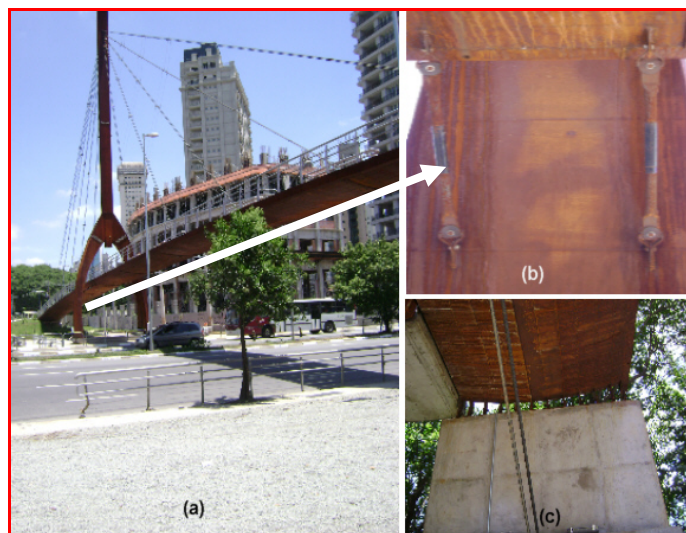


Figura 1. Passarela Miguel Reale tipo estaiada. a) Aspecto arquitetônico; b) detalhe dos amortecedores utilizados entre a torre e o tabuleiro, no vão central; c) sistema de fixação com liberdade de rotação.

Fonte: Acervo próprio

Modelos em escala têm sido utilizados desde as primeiras teorias a respeito da semelhança física, que datam do século XIX (CARNEIRO, 1996). Modelos em escala ensaiados nas mais variadas circunstâncias, e com diferentes tipos de material podem ser vistos em Martins (1990), que realizou experimentos em modelos de microconcreto para

validação de estruturas. Para outras aplicações, tais como carregamento pelo vento, modelos são ensaiados em túneis de vento visando conhecer o comportamento da estrutura final.



Figura 2. Passarela composta pela intersecção de dois arcos de parábola, construída em aço e madeira.

Fonte: Constructalia-

http://www.constructalia.com/br_BR/gallery/galeria_detalle.jsp?idProyec=1364195#

Apesar da sofisticação dos exemplos citados, o presente trabalho, dentro do contexto teórico-experimental investigou um tipo mais simples de passarela e seu comportamento dinâmico sob a influência do carregamento induzido por pessoas, que foi tomado como objeto desse estudo, frente ao desafio pedagógico. A passarela em estudo está localizada dentro da cidade universitária e dá acesso às Escolas de Engenharia Mecânica e Civil na Escola Politécnica em São Paulo. A figura 3 mostra o aspecto da passarela, indicando a sua posição geográfica bem como os elementos estruturais que a compõe.

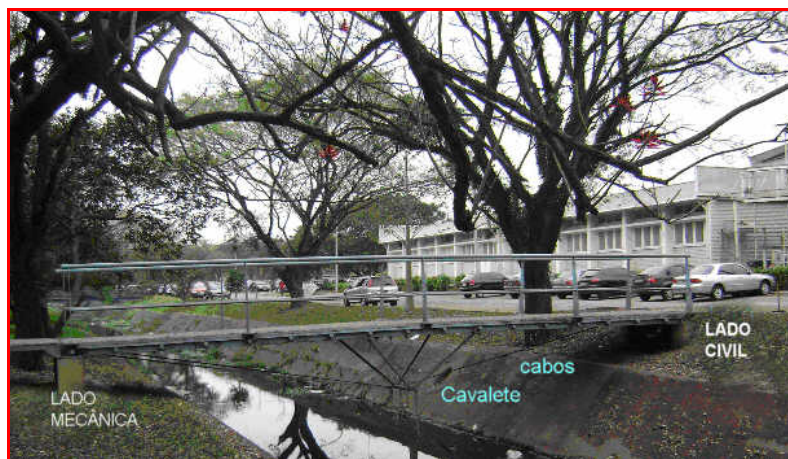


Figura 3. Vista total da passarela e seus aspectos construtivos.

Fonte: acervo próprio

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa, dentro do processo metodológico, foi realizar a instrumentação da passarela com a colocação de servo acelerômetros para fazer o registro dos eventos. O sistema

utilizado foi da marca Lynx modelo ADS2000 IP. A visualização dos sinais e sua análise foi realizada por meio de um computador pessoal genérico tendo como suporte os softwares Lynx Aqdados e Lynx AqDAnalysis do mesmo fabricante do ADS2000 IP. O registro das vibrações foi realizado todas as vezes que um pedestre, ou um grupo de pedestres realizava a travessia sobre a estrutura.

Como parte da metodologia, foi constatado em *loco*, que a passarela foi construída de madeira intertravada e protendida lateralmente. No sentido longitudinal e sob a passarela foi colocada uma estrutura de aço como contraventamento, por onde cabos de aço protendidos impõem uma contra-flexa na passarela.

Para aumentar a rigidez, uma camada de concreto de espessura 0,1 m foi colocada sobre ela. O comprimento total é de 12,0 m, com largura de 2,15 m, conforme ilustra a figura 3

A instrumentação foi feita com três servo acelerômetros, dois postados perpendicularmente ao piso da passarela (sensores 1 e 2) e o outro foi colocado paralelo ao piso da passarela (sensor 3). Por questões práticas, os sensores foram parafusados em bases metálicas de aço com dimensões de 0,12 m por 0,08 m e 0,008m de espessura. Os conjuntos (base+servo) foram posicionados na passarela e fixados, por meio de uma massa automotiva¹ de calafetar, no meio do vão, conforme ilustra a figura 4 e em detalhe na figura 5. A disposição geométrica dos sensores pode ser vista no desenho esquemático (sem proporção) na figura 6.



Figura 4. Posicionamento dos servos sobre o piso.
Fonte: acervo próprio

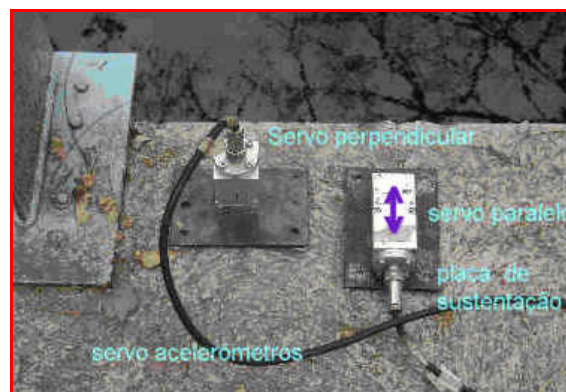


Figura 5. Fixação dos servos acelerômetros e posicionamento sobre o piso da passarela.

¹ O objeto de estudo foi a verificação dos modos de vibração e não as amplitudes de deslocamento da estrutura. Nesse sentido, o amortecimento causado pela inserção de massa de calafetar entre os sensores e o piso da passarela não teve influência nas análises.

Fonte: acervo próprio.

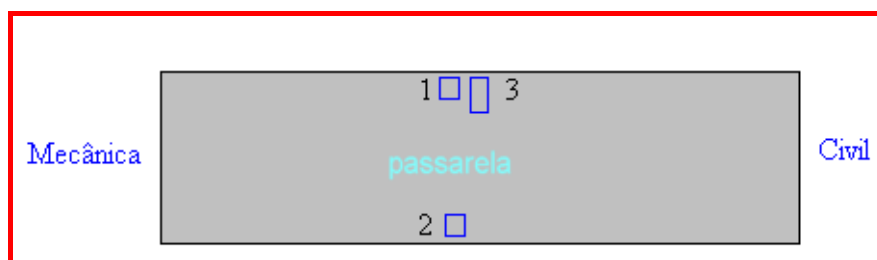


Figura 6. Disposição dos equipamentos.

Fonte: acervo próprio.

A segunda etapa da experiência metodológica foi, após a coleta e análise dos dados, a construção de um modelo computacional representando a estrutura, que foi concebido utilizando-se o método dos elementos finitos por meio do programa SAP 2000. A estrutura foi modelada utilizando-se elementos de barra e elementos de casca. O comportamento dinâmico da passarela foi obtido com curvas no domínio do tempo, figura 7, e da frequência (espectro), no momento da passagem de pedestres sobre na estrutura.



Figura 7. Resposta temporal devido a excitação causada na passarela.

Fonte: acervo próprio

Os sinais aqusitados, devido às várias excitações, realizadas pela passagem solitária ou em grupos de pedestres, sobre a passarela, forneciam energia suficiente para excitar os modos de vibração da estrutura. A figura 8 mostra, em várias situações, a resposta da estrutura mediante essas excitações que, apesar de terem um caráter aleatório, conseguem evidenciar os modos de vibração.

A escala do eixo vertical não está calibrada em unidades coerentes. Isso não foi feito pois o objeto de estudo era visualização dos efeitos e comportamento da passarela.

A observação da figura mostra que: fig.8a, excitação causada pela passagem de várias pessoas ao mesmo tempo e em sentidos diferentes, fig.8b, passagem de três pessoas em único sentido, fig.8c e fig.8d, passagem de uma pessoa e a fig.8e mostra o comportamento da passarela quando saltos intencionais foram realizados no vão central da passarela.

Os sinais aqusitados pelos sensores postados perpendiculares à passarela são apresentados na figura 9 na forma temporal e na forma espectral, onde são destacadas as frequências dos modos de vibração da estrutura. As figuras 10 e 11 mostram o modelo da passarela confeccionado no SAP 2000 e a figura 12 mostra o detalhe do cavalete.

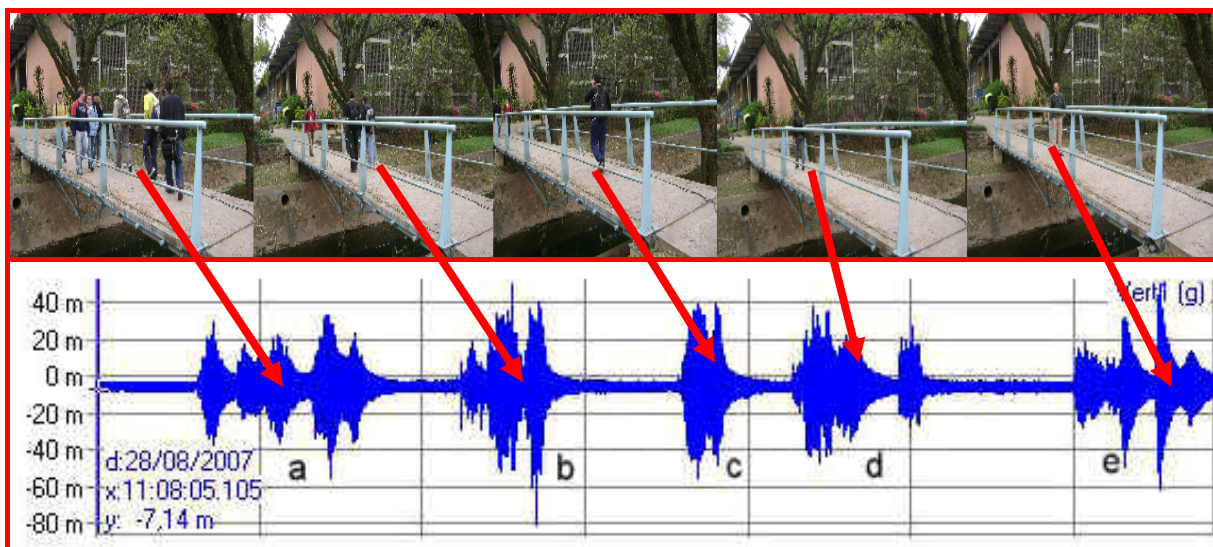


Figura 8. Excitações causadas pela passagem dos pedestres sobre a passarela.
 Fonte: acervo próprio.

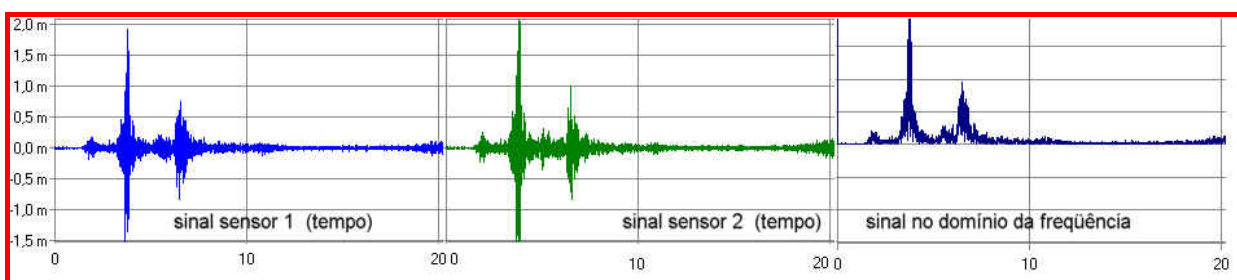


Figura 9. Sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência.
 Fonte: acervo próprio.

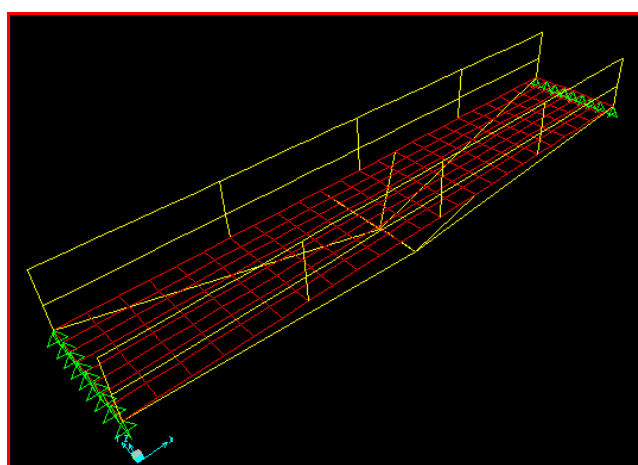


Figura 10 – Modelo da Passarela
 Fonte: acervo próprio

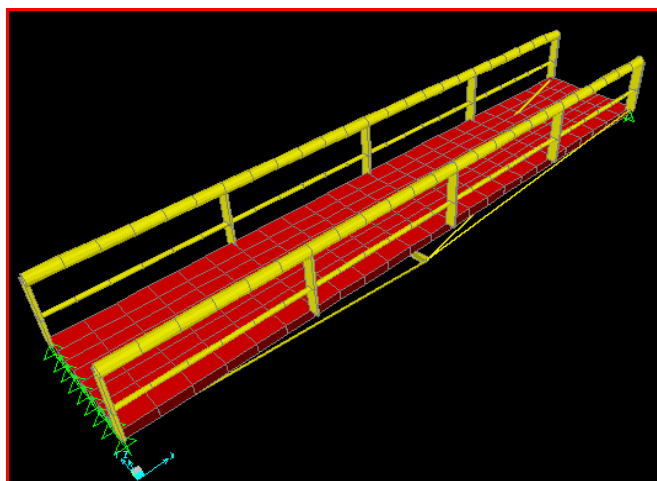


Figura 11 – Modelo da Passarela
Fonte: acervo próprio

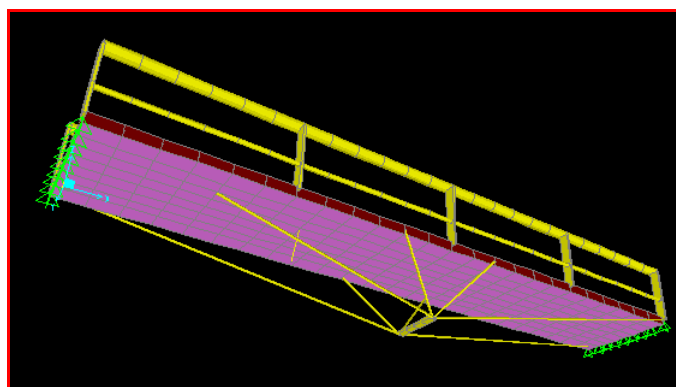


Figura 12 – Detalhe do Contraventamento.
Fonte: acervo próprio

4. RESULTADOS DA PARTE TÉCNICA

Após tratamento dos sinais, filtragem de ruídos e seleção dos sinais mais representativos foram obtidos os gráficos abaixo, figuras 13 a 15. Eles demonstram que a estrutura responde às excitações com três frequências naturais dominantes.

Em contra partida a esses resultados, o modelamento numérico da passarela, apresentou valores concordantes com aqueles obtidos experimentalmente. Os valores não foram mais expressivos, pois houve certa dificuldade na busca das características dos materiais, métodos de construção e geometrias estruturais utilizadas na construção da passarela.

No modelo numérico, desenvolvido pelo método dos elementos finitos no software SAP2000, as extremidades do modelo foram fixadas e através de elementos apropriados a estrutura apresentou os modos de vibração mostrados nas figuras 16 a 18.

A análise e interpretação dos dados, tanto experimentais numéricos, foram computados na tabela 1.

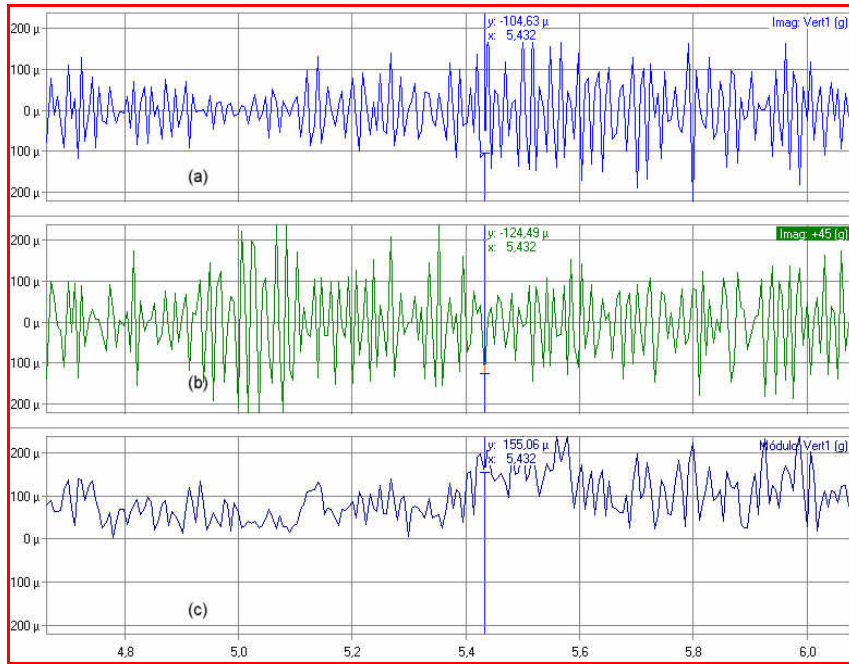


Figura 13. Características temporais das freqüências de excitação dos modos de vibração. Primeira freqüência natural experimental (a) sensor vertical 1 , (b) sensor vertical 2 e (c) sensor horizontal 3 (conforme fig.8).

Fonte: acervo próprio

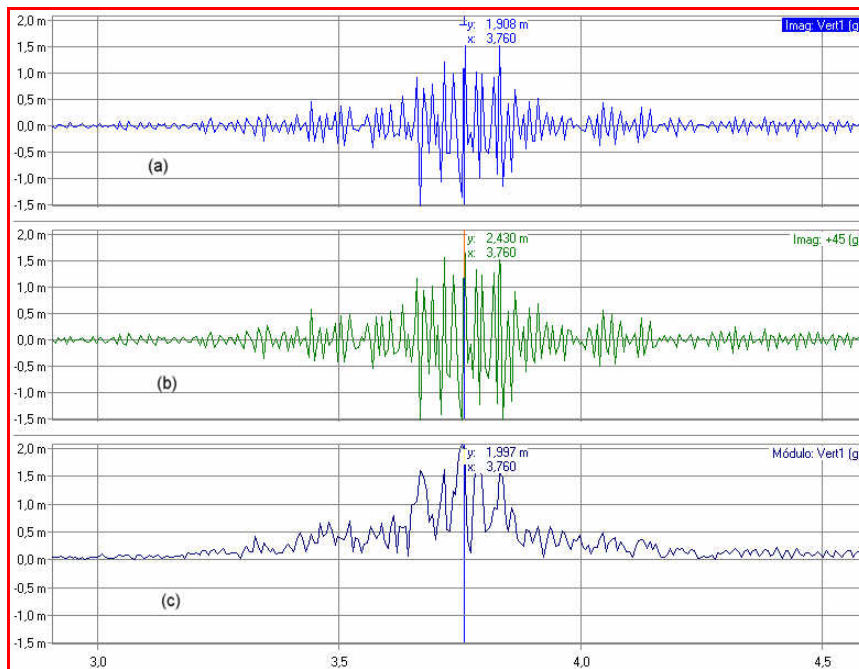


Figura 14. Características temporais das freqüências de excitação dos modos de vibração. Segunda freqüência natural experimental. (a) sensor vertical 1 , (b) sensor vertical 2 e (c) sensor horizontal 3 (conforme fig.8).

Fonte: acervo próprio

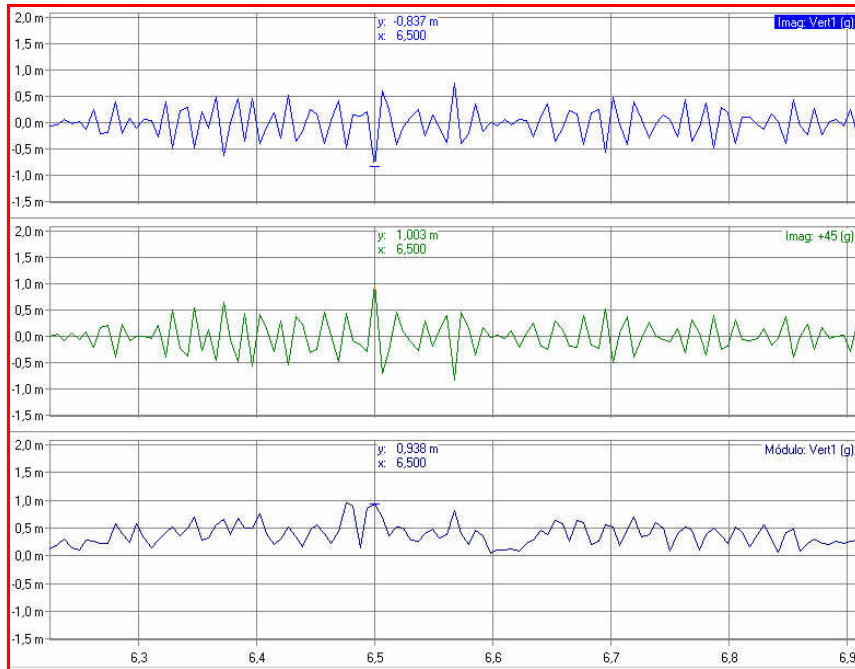


Figura 15. Características temporais das freqüências de excitação dos modos de vibração. Terceira freqüência natural experimental. (a) sensor vertical 1 , (b) sensor vertical 2 e (c) sensor horizontal 3 (conforme fig.8).

Fonte: acervo próprio

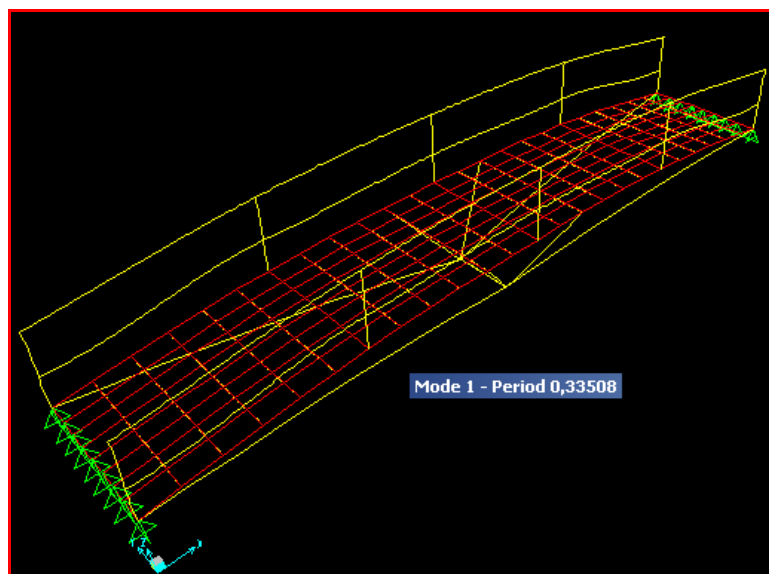


Figura 16. Características da freqüência do primeiro modo de vibração.

Fonte: acervo próprio

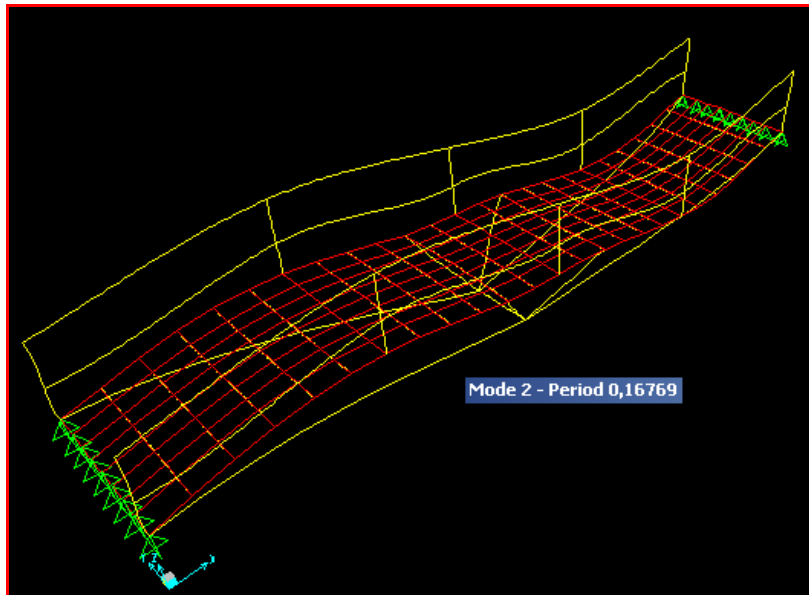


Figura 17. Características da frequência do segundo modo de vibração.
 Fonte: acervo próprio

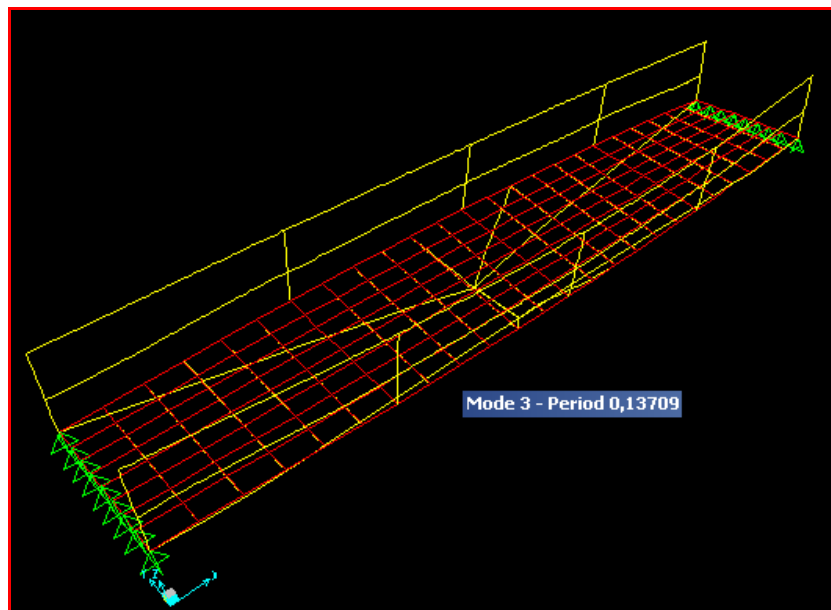


Figura18. Características da frequência do terceiro modo de vibração.
 Fonte: acervo próprio.

Tabela 1. Valores das frequências obtidos no processo experimental e numérico

Classificação da frequência do modo de vibração	Valor experimental (Hz)	Valor obtido no modelo numérico (Hz)
F_1	3,7	3,0
F_2	5,4	6,0
F_3	6,5	7,3

5. RESULTADOS DA PARTE METODOLÓGICA

Após o final do trabalho técnico e análise dos resultados, procedeu-se a elaboração de um relatório final que foi submetido à análise do professor da disciplina. O processo de avaliação foi feito em conjunto onde, destacaram-se os pontos positivos e os pontos menos explorados na análise técnica. Essa discussão não só favoreceu o conhecimento, como deu um aspecto profissional ao trabalho realizado. Cabe ressaltar que alguns pontos, dentro desse processo, poderiam ser acrescentados no sentido de valorizar ações como essa, são eles:

1. O tempo, para elaboração de todo processo correu contra a produtividade individual, ou seja, um período maior seria mais lucrativo em termos da qualidade do trabalho;
2. Repetir a metodologia em outros semestres para validação dessa experiência inicial;
3. O método pode mostrar a existência da divergência entre a metodologia proposta e o ensino tradicional.
4. A mudança na relação professor/aluno possibilitando uma nova concepção do ensino, isso devido à ausência de imposição do conhecimento, liberdade de manifestação e caracterização da avaliação como um processo educacional de duas vias.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na parte técnica se devem ao recurso didático adotado por esta experiência baseada sobre uma visão construtivista. Percebe-se, após a experimentação, que o ensino de engenharia pode ser mudado dentro da sua estrutura metodológica possibilitando aos alunos uma formação técnica e crítica, dirigida para uma visão social como agentes modificadores da sociedade dentro de um espírito inovador e ético. A avaliação dos resultados mostra que a metodologia adotada, para a interpretação dos dados, oriundos da parte experimental e da parte teórica, mostra grande concordância e que o modelo adotado, pelo método numérico, pode ser utilizado como referência em outros estudos estruturais dessa passarela e de outras semelhantes. A discordância vista nos valores da tabela 1, podem ser justificados levando em conta que a estrutura é composta por diferentes materiais e isso pode trazer dificuldades na programação das situações de contorno e na inserção das características dos materiais. Por outro lado, a parte experimental mostrou com bastante nitidez os modos de vibração da estrutura e seu comportamento dinâmico. Pode-se observar que a metodologia aplicada (excitação estrutural natural) permite uma visualização da dinâmica da estrutura sob excitações simples e não programadas. Uma análise superficial da resposta temporal indica que, a frequência de passo dos pedestres apesar de próxima, não excita os modos de vibração. Cabe ressaltar que a condução didática e o procedimento programático foram além do conteúdo tradicional desenvolvido nas Escolas de Engenharia e, que a abordagem temática, serviu como apelo no sentido de fortalecer o vínculo entre teoria de prática.

Para futuros trabalhos seria importante a avaliação da amplitude das oscilações e um estudo sobre a sensação dessas oscilações da resposta do passo e no caminhar do pedestre.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – NBR 8681. Ações e segurança nas estruturas – procedimento. ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – NBR 7188. Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres, ABNT, Rio de Janeiro, 1984.

ALMEIDA, P, A, et al. Stressing with Real Time Load to Installation the Stay Cable in the Brasilia Bridge. Disponível no site da empresa: <http://www.Isetech.com.br/Publicações>. Acesso dia 16 de novembro de 2007.

CARNEIRO, F, L. Análise Dimensional e teoria da Semelhança e dos modelos físicos. Editora da UERJ, Rio de Janeiro, 1996.

DER (São Paulo). Departamento de estradas de Rodagem, instrução de projeto IP-DE-C00/004. Projeto de Passarelas. 2005.

Dias, A, A. Segundinho, A, G, P. Estudo do comportamento dinâmico de passarelas de madeira. Caderno de Engenharia de Estruturas, v. 8, n. 32, p. 85, São Carlos, 2006.

MARTINS, A, R. Técnicas experimentais para aplicação de modelos de microconcreto. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1990.

OESP. Kassab anuncia que o rodízio volta amanhã. Reportagem de Alexandra Penhalver e Humberto Maia Junior. caderno metrópole, quarta-feira, 11 de julho de 2007.

Pletz, E. Passarela estaiada com tabuleiro de madeiral laminada protendida em módulos curvos. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

RAYS, O, A. A unidade da teoria e da prática na didática escolar. *In: Cadernos Didáticos do C.P.G.E. n.21.* Santa Maria: UFSM, 1990.

Téchné. Passarela do aço, conheça as soluções estruturais da passarela Simone de Beauvoir, sobre o rio Sena, em Paris. Reportagem feita por por Éride Moura. Revista Téchné Edição 117, dez. 2006.

METHODOLOGICAL EXPERIMENT INVOLVING A THEORETICAL-PRACTICAL STUDY OF DYNAMIC BEHAVIOR OF A PEDESTRIAN BRIDGE

Abstract: *According to the dynamics of school curricula, in terms of undergraduate and graduate, it has realized a discussion about the excess of theory to the detriment of practical activities carried out by students inside or outside the classroom. The practice is not only the one dedicated only to the life of the professional future of Engineering, but that also focused on carrying out activities which necessarily involves the critical analysis of theoretical content taught during the course, where he seeks the formation of the person before the knowledge. The proposal, to overcome the traditional pedagogy, was the student to be the researcher of content, and presents them as a result of a general activity. Therefore, it is aimed to describe a methodological expertise developed during the course of Experimental Analysis of Structures, taught in the second half of 2007 in the Polytechnic School of Sao Paulo. Their approach, within the content, was the analysis of vibrations in structures. However, it has proposed the study of the vibration caused by people walking on a bridge, whose board was prepared by using many sensors in order to obtain consistent data to validate a model made by the technique of finite elements. As specific objective it was intended to show through numerical and experimental trials, how the move of people can trigger modes of vibration of such structure. The universe of the survey was based on a*

pedestrian bridge, located at the University of São Paulo (USP), which is the connection between the School of Civil Engineering with the School of Mechanical Engineering.

Keywords: *bridge, accelerometer , numerical method, acquisition of data, methodological experiments*