

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS PREDIAIS SUBMETIDAS A EFEITOS SÍSMICOS SIMULADOS EM MODELOS

Cláudio Silva Soares¹
Marcos Antônio Barros²

RESUMO

A utilização de modelos qualitativos, como ferramenta didática, vem auxiliando o aprendizado dos alunos de cursos de engenharia e, muitas dessas são vendidas comercialmente ou feitas pelos próprios professores e alunos. No intuito de comprovar tal afirmativa, objetivou-se, neste estudo, analisar as reações de tensões em diferentes modelos de edificações, a partir da construção e desenvolvimento de uma mesa simuladora de abalos sísmicos e de um modelo de estrutura predial com vários pavimentos e distâncias entre os mesmos (0,2 e 0,3m). O modelo do simulador sísmico constou de uma plataforma de madeira MDF, com trilhos de alumínio que serviram como guia para as roldanas fixadas em outra base superior. A base superior foi interligada ao disco giratório por meio de uma haste metálica, o qual permitiu o movimento horizontal oscilatório da base superior, acionada através de uma parafusadeira elétrica. A partir dos resultados foi verificado que a mesa simuladora foi capaz de demonstrar os efeitos sísmicos nas estruturas dos modelos, o que pôde ser comprovado pelos alunos através de cálculos matemáticos que demonstraram os diferentes níveis de dilatações sofridas quando esses modelos de edificação foram submetidos a distintas alturas entre pavimentos. Desta forma, este modelo pode ser utilizado, de forma satisfatória, como ferramenta de apoio didático nas aulas de mecânica geral e em outras disciplinas que analisem as forças sísmicas incidentes numa estrutura edificada.

Palavras-chave: Mecânica geral, Modelo qualitativo, Ferramenta Didática.

INTRODUÇÃO

Não é de hoje que o processo didático pedagógico apresenta algumas lacunas que necessitam ser preenchidas, com a finalidade de que o aluno absorva de forma mais eficiente o conteúdo ministrado por professores, principalmente, da área de engenharias, uma vez que na sua maioria, estes não possuem disciplinas de formação pedagógica em seus cursos de formação.

Essa lacuna, representada muitas vezes pela falta da associação entre teoria e prática, ocorre devido à ausência de interdisciplinaridade dentro dos cursos, ou seja, muitas disciplinas estritamente teóricas deixam de ser exploradas, de forma a incitar, no aluno, uma

¹ Graduando do Curso de Engenharia Civil da Unifacisa, claudioccaauepb@gmail.com;

² Professor Doutor, Unifacisa – Centro Universitário - Departamento de Engenharia Civil, marcos_fis@hotmail.com.

visão de aplicação prática em outras disciplinas ou, até mesmo, no exercício do futuro profissional engenheiro. Aliado a isso, a grade curricular dos cursos de engenharia civil possuem muitas disciplinas com carga horária, quase na sua totalidade, abrangendo bastante teoria e, na maioria das vezes, poucas aulas práticas, devido a uma gama de empecilhos que vão desde a formação acadêmica dos professores, até mesmo uma base curricular desatualizada e muito aquém das necessidades atuais.

Quando se analisa didaticamente esse processo de aprendizado nos cursos de engenharia, é notado que uma aula dinâmica, aparentemente informal e descompromissada com livros didáticos e roteiros, com certeza, rende muito mais e gera mais resultados positivos em comparação com uma aula formal (ROCHA *et al.*, 2017). Partindo desse pressuposto, entende-se que os resultados didáticos que fogem do habitual, com a demonstração prática do que é ensinado, alcançam melhores efeitos em um estimado período.

Uma ferramenta que vem ajudando nesse aprendizado é a utilização de modelos qualitativos, muitos deles vendidos comercialmente ou feitos pelos próprios professores e alunos. Exemplificando como esses modelos ajudam o aluno a entender, de forma mais prática, pode-se imaginar a estrutura de uma edificação formada pela associação das diversas barras de sustentação, e como funcionam os vínculos externos e internos para garantir sua estabilidade, o que também torna a aula mais prática e participativa, porém não permitem a comparação de resultados obtidos por cálculos em sala de aula (como reações, esforços internos solicitantes e deslocamentos) com o observado no modelo (MOURA *et al.*, 2016).

De acordo com Lobosco & Câmara (2018), esses modelos apresentam certa flexibilidade construtiva, pois são construídos para a observação da mecânica estrutural, a partir de suas deformações, logo, precisam ser capazes de evidenciar o comportamento estrutural, através da visualização das deformações apresentadas pela montagem.

Diante do exposto, o presente trabalho teve o objetivo de analisar os efeitos sofridos por dois modelos de edificação, quando submetido aos efeitos da mesa simuladora de abalos sísmicos.

METODOLOGIA

Este experimento foi realizado com os alunos do curso de Engenharia Civil da UNIFACISA, no período de maio a junho de 2019. Para elaboração do modelo simulador de abalo sísmico (Figura 1), foi utilizada uma base inferior de madeira MDF (*Medium Density*

Fiberboard), sobre a qual foram instalados trilhos de alumínio que serviram como guia das roldanas fixadas em outra base superior. Acima destas foi fixada uma plataforma superior interligada ao disco giratório por meio de uma haste metálica, o qual permitia o movimento horizontal oscilatório da plataforma superior. O acionamento do movimento deste disco foi feito através de uma parafusadeira elétrica acoplada ao parafuso central do mesmo.

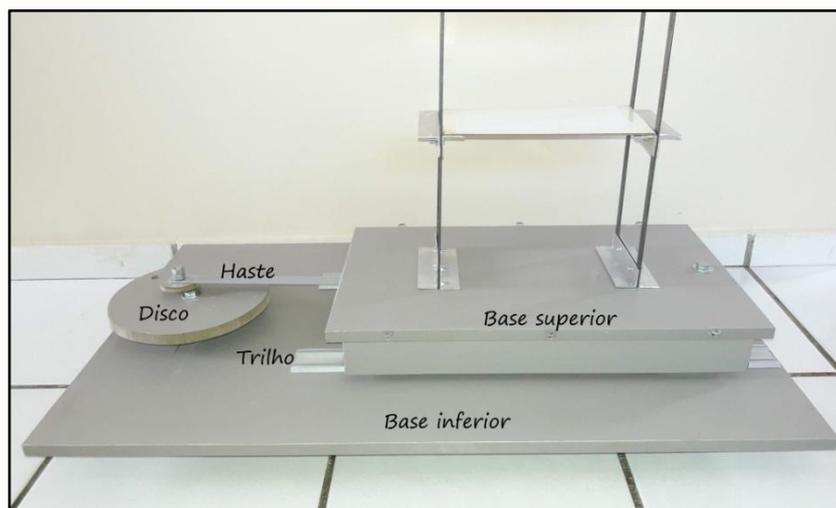


Figura 1. Mesa simuladora de efeitos sísmicos. Fonte: os autores.

As variações de velocidade e, conseqüentemente, intensidade do abalo sísmico, foram obtidas com os diferentes níveis de rotações que a parafusadeira possui, assim como com a variação da disposição da barra de ligação nos diferentes orifícios do disco. Com relação à medição da intensidade sísmica, esta foi determinada através de um *App* de *Smartphone* denominado *Vibrationanalysis* que fornece dados gráficos e numéricos, como deslocamento nos eixos x , y e z , amplitude da aceleração e distância, assim como frequência do movimento.

Na avaliação do simulador sísmico, foram aplicados exemplos de modelos qualitativos ou elásticos elaborados a partir da semelhança geométrica direta com a estrutura proposta de uma edificação de vários pavimentos com duas distâncias distintas entre estes pavimentos (0,2 e 0,3m). De acordo com Lobosco e Câmara (2018), esses modelos apresentam certa flexibilidade construtiva, pois são construídos para a observação da mecânica estrutural a partir de suas deformações, logo, precisam ser capazes de evidenciar o comportamento estrutural através da visualização das deformações apresentadas pela montagem.

Neste sentido, foi feito o diagrama de corpo livre com um modelo simplificado de deslocamentos laterais nos múltiplos graus de liberdade (pavimentos), com plataformas

paralelas representando as massas do sistema, as colunas como o elemento de mola e excitação do modelo no eixo x , conforme demonstrado na Figura 3 (Rao, 2008).

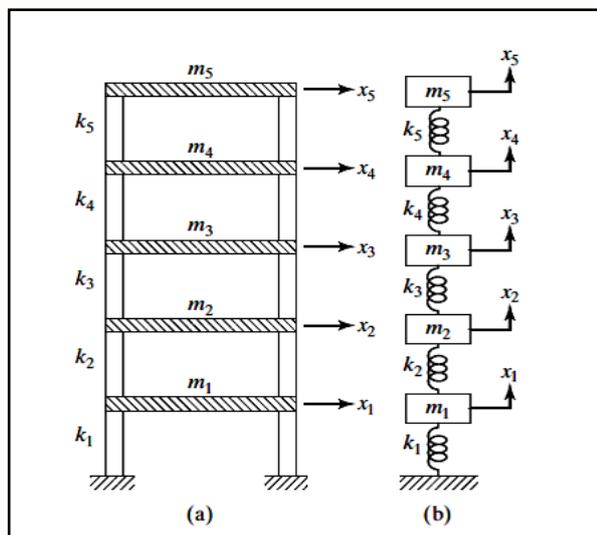


Figura 3. Modelo de vibrações em plataformas paralelas.

No modelo aqui proposto, as quatro colunas de sustentação (meia cremalheira) apresentam a função de elemento de mola. Através da fixação de apoios laterais em alguns dos pavimentos, é possível ser obtido uma variação na flexão do modelo, fazendo variar a sua constante de rigidez. Essa constante também pode ser obtida por meio da variação das distâncias entre cada pavimento. Para compor as colunas de sustentação do modelo, foi escolhida uma haste de ferro com 1.000 mm de comprimento, 13,02 mm de largura e 2,87 mm de espessura (Figura 4).

O modelo da estrutura foi proposto considerando três peças distintas: as régua, as plataformas e os suportes. Os suportes foram fixados nas peças centrais das plataformas ou na mesa por parafusos e porcas através de furos com a mesma distância das furações da mesa isolante de vibrações, garantindo a compressão necessária de modo a restringir qualquer deslocamento ou deslizamento da régua. O material escolhido para o suporte foi alumínio 6061.

As peças centrais das plataformas são o principal elemento de massa do dispositivo que possuem furações para fixação com os suportes. Com relação à montagem do dispositivo, apresentada na Figura 4, pode-se verificar que o mesmo foi formado por 5 plataformas, resultando em 5 graus de liberdade para o sistema.

Neste experimento, foram utilizadas duas distâncias entre as plataformas, sendo adotados 200 mm e 300 mm separadamente em cada teste. Com relação ao tipo de engastamento das vigas, foi considerando a régua como uma coluna biengastada de seção

retangular com flexão em seu eixo x , sendo o segundo momento de inércia da área (I_x), em relação ao eixo x , calculado segundo a equação 01, onde b é a largura da régua e h a espessura (BEER *et al*, 2011).

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{Eq. 01}$$

O material da régua foi considerado como ferro, sendo então realizado o cálculo do deslocamento de viga biengastada sob carregamento perpendicular, obtida através da equação 02 que determina a constante de rigidez da régua (k) conforme sua altura (l).

$$k = \frac{12 \cdot E \cdot I_x}{l^3} \quad \text{Eq. 02}$$

Em seguida, foi calculada a constante de rigidez equivalente (k_{eq}), onde para cada plataforma, as quatro réguas que a sustentam funcionam como uma associação de molas em paralelo agindo sobre uma mesma massa. A Figura 4 mostra, para a primeira plataforma de massa m_1 , a disposição paralela das réguas com coeficientes de rigidez k_1, k_2, k_3, k_4 .



Figura 4 – Molas k_1 em paralelo agindo sob as massas m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 das plataformas.

Tendo em vista que as quatro réguas restringem o movimento da massa m_1 a um eixo em comum, a constante de rigidez equivalente na primeira plataforma (k_{eq}) é determinada a partir do somatório das constantes de rigidez das quatro vigas conforme a equação 03.

$$K_{eq} = \sum_1^4 K_n \quad \text{Eq. 03}$$

As plataformas do dispositivo são paralelas, logo manterão as réguas de uma mesma plataforma sempre com o mesmo comprimento (200 mm).

Também foi verificado a possibilidade de flambagem da estrutura, já que as réguas são o elemento estrutural do dispositivo e que podem estar sujeitas a cargas axiais de compressão, logo é importante verificar se as réguas não sofreriam essa deformação. Para essa verificação foi necessário calcular dois fatores: o índice de Esbeltez das réguas e se a maior carga axial de compressão a qual uma régua esteja submetida é menor que a carga crítica para flambagem.

Considerando as réguas elemento de viga biengastada, sabe-se que o $l_{ef} = 0,5l$ (BEER & DEWOLF, 2015). Como o comprimento da régua é um fator determinante para a resistência a flambagem, foram calculados o índice de Esbeltez (equação 04) e carga crítica (equação 05) para dois casos, onde apenas a distância entre as plataformas é alterada no dispositivo. No primeiro caso se considerou a distância entre as plataformas de 200 mm e desse modo este é o comprimento das réguas. No segundo caso é considerada a distância de 300 mm entre as plataformas.

$$S_r = \frac{l_{ef}}{r} \quad \text{Eq. 04}$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{Eq. 05}$$

Na equação 04, l_{ef} é o comprimento efetivo da viga dependente de sua condição de extremidade. Na equação 05, I é o momento de inércia da seção transversal e A a área da seção transversal da viga.

Beer & Dewolf (2015) mostram que a fórmula de Euler (equação 06) determina o valor crítico da força P_{cr} . Se a força axial de compressão P for maior que a P_{cr} , a viga sofrerá flambagem.

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad \text{Eq. 06}$$

Com relação à massa crítica (m_{cr}), esta é proveniente do carregamento crítico (P_{cr}) dividido pela aceleração da gravidade ($9,80665\text{m/s}^2$), conforme equação 07.

$$m_{cr} = \frac{P_{cr}}{9,80665} \quad \text{Eq. 06}$$

As régua ou colunas conectadas entre a plataforma isolante e o primeiro pavimento são as que estão submetidas ao maior carregamento de peso e, conseqüentemente, possuem maior risco de flambagem. Devido à maior massa apoiada sobre elas, o carregamento crítico foi comparado com o carregamento que estas quatro primeiras régua estão submetidas.

Para determinação do peso de cada item do modelo estrutural, foi utilizada uma balança de precisão 0,001g. Deste modo, o peso total de cada estrutura foi determinado, multiplicando-se o peso unitário de cada peça por sua respectiva quantidade presente em cada modelo de edificação (Tabela 1).

Dividindo o valor da massa total (Tabela 1) pelo número de régua que a suportam, chega-se no valor máximo de carregamento que uma régua estará sujeita no dispositivo (equação 08).

$$m_{máx} = \frac{m_{tot}}{n^{\circ} \text{ pavimentos}} \quad \text{Eq. 08}$$

DESENVOLVIMENTO

A utilização de modelos físicos vem sendo descrito e usado durante boa parte da história humana, pois Oliveira (2008) ressalta que o homem vem utilizando modelos, em diferentes setores, como meio de adquirir conhecimento não somente no campo da engenharia, mas também na maioria dos laboratórios e em qualquer área de conhecimento, se utilizam modelos como simulação da realidade.

Neste sentido, é de fundamental importância que os profissionais envolvidos na concepção dos projetos estruturais tenham habilidade de visualizar e compreender o comportamento da referida estrutura em diferentes hipóteses de combinações das ações e carregamentos. Neste sentido, Brito *et al.*, (2017) comentam que, para isso, é essencialmente necessário que os alunos devam desenvolver a percepção espacial intuitiva, para compreender o comportamento local e global de uma determinada estrutura, a fim de idealizar o projeto arquitetônico aliado ao conhecimento e percepção da importância da otimização na modelagem da estrutura.

Em estruturas especiais e em estruturas de pontes, tem se utilizado muito modelos no estudo de vibrações e do efeito das cargas dinâmicas nas estruturas. Tem sido comum o uso desses modelos para estudar problemas devido aos efeitos sísmicos e às ações de vento nas estruturas (BRITO *et al.*, 2017).

No entanto, segundo Teixeira (2016), atualmente no ensino de engenharia, a exploração desta vertente intuitiva é deixada de certa forma para segundo plano, já que a exposição dos conceitos estruturais é feita quase exclusivamente por via analítica, menosprezando noções qualitativas, o que dificulta a aprendizagem na compreensão dos conceitos teóricos por parte dos alunos.

Neste sentido, este estudo visa contribuir no aprendizado dos alunos do curso de engenharia civil, através da construção e validação de um modelo de mesa simuladora de efeitos sísmicos e suas conseqüências numa estrutura modelo de edificação com vários pavimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo estrutural da edificação é composto por vários itens, descritos na Tabela 1, onde observa-se o resultado das características de cada peça presente na plataforma, como seu material, quantidade e peso total de cada conjunto.

Tabela 1. Massa de cada componente do modelo de prédio.

Peça	Material	Massa unitária (kg)	Quantidade	Total (kg)
Plataforma	MDF	0,0756	05	0,378
Suporte	Alumínio	0,0233	20	0,466
Parafuso	Aço carbono	0,0015	20	0,030
Porca	Aço carbono	0,0006	20	0,012
			<i>m_{total}</i> :	0,886

Neste contexto, é importante salientar que a determinação destes dados é de extrema importância, quando se trabalha com modelos representativos, pois, a partir desses, o aluno pode extrapolar os cálculos para os demais materiais utilizados nas edificações de tamanho e material em escala natural.

Essa idéia é corroborada por Moura *et al.* (2016), quando ressaltam a possibilidade de comparação de resultados calculados em modelos, utilizando as teorias da resistência dos materiais e das estruturas, auxiliando assim no aprendizado, uma vez que permite apresentar

bases teóricas dos problemas aos alunos, aplicá-las na resolução de exercícios e comprová-las com a comparação daquilo calculado ao que foi medido no modelo.

O cálculo do segundo momento de inércia foi determinado com aplicação dos dados da tabela 2 na equação 01. Como resultado deste cálculo, verifica-se que o segundo momento de inércia para este modelo de edificação apresentou valor de $2,565 \times 10^{-11} \text{ m}^4$.

Tabela 2. Cálculo do segundo momento de inércia da área em relação ao eixo x (I_x).

b (m)	h (m)	I_x (m^4)
$13,02 \times 10^{-3}$	$2,87 \times 10^{-3}$	$2,565 \times 10^{-11}$

Neste sentido, Zanelatto (2017) utilizou um modelo com réguas de aço inox de seções b e h com $25,0 \times 10^{-3}$ e $7,0 \times 10^{-4}$ m, respectivamente, e obtiveram um valor de $7,146 \times 10^{-13} \text{ m}^4$ no segundo momento de inércia (I_x). Quando se compara o resultado desse autor com os dados deste trabalho, verifica-se que quando maior a seção transversal ($b.h$) da coluna estrutural de sustentação da edificação, maior será o valor do segundo momento de inércia neste edificação.

A Tabela 3 exibe o resultado do cálculo da constante de rigidez para uma única régua, onde verifica-se que o aumento da altura entre as plataformas (l) faz com que haja diminuição desta constante de rigidez.

Tabela 3. Cálculo da constante de rigidez (k).

l (m)	E (N.m^{-2})	I_x (m^4)	k (N.m^{-1})
0,2	19×10^{10}	$2,565 \times 10^{-11}$	7.310,25
0,3	19×10^{10}	$2,565 \times 10^{-11}$	2.166,00

Para os diferentes comprimentos entre as plataformas ($l = 0,2$ m e $0,3$ m), a Tabela 4 dispõe o coeficiente de rigidez k_1 da massa m_1 , k_2 da massa m_2 , k_3 da massa m_3 e k_4 da massa m_4 e o coeficiente de rigidez equivalente, o qual é o somatório dos demais. Diante os resultados, assim como verificado no item anterior, também é evidenciado que a variação da altura entre as plataformas é inversamente proporcional ao coeficiente de rigidez equivalente.

Tabela 4 - Cálculo da constante de rigidez equivalente (k_{eq}).

l (m)	k_1 (N/m)	k_2 (N/m)	k_3 (N/m)	k_4 (N/m)	k_{eq} (N/m)
0,2	7.310,25	7.310,25	7.310,25	7.310,25	29.241,00
0,3	2.166,00	2.166,00	2.166,00	2.166,00	8.664,00

Esses cálculos da constante de rigidez foram validados no modelo quando o mesmo foi submetido ao movimento da mesa sísmica, pois se verificou que, quando maior a altura entre as plataformas da edificação, maior a deformação sofrida por esta estrutura, já que essa apresentou menor rigidez em comparação àquela de menor distância entre plataformas.

Na Tabela 5 são mostrados os resultados dos cálculos que determinam se existe ou não flambagem. Neste sentido, Norton (2013) considera que uma viga com carregamento axial de compressão poderá sofrer falha por flambagem quando seu índice de Esbeltez (S_r) for maior que dez. Se o S_r for menor que dez, a viga não poderá sofrer falha por flambagem, apenas por compressão.

Tabela 5 – Cálculo para verificação da flambagem nas duas alturas entre pavimentos.

l (m)	r (m)	l_{ef}	S_r	P_{cr} (N/m)	m_{cr} (kg)	$m_{máx}$ (kg)
0,2	$8,285 \times 10^{-4}$	0,10	120,70	4.809,952	490,48	0,222
0,3	$8,285 \times 10^{-4}$	0,15	181,05	2.137,756	217,99	0,222

Para os valores encontrados neste experimento, verifica-se que a viga poderá sofrer flambagem já que o índice de Esbeltez encontrado neste trabalho foi menor que dez.

Segundo Pravia *et al.*, (2004), a análise numérica envolvida na disposição de restrições para impedir a flambagem fora do plano não é simples, e é difícil de se ensinar ferramentas numéricas desse tipo para cursos de graduação, por tanto resta mostrar o fenômeno qualitativo para permitir que esse conceito seja compreendido e devidamente aplicado na prática profissional sem necessidade de análises numéricas elaboradas.

A ideia de que os modelos, utilizados nas aulas práticas, trazem muitos benefícios ao processo de aprendizagem dos alunos é reforçada por Anastasiou & Alves (2012), quando comentam que estes alunos não, apenas, memorizam conteúdos e processos de cálculo, mas também podem entender e compreender o conteúdo, além de ajudar a introduzi-los no método científico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização do experimento, foi verificado que a mesa simuladora foi capaz de transmitir os efeitos sísmicos para as estruturas-modelo, fato esse que o que pôde ser comprovado pelos alunos através de cálculos matemáticos que demonstraram os diferentes níveis de dilatações sofridas, quando esses modelos de edificação foram submetidos a distintas alturas entre pavimentos. Sendo assim, foi demonstrado a eficácia do presente

modelo experimental, no sentido de que pôde-se ter um grau de confiabilidade maior nos cálculos realizados, para obtenção de valores relativos às constantes de rigidez, força elástica, etc. Além disso, há traços qualitativos que podem ser observados nos modelos desenvolvidos, que oferecem uma ferramenta didática com grande potencial para facilitar o processo de aprendizagem dos conceitos, métodos e cálculo utilizados no estudo de estruturas edificadas.

À medida que os ensaios foram se desenvolvendo, os alunos puderam observar quais eram os pontos mais solicitados das estruturas construídas, de acordo com as suas diferentes geometrias. Quando se compara o desempenho desses alunos, em cada um dos modelos desenvolvidos, bem como nos resultados por eles obtidos, constatou-se um maior rendimento acadêmico.

Também foi constatado que, durante esse processo, os alunos trabalharam com entusiasmo e motivação, desempenhando, em cada unidade, um papel de agente do processo de aprendizagem, interagindo com o professor, com os demais componentes do grupo e de outros grupos, num diálogo que priorizou a construção do conhecimento.

Em geral, conclui-se que a aplicação desta proposta evidenciou que o desenvolvimento dos conteúdos teóricos relacionados à disciplina de Mecânica Geral, associando uma metodologia centrada na experimentação concreta e visual, torna seus conteúdos mais motivantes e, conseqüentemente, se obtém alunos mais participativos e criativos.

REFERÊNCIAS

ANASTASIOU, L. G. C.; ALVES, L. P. **Processos de Ensino na Universidade: pressupostos para estratégias de trabalho em aula**. 10ª Ed. Univille, 2012.

BEER, F. P.; DEWOLF, J. T. **Mecânica dos materiais**. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

BRITO, L.D.; SANTOS, I.B.J.; RIBEIRO, J.L.; CARVALHO, L.V.; SANGALETTI LOPES, M.R. Modelo reduzido qualitativo aplicado no ensino para pré-avaliação do comportamento de arcos triarticulados em sistemas estruturais MLC. II CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 2017. **Anais**. Buenos Aires, 2017.

LOBOSCO, T.; CÂMARA, D. C. Desenvolvimento de modelos qualitativos para o ensino de estruturas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 3, p. 167-178, set. 2018.

MOURA, A. C. *et al.* Desenvolvimento de um modelo reduzido didático qualitativo e quantitativo de treliça plana. In: XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2016, Natal/RN. **Anais**. Natal, 2016.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, Márcio Sequeira. **Modelo estrutural qualitativo para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008.

PRAVIA, Z. M. C. A.; DREHMER, G. A.; DELLA VECHIA, A. F. Modelo qualitativos do comportamento da estabilidade lateral de treliças planas. In: COBENGE 2004. **Anais**. Brasília, 2004.

RAO, S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TEIXEIRA, G. A. S. **Análise de estruturas porticadas através de modelação física**. Dissertação (Mestrado) Engenharia Civil / Estruturas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

ZANELATTO, T.V.B. **Desenvolvimento de dispositivo didático para aulas práticas de vibrações**. 2017. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.