



USO DO SAP2000 COMO FERRAMENTA PARA MODELAGEM E ENSINO DE ANÁLISES MODAIS E SEUS FATORES CONDICIONANTES

André Luis Silva Bernardo – eng.andrebernardo@gmail.com
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil

Jakson Macedo Alves Campos – jaksonn.macedo@gmail.com
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil

Charles Julião da Silva – charles_js@gmail.com
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil

Elton Arruda Costa – eng.eltonarruda@gmail.com
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil

Aarão Ferreira Lima Neto – aaraof@hotmail.com
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil

Marcelo Rassy Teixeira – marcelorassyteixeira@gmail.com
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil

***Resumo:** A dinâmica das estruturas é um campo da engenharia que estuda o comportamento das estruturas submetidas aos efeitos dinâmicos. As cadeiras que compreende esse campo têm sido cada vez mais inclusas nos cursos de engenharia civil. Assim, durante o desenvolvimento da cadeira de Dinâmica das Estruturas na Universidade Federal do Pará - Campus Universitário de Tucuruí, foi perceptível a dificuldade dos discentes com o entendimento físico dos fenômenos que compreendem as análises modais. Nesse contexto, o presente artigo demonstra a maneira como o software comercial SAP2000 foi utilizado como ferramenta de ensino, para que fosse possível um melhor entendimento dos assuntos ministrados. Como resultado houve um aumento do rendimento dos alunos visto que o programa possui uma interface gráfica onde é possível observar os fenômenos físicos de maneira mais clara e possibilitar aos alunos conhecimento necessário para alavancar suas próprias experiências.*

***Palavras-chave:** Análise modal, dinâmica das estruturas, SAP2000, ferramenta de ensino.*

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





1. INTRODUÇÃO

Durante a disciplina de Dinâmica das Estruturas na Universidade Federal do Pará (UFPA) Campus de Tucuruí, foi perceptível o desconforto dos alunos no que se refere ao entendimento físico dos fenômenos que compreendem as análises modais.

O estudo de dinâmica em estruturas envolve complexos cálculos. No entanto, com a evolução da informática aliada aos diversos softwares de análise estrutural, fica cada vez mais prática e intuitiva a interpretação desses efeitos. De acordo com Tarouco (2003) e (ROMISZOWSKI, s.p.) o uso da tecnologia torna o processo de ensino-aprendizagem mais interativo, sendo assim, o rendimento do aprendiz é maior tendo em vista que há a construção de um ambiente que permite uma participação mais ativa do aluno. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem didática a respeito de análises modais e, desse modo, proporcionar maior confiabilidade na modelagem do sistema estrutural e autonomia na interpretação dos resultados, tornando mais simples o processo de aprendizagem.

2. ANÁLISE MODAL

Avitabile (2010) e Soeiro (2001) dizem que análise modal é utilizada para identificar as frequências naturais de um sistema mecânico. A quantidade de frequências naturais de um sistema depende de seus graus de liberdade, dessa maneira, uma estrutura pode apresentar diversas frequências naturais que são representadas pelos seus modos de vibração.

2.1. MODOS DE VIBRAÇÃO

Segundo Justo (2010), modo de vibração é a forma como a estrutura vibra, ou seja, é a representação de sua deformada mediante uma determinada frequência. Sendo assim, para cada modo existe uma frequência própria intrínseca à estrutura e, portanto, não tem relação com as ações atuantes. Além disso, os modos de vibração são determinados sem o efeito do amortecimento.

2.2. FREQUÊNCIA NATURAL

Conforme Hibbeler (2009), vibração é todo movimento repetitivo de um corpo ou sistema de corpos unidos, em torno de um ponto de equilíbrio. Ao deixar cair no chão dois objetos, um de metal e outro de madeira, será possível identificar que os sons oriundos dos impactos de cada um deles serão diferentes, mesmo que as alturas sejam iguais. Isso se dá, pois, os dois objetos vibram de formas distintas quando sofrem uma excitação, e, o som é a vibração no meio elástico com uma frequência que é capaz e ser percebida pelo ser humano. Essa particularidade de comportamento dinâmico de cada objeto se chama frequência natural, que nada mais é do que a vibração que o corpo adquire ao ser perturbado, tal propriedade depende de um conjunto de fatores tais como a elasticidade e a geometria do objeto. Portanto, a frequência natural (ω_n) é dada pela Equação 1, onde k é a rigidez e m a massa.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Organização



Promoção





3. METODOLOGIA

As estruturas foram modeladas no software comercial SAP2000 baseado método dos elementos finitos (MEF). Através desse mecanismo foi possível analisar a estrutura para a indução de resultados que geraram a discussão sobre o assunto, e assim, possibilitou uma melhor interpretação física dos problemas. Desse modo, foi permitido analisar cada etapa da modelagem de uma estrutura padrão, e a partir dela atribui-se diferentes geometrias, condições de contorno e materiais, a fim de entender como essas modificações podem alterar as propriedades dinâmicas das estruturas como as frequências naturais e modos de vibração, além de atribuir ao aluno conhecimento para alavancar suas próprias experiências nesse campo da engenharia.

4. MODELAGEM ESTRUTURAL

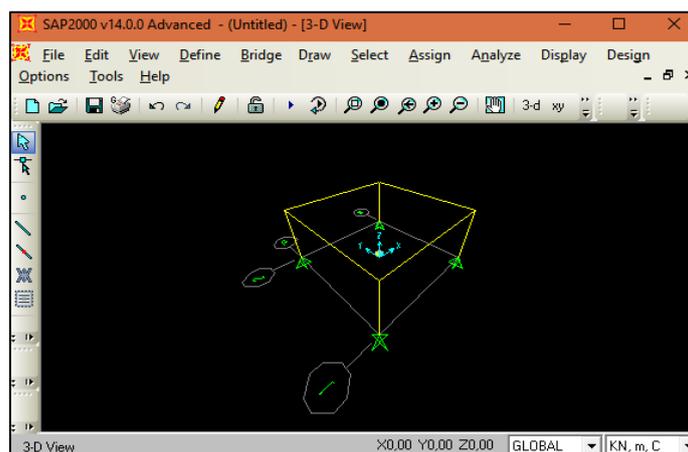
O programa SAP2000 fornece uma pré-configuração do pórtico espacial a ser estudado, através da opção “3D Frames” pelo caminho “New model→ 3D Frames”. Algumas informações de geometria poderão ser inseridas na tela como representado conforme a Figura 1 e Figura 2.

Figura 1 - Dados de entrada

Open Frame Building Dimensions	
Number of Stories	1
Number of Bays, X	1
Number of Bays, Y	1
Story Height	3
Bay Width, X	6
Bay Width, Y	6

Use Custom Grid Spacing and Locate Origin Edit Grid...

Figura 2 - Pórtico lançado.



Em seguida, acessando o menu “Define Materials” pelo caminho “Define → Materials...”, seleciona-se o material “4000Psi” referente ao concreto e é escolhida a opção “Modify/Show Material...”, definindo-se as características do material que será componente dos elementos da estrutura como mostrado na Figura 3:

Organização



Promoção





- Resistência à compressão do concreto (f_c) = 25 MPa
- Peso específico do concreto (γ) = 2500 kg/m³
- Poisson (ν) = 0,2.
- Módulo de elasticidade (E) = 28000 MPa

Figura 3 - Modificações feitas nas características do material.

Para a determinação das seções dos pilares e vigas acessamos o menu “*Frame Properties*”, através do caminho *Define* → *Section Properties* → *Frame Sections*. Em “*Add New Property*” cria-se uma nova propriedade para cada tipo de elemento, como mostrado nas Figuras 4 e Figura 5.

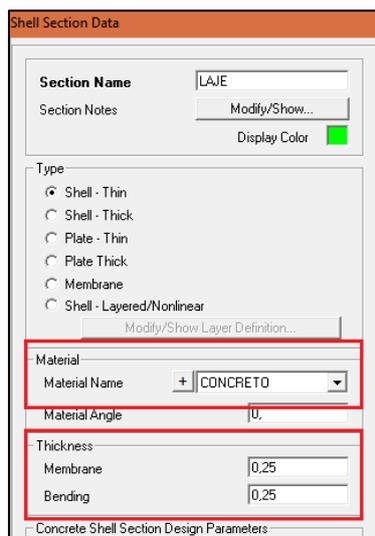
Figura 4 - Determinação da seção dos pilares.

Figura 5 - Determinação da seção das vigas.



Por último, definem-se as características da laje. Admitiu-se laje de 0,25 m de espessura, maciça de concreto. Para tal configuração no software, segue-se o caminho “Define” → “Section Properties” → “Area Sections” de acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Escolha do material e espessura da laje.



Após terem sido feitas todas as configurações acerca dos materiais e seções dos elementos constituintes da estrutura, devem-se atribuir tais configurações aos elementos (pilares, vigas e lajes) e serem determinadas também as condições de contorno do pórtico.

Para atribuição das configurações dos pilares, selecionam-se os quatro elementos representados na janela de trabalho do SAP2000 e segue-se o caminho “Assign” → “Frame” → “Frame Sections”, seleciona-se a opção “PILARES” previamente configurada e confirma em “OK”.

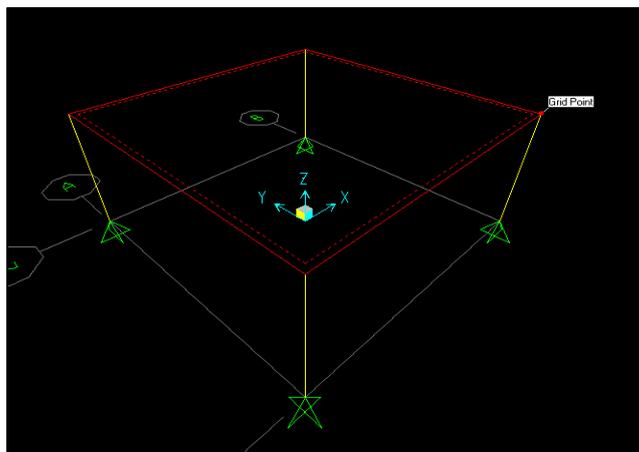
Para atribuição das configurações das vigas o processo é semelhante; selecionam-se os quatro elementos representados na janela de trabalho do SAP2000 e segue-se o caminho “Assign” → “Frame” → “Frame Sections”, seleciona-se a opção “VIGAS” previamente configurada e confirma em “OK”.

Para atribuir as configurações da laje, primeiramente deve ser feita determinação da área que a mesma irá ocupar na estrutura. Essa configuração é feita lançando-se no modelo um elemento de área, através do comando “Draw Poly Area”, que pode ser acessado na guia “Draw”.

Após ativar o comando, selecionam-se os quatro pontos na estrutura do modelo que servirão de referência para locação da laje e confirma o lançamento pressionando a tecla *enter*. A área criada será representada por linha vermelha seguida de linha tracejada de mesma cor, como indicado na Figura 7:



Figura 7 - Representação de área da laje.

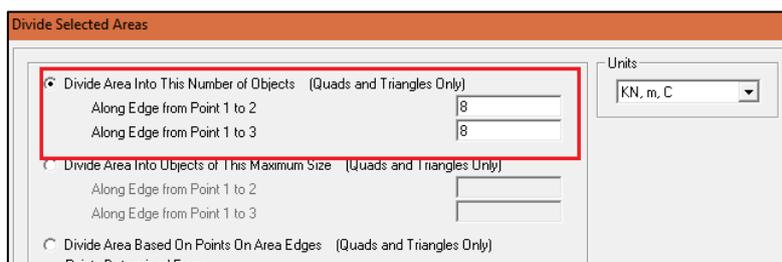


Agora, depois de lançada a área da laje, pode ser atribuída a configuração previamente feita para ela. Seleciona-se a área da laje no modelo, e segue-se o caminho “Assign” → “Area” → “Sections”. Na janela aberta, seleciona-se a seção “LAJE” e confirma clicando em “OK”.

Ainda na laje, para obter resultados mais precisos, é necessário que seja feita uma divisão da área da laje em subáreas com o intuito de um maior refinamento para o processo de cálculo do programa.

Para tal configuração, segue-se o caminho “Edit” → “Edit Areas” → “Divide Areas”. Na janela que se segue, pode-se escolher o número de divisões feita na área nos eixos X e Y. Para a modelagem foi determinada malha de 8 x 8 como observado na Figura 8.

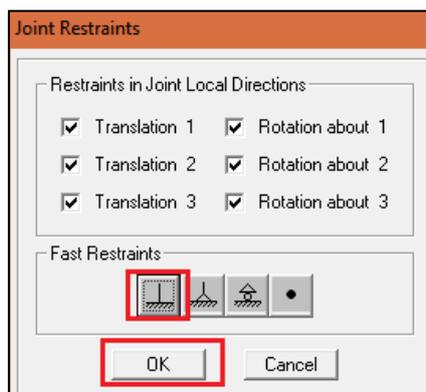
Figura 8 - Discretização da laje em malha de 8x8.



Finalmente, determinam-se as condições de contorno do pórtico. Para o modelo padrão, definem-se todas as ligações engastadas.

É feito primeiramente engaste dos pilares em relação à fundação selecionando os quatro pontos na modelagem encontrados na extremidade inferior de cada pilar. Segue-se o caminho “Assign” → “Joint” → “Restraints”. Na janela que segue pode-se escolher entre vários tipos de vinculações. Para o modelo restringimos as movimentações nos três eixos que pode ser visualizado na Figura 9.

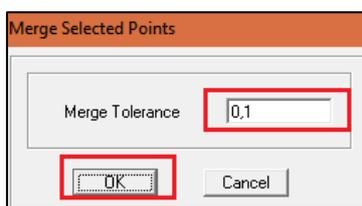
Figura 9 - Vinculação dos pilares com as fundações.



Para os outros pontos da estrutura, atribui-se a opção “*Merge Points*”, que considera que os pontos em um raio pré-configurado de influência estão unidos. Para atribuição desta configuração, selecionam-se os pontos externos da malha da laje e segue-se o caminho “*Edit*” → “*Edit Points*” → “*Merge Points*”.

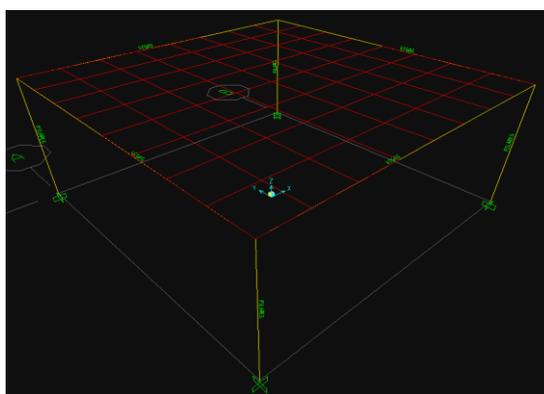
Na janela que segue insere-se o valor do raio de influência do comando. Para a modelagem foi atribuído valor de 0,1, podendo este valor ser até mesmo zero, levando-se em conta que queremos unir apenas o ponto que liga os elementos laje, viga e pilar segue um exemplo na Figura 10.

Figura 10 - Atribuição do comando “Merge Points”.



Finalmente o modelo apresenta-se como indicado na Figura 11 abaixo:

Figura 11 - Aspecto final do pórtico.

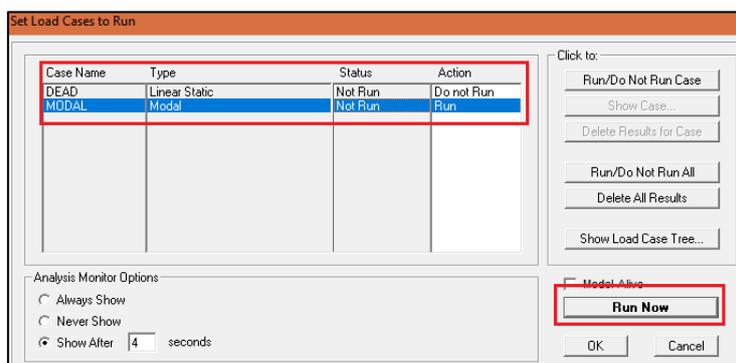


Após todas as configurações realizadas a análise é feita por meio do padrão de análise “MODAL”, que nos fornecerá as propriedades dinâmicas da estrutura como a frequência natural e os modos de vibração. Segue-se o caminho “*Analyze*” → “*Run Analysis*”. Na



janela que se segue, deve-se selecionar o modo “DEAD” e desativá-lo, rodando apenas o modo “MODAL”, confirmar e iniciar análise clicando em “Run Now” de acordo com a Figura 12.

Figura 12 - Escolha do modo de análise.



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de deformação representados nas Figuras 13, 14, 15 e 16 a seguir, são obtidos através do caminho “show deformed shape” e selecionando a opção “modal”.

Figura 13 - Modelo padrão de concreto

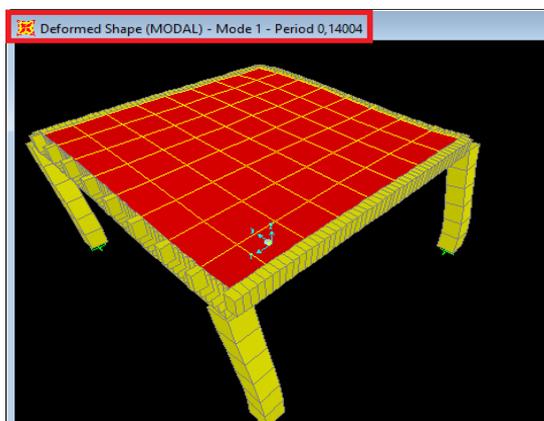
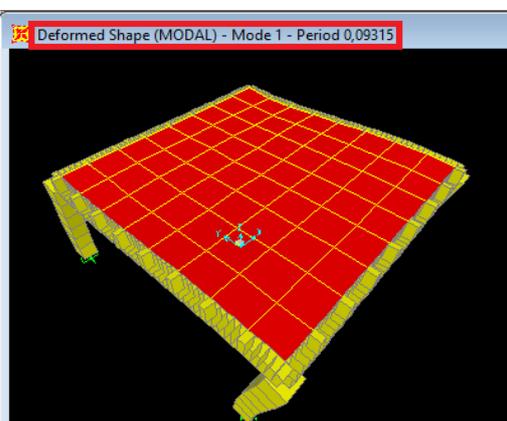


Figura 14 - Modelo de aço



Para a Figura 13 os resultados obtidos para a frequência natural de cada modo de vibração desse modelo serão utilizados como parâmetro de comparação para os outros modelos. Essa versão do SAP2000 informa o período, e a frequência pode ser obtida através da expressão onde a frequência é o inverso do período. Sendo assim a frequência encontrada foi igual a 7,14 Hz.

Para a Figura 14, que corresponde ao modelo feito de aço (onde utilizou-se $E = 200000$ MPa, $\gamma = 7850$ kg/m³ e $\nu = 0,3$), a frequência obtida foi 10,74 Hz, esse resultado era esperado, visto que o módulo de elasticidade do aço utilizado na modelagem é 7,14 vezes maior que o do concreto, e este estando diretamente ligado à rigidez (k) trouxe um aumento nas frequências naturais da estrutura.

Organização

Promoção



Figura 15 - Modelo com Seção de pilar
40x20

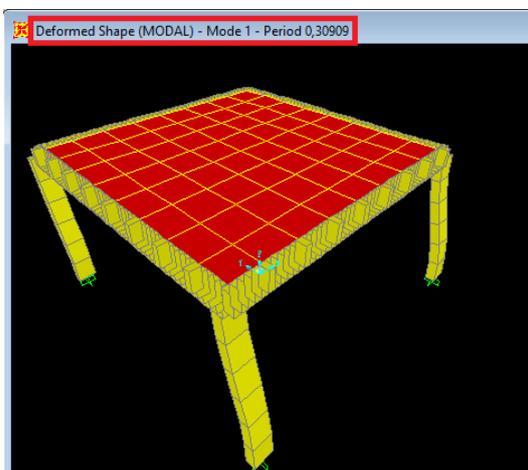
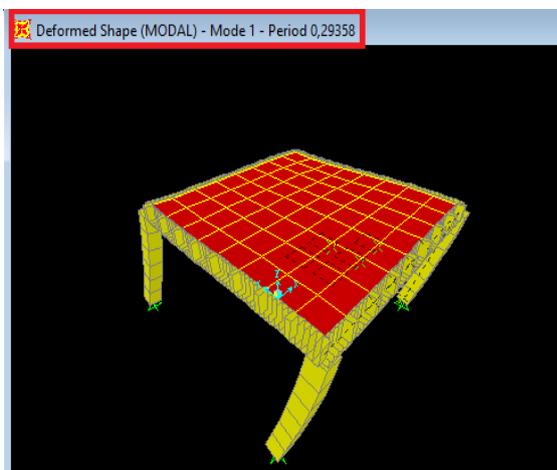


Figura 16 - Modelo com apoio de segundo
gênero



A Figura 15 mostra que a mudança na geometria da seção do pilar de 40x40 centímetros para 40x20 centímetros teve uma grande redução da frequência natural no sentido da menor inercia do mesmo, sendo a nova frequência de 3,33 Hz. Esse resultado era esperado visto que a diminuição da seção transversal do pilar iria afetar a rigidez (k) da estrutura. Desse modo, o eixo que ficou com a menor inercia foi o mais afetado.

A Figura 16 mostra que a utilização de apoios de segundo gênero fez com que o resultado da frequência natural tivesse uma grande redução quando comparado ao modelo padrão. A nova frequência de 3,4 Hz se dá pelo fato de que as condições de contorno têm uma grande influência sobre as propriedades dinâmicas da estrutura, e a troca de um apoio de terceiro gênero por um apoio de segundo gênero tornou isso evidente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação dessa metodologia durante a cadeira de Dinâmica das Estruturas na Universidade Federal do Pará - Campus Universitário de Tucuruí utilizando o SAP2000 versão 14.0.0 presente nos laboratórios da instituição, mostrou um aumento significativo na compreensão dos alunos. Todas as análises e resultados possíveis podem ser visualizados através da interface gráfica do programa o que possibilita uma maior percepção física dos fenômenos, e assim, um maior rendimento durante as aulas visto que o uso dessa ferramenta ajuda a reter a atenção dos discentes. O avanço da tecnologia permite uma facilidade no ensino, porém, essas ferramentas ainda são pouco exploradas, sendo assim, é necessário que metodologias como essa sejam cada vez mais utilizadas para assim possa haver uma maior aprendizagem dos alunos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estrutura de concreto armado– Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





AVITABILE, PETER. Tutorial notes: structural Dynamics and Experimental Modal Analysis. Modal Analysis & Control Laboratory University of Massachusetts Lowell, 2000.

CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J. Dynamics of Structures. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1993.

HIBBELER, Russell Charles. Dinâmica. 12. ed. São Paulo: ABDR, 2010. 591 p, il.

JUSTOS, Rodrigo; UNIVERSIDADE FEDERAL NOVA DE LISBOA, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Comparação do desempenho e de funcionamento de programas comerciais (ANSYS e SAP2000) focado à análise sísmica, 2010. 85p, il. Tese (Doutorado).

ROMISZOWSKI, A. Revista Brasileira de Aprendizagem Aberta e a Distância. Editorial, v. 2, n. 3, 2003. Disponível em: <http://www.abed.org.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?UserActiveTemplate=1por&inford=895&sid=22>. Acesso em: 20, maio, 2017.

SANTOS, A, A; LOPES, R, C; LOPES, A, P; CASTRO, L, C. Elaboração de um tutorial do SAP 2000 para o estudo de vibrações livres em pórticos espaciais. Anais:XXXV–Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Curitiba: PUCPR, 2007.

SOEIRO, S. N. Análise Modal Experimental. (Mestrado em Engenharia Mecânica Grupo de Vibrações e Acústica), Universidade Federal Do Pará, Belém – Pará, 2001.

TAROUCO, Liane Magarida Rackenbach et al. **Formação de professores para produção e uso de objetos de aprendizagem.** Disponível em: http://www.cinted.ufrgs.br/renote/jul2006/artigosrenote/a20_21173.pdf. Acesso em: 20, maio, 2017

SAP2000 USAGE AS A TOOL FOR MODELING AND TEACHING MODAL ANALYSIS AND ITS CONDITIONING FACTORS

Abstract: *The dynamic of structures is an engineering branch which studies the behavior of structures under dynamic effects. The subjects that comprise this field have been increasingly included in civil engineering courses. Therefore, during the development of the Dynamic of Structures subject in the Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí, It was perceptible the difficulty from students with the physical understanding of the phenomena that comprise the modal analyzes. In this context, this paper demonstrates how the comercial software SAP2000 was used as an education tool, to enable a better understanding of the subjects taught. As a result, student yield have been icreasing due to the program's graphical interface, which makes it possible to observe the physical phenomena more clearly and to give students the knowledge required to leverage their own experiences*

Key words: *Modal analysis, dynamic of structures, SAP2000, education tool.*

Organização



Promoção

