

MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURA AUTO PORTANTE CALIBRADA ATRAVÉS DE PARAMETROS MODAIS

Fabiano Eduardo Moraes Matos, FabianoEMMatos@hotmail.com^{1,2}

Cláudio José Martins, cjmartins@civil.cefetmg.br¹

Marina F. M. Campos, marinafmcampos@gmail.com¹

Diego Goulart Lucena, diegoglucena@gmail.com¹

Nathalia Alves Dornellas Fonseca, nat_dornellas@hotmail.com¹

¹ PPGEC- CEFET-MG, Av. Amazonas 7675- Nova Gameleira - Belo Horizonte - MG - Brasil

² Banco do Brasil, Av Estados Unidos 561, 8º andar, Setor de Engenharia – Comércio – Salvador

Resumo: Este artigo vem descrever as etapas de modelagem numérica de um edifício em alvenaria estrutural de bloco de concreto com 16 pavimentos e uma área de arrasto de 1619 m² submetida à ação dos ventos. Esta modelagem numérica foi obtida através do levantamento dos seus parâmetros dinâmicos (frequências naturais, taxas de amortecimento e modos de vibração). A caracterização numérica foi realizada em três etapas, sendo a inicial com a confecção do modelo 3D em software de CAD – Computer-Aid Design gerando 767 elementos lineares e 47846 elementos de superfícies. Na fase seguinte, o modelo foi exportado para um programa baseado no MEF- Método dos Elementos Finitos, onde foram atribuídos os materiais e as condições de contorno gerando 271.782 equações de equilíbrio para o cálculo do comportamento da estrutura e a verificação das frequências naturais do edifício. Para avaliação do modelo foram levantados in loco os sinais das vibrações, devido principalmente às ações dos ventos, sendo captadas em pontos distribuídos pela edificação. Com os registros das vibrações, os sinais do domínio do tempo foram tratados e transformados em domínio de frequência, e, dessa forma, foram encontradas as principais frequências naturais da estrutura. E, finalmente, para alcançar o objetivo final deste trabalho de gerar um modelo representativo, foram realizados ciclos de calibração do modelo com base nos parâmetros modais experimentais até encontrar uma boa correlação entre os resultados do experimento e o modelo numérico.

Palavras Chaves: modelagem numérica, vibrações em edifícios, parâmetros modais.

1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos foram conduzidos a fim de realizar um modelo numérico que melhor retrate a alvenaria estrutural. Para tal foi necessária a segmentação em dois grupos: a micro-modelagem para avaliar o comportamento do prisma de alvenaria como realizaram Lourenço (1997), Gomes (2001), Peleteiro (2002) e Barreto (2002) e a macro modelagem para a verificação do comportamento global da estrutura como realizado por Porto (2010), Ceroni et al (2014), Cakir et al (2015). Aprofundando ainda a análise de modelos numéricos, Brincker (2014) observa que a análise estrutural pode aumentar seu foco observando o comportamento dinâmico das estruturas e considerando os efeitos das ações externas em relação ao tempo, assim como também descreve Soriano (2014). Através dessa análise, é possível tornar a utilização de parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento) para caracterização de materiais e estruturas.

A heterogeneidade da alvenaria estrutural é bastante extensa se comparado a estruturas em concreto armado ou metálicas e exige seu maior detalhamento. Sua parte estruturante está distribuída em todos os prismas de alvenarias e mostra que mais parâmetros devem ser compreendidos, principalmente os aspectos constitutivos dos elementos estruturais que são utilizados para a confecção do modelo numérico. Por este motivo, este estudo entende como relevante relatar as etapas de modelagem e a sua calibração utilizando parâmetros modais para confecção de um modelo final que possa ter comportamento dinâmico semelhante ao real.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

2.1 Obtenção dos parâmetros modais

Para investigação de uma estrutura do porte da edificação que totaliza 8.063,16 m² de pavimento tipo e 44,31m de altura, optou-se por ser mais conservador e garantir o registro significativo tanto no aspecto qualitativo quanto

quantitativo. Foram considerados os pontos distribuídos como mostra a figura 01, totalizando assim 18 pontos. Definiu-se o período de 1 hora para a leitura em cada ponto, perfazendo um total de 18 horas de levantamentos.

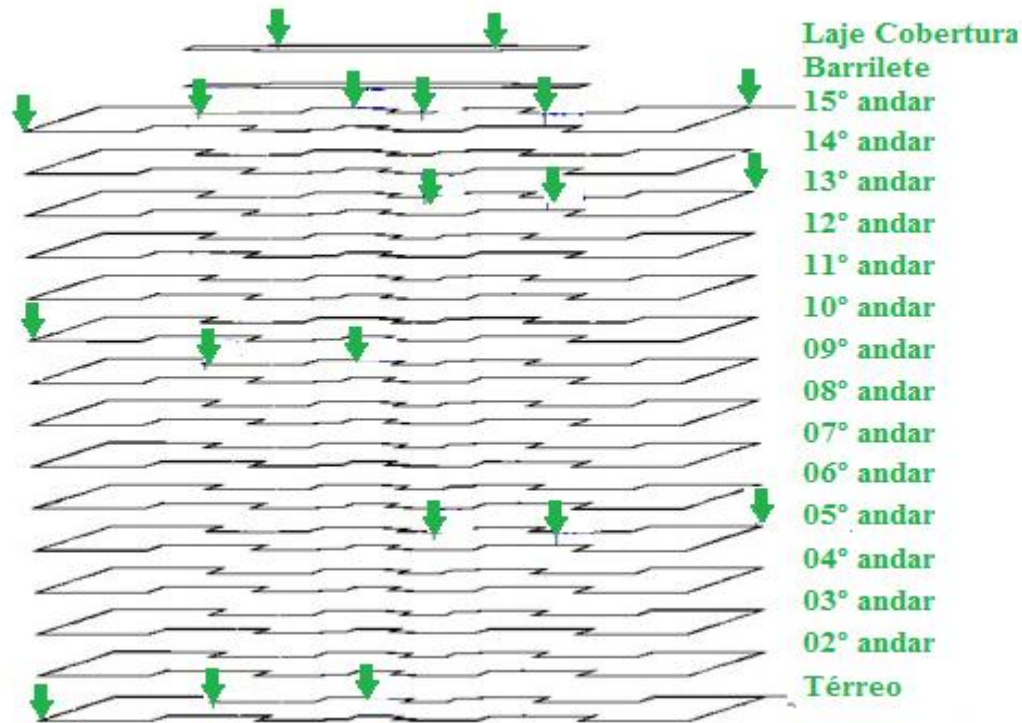


Figura 01 – Exemplo de sinal no domínio do tempo.

As técnicas de identificação modal podem ser classificadas de duas formas: método de análise no domínio da frequência, baseando-se em estimativas espectrais das respostas obtidas ou, método no domínio do tempo utilizando como base as séries temporais da resposta da estrutura.

Um sinal pode ser representado no domínio do tempo, quando expresso em função do tempo de aquisição conforme representado na Fig. 02

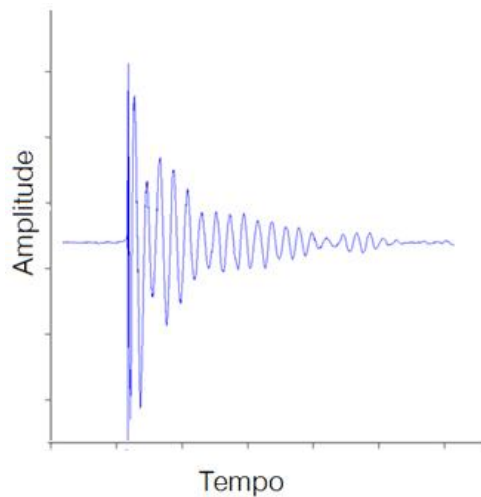


Figura 02 – Exemplo de sinal no domínio do tempo.

Ao aplicar a transformada de Fourier nos sinais, é possível observar o mesmo sinal no domínio da frequência, onde esse é representado em função da amplitude de cada componente harmônica como mostra a figura 03.

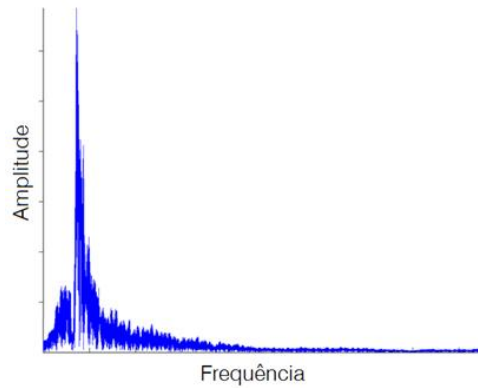


Figura 03 – Exemplo de sinal no domínio da frequência.

Após tratamento das 18 leituras utilizando software de processamento de sinais, foram obtidos os resultados apontados na tabela 01. Para tal, foi utilizando o algoritmo Fast Fourier Transform (FFT) que realiza a decomposição do sinal em séries temporais no domínio da frequência, utilizando as séries de Fourier. E, também, a identificação estocástica por subespaços (SSI) que identifica ações randômicas. Essas ações representam a fase transiente do carregamento impulsivo e estabelecem um padrão estocástico caracterizado como ruído branco, podendo assim segregar do regime de vibração livre que não é aleatório e obter uma referência de funções de correlação do sistema. A técnica dos subespaços (SSI) é bastante eficiente para demonstrar frequências que estão próximas entre si; entretanto, requer bem mais tempo que FFT para o seu processamento.

Realizadas as duas técnicas para os 18 extratos de vibração adquiridos no campo, obteve-se a tabela 01 que lista as frequências naturais, dos quais seus dados foram utilizados para referencia da calibração.

Tabela 01 – Parâmetros modais encontrados nos processamento da estrutura

Modo	Frequência (Hz)	Desvio padrão Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Desvio padrão Amortecimento (%)
1	1,85	0,115	2,991	1,527
2	2,144	0,16	4,581	2,375
3	4,886	0,043	5,903	1,429
4	5,894	0,083	2,658	0,872
5	6,15	0,073	4,703	0,644
6	7,014	0,092	3,89	1,131
7	9,515	0,083	3,638	1,705
8	9,644	0,173	4,103	1,414
9	10,693	0,093	5,537	1,123
10	11,637	0,136	5,291	0,992
11	11,698	0,126	5,805	1,008
12	12,29	0,015	1,975	1,146
13	12,879	0,139	1,497	0,561
14	15,105	0,159	2,514	0,998
15	15,398	0,181	3,737	1,718
16	15,482	0,119	2,553	1,977
17	17,403	0,162	3,191	2,274
18	17,71	0,187	5,256	1,661
19	19,227	0,151	3,744	1,66
20				
21	20,676	0,235	2,951	1,183
22				
23	21,168	0,191	2,655	0,767
24	22,616	0,037	1,563	0,298
25				

2.2 Desenvolvimento do Modelo numérico

Visto a complexidade dos aspectos estruturais que envolvem um edifício em alvenaria auto portante, foi planejado um modelo numérico para um edifício de 14 pavimentos residenciais e 2 pavimentos de cobertura em geometria 3D. Nesse modelo foi considerada a presença de todos os vãos (portas e janelas) e ainda, a estrutura foi segmentada em paredes, alvenaria, pilares, alvenarias grauteadas e laje que permite um bom acoplamento da malha e atribuição de parâmetros constitutivos mais realistas.

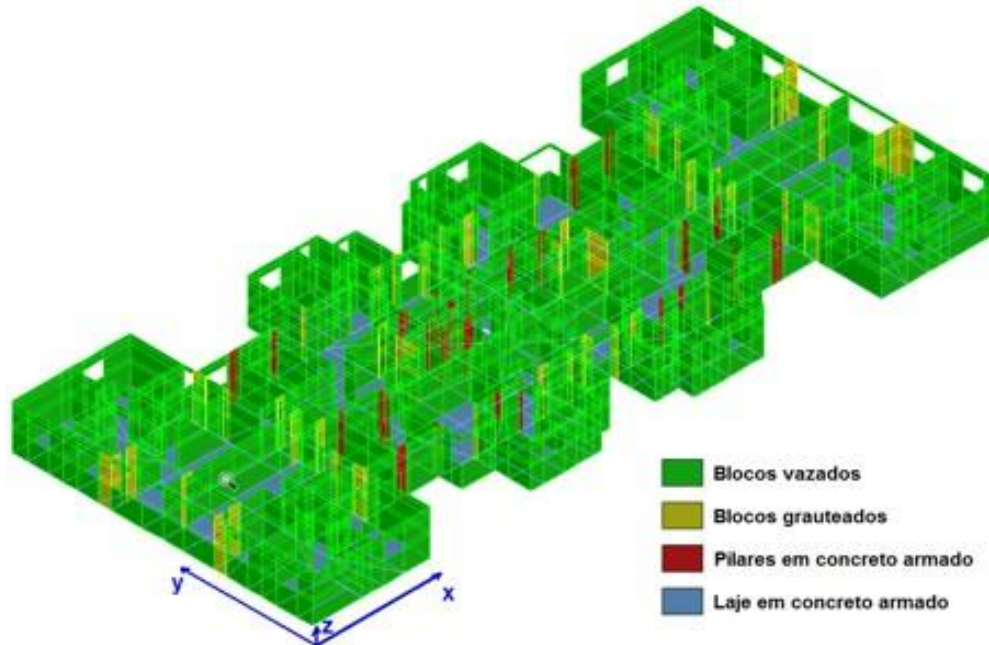


Figure 04 - Elementos estruturais distribuídos num pavimento tipo residencial

Exportado para software baseado em MEF, adotou-se o elemento Shell – figura 05 - para todos os elementos estruturais, com exceção das cintas e fundações, pois este representa tanto o comportamento de placa como de membrana, com boa precisão quando utilizado em análises dinâmicas lineares.

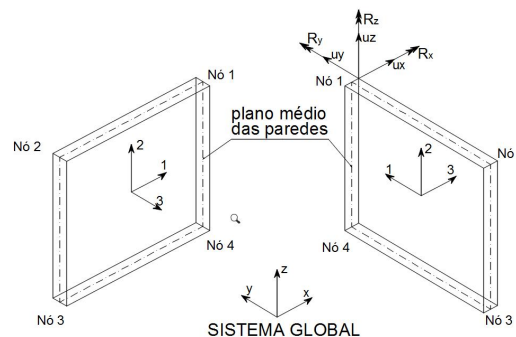


Figura 05 - Modelo de iteração do elemento shell

Outra importante característica do elemento shell é ter seu próprio sistema de coordenadas local, onde os eixos 1 e 2 situam-se no plano do elemento e o eixo 3 é normal a esse plano. Possui ainda 24 graus de liberdade, sendo 6 por nó, compreendendo 3 graus de liberdade de translação U_x , U_y , U_z e 3 graus de rotação R_x , R_y , R_z , como mostra a figura 27, permitindo assim, analisar tanto os deslocamentos como as rotações em cada nó.

Para a representação das cintas foi utilizado o elemento de barra e para as fundações foi escolhido o elemento spring. Esse trabalha similar a uma mola e onde foi especificado o comportamento linear. Este elemento possui 6 graus de liberdade onde é permitido a atribuição de seis constantes de rigidez das molas, sendo uma para cada grau de liberdade; a fim de simular o suporte de uma estrutura. A figura 06 demonstra o esquema de como o elemento se comporta.

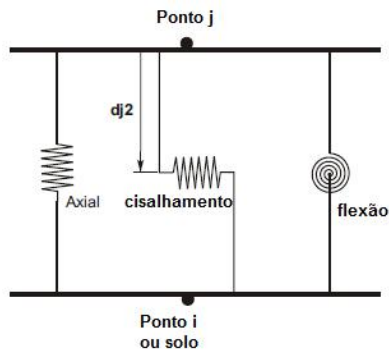


Figura 06 - Modelo de elemento de mola

Para atribuição das propriedades dos elementos que compõem o modelo foi utilizado os dados dos prismas de alvenaria da norma brasileira NBR 15961-1/2011 que já apresenta os dados dos prismas homogeneizados. Essa homogeneização é descrita por Lourenço (1996) que relata as etapas e considera a disposição das juntas verticais e horizontais para encontrar um “material equivalente”. Para os elementos de concreto foram utilizadas as propriedades previstas na norma NBR 6118/2014, como mostra a figura 07.

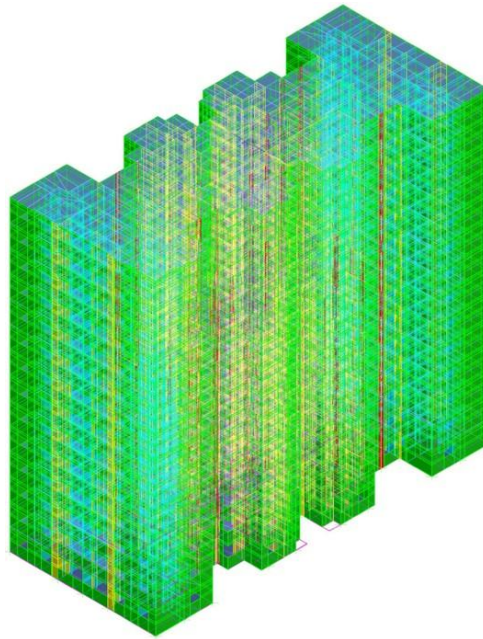


Figura 07 - Modelo completo da estrutura

Após definição da composição dos elementos e de suas propriedades de material, foi verificado o acoplamento dos elementos e atribuídas as condições de contorno que fixam os limites de trabalho da edificação.

Com todos os dados informados ao software, foi executada a análise das frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. O modelo apresentou um total de 45297 nós, sendo 84 com restrição tipo string para simulação das estacas, 767 elementos lineares que representam as cintas e 47846 elementos shell que representam alvenaria, lajes e pilares analisados. Foram geradas 271.782 equações de equilíbrio limitando a análise para a identificação das 25 primeiras frequências naturais e os respectivos modos de vibração.

Verificou-se que as principais mobilizações de massa ocorreram nos primeiros quatorze modos de vibração. No entanto, para garantir resultados significativos, foram selecionados os 25 modos iniciais que garantiram pelo menos 66% de mobilização de massa em todas as direções.

Em relação ao índice U_x , os modos 3 e 9 mobilizaram respectivamente mais de 63,99% e 14,06% da massa da estrutura; sendo estes considerados os principais modos em relação à direção U_x já que são responsáveis por mobilização de mais de 78,05% da estrutura. Já para o índice U_y , os modos 1 e 7 são os principais modos de vibração, com respectivamente mais de 62,25% e 15,34% de mobilização de massa, superando assim os 77,59% da estrutura. Em

relação a U_z , os modos 11,12 e 13 atingiram os valores de 12,70%, 6,32% e 62,44%, o que somados significam um índice de mobilização de massa superior a 81,74%.

No entanto, foi constatado um erro médio de 41,48 % na comparação para os valores das frequências naturais encontradas com desvio padrão de 7,11 para os valores de referência. Essa observação demonstrou uma necessidade de calibração do modelo confeccionado inicialmente.

2.3 Calibração do Modelo

Para fazer a calibração, foram verificadas as influências dos indicadores modificáveis no software baseado em MEF como mostra as figuras 08 e 09. Foi analisado como cada indicador incide na alteração dos parâmetros modais e a sua significância para contribuir no processo de calibração do modelo resultando na tabela 2.

Figura 08 – Tela de entrada de dados para os indicadores no SAP2000

Figura 09 – Tela de entrada de dados para os indicadores no SAP2000

Cada item que possibilita a configuração do modelo como mostraram as figuras 08 e 09 foram estudados individualmente com atribuições de valores distintos e distantes entre si com intuito de provocar alteração nos resultados das frequências naturais. Conforme os resultados e a influência verificada na alteração das frequências naturais foram classificados em: não influencia, influencia e influência considerável.

Tabela 02 – Classificação dos parâmetros

Coeficientes de mola	Molas U_x	U_x	Influencia considerável
	Molas U_y	U_y	Influencia considerável
	Molas U_z	U_z	Influencia considerável
	Molas R_x	R_x	Influencia
	Molas R_y	R_y	Influencia
	Molas R_z	R_z	Influencia
Materiais	Módulo de elast. da Alvenaria	E_{Alv}	Influencia considerável
	Coefficiente de Poisson - Alvenaria	ν_{Alv}	Influencia
	Coefficiente de dilatação	COEF	Não influencia
	F_c	F_c	Não influencia
	Módulo de elast. da Alvenaria	E_{Graute}	Influencia considerável
	Coefficiente de Poisson - Alvenaria	ν_{Graute}	não avaliada
	Peso próprio da alvenaria	PP_{Graute}	Influencia considerável
	Módulo de elast. da Alvenaria	E_{Conc}	Influencia considerável
	Coefficiente de Poisson - Alvenaria	ν_{Conc}	não avaliada
	Peso próprio da alvenaria	PP_{Conc}	Influencia considerável

Cabe ressaltar ainda que restrições foram impostas para as alterações dos indicadores, estabelecendo intervalos de valores aceitáveis tendo como referências normas, estudos que realizaram análises experimentais dos elementos que compõe a alvenaria estrutural e dados de modelagens deste tipo de estrutura, especificando os limites expressos na tabela 03.

Tabela 03 – Limitações (impostas) para ajustes na calibração

Propriedade	Mínimo	Máximo
E_{alv} (GPa)	2,16	15, 5
E_{conc} (GPa)	31	34,1
E_{Graute} (GPa)	19,9	34,1
PP_{alv} (kN/m ³)	12,1	14
PP_{conc} (kN/m ³)	25	25
PP_{Graute} (kN/m ³)	24	24
ν_{alv}	0,15	0,25

Foram realizadas 74 etapas de calibrações com ajustes nos parâmetros até chegar à um erro médio de 8,20% para os 25 primeiros modos, apresentando ainda desvios padrão de 7,10 para amostragem do experimento e, dessa forma, a uma correlação entre os resultados superior a 93,74% .

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

O modelo proposto mostrou-se robusto com grande numero de elementos na sua composição e um imenso número de equações foram necessárias para a sua solução. A simplificação com a homogeneização dos prismas se mostrou muito adequado, e caso fosse utilizada a micro modelagem poderia inviabilizar o estudo pela necessidade de uma capacidade de processamento de dados extremamente grande para a conclusão dos cálculos.

Apesar da simplificação, o modelo ainda exigiu um detalhamento para melhor retratar a estrutura, considerada essencialmente estática, e o excesso de elementos exigiu um maior rigor nos acoplamentos para que não houvessem modos pontuais e inadequados o que poderia não evidenciar modos principais.

O grande percentual de acionamento de massas pelo modos, demonstram que os modos encontrados são significativos o que valida tanto a extração de dados como o próprio modelo.

A limitação dos parâmetros através de valores encontrados nas normas foi fundamental para garantir uma caracterização adequada não permitindo extravazar para valores que não condissessem com os materiais constituintes da estrutura.

E finalmente a calibração exigiu grande atenção nas variações dos modos conforme o parâmetro escolhido em cada ciclo de calibração. Nas alterações de alguns índices do software as modificações nas frequências naturais dos modos não mostravam-se bem comportadas sendo que algumas alteravam predominantemente as frequências iniciais e outras alterando praticamente de forma intercalada nos 25 modos estudados e ainda outros atuavam nos modos finais.

Não obstante, o resultado final foi satisfatório em dois aspectos: na correlação do modelo ao experimento realizado em campo e, na identificação da translação axial em z (89,20% de mobilização de massa) figura 10, e da rotação em torno de x (97,54% de mobilização de massa) figura 11, como os principais modos de vibração, sendo o plano XZ o de maior área de arrasto, o que era esperado se a análise fosse simplesmente estática.

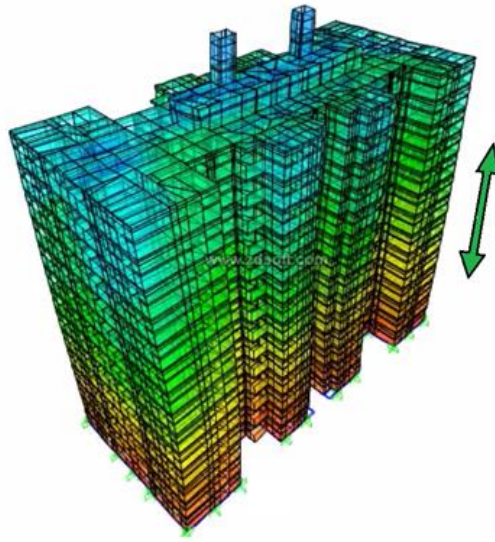


Figura 10 - Modo de vibração translacional no eixo z – 1º modo encontrado

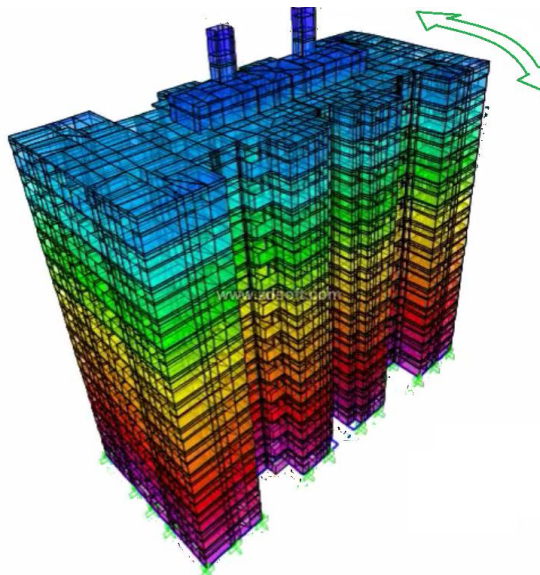


Figura 11 - Modo de vibração rotacional em relação ao eixo x – 8º modo encontrado

4. CONCLUSÃO

Diante do resultado obtido pode-se verificar que a metodologia utilizada para a modelagem baseada em CAD – MEF com auxílio de parâmetros modais pode ser considerada eficiente para apresentação de um modelo numérico que represente de forma significativa o comportamento dinâmico de uma estrutura em alvenaria estrutural.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG e ao Setor de Engenharia do Banco do Brasil pelo incentivo às atividades de ensino e pesquisa e apoio na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- BARRETO, Adriano Siebra Paes, 2002. “Análise numérica de painéis de alvenaria estrutural utilizando técnica de homogeneização”. Dissertação de Mestrado . Universidade de São Paulo
- BRINCKER, Rune, 2014, “Some elements of operational modal analysis”. Shock and Vibration.
- CAKIR, Ferit; UYSAL, Habib, 2015 “ Experimental modal analysis of brick masonry arches strengthened prepreg composites.” Journal of Cultural Heritage, v. 16, n. 3, p. 284-292.
- CERONI, Francesca et al. , 2014, “ Evaluation of the natural vibration frequencies of a historical masonry building accounting for SSI.” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 64, p. 95-101.
- CORREA, M. R. S.; RAMALHO, M. A, 2003, “ Projeto de edifícios de alvenaria estrutural.” São Paulo: Editora PINI Ltda.
- GOMES, Itamar Ribeiro, 2001, “ Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface.” Universidade Federal de Santa Catarina.
- LOURENÇO, Paulo B.; ROTS, Jan G., 1997, “Multisurface interface model for analysis of masonry structures.” Journal of engineering mechanics, v. 123, n. 7, p. 660-668.
- PELETEIRO, Suzana Campana, 2002, “ Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural.” Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- PORTO, Thiago Bomjardim, 2010, “Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com a estrutura de fundação.”. Universidade Federal de Minas Gerais.
- SHREVE, Dennis H., 1995, “Signal processing for effective vibration analysis.” IRD Mechanalysis,
- SORIANO, Humberto, 2014 “Introdução à dinâmica das estruturas.” Elsevier Brasil.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL MODELING OF A BUILDING IN STRUCTURAL MASONRY SUBMITTED TO THE ACTION OF THE WINDS TO ASSESS THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THE STRUCTURE

Fabiano Eduardo Moraes Matos, FabianoEMMatos@hotmail.com^{1,2}

Cláudio José Martins, cjmartins@civil.cefetmg.br¹

Marina F. M. Campos, marinafmcampos@gmail.com¹

Diego Goulart Lucena, diegoglucena@gmail.com¹

Nathalia Alves Dornellas Fonseca, nat_dornellas@hotmail.com¹

Abstract: This article describes the steps of numerical modeling of a 16-storey concrete block masonry building and a 1619 m² trailing area submitted to the action of the winds. This numerical modeling was obtained by surveying its dynamic parameters (natural frequencies, damping rates and vibration modes). The numerical characterization was performed in three stages, the initial one being the confection of the 3D model in CAD software - Computer-Aid Design generating 767 linear elements and 47846 surface elements. In the next phase, the model was exported to a program based on the Finite Element Method (MEF), where the materials and boundary conditions were assigned generating 271,782 equilibrium equations for the calculation of the behavior of the structure and the verification of the natural frequencies of the building . In order to evaluate the model, the vibration signals were drawn in loco, due mainly to the actions of the winds, being captured in points distributed by the building. With the vibration records, the time domain signals were processed and transformed into a frequency domain, and in this way the main natural frequencies of the structure were found. Finally, in order to reach the final goal of this work to generate a representative model, calibration cycles of the model were performed based on experimental modal parameters until a good correlation between the results of the experiment and the numerical model was found.

Key words: numerical modeling, vibrations in buildings, modal parameters.