

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS EXPERIMENTAIS E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN EXPERIMENTAL METHODS AND COMPUTATIONAL TOOLS TO EVALUATE THE DYNAMICS BEHAVIOR OF BUILDINGS IN REINFORCED CONCRETE

Társis Rafael Silva Travassos Oliveira(1); Remo Magalhães de Souza (2); Regina Augusta Campos Sampaio (3); Marcelo Machado Facchini (4);

- (1) *Professor M.Sc, Escola Politécnica USP, Sócio Diretor da Grifa Engenharia, Professor Docente III do Dep. de Eng. Civil da Universidade Anhembi Morumbi, SP, Brasil - tarsis@grifaengenharia.com.br*
(2) *Professor Ph.D, University of California, Sócio Diretor da Dynamis Techne, Professor Associado III da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil - remo@dyntech.com.br*
(3) *Professora D.Sc, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Professor Adjunto de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil. rsampaio@ufpa.br*
(4) *Engenheiro Civil, Universidade Paulista, Sócio Diretor da Grifa Engenharia Associados LTDA, São Paulo, SP, Brasil – mmf@grifaengenharia.com.br*

Resumo

Mesmo com os avanços na aplicação de ferramentas computacionais na engenharia estrutural, a simulação numérica sem um processo iterativo com resultados experimentais ainda apresenta uma imprecisão no comportamento da estrutura. Dessa maneira torna-se necessário ajustar/calibrar o modelo computacional para que a resposta numérica esteja muito próxima do comportamento real da estrutura. Essa imprecisão acontece em função da vultuosa quantidade de variáveis que envolve um projeto de estruturas, como por exemplo: propriedades e variabilidade dos materiais, variabilidade e simultaneidade das ações, imperfeições físicas e geométricas, entre outros. O objetivo do presente trabalho é apresentar resultados comparativos entre análise modal computacional e análise modal experimental de um edifício em concreto armado com 18 pavimentos. Foram realizados dois tipos de monitoração da estrutura, a saber: a) monitoração do comportamento dinâmico da estrutura, realizada com acelerômetros (sensores de vibração); b) monitoração das deformações em pilares, realizadas com strain gages (extensômetros elétricos de resistência). Não faz parte do escopo deste trabalho entrar no mérito do dimensionamento dos elementos estruturais (pilares, vigas, lajes, fundações, etc.). Além do que já foi exposto, este trabalho recita uma breve revisão bibliográfica sobre o comportamento dinâmico das estruturas. Para o edifício de concreto armado em análise neste trabalho, o modelo computacional analisou a vibração global do edifício e a vibração vertical do pavimento tipo. Os resultados ratificaram uma imprecisão entre o modelo numérico e o modelo experimental e confirmaram a importância da alvenaria no contraventamento do edifício, contribuindo com a rigidez horizontal do mesmo, efeito este que não é levado em conta na modelagem computacional.

Palavra-Chave: Engenharia de estruturas; Modelagem computacional; Análise experimental; Comportamento dinâmico das estruturas.

Abstract

Even with the advances in the application of computational tools in structural engineering the numerical simulation without an iterative process with experimental results still presents an inaccuracy in the behavior of the structure. Thus it becomes necessary to adjust/calibrate the computational model for the numeric answer to be very close to the real behavior of the structure. This inaccuracy happens depending on the amount of bulky variables involving the design of structures, for example, materials properties and variability, variability and simultaneity of actions, physical and geometrical imperfections, among others. The aim of this paper is to present comparative results between computational modal analysis and experimental modal

analysis of a building in reinforced concrete with 18 floors. Two types of structure's monitoring were conducted as follows: a) dynamic behavior monitoring of the structure realized with accelerometers (vibration sensors); b) columns deformations monitoring, made with strain gages. Is not part of the scope of this paper going into the merits of the design of the structural elements (columns, beams, slabs, foundations, etc). In addition to what has been stated, this work recites a brief literature review on the dynamic behavior of structures. For the reinforced concrete building analyzed in this paper, the computational model analyzed the overall vibration of the building and the vertical vibration of the type pavement. The results confirm an inaccuracy between the numerical model and the experimental model and confirmed the importance of the masonry in the building's bracing, contributing to the horizontal stiffness of the building, an effect that is not taken into account in the computer model.

Keywords: Structural Engineering; Computational Modeling; Experimental Analysis; Dynamic Behavior of the Structures.

1 Introdução

1.1 Problema Analisado

1.1.1 Histórico

Infelizmente ainda nos dias atuais, mesmo com todo avanço tecnológico disponível, sofremos com colapsos, parcial ou total, de estruturas ou até mesmo a inutilização da edificação devido ao não atendimento das exigências normativas para o estado limite de serviço. Muito se discute, mas pouco se esclarece sobre as verdadeiras causas destas situações, principalmente as de edifícios residenciais ou comerciais de múltiplos andares, com distintas concepções estruturais. Este cenário tem tido lamentável crescimento nos últimos anos, e tem despertado a atenção e apreensão do meio técnico da engenharia civil, bem como dos proprietários e usuários destas edificações. A crescente consciência da existência dessas falhas por parte da sociedade civil, tem recentemente impulsionado os construtores numa busca por maior qualidade técnica e conseqüente aumento de segurança e de conforto, obrigando-os juntamente com os projetistas a reavaliar seus projetos segundo os critérios de segurança e de utilização da estrutura prescritos nas normas de projetos vigentes. Entretanto, não é rara a ocorrência de problemas de estabilidade, vibrações excessivas, recalques, etc, nestas edificações, demonstrando que esses critérios de projeto não são em geral atendidos (MOREIRA, 2002).

Para melhor compreender o comportamento destas edificações quando solicitadas por cargas cíclicas, como o vento e sismos, realizam-se ensaios dinâmicos para identificar os parâmetros modais (frequências naturais de vibração, coeficientes de amortecimento e configurações dos modos de vibração). Os ensaios dinâmicos com utilização crescente nos últimos tempos, têm sido os de vibração ambiental por não necessitarem da aplicação de qualquer tipo de excitação artificial, sendo apenas baseados na análise da resposta dinâmica da estrutura às ações ambientais. Assim, e porque são feitos com equipamento portátil, a sua realização torna-se bastante simples, podendo ser efetuados sem interrupção do funcionamento normal do edifício. Os resultados obtidos com estes ensaios permitem a validação e calibração dos modelos numéricos da estrutura, uma avaliação mais rigorosa da segurança estrutural e suportam a recomendação de eventuais soluções de reforço estrutural (MAGALHÃES; CUNHA e CAETANO, 2007).

O objetivo do presente trabalho é apresentar resultados comparativos entre análise modal computacional e análise modal experimental de um edifício em concreto armado com 18 pavimentos, a Figura 1 apresenta uma vista geral do edifício analisado. Foram realizados dois tipos de monitoração da estrutura, a saber: a) monitoração do comportamento dinâmico da estrutura, realizada com acelerômetros (sensores de vibração); b) monitoração das deformações em pilares, realizadas com strain gages (extensômetros elétricos de resistência). Não faz parte do escopo deste trabalho entrar no mérito do dimensionamento dos elementos estruturais (pilares, vigas, lajes, fundações, etc.).



Figura 1 – Vista geral do edifício analisado.

2 Materiais e Métodos

Apresentam-se, nesta seção do artigo, as análises do comportamento dinâmico da estrutura, visando identificar a ocorrência de vibrações acentuadas, a partir de análises numéricas e monitoração de acelerações no edifício. No presente trabalho, ensaios com monitoração de vibrações foram realizados por meio de acelerômetros fixados na estrutura do prédio. Durante o período de monitoração, foram registradas as vibrações na estrutura do edifício para condições ambientais normais existentes, tais como: ventos, chuvas e tráfego de veículos no entorno da edificação. No entanto, como este edifício ainda se encontra em construção, não houve, portanto, o trânsito de moradores, nos apartamentos.

2.1.0 Critérios Normativos referentes a vibrações de Edifício

2.1.1 Consideração do Efeito Dinâmico do vento de acordo com a ABNT NBR 6123

De acordo com a ABNT NBR 6123:1988, tem-se que a velocidade média do vento mantém-se constante durante um intervalo de tempo de 10 min ou mais, produzindo nas edificações efeitos puramente estáticos, designados como resposta média. Já as flutuações da velocidade podem induzir, em estruturas muito flexíveis, especialmente em edificações altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média, designadas como resposta flutuante. Em edificações com período fundamental T igual ou inferior a 1 s (ou seja, com frequência menor do que 1Hz), a influência da resposta flutuante é pequena, sendo seus efeitos já considerados na determinação do intervalo de tempo adotado para o fator S_2 (que depende da rugosidade e das dimensões da edificação). Entretanto, edificações com período fundamental superior a 1 s, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio. Na seção 9.2 da ABNT NBR 6123:1988, é apresentada a Tabela 1 (Tabela 9 de acordo com numeração da norma), que apresenta valores aproximados de parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos.

Tabela 1 – Parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos.

Tipo de edificação	γ	ζ	$T_1 = 1 / f_1$
Edifícios com estrutura apertada de concreto, sem cortinas	1,2	0,020	$0,05h + 0,015h$ (h em metros)
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais	1,6	0,015	$0,05h + 0,012h$
Torres e chaminés de concreto, seção variável	2,7	0,015	0,02h
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	1,7	0,010	0,015h
Edifícios com estrutura de aço soldada	1,2	0,010	$0,29 \sqrt{h} - 0,4$
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	1,7	0,008	
Estruturas de madeira	--	0,030	

Ainda de acordo com a ABNT NBR 6123, na seção 9.5, referente ao cálculo de acelerações máximas para verificação de conforto, tem-se como indicação geral, que a amplitude máxima (aceleração máxima) não deve exceder $0,1 \text{ m/s}^2$.

2.1.2 Aspectos Normativos da ABNT NBR 6118 sobre a vibração vertical de pavimentos

Em relação às frequências de vibração vertical dos pavimentos, a ABNT NBR 6118, no capítulo 23, estabelece que a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. Para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit}), que depende da destinação da respectiva edificação. A ABNT NBR 6118 estabelece que a frequência natural deve ser maior do que 1,2 vezes a frequência crítica. A norma recomenda como valores críticos de frequência os valores mostrados na Tabela 2 (Tabela 23.1 de acordo com numeração da norma). Observa-se que a Tabela 2 não faz menção a edifícios residenciais. Entretanto, no que diz respeito ao estudo de edifícios residenciais (em questão), o caso mais similar apresentado na tabela seria o de escritórios, com frequência crítica para vibrações verticais de 4,0Hz.

Tabela 2 – Frequência crítica para vibrações para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.

Caso	f_{crit} Hz
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

2.1.3 Aspectos Normativos da ISO 2301-2 sobre o conforto no que diz respeito a vibrações

Questões relativas à especificação de valores limites normativos de conforto humano são bastante delicadas, devido à complexidade relativa ao fenômeno das vibrações e também da resposta humana às vibrações, sendo essa última influenciada por fatores culturais e sociais dos usuários. Esse fato pode ser verificado quando se observam as recomendações normativas brasileiras e internacionais sobre o assunto.

Segundo o Anexo B da ISO 2631-2, em muitas circunstâncias, o grau de incômodo e reclamação não pode ser explicado diretamente e unicamente pela magnitude das vibrações medidas (amplitudes das acelerações e frequências). Análises dessas reclamações têm mostrado que outros parâmetros, relacionados à fonte de vibração ou ao resultado das vibrações (ruído irradiado) influenciam no desconforto dos usuários. Pode-se dizer que, em geral, a vibração em uma determinada edificação pode provocar a vibração do corpo humano, ruídos, movimentação da mobília e de objetos, bem como a percepção visual do movimento desses objetos. Por isso, para a avaliação do nível de conforto, todos esses fatores devem ser levados em conta. Entretanto, sabe-se que de uma maneira geral, o ser humano possui maior sensibilidade a vibrações com frequências inferiores a 10 Hz.

Os espectros de aceleração correspondentes aos máximos valores medidos são comparados com as curvas limites de vibração da ISO 2631-2 multiplicados por fatores que variam conforme o tipo de edificação (Tabela 3). Assim, as curvas para prédios residenciais com vibrações intermitentes correspondem aos fatores de 1 a 4, considerando os períodos noturno e diurno.

Tabela 3 – Frequência crítica para vibrações para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.

ambiente	período	vibrações contínuas ou intermitentes	Vibrações transientes
hospitais, laboratórios, etc	Dia	1	1
	Noite	1	1
Residencial	Dia	1 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios	Dia	4	60 a 128
	Noite	4	60 a 128
Oficinas	Dia	8	90 a 128
	Noite	8	90 a 128

2.1.4 Aspectos Normativos do Boletim 209/1991 do CEB quanto a limites de vibração

O Comitê Euro-International du Beton (CEB) no boletim n. 209, intitulado *Vibration problems in structures*, indica limites para valores de aceleração em edifícios, os quais são apresentados na Tabela 4, sendo g a aceleração da gravidade.

Tabela 4 – Percepção humana para vibrações em edifícios em relação ao vento.

Percepção humana	Valores limites de aceleração
Imperceptível (IMP)	$a < 0,005 \text{ g}$
Perceptível (P)	$0,005 \text{ g} < a < 0,015 \text{ g}$
Incômodo (I)	$0,015 \text{ g} < a < 0,05 \text{ g}$
Muito incômodo (MI)	$0,05 \text{ g} < a < 0,15 \text{ g}$
Intolerável (INT)	$a > 0,15 \text{ g}$

2.1.5 Avaliação experimental do comportamento dinâmico da estrutura

Para a monitoração dinâmica da estrutura foram instalados no edifício acelerômetros de alta precisão da marca Suíça GeoSIG, com sistemas de aquisição modelo GMSPLUS. O plano de instrumentação com os acelerômetros é apresentado a seguir. A partir das simulações computacionais de vibração livre da estrutura, realizadas com o modelo computacional desenvolvido, foi definido um plano de instrumentação e monitoração dinâmica da estrutura. Neste plano de instrumentação foram estabelecidos os arranjos (posicionamento) dos acelerômetros (sensores de vibração) que foram utilizados para determinação experimental das propriedades dinâmicas da estrutura, quais sejam, as frequências de vibração, os respectivos modos de vibração, e os fatores de amortecimento. A título de ilustração, a Figura 11 mostra um sistema de aquisição de dados e um acelerômetro instalados no edifício.



Figura 3 – Sistemas de aquisição modelo GeoSIG GMSPLUS conectados ao sistema ao acelerômetro eletromecânico

As monitorações foram realizadas continuamente durante 12 dias, onde os acelerômetros foram dispostos em três arranjos distintos. O limite de amplitude de aceleração estabelecido foi de aproximadamente 4 vezes a aceleração da gravidade.

3 Resultados e Discussão

3.1.0 Resultados da análise modal computacional

Nesta seção apresentam-se os resultados das análises numéricas de vibração livre, realizadas com o modelo computacional (Figura 2). São apresentados os resultados de vibração no que diz respeito à vibração global do edifício, e à vibração dos pisos.

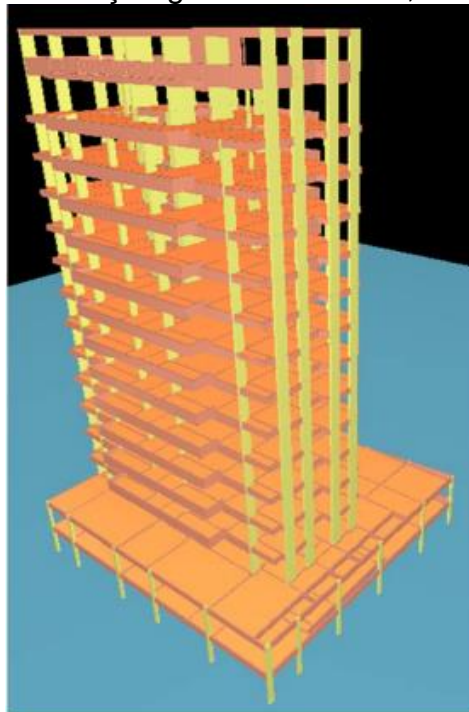


Figura 4 – Modelo computacional do edifício desenvolvido no software TQS

3.1.1 Vibração global do edifício

Os modos numéricos de vibração do edifício, correspondentes às primeiras frequências naturais são apresentados na Figura 3, Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

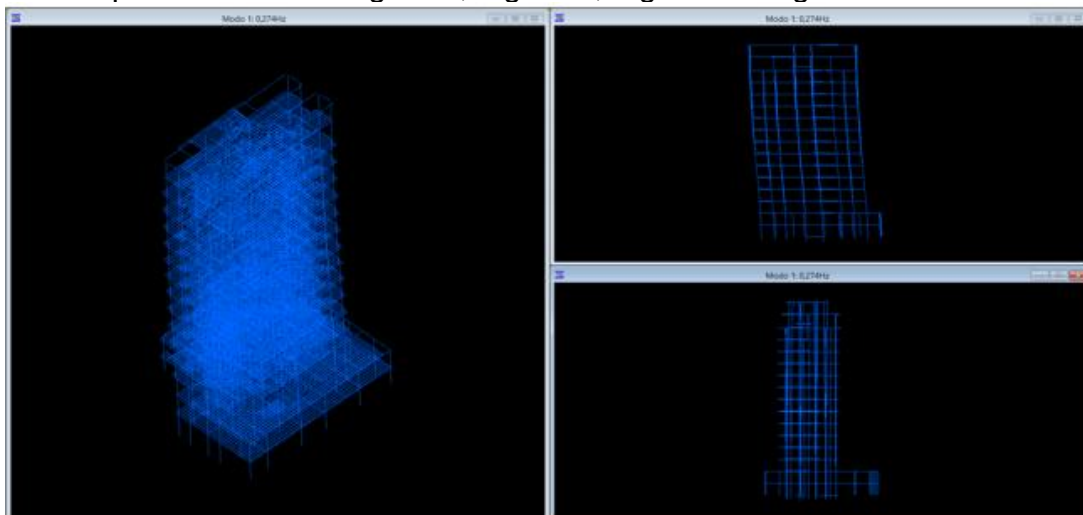


Figura 5 – Modo numérico de vibração global do edifício (Modo de flexão na direção longitudinal) $f = 0,27\text{Hz}$
ANAIS DO 58º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2016 – 58CBC2016

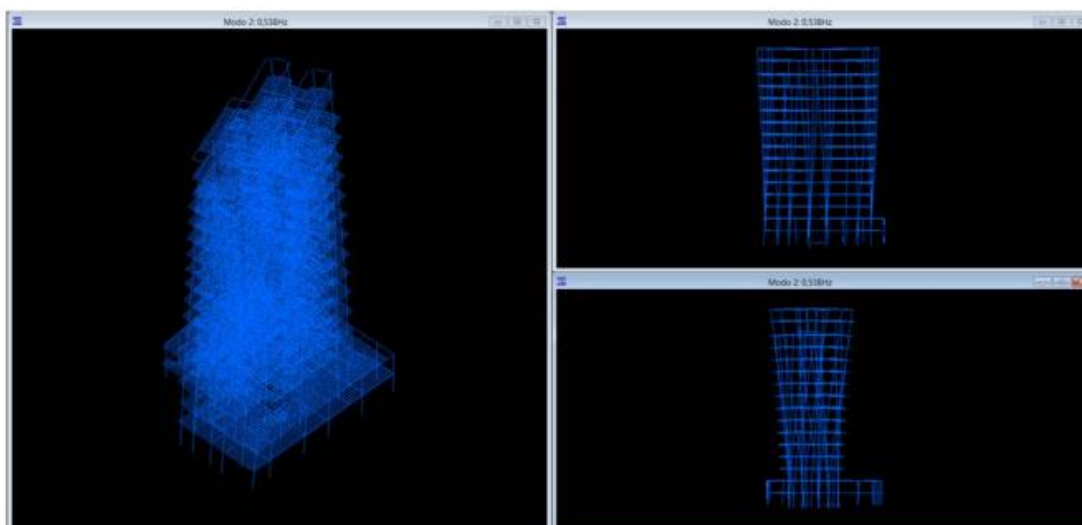


Figura 6 – Segundo modo numérico de vibração global do edifício (Modo de torção) $f = 0,54\text{Hz}$

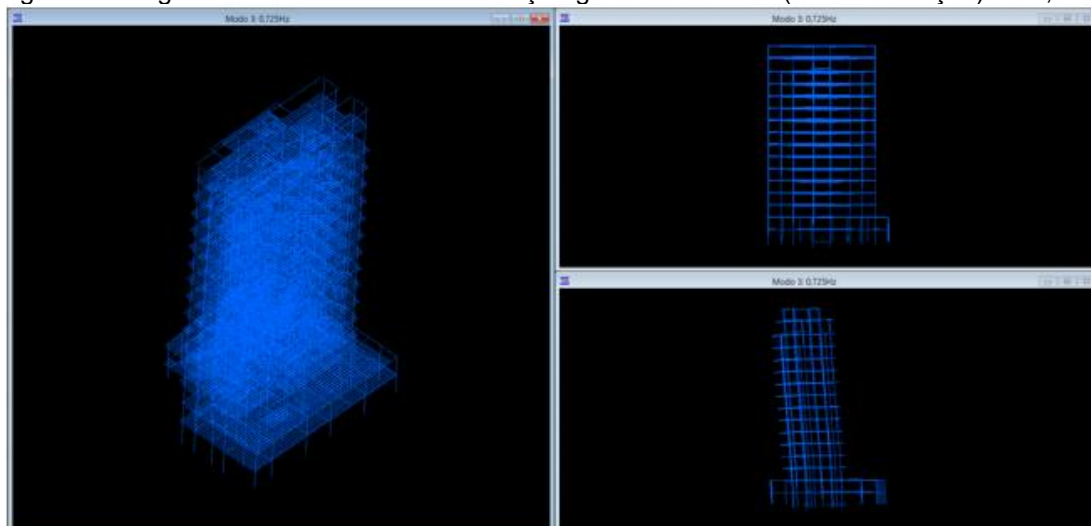


Figura 7 – Modo numérico de vibração global do edifício (Modo de flexão na direção transversal) $f = 0,73\text{ Hz}$. Pelo exposto acima, a estrutura apresentaria uma frequência fundamental de vibração muito baixa, de $0,27\text{ Hz}$ (correspondendo a um período de $3,7\text{s}$). Conforme mencionado anteriormente, uma edificação com período maior do que 1s pode apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio. Empregando a expressão apresentada na NBR 6123, para o cálculo do período (ver seção 2.1.1 do presente artigo), considerando a altura do edifício $h=45,3\text{m}$, chega-se aos seguintes valores, respectivamente, para período e frequência: $T=0,73$ e $f= 1,37\text{ Hz}$. Ou seja, os valores para as frequências fundamentais do edifício, obtidas numericamente, estariam baixas. Entretanto, conforme será apresentado mais adiante nesse trabalho, os resultados experimentais indicam valor de frequência fundamental medida no edifício bem próximo ao obtido pela fórmula proposta na NBR6123.

3.1.2 Vibração vertical do pavimento tipo

Os modos numéricos de vibração vertical do pavimento tipo obtidos com o modelo computacional, são mostrados nas Figuras 6 a 9.

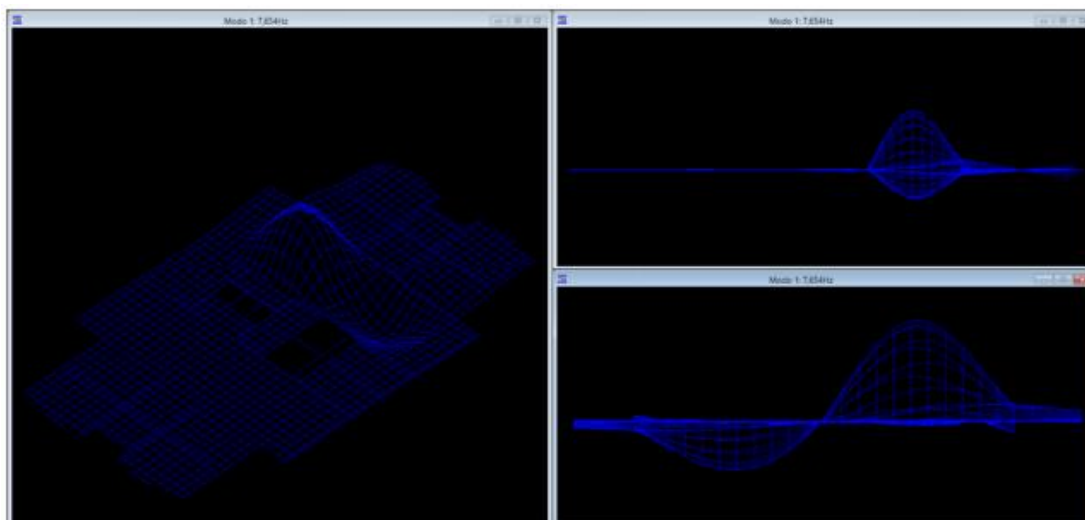


Figura 8 – Modo numérico de vibração global do edifício (Modo de flexão na direção transversal) $f = 0,73$ Hz

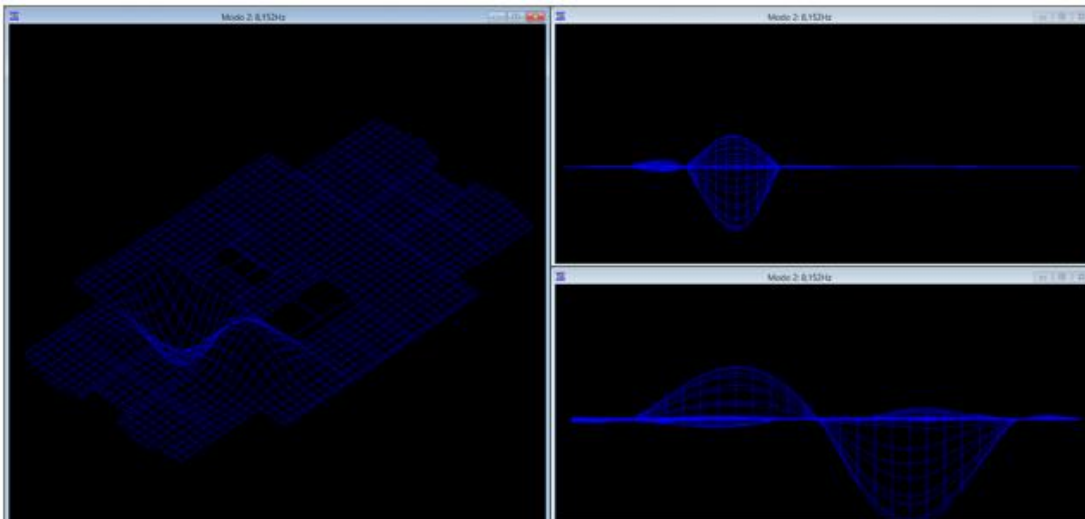


Figura 9 – Modo numérico de vibração global do edifício (Modo de flexão na direção transversal) $f = 0,73$ Hz

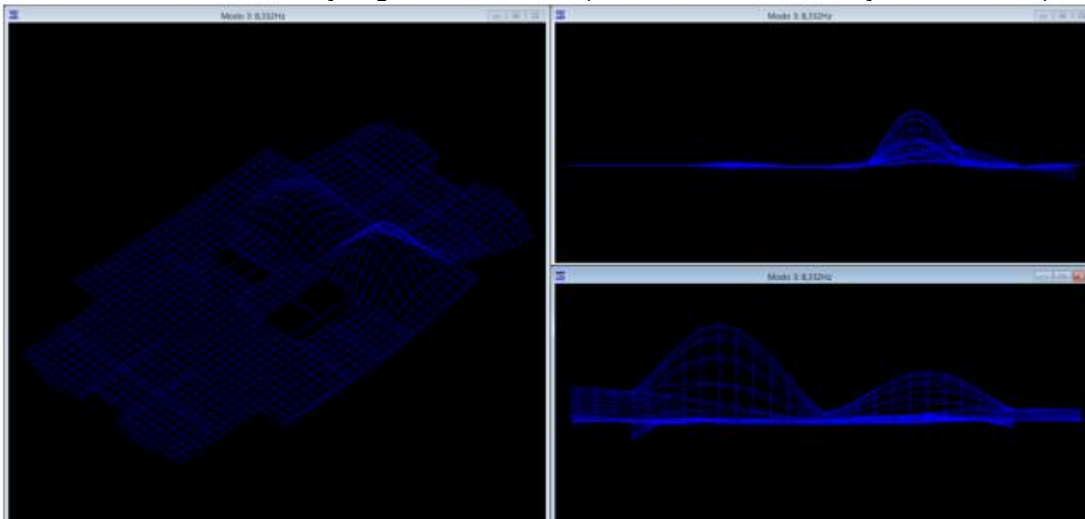


Figura 10 – Modo de vibração global do edifício (Modo de flexão na direção transversal) $f = 0,73$ Hz

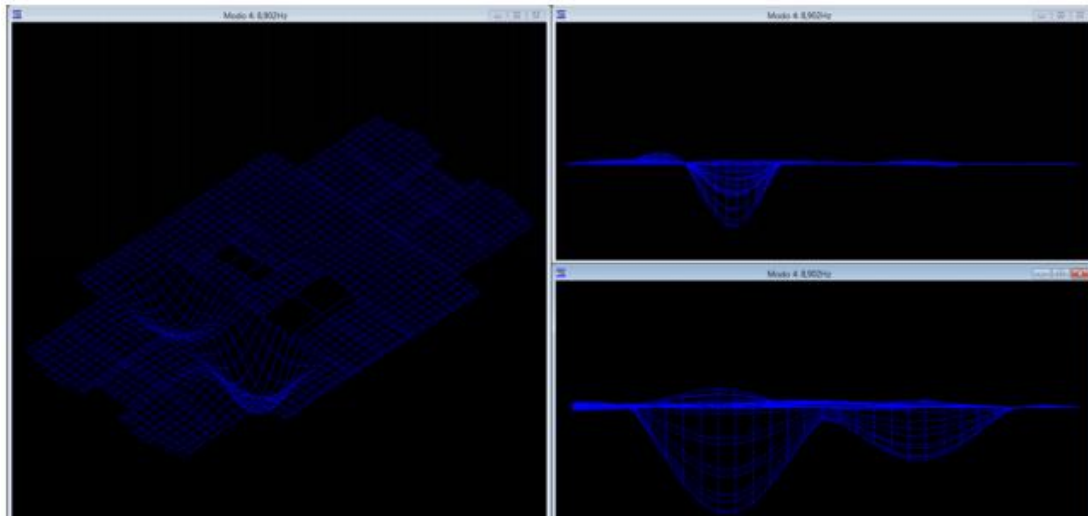


Figura 11 – Modo de vibração global do edifício (Modo de flexão na direção transversal) $f = 0,73$ Hz

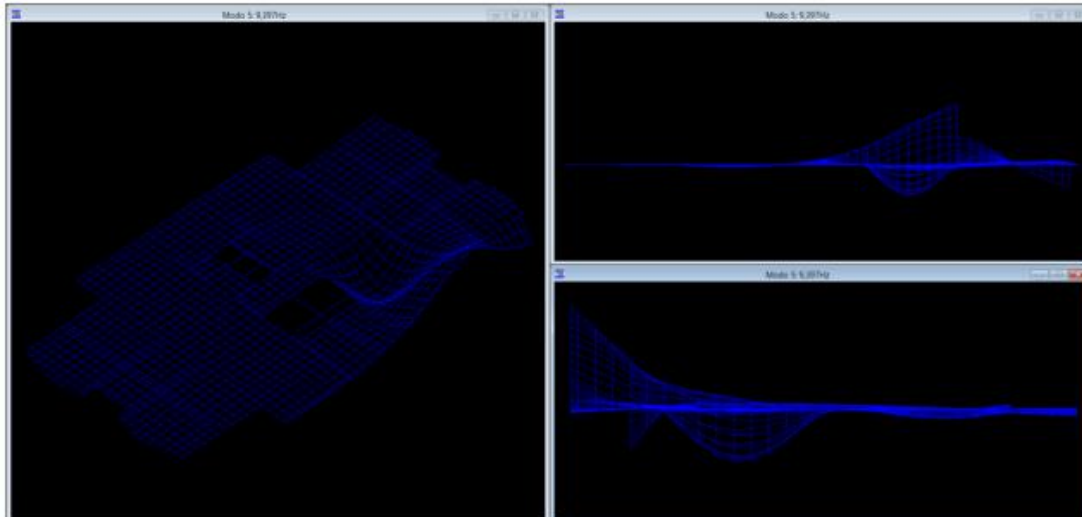


Figura 11 – Modo de vibração global do edifício (Modo de flexão na direção transversal) $f = 0,73$ Hz

Conforme mencionado anteriormente, a ABNT NBR 6118 estabelece que a frequência natural deve ser maior do que 1,2 vezes a frequência crítica (ver Tabela 2). Observando o primeiro modo de vibração vertical do pavimento na análise do modelo tem-se uma frequência de 7,65 Hz, e portanto, este critério da NBR6118:2014, ficaria atendido, quando se considera edifícios de escritório. No entanto, as análises experimentais mostram outro panorama, com frequências mais baixas do que a crítica, conforme será apresentado mais adiante neste relatório.

3.3.0 Análise modal experimental

A Análise modal experimental consiste na determinação experimental das frequências naturais de vibração da estrutura e dos respectivos modos de vibração. Esta análise foi realizada a partir dos registros de aceleração, após o devido tratamento dos dados. A extração dos parâmetros modais foi realizada com o software comercial ARTEMIS empregando-se dois métodos, o da identificação estocástica (SSI) e o da decomposição no domínio da frequência (EFDD).

3.3.1 Análise modal experimental global do edifício

Os modos de vibração globais do edifício foram obtidos a partir dos registros feitos com o arranjo 3. A Tabela 5 apresenta os valores de frequências naturais globais do edifício encontradas, assim como os valores de taxa de amortecimento. Os modos de vibração correspondentes são apresentados na Figura 12. A frequência fundamental obtida ($f = 1,23$ Hz, $T = 0,81$ s) é bem maior do que a encontrada na análise numérica e está próxima ao valor obtido na equação apresentada na norma brasileira NBR6123. O período de 0,81 s também é inferior ao proposto na norma, já que o mesmo é inferior a 1s, sendo, portanto, considerado apropriado.

Tabela 5 – Frequências naturais de vibração Global – análise modal experimental.

Frequencia [Hz]	Amortecimento [%]	Complexidade [%]
1.23	0.886	0.796
1.36	0.757	0.134
1.62	0.656	0.04
4.00	1.027	0.103
4.38	2.172	3.401
4.90	1.289	0.213
8.00	1.228	0.186
11.66	2.032	4.352

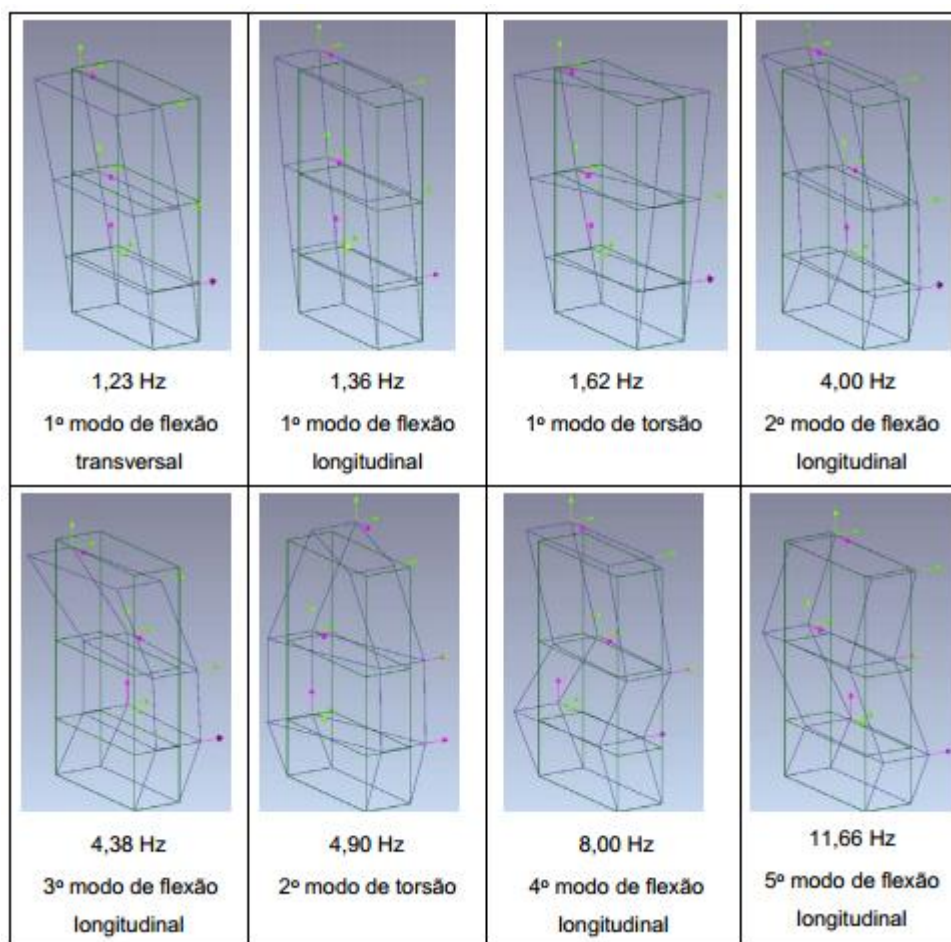


Figura 12 – Modo de vibração global do edifício – análise modal experimental

3.3.2 Avaliação experimental do comportamento dinâmico da estrutura

A partir das monitorações referentes aos arranjos 1 e 2, foi realizada a análise modal experimental do pavimento tipo e suas características dinâmicas determinadas. Os valores de frequências e taxas de amortecimento encontrados estão apresentados na Tabela 6 e na Tabela 7, para os arranjos 1 e 2, respectivamente. Observa-se aqui que as frequências naturais verticais obtidas experimentalmente para o pavimento tipo não atendem aos limites da norma brasileira NBR 6118 para os quatro primeiros modos e são muito inferiores àquelas obtidas com o modelo computacional (Figura 13).

Tabela 6 – Frequências naturais de vibração do Pavimento – análise experimental – ARRANJO 1

Frequencia [Hz]	Amortecimento [%]	Complexidade [%]
1.23	1.048	0.005
1.60	1.376	0.038
4.03	1.52	0.415
4.40	1.842	0.434
4.90	2.23	0.523
9.39	3.971	0.376
9.72	1.728	8.521
10.11	1.589	14.754

Tabela 7 – Frequências naturais de vibração do Pavimento – análise experimental – ARRANJO 2

Frequencia [Hz]	Amortecimento [%]	Complexidade [%]
1.23	1.538	0.002
1.35	1.789	0.488
1.61	1.102	0.266
4.02	2.355	2.862
4.37	1.355	0.351
4.39	3.943	0
9.39	4.767	0

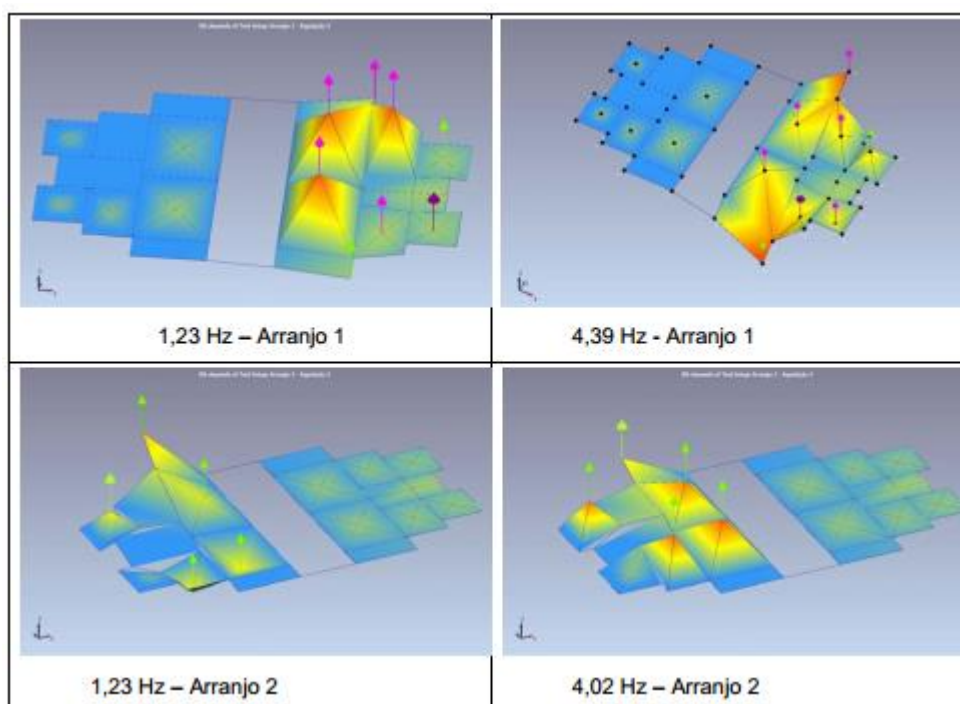


Figura 12 – Modo de vibração do pavimento tipo – análise modal experimental

4 Conclusão

No que diz respeito ao comportamento dinâmico da estrutura, a partir dos resultados obtidos nas análises realizadas, pode-se concluir o seguinte:

- As frequências naturais de vibração livre verticais no pavimento tipo não atendem às especificações da norma brasileira NBR6118 para os 4 primeiros modos, e são muito inferiores àquelas obtidas no modelo numérico. Uma provável explicação para esta discrepância pode ser um baixo módulo de elasticidade para o concreto empregado no pavimento tipo onde os ensaios foram realizados. É necessário então ajustar/calibrar o modelo computacional para que a resposta dinâmica do pavimento esteja mais próxima do comportamento real. As frequências mais baixas ($f=1,23\text{Hz}$) estão relacionadas à vibração das lajes com os acelerômetros 1z e 2z e à vibração da laje com o acelerômetro 15z.
- Mais especificamente, a estrutura apresenta baixa rigidez nas quatro maiores lajes do pavimento tipo, o que pode ser verificado pelos baixos valores de frequências de vibração obtidas experimentalmente. Assim, as análises indicam uma possível futura ocorrência de desconforto por parte dos moradores, no que diz respeito à vibração vertical, desde que haja a excitação necessária.
- A Frequência Fundamental Global obtida foi de $f=1,23\text{Hz}$, ou seja, um período de $T=0,81\text{s}$ que também atende ao limite estabelecido na norma NBR6123, cujo critério recomenda que este período deva ser inferior a 1s. Estes valores diferem dos encontrados na análise numérica, pela qual este critério não seria atendido. Uma possível explicação para esta discrepância é a contribuição da alvenaria como contraventamento do edifício, contribuindo com a rigidez horizontal do mesmo, efeito este que não é levado em conta na modelagem computacional. Assim, pode-se concluir que o edifício não está susceptível à ocorrência de vibrações acentuadas na direção horizontal, induzidas pelo vento.
- As avaliações de conforto foram feitas a partir dos históricos de aceleração obtidos em 20 períodos de aquisições com duração média de 11 horas, em um pavimento tipo desocupado. Observou-se, em todos os casos, que as vibrações estão abaixo dos limites estabelecidos por norma (ISO 2301-2/2003), mantendo-se em níveis aceitáveis de vibração em função do tipo de vibração, do período, e da área de ocupação do edifício. Entretanto, ressalta-se que estas monitorações foram feitas com o edifício não ocupado por moradores, e que como as primeiras frequências naturais de vibração vertical do pavimento tipo são bastante baixas, conforme mencionado anteriormente, poderá haver desconforto dos moradores no futuro, no que diz respeito a vibração vertical, após a ocupação do edifício.
- Desta forma, de modo a aumentar a frequência natural de vibração vertical do pavimento tipo, e assim, atender às especificações normativas, as quatro maiores lajes necessitam de aumento de rigidez, o que pode ser conseguido enrijecendo-se as lajes propriamente ditas, e provavelmente algumas vigas de bordo (sobretudo dos balanços).

5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 – Forças devidas ao vento em Edificações**. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2301-2 – Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibration in buildings**. 2003.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB Model Code 1991 – Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines**. Bulletin D'information n° 209.

MOREIRA, T. V. Análise da Sensibilidade Dinâmica de Edifícios com Estruturas Esbeltas, Tese de Pós- Graduação submetida a Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CARVALHO, A. F. C. Estudo Numérico E Experimental sobre o comportamento dinâmico de um Edifício. Tese de Mestrado submetida ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2013.

MAGALHÃES, F., CUNHA, A. & CAETANO E., Ensaios Dinâmicos de Viadutos Ferroviários : Automatização de Procedimentos de Ensaio e Processamento. Mecânica Experimental, 1–11, 2007