

Dynamic characterization of a heritage construction from 19th century

Caracterização dinâmica de uma edificação histórica do século XIX



F. BRANDÃO^a
eng.franciscobrandao@hotmail.com

E. MESQUITA^b
e.mesquita@fe.up.pt

A. DIÓGENES^a
aldeciragd@yahoo.com.br

P. ANTUNES^c
pantunes@ua.pt

H. VARUM^b
hvarum@fe.up.pt

Abstract

Heritage constructions presents high significance and importance for society. As way of contribution for the preservation of the heritage constructions, this paper presents a study on the dynamic behavior of a heritage construction, part of the historic center of Sobral city, located at the north region of Ceará State, namely the Nossa Senhora das Dores Church, a church from the beginning of the 19th century, built in clay brick walls. In this study, ambient vibration tests were performed aiming to obtainment of the natural frequencies of the building focusing the calibration of the numerical model and, from it, proceeding with modal analysis by Finite Element Method (FEM) with recurrence to software Ansys®. The results allowed the analysis of the structural dynamic behavior taking into account natural frequencies, modal shapes and directional displacements.

Keywords: dynamic characterization, heritage construction, environmental vibrational characterization, finite elements, sobral's historical heritage.

Resumo

As construções históricas possuem elevado significado e importância para a sociedade. Como contribuição à preservação do patrimônio histórico, o presente trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento dinâmico de uma edificação histórica, inserida no âmbito do patrimônio histórico da cidade de Sobral, localizada na região norte do estado do Ceará, nomeadamente Igreja de Nossa Senhora das Dores, uma capela do início Século XIX, construída em alvenaria de tijolos maciços. Neste estudo foi realizado o ensaio de vibração ambiental com objetivo de obter as frequências naturais da edificação com foco à calibração do modelo numérico e, a partir dele, com recurso ao software Ansys®, realizar a caracterização modal via Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados obtidos permitiram analisar o comportamento dinâmico da estrutura, no que se refere à obtenção das frequências naturais, modos de vibração e deslocamentos direcionais.

Palavras-chave: caracterização dinâmica, construções históricas, caracterização vibracional ambiental, elementos finitos, patrimônio histórico sobralense.

^a GEM, Department of Civil Engineering, State University of Vale Do Acaraú, Sobral, CE, Brazil;

^b CONSTRUCT-LESE, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Porto, Porto, Portugal;

^c Telecommunications Institute and Department of Physics of the University of Aveiro, Aveiro, Portugal.

1. Introdução

O patrimônio histórico pode ser entendido como todo e qualquer bem material, imaterial, natural ou imóvel que possua significado e importância artística, cultural, religiosa, documental ou estética para uma sociedade em particular, ou seja, representa, em algum aspecto, a identidade cultural de uma comunidade.

No contexto do patrimônio histórico, estão as construções históricas que, assim como os demais tipos de construções, estão submetidas à diversos cenários de degradação, dentre os quais podem ser citados as ações da natureza (efeitos térmicos, ataques químicos ou físicos), ações antrópicas, tais como alterações na arquitetura da edificação, destruição intencional, intervenções inadequadas, e também as ações de caráter dinâmico, como por exemplo a ação do vento e dos sismos, e por este motivo precisam ser bem mantidas como forma de ampliar sua vida útil e garantia da segurança estrutural [1]. Todavia, para que as ações de manutenção ou reabilitação sejam eficazes, é necessária a implementação do conhecimento acerca das características e comportamento das construções patrimoniais, uma vez que estas podem apresentar diversos métodos construtivos e propriedades amplamente divergentes das construções contemporâneas, que foram projetadas com base nos códigos construtivos atuais.

Desse modo, e assim como destaca [2], há uma lacuna no meio técnico-científico no que se refere ao conhecimento acerca das características do patrimônio histórico e, uma vez que estas estruturas têm despertado interesse, quer por representarem marcas históricas do desenvolvimento de uma sociedade, quer por sua potencial contribuição para a implementação do turismo regional, ou ainda pela necessidade de desenvolvimento do conhecimento nesta área da engenharia, fica evidente que este é um tópico de interesse para o desenvolvimento científico e tecnológico. Neste sentido, estudos essencialmente focados na caracterização não destrutiva das propriedades de exemplares do patrimônio histórico têm sido desenvolvidos na Universidade Estadual Vale do Acaraú em Sobral, com suporte da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e da Universidade de Aveiro, dentre os quais podem ser citados os trabalhos apresentados por [3], [4], [5], [6].

O estudo das características dinâmicas de estruturas no âmbito da engenharia civil, consiste numa etapa fundamental para a caracterização do comportamento estrutural, que pode ainda ser utilizado como suporte à implementação de sistemas de monitorização, uma vez que as propriedades dinâmicas estão intimamente relacionadas ao desempenho em serviço dos elementos estruturais e, conseqüentemente, com a integridade da estrutura [7], [8]. Em se tratando de construções históricas, o emprego da caracterização dinâmica é relevante não somente pelos dados dinâmicos coletados, mas também por seu caráter não-destrutivo, o que garante a repetibilidade dos ensaios sem danos ao patrimônio [9].

O uso de técnicas de identificação experimental do comportamento dinâmico das estruturas, como a vibração ambiental, servindo como base para a calibração de modelos numéricos, permite interpretar o comportamento dinâmico de estruturas complexas e proporcionam resultados muito condizentes com o comportamento real da estrutura em análise. Uma vez que as simulações numéricas também podem ser empregadas com foco na obtenção da resposta estrutural sob

cenários variados de danos e ainda, podem servir também como ferramenta de apoio a tomada de decisões relativas à manutenções e intervenções a serem realizadas na estrutura [10].

Deste modo, como forma de contribuição à implementação do conhecimento técnico-científico e, conseqüentemente, para a preservação do patrimônio histórico, o presente trabalho propõe-se ao estudo das características dinâmicas de uma edificação histórica do patrimônio histórico sobralense, nomeadamente Igreja de Nossa Senhora das Dores, uma capela do início Século XIX construída em alvenaria de tijolos maciços, localizada às margens do Rio Acaraú em Sobral, uma vez que esta cidade, situada na região Norte do Estado do Ceará, apresenta um dos maiores e mais importantes centros históricos do Brasil, com cerca de 1200 imóveis tombados pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN).

2. Caracterização dinâmica de edificações

De acordo com [11], as ações dinâmicas podem ser caracterizadas pela ação de carregamentos que variam ao longo do tempo, ou seja, podem variar de grandeza, direção e ponto de aplicação, e que podem ser caracterizados pela existência de movimento oscilatório, designado por vibrações. E, portanto, a resposta de uma estrutura à estas ações podem ser expressas em termos de deslocamentos, velocidades, acelerações ou tensões. A caracterização do comportamento dinâmico das estruturas compreende, essencialmente, ao cálculo das frequências naturais, modos de vibração e também a obtenção de estimativas dos coeficientes de amortecimento modal.

Uma das estratégias para a caracterização das propriedades dinâmicas de uma estrutura pode ser realizada recorrendo-se a ensaios *in situ* que colem dados sobre a aceleração da estrutura onde, posteriormente estes dados são organizados, tratados e processados, e os parâmetros dinâmicos, tais como as frequências naturais, são identificados. Estes ensaios podem ser realizados tanto em estruturas novas quanto em edifícios antigos, como no caso dos edifícios históricos que poderão requerer ações de reabilitação. Atualmente, para este tipo de caracterização, os ensaios de vibração ambiental têm sido frequentemente adotados (ver [12],[13],[14],[15],[16]), pois além de não constituírem uma técnica invasiva, requerem menor tempo que ensaios de carga tradicionais, são de fácil aplicação e podem ser realizados com a estrutura em uso.

De acordo com [17], ensaios de vibração ambiental baseiam-se na medição de séries temporais de acelerações, em pontos da estrutura previamente escolhidos mediante a simulação de um modelo numérico preliminar com propriedades mecânicas iniciais. A partir destas medições, são identificados os parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimentos). Neste tipo de ensaio a excitação atuante na estrutura é resultante das ações ambientais (vento ou sismo, por exemplo) e ações operacionais (ligadas a utilização da estrutura), não havendo, portanto, controle sobre a excitação.

A coleta dos dados de acelerações da estrutura é realizada, essencialmente, através do uso de acelerômetros, que podem ser de diversos tipos. Os acelerômetros do tipo piezoelétricos, por exemplo, utilizam materiais que tem a propriedade de gerarem uma diferença

de potencial elétrico quando submetidos a pressão mecânica. De acordo com [18], acelerômetros piezoelétricos são configurados, essencialmente, por uma massa inercial disposta em contato com a superfície de um material piezoelétrico. Quando este acelerômetro é submetido a uma variação de movimento, a massa inercial produz uma tensão mecânica no material piezoelétrico, e este tem como resposta uma carga elétrica proporcional a tensão aplicada.

Em termos do processamento dos dados obtidos por ensaios de vibração ambiental, estes podem ser tratados mediante a aplicação de métodos já consolidados, como a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (TRF), descrito pela Equação (1). Pela aplicação da TRF extrai-se o espectro de Fourier, pelo qual podem ser identificadas as frequências dominantes ao sinal colhido, e que indicam as frequências naturais da estrutura [19].

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

Por si só, os resultados obtidos pela caracterização dinâmica estrutural através de ensaios de vibração ambiental proporcionam uma boa compreensão sobre o comportamento das construções históricas, porém esta abordagem pode ser complementada através de uma simulação numérica do modelo da estrutura com recurso a análise modal, utilizando os dados obtidos nos ensaios de vibração ambiental. Nestes casos, os modelos numéricos são utilizados como forma de reproduzir, o mais semelhante possível, o comportamento dinâmico da estrutura tendo em conta os parâmetros coletados durante os ensaios de vibração ambiental. Os resultados numéricos (frequências naturais e modos de vibração) são então comparados aos valores obtidos experimentalmente, e através de ajustes nas propriedades do modelo, em particular do módulo de elasticidade, de modo a se garantir a semelhança entre o comportamento real estrutura e o comportamento do modelo numérico. Desta forma é possível que o modelo numérico desenvolvido fique devidamente calibrado podendo então ser utilizado com confiança para a avaliação de segurança da estrutura em diversos cenários de risco [20].

Para a análise modal de uma estrutura, considerando-a em regime de vibração livre não amortecida de comportamento linear, a equação diferencial do movimento tem a seguinte forma:

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0 \quad (2)$$

Onde K representa a matriz de rigidez da estrutura, M a matriz de massa, u(t) o deslocamento e $\ddot{u}(t)$ a aceleração. Ao considerar ainda que a estrutura apresenta um movimento harmônico quando vibra a uma dada frequência angular natural, seu deslocamento é expresso por:

$$u(t) = \hat{\varphi}_j \cos(\omega_j t - \theta_j) \quad (3)$$

Onde $\hat{\varphi}_j$ é um vetor denominado modo natural de vibração da estrutura, ω_j é uma grandeza chamada de frequência natural de vibração da estrutura e θ_j é o ângulo de fase. Agora, fazendo a derivada de segunda ordem da Equação (2) em relação ao tempo obtém-se a seguinte equação que representa as acelerações:

$$\ddot{u}(t) = -\omega_j^2 \hat{\varphi}_j \cos(\omega_j t - \theta_j) \quad (4)$$

E por fim, substituindo as Equações (3) e (4) na Equação (2) chega-se a seguinte equação:

$$[K - \omega_j^2 M] \hat{\varphi}_j = 0 \quad (5)$$

De onde se extraem ω_j^2 que é um autovalor e quadrado da j-ésima frequência natural, $\hat{\varphi}_j$ que representa um autovetor e j-ésimo modo natural de vibração ou modo não amortecido. A Equação (5) expressa um problema de autovetor generalizado e tem soluções não triviais ($\omega_j^2, \hat{\varphi}_j$) apenas se a matriz dos coeficientes de $[K - \omega_j^2 M]$ for singular, ou seja:

$$\det[K - \omega_j^2 M] = 0 \quad (6)$$

Com isso, pode-se inferir que para cada solução do autovalor ω_j^2 , corresponde um autovetor $\hat{\varphi}_j$.

3. Estudo de caso

3.1 A Igreja de Nossa Senhora das Dores

A Igreja de Nossa Senhora das Dores (Figura 1-A) é uma edificação histórica que faz parte do centro histórico da cidade de Sobral e localiza-se as margens do Rio Acaraú (Figura 1-B). A Cidade de Sobral localiza-se no Estado do Ceará (Figura 1-C), mais precisamente na região norte do estado (Figura 1-D), a pouco mais de 230 Km da Capital Fortaleza. A cidade detém um dos maiores centros históricos do país com mais de 1200 edificações tombadas pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). De acordo com [21], a Igreja das Dores, como é conhecida na cidade, data da década de 1810 e foi construída no local onde antes existia um pequeno nicho localizado junto à antiga Rua do Rio as margens do Rio Acaraú. Não se sabe precisamente quando a igreja foi construída, mas sabe-se que a mesma já existia em 1818. Sua torre única e lateral não segue a regra neoclássica de seus elementos de fachadas, pois foi concluída após 1924.

A Igreja foi construída em alvenaria de tijolos maciços utilizando-se técnicas construtivas locais. Sua geometria (Figura 2) caracteriza-se por uma nave central de maior proporção (6,46 x 16,02 m) e uma lateral de menor proporção (3,23 x 12,00 m). No mesmo alinhamento da nave central localiza-se o altar, que se separa desta pelo Arco Triunfal. Após o altar encontram-se uma pequena sacristia e dependências utilitárias da Igreja. O acesso ao assoalho (coro) dá-se por uma escadaria na única torre lateral, de 20,50 m de altura.

A Figura 3-A mostra o interior da edificação, onde se pode observar com maiores detalhes os arcos laterais que separaram as duas naves, enquanto que a Figura 3-B, mostra o altar visto a partir do Coro, onde se pode constatar o baixo grau de ornamentação da igreja.

3. Simulação numérica da Igreja das Dores

Para a criação do modelo em 3D da Igreja de Nossa Senhora das Dores, primeiramente foi feita uma consulta às plantas da edificação, fornecidos pelo IPHAN-CE em formato CAD. Em complemento, foi feita uma visita à igreja que permitiu a validação das medidas cons-



Figura 1

(A) Vista da Igreja de Nossa Senhora das Dores; (B) Localização da referida igreja em Sobral; (C) Localização do estado do Ceará no Brasil e (D) Localização de Sobral no Ceará

tantes nestes registros geométricos. Com bases nestes registros e na visita, foi construído um modelo 3D da igreja com recurso ao software comercial *AutoCAD*®, (Figura 4), onde se pode perceber que o teto em madeira, a cobertura em telha cerâmica e o pequeno coro de madeira da fachada frontal não foram modelados, como forma de simplificar o modelo e também minimizar a ocorrência de discontinuidades e ainda, problemas na discretização da malha de elementos finitos.

Os detalhes ornamentais das fachadas e das portas foram simplificados, as paredes foram modeladas com uma espessura constante de 60 cm, com exceção das paredes em destaque na Figura 5, onde o retângulo preto indica a parede atrás do altar com espessura de 35cm, o retângulo amarelo indica a parede da porta do banheiro, com espessura de 15 cm e o retângulo vermelho indica as paredes da torre lateral que foi modelada com espessura de 1,05m. Essas

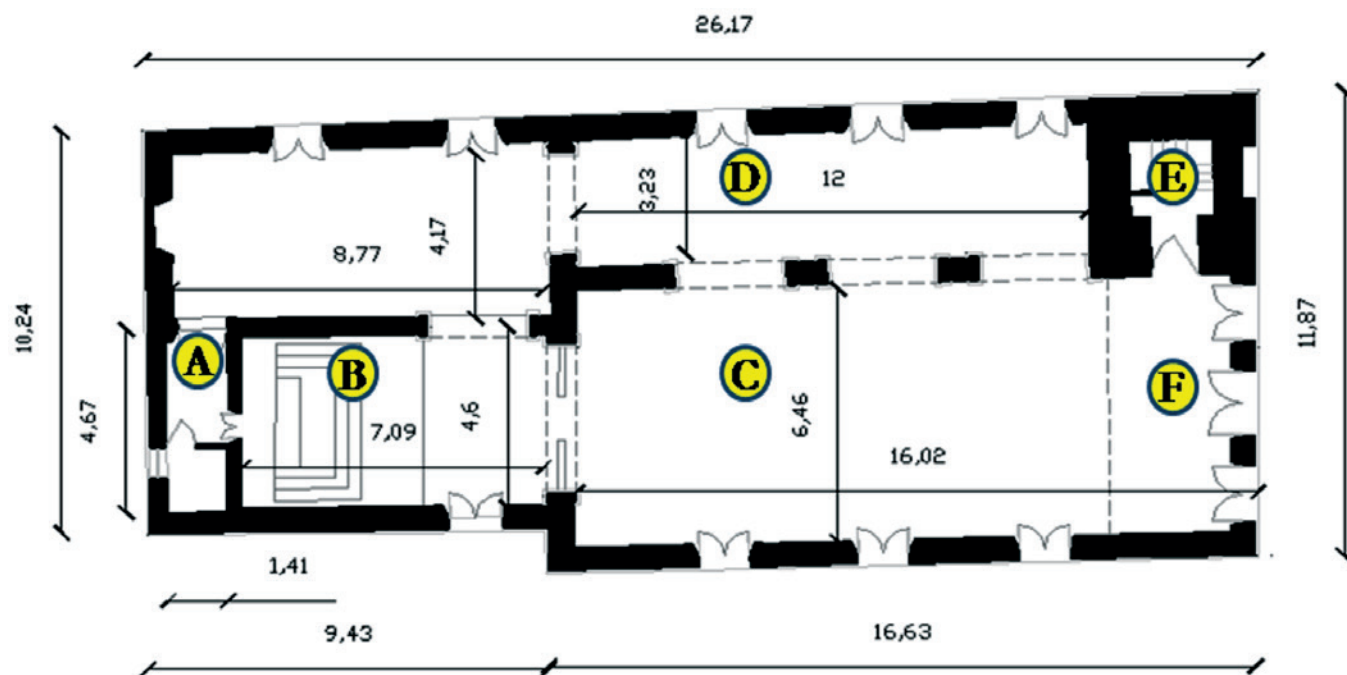


Figura 2

Geometria da Igreja de Nossa Senhora das Dores: (A) Sacristia; (B) Altar; (C) Nave central; (D) Nave lateral; (E) Torre lateral e (F) Assoalho [adaptada, 22]



Figura 3
(A) vista dos arcos e (B) vista do altar da Igreja das Dores

medidas foram obtidas de acordo com os registros geométricos existentes e confirmadas na inspeção *in situ* que foi realizada. Em relação às propriedades mecânicas da alvenaria adotadas no modelo, dada a impossibilidade de se realizar ensaios de determinação *in situ*, recorreu-se a literatura existente na área. Optou-se por utilizar os dados referentes ao Módulo de Elasticidade (E), Peso específico (W) e Resistência à compressão (f_m) do regulamento italiano “*Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)*” de 2008 [23], o qual traz os valores das propriedades mecânicas a se adotar para paredes de alvenaria. Destaca-se que algumas entidades italianas têm inclusive desenvolvido programas de cálculo e análise especializados para o caso de estruturas em alvenaria, como é o caso do 3DMacro e do 3Muri, que utilizam os valores da NTC para a elaboração de modelos de cálculo. O coeficiente de Poisson (ν), foi considerado como sendo 0,2 valor este comumen-

te adotado em estudos na área, [24], [25], [26]. Já o valor da resistência a tração das alvenarias, (f_t), que é considerada nula em muitos programas de cálculo como 3muri, foi considerada como sendo 5% do valor adotado para a resistência a compressão. Ressalta-se que estes valores adotados foram obtidos mediante extensa pesquisa bibliográfica, e estão de acordo com a tipologia estrutural da edificação do presente estudo. As propriedades mecânicas inseridas no modelo são mostradas na Tabela 1. Na discretização do modelo numérico em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys® (versão 17.1), utilizou-se uma malha de 500 mm de lado que gerou 53.889 elementos e 93.380 nós. O elemento escolhido foi o SOLID187, um elemento tetraédrico de 10 nós com 3 graus de liberdade em cada um. Este tipo de elemento é bastante flexível e compatível com malhas irregulares e permite que as superfícies curvilíneas, dos arcos, portas e janelas, possam ser modeladas mais precisamente sem perda da geometria. A Figura 6 mostra um detalhe da malha de elementos finitos utilizada.

3.3 Ensaio de vibração ambiental

A obtenção experimental de dados referentes às propriedades

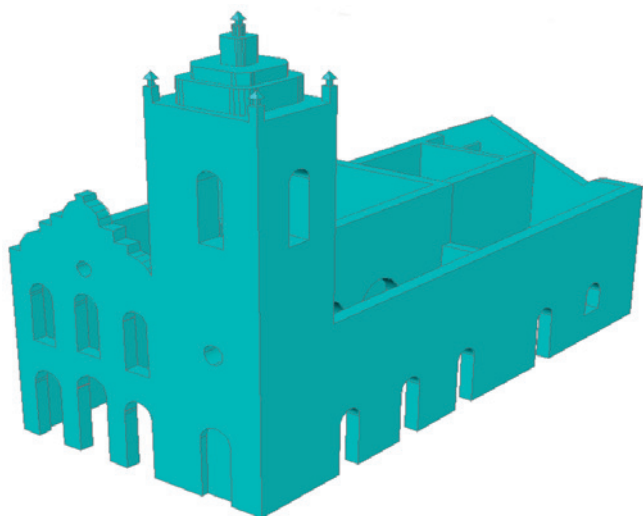


Figura 4
Modelo 3D da Igreja de Nossa Senhora das Dores

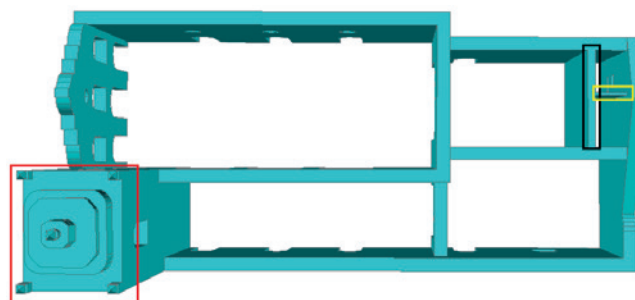


Figura 5
Detalhes das espessuras de paredes adotadas no Modelo 3D da Igreja das Dores

Tabela 1
Propriedades mecânicas adotadas no modelo numérico

E (GPa)	W (kN/m ³)	f _m (MPa)	f _t (MPa)	v
1,5	18	3,2	0,16	0,2

modais da Igreja de Nossa Senhora das Dores foi feita através do ensaio de vibração ambiental no dia 28/04/2016, no período da tarde, das 14:00h às 17:00h. Antes de se proceder ao ensaio experimental propriamente dito, foi realizada uma análise modal preliminar do modelo utilizando as propriedades mecânicas da alvenaria constantes na Tabela 1 com o objetivo de se obter uma primeira aproximação dos valores das frequências naturais e dos modos de vibração da estrutura, e ainda, identificar as zonas com os maiores deslocamentos observados nos primeiros modos de vibração, para que nestes pontos fossem posicionados os acelerômetros. O equipamento utilizado neste ensaio foi um acelerômetro triaxial do tipo piezoelétrico, com frequência de amostragem entre 0 Hz e 100 Hz configurável através de um software desenvolvido em Labview pelo Instituto de Telecomunicações de Aveiro, Portugal. Os pontos onde o acelerômetro foi posicionado são indicados na Figura 7.

O acelerômetro foi fixado em cada um dos três pontos um de cada vez, sendo que em cada um dos pontos a recolha dos dados durou 10 minutos. Foram coletadas as acelerações nos 3 eixos (X, Y e Z), onde o eixo X foi considerado para fora do plano das paredes, o eixo Y no plano das paredes e o eixo Z na posição vertical.

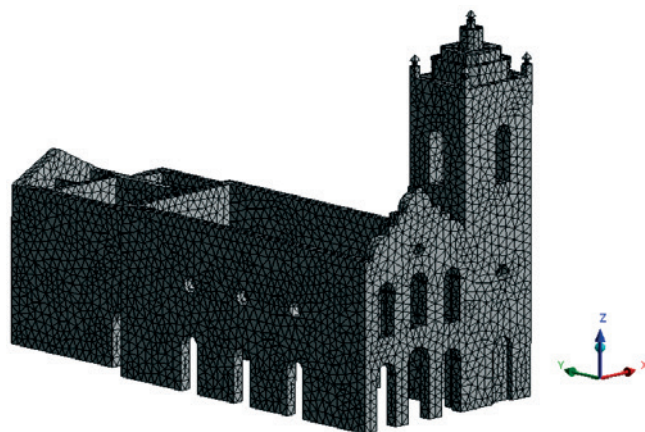


Figura 6
Malha de elementos finitos utilizada no modelo

3.4 Identificação experimental das frequências naturais

Os acelerogramas colhidos no ensaio (Figura 8 e Figura 9) foram processados através da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (TRF), utilizando-se 16384 pontos, visto que a TRF exige amostras cuja dimensão seja a potência inteira de 2, neste caso 2¹⁴=16384. Os pontos foram espaçados em intervalos de tempo de 0,001 s, o que totalizou 16,384s de sinal, e ainda, os efeitos de ruído nos sinais das frequências foram filtrados através do software SeismoSignal@.

Dos acelerogramas colhidos, foram considerados apenas os

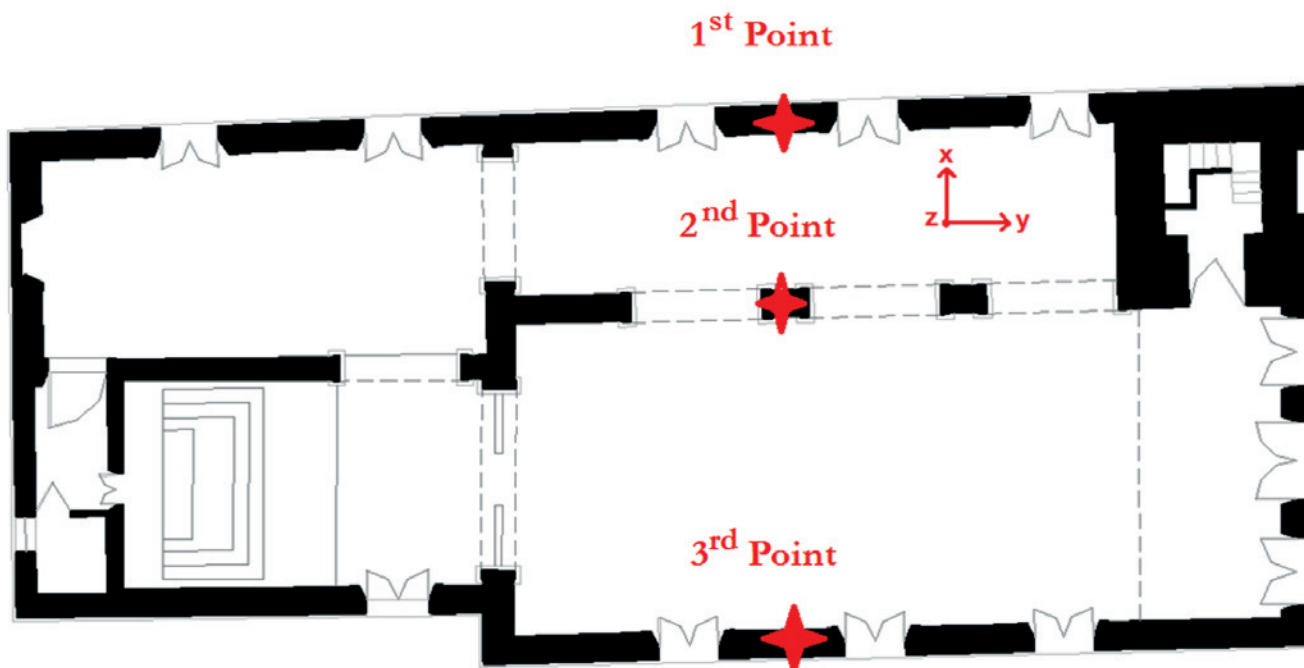


Figura 7
Localização dos pontos da edificação escolhidas para o ensaio de vibração ambiental

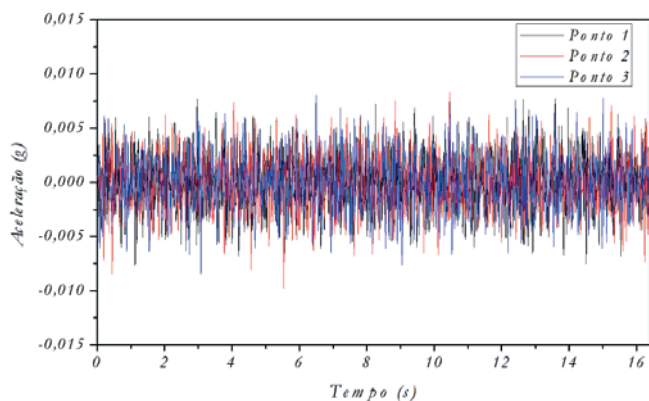


Figura 8
Acelerograma dos 3 pontos no eixo X

espectros nas direções X e Y, uma vez que o eixo X refere-se aos deslocamentos para fora do plano das paredes e o eixo Y no plano das paredes no sentido longitudinal. No eixo Z, a análise modal preliminar do modelo constatou deslocamentos muito baixos quando comparados com os demais eixos, além disso, a estrutura não apresenta pavimentos, logo, não há expressiva participação de massa efetiva modal que levaria a um incremento de frequência. Ainda na análise modal preliminar do modelo, não se encontraram frequências inferiores a 1,50 Hz, logo, para a edificação em estudo aplicou-se um filtro, *Lowpass* e *Bandpass* de 1,00 Hz a 30,00 Hz, ao sinal para eliminar as frequências externas a este intervalo. Ressalta-se ainda que, a amplitude das frequências compreendidas entre 0 e 1,00 Hz antes da aplicação do filtro, não eram superiores a 0,01Hz o que corrobora a utilização do filtro escolhido. Da aplicação da TRF e do filtro aos sinais, obtiveram-se como resultados espectros de Fourier nas direções X (Figura 10) e Y (Figura 11), das quais se determinam as frequências dominantes que caracterizam o comportamento dinâmico da estrutura identificadas pelos pontos máximos da função.

Analisando-se os picos destes dois espectros pode-se inferir que as 3 primeiras frequências naturais da edificação estão compreendidas entre 2,00 Hz e 4,00 Hz. Considerando-se as frequências com maiores valores de amplitude em relação a cada eixo, obte-

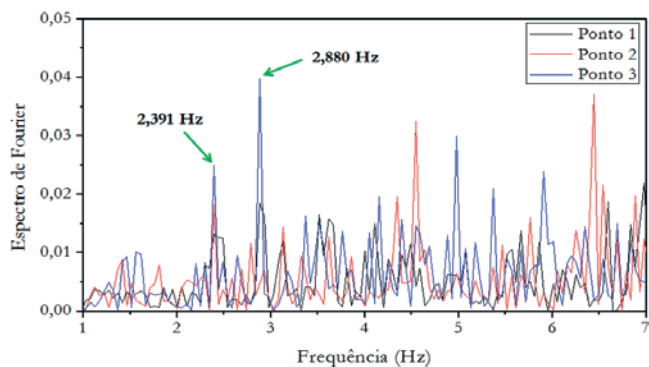


Figura 10
Espectros de Fourier em relação ao eixo X para os três pontos ensaiados

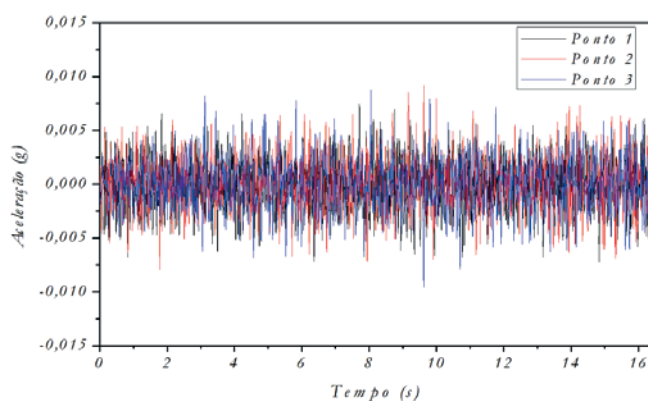


Figura 9
Acelerograma dos 3 pontos no eixo Y

ve-se como primeira frequência fundamental da edificação o valor de 2,391 Hz em relação ao eixo X, a segunda é de 2,880 Hz também na direção X, pois a amplitude dos dois primeiros picos na direção X é maior que na direção Y. Já a terceira frequência natural foi obtida no eixo Y, cujo valor é de 3,125 Hz, pois nesta direção sua amplitude bem maior. Os valores das três primeiras frequências naturais da Igreja das Dores são indicados na Tabela 2. Identificam-se somente as três primeiras frequências naturais da Igreja das Dores, pois estas foram consideradas suficientes para a calibração do modelo em elementos finitos, além disso, a mais importante dentre todas é a primeira, visto que tem o maior período.

3.5 Calibração do modelo

A calibração do modelo numérico foi feita utilizando-se as frequências naturais obtidas no ensaio experimental, mantendo o peso específico constante e ajustando apenas o módulo de elasticidade adotado para a alvenaria, tendo como limite o valor máximo imposto pela norma técnica italiana, 1,8 GPa.

O módulo de elasticidade foi ajustado no programa *Ansys*[®] de modo que a frequência natural do primeiro modo de vibração do modelo chegasse o mais próximo possível do valor obtido no ensaio experimental, e as demais frequências, do segundo

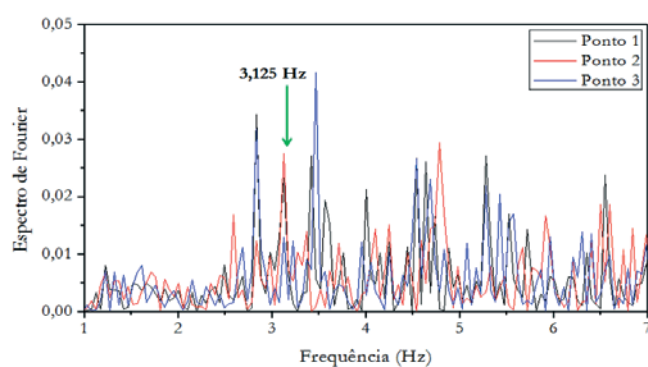


Figura 11
Espectros de Fourier em relação ao eixo Y para os três pontos ensaiados

Tabela 2

Primeiras 3 frequências naturais da edificação

Mode	Frequency (Hz)
1	2.391
2	2.880
3	3.125

e terceiro modos, se ajustariam mediante o ajuste da primeira frequência. Variou-se o módulo de elasticidade de 1,50 GPa, primeiro valor utilizado, até 1,75 GPa, de modo que os valores das frequências obtidas pela simulação numérica apresentassem valores próximos aos valores experimentais. Sendo que o valor mais próximo da frequência natural do primeiro modo de vibração foi obtido ajustando-se o módulo de elasticidade para $E = 1,70$ GPa. Os resultados, bem como o erro associado à cada uma das frequências, são mostrados na Tabela 3.

As diferenças entre os parâmetros dinâmicos obtidos numericamente e aqueles obtidos pelo ensaio experimental podem estar relacionadas com o processo de modelagem da estrutura e com as propriedades mecânicas adotadas. É prática comum para corrigir estes modelos usar informações obtidas a partir de ensaios de vibração. As frequências naturais podem ser usadas para a correção das propriedades elásticas e inércia do modelo numérico, e incorporar as características de amortecimento obtidas experimentalmente [27].

Um erro de até 5% é aceitável e nesta calibração o maior valor do erro obtido da diferença entre a frequência natural da edificação extraída por via experimental e a frequência natural extraída por via numérica, foi de 2,637%, que está a bem baixo deste valor. As propriedades mecânicas adotadas no modelo numérico, agora calibrado, são indicadas na Tabela 4.

A partir das propriedades mecânicas da Tabela 4 inseridas no modelo, obtiveram-se as frequências para os 20 primeiros modos de vibração da edificação, com respectivas porcentagens de participação das massas em cada modo.

4. Resultados e discussões

Na análise foram extraídos os 20 primeiros modos de vibração do modelo numérico da Igreja de Nossa Senhora das Dores, considerando o regime linear-elástico dos materiais. As fre-

Tabela 3

Comparativo entre as frequências experimentais e numéricas ad edificação

Modo	Freq. Exper. (Hz)	Freq. Ansys (Hz)	Erro (%)
1	2,391	2,403	0,502
2	2,880	2,806	2,637
3	3,125	3,084	1,329

quências naturais, períodos e porcentagens de participação das massas para cada um deste 20 modos são indicados na Tabela 5 a seguir.

A porcentagem de participação das massas para os 20 primeiros modos de vibração nas direções X, Y e Z são, respectivamente; 72,930%, 61,675 % e 0,151%. Observa-se que a direção X apresenta a maior porcentagem de participação, o que acarreta em maiores deslocamentos neste eixo, que pode ser confirmado através da primeira frequência natural, que foi identificada como sendo também na direção do referido eixo.

A direção Y também apresenta significativa participação de massas, mais de 50% da massa total da igreja. Já a direção Z é a direção que apresentou as menores porcentagens de participação modal, o que indica uma tendência de se obterem valores de deslocamentos muito baixos neste eixo, quase nulos. E é justamente o que se observa na Figura 12, onde estão indicados todos os valores dos deslocamentos direcionais em cada um dos três eixos.

Os deslocamentos mostrados no sentido negativo do eixo horizontal indicam que a estrutura se deslocou no sentido negativo do sistema de eixos de referência adotados na análise. Verifica-se que os deslocamentos direcionais mais expressivos são na direção X, já os menos expressivos são encontrados na direção Z.

Os três primeiros modos de vibração da edificação estão indicados na Figura 13, onde se pode perceber que o primeiro modo é um modo local e que apresenta flexão da parede lateral esquerda, esta que é a parte da estrutura que apresenta o maior valor de deformada modal, 0,215 mm, indicado pela coloração vermelha desta figura. O segundo e terceiro modo também são de flexão, ambos na direção X. No segundo modo observa-se que o maior deslocamento ocorre no topo da torre lateral; 0,108 mm. Já no terceiro modo, o maior deslocamento ocorre nos arcos que separam as duas naves, qual seja 0,133 mm.

Na Figura 14, são indicados dos modos de vibração que excitam o maior número de partes da edificação, ou seja, os modos globais. O modo 6 e o modo 13 são modos de flexão já o modo 18 é um modo de torção, observada na torre lateral. Analisando-se as Figuras 13 e 14, pode se inferir que a parede lateral esquerda e a região dos arcos centrais são as zonas da edificação que mais são solicitadas nas deformadas modais. Para a parede lateral, este fato pode estar relacionado a não continuidade da mesma, como se pode observar na planta baixa da Figura 2, como isso um modo local de vibração foi gerado o que acarretou em grandes deslocamentos. Já para a região dos arcos, este comportamento já era esperado, pois geralmente a região dos arcos, neste tipo de edificações, são zonas muito propícias ao

Tabela 4

Propriedades mecânicas adotadas no modelo numérico calibrado

E (GPa)	W (kN/m ³)	f _m (MPa)	f _t (MPa)	v
1,70	18,00	3,20	0,16	0,20

Tabela 5
Resultados da análise modal

Modo	Frequência	Período	Participação de massa		
	f (Hz)	T (s)	U _x (%)	U _y (%)	U _z (%)
1	2,403	0,416	13,533	0,219	0,000
2	2,806	0,356	20,969	3,020	0,003
3	3,084	0,324	7,241	16,007	0,010
4	3,342	0,299	0,022	4,951	0,008
5	3,796	0,263	3,031	0,008	0,000
6	4,925	0,203	3,571	0,211	0,000
7	5,547	0,180	7,051	2,271	0,001
8	6,229	0,161	0,581	2,311	0,001
9	6,753	0,148	0,628	0,558	0,001
10	7,247	0,138	0,019	4,143	0,003
11	7,867	0,127	3,864	0,147	0,000
12	8,192	0,122	0,993	0,013	0,001
13	8,591	0,116	1,437	0,212	0,000
14	8,763	0,114	0,943	0,729	0,003
15	8,924	0,112	0,950	0,001	0,001
16	9,275	0,108	0,720	4,703	0,001
17	9,463	0,106	1,851	13,502	0,049
18	9,907	0,101	0,526	8,546	0,026
19	10,341	0,097	4,412	0,062	0,027
20	10,835	0,092	0,588	0,060	0,017

surgimento de fissuras, tanto devido a tensões quanto a deslocamentos elevados.

Os resultados obtidos neste trabalho são úteis para a monitorização estrutural da edificação, uma vez que indicam as zonas onde acelerômetros e sensores de deslocamentos podem ser instalados, além disso possibilitam a compreensão do comportamento

global da estrutura e verificação das regiões em que, na necessidade de um plano de reforço, devem ser priorizadas. Este trabalho gerou informações que podem ser úteis em simulações de diversos cenários de danos, como por exemplos a incidência de sismos, e ainda, pode ser utilizado como ferramenta de apoio à manutenção da segurança estrutural da Igreja de Nossa Senhora das Dores.

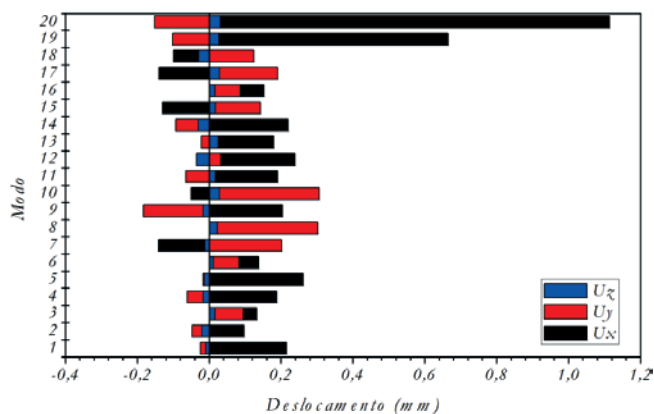


Figura 12
Comparativo entre os deslocamentos direcionais de cada modo

5. Conclusões

A Igreja de Nossa Senhora das Dores é uma importante edificação componente do patrimônio histórico sobralense, neste trabalho buscou-se definir um modelo numérico que representasse da melhor forma possível esta estrutura, a fim de garantir precisão nos resultados da análise modal. Através da realização do ensaio de vibração ambiental foi possível identificar as três primeiras frequências naturais da edificação, necessárias à calibração do modelo numérico, para assim, proceder ao estudo do comportamento dinâmico, através da realização de uma análise modal via Método dos Elementos Finitos.

As três primeiras frequências naturais da edificação estão contidas no intervalo de 2,00 Hz a 4,00 Hz, sendo a primeira 2,403 Hz, que difere 0,502 % do valor obtido experimentalmente mediante o ensaio de vibração ambiental, qual seja 2,391 Hz. Verificou-se que

os maiores deslocamentos da edificação ocorrem na direção X, o eixo com maior participação de massa efetiva modal. Já os menores deslocamentos ocorrem na direção Z, este que tem baixa participação de massa. Os primeiros modos de vibração da edificação caracterizaram-se por serem modos de flexão, dentre os quais alguns são modos locais, já a partir do sexto, os modos passam a

serem globais, sendo o 18º modo caracterizado por ser um modo de torção. Observou-se ainda que a região dos arcos centrais é uma zona muito solicitada, pois suas deformações aparecem em quase todos os 20 modos de vibração extraídos, e ainda, em muitos destes, apresenta valores de deslocamentos consideráveis, devido, essencialmente, a sua geometria que influencia diretamente em suas

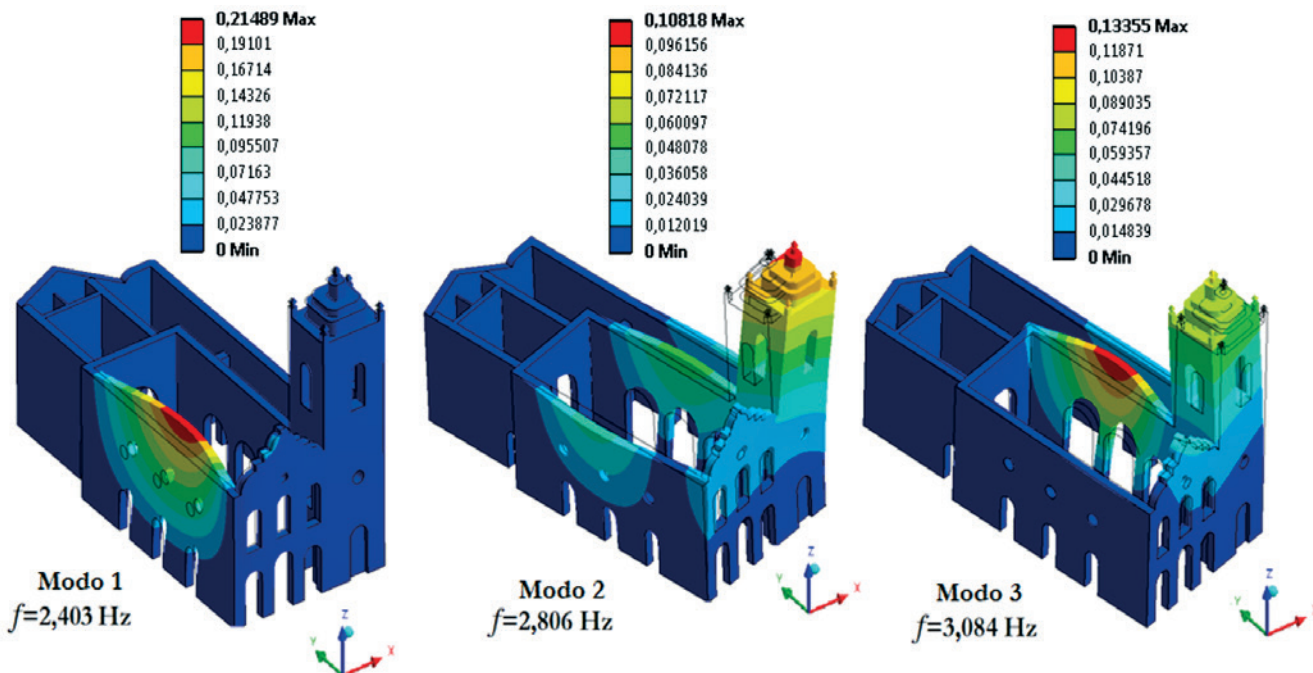


Figura 13
Três primeiros modos de vibração da Igreja das Dores

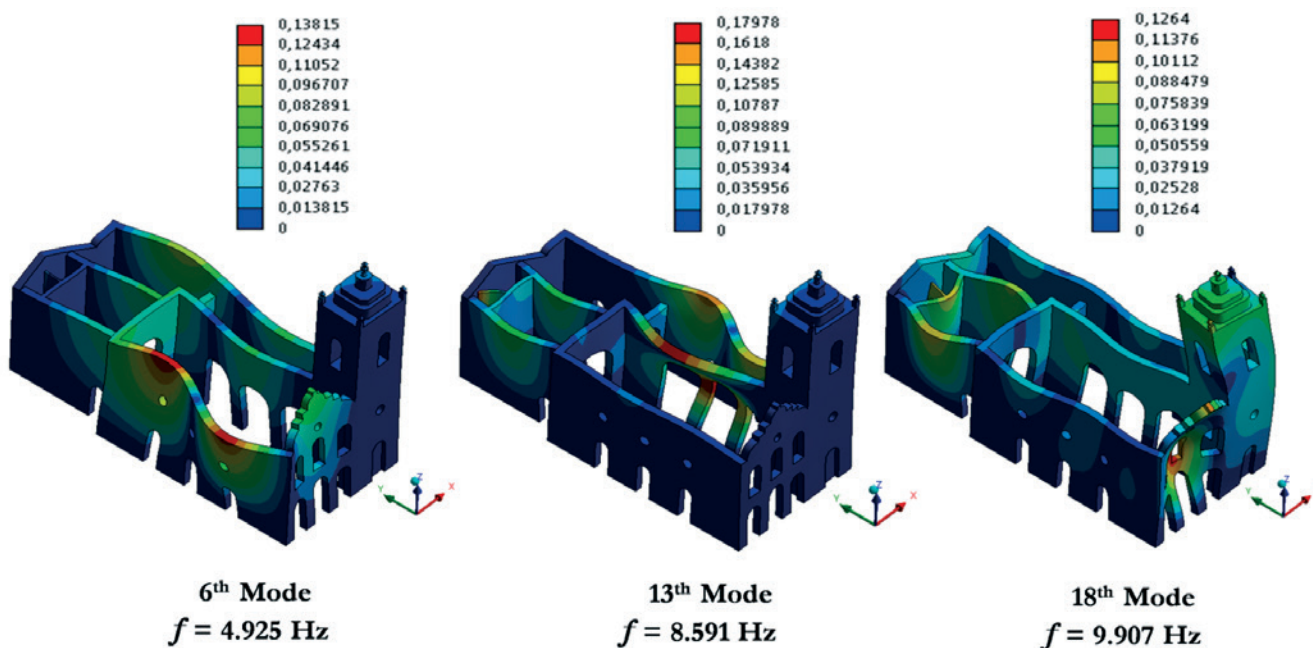


Figura 14
Modos de vibração com maiores partes da edificação excitadas

propriedades de rigidez. Desta forma pode-se inferir que essa zona é uma das mais propícias ao surgimento de fissuras.

Estudos desta natureza, aplicados a edificações históricas, contribuem para a implementação do conhecimento a cerca do comportamento global e vulnerabilidade destas estruturas, constituindo ferramentas importantes de apoio à tomada de decisões sobre intervenções com foco na preservação e manutenção da segurança estrutural e, não obstante, para a valorização do edificado.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), pelos arquivos e informações concedidas, à secretaria da Paróquia de Nossa Senhora da Conceição em Sobral pelo apoio durante a realização da campanha experimental. Francisco Brandão agradece a Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA) pela bolsa de iniciação científica do programa PIC/PBU/UVA e Esequiel Mesquita agradece a Fundação CAPES, Ministério da Educação do Brasil pela bolsa de Doutorado Pleno no Exterior, processo número 10023/13-5.

7. Referências bibliográficas

- [1] Roca, P. et al. Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. Archives of Computational Methods in Engineering, v. 17, n. 3, 2010; p. 299–325.
- [2] Mesquita, E. et al. Structural reliability assessment based on optical monitoring system: case study. IBRACON Structures and Materials Journal, v. 9, n.2, 2016;p. 297–305.
- [3] Alves, A. et al. Estimativa do módulo de elasticidade global de uma edificação histórica de alvenaria de tijolos maciços pelo método ultrassônico. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções-CBPAT 2016, 2º, Belém, 2016, Anais, Belém, p. 1005-1015.
- [4] Cavalcante, A. et al. Caracterização dos danos em construções históricas de alvenaria vernacular: casos de estudo. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções-CBPAT 2016, 2º, Belém, 2016, Anais, Belém, p. 757-765.
- [5] Mota, L. et al. Avaliação da vulnerabilidade sísmica à escala urbana: o centro histórico sobralense. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções-CBPAT 2016, 2º, Belém, 2016, Anais, Belém, p. 559-569.
- [6] SANTOS, F. et al. Análise estrutural de uma edificação histórica do século XVIII. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções- CBPAT 2016, 2º, Belém, 2016, Anais, Belém, p. 317-327.
- [7] Antunes, P. et al. Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study. Measurement, v. 45, n.7, 2012; p.1695–1705.
- [8] Mesquita, E. et al. (2016). Global overview on advances in structural health monitoring platforms. Journal of Civil Structural Health Monitoring, v. 6, n.3, 2016; p. 461–475.
- [9] Boscato, G. et al. Optimized procedures and strategies for the dynamic monitoring of historical structures. Journal of Civil Structural Health Monitoring, v. 6, n. 2, 2016; p. 265–289.
- [10] Di Paola, M. et al. L'identificazione dinamica delle caratteristiche modali e meccaniche della struttura della cupola del Teatro Massimo. Meccanica dei Materiali e delle Strutture, v.3, n.2, 2012; p.94-107.
- [11] CARVALHO, A. F. C. Estudo numérico e experimental sobre o comportamento dinâmico de um edifício, Lisboa, 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Estruturas)- Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 111 p.
- [12] Brownjohn, J. M. W. et al. Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge. Engineering Structures, v. 32, n. 8, 2010; p. 2003–2018.
- [13] Magalhães, F. (2010). Operational modal analysis for testing and monitoring of bridges and special structures. Faculty of Engineering of University of Porto.
- [14] Martínez, G. et al. Determinación experimental y analítica de las propiedades dinámicas para la Catedral de Mallorca. Intersections/Intersección- Structural Engineering, v. 4, n. 2, 2007; p. 65-74.
- [15] Rinaldis, D.; Clemente, P.; Buffarini, G. Dynamic Behavior of a Historical Building. Advanced Materials Research, Vols. 133-134, 2010; p. 659-664.
- [16] Ceroni, F. et al. SSI on the Dynamic Behaviour of a Historical Masonry Building: Experimental versus Numerical Results. Buildings, v. 4, n. 3, 2012; p. 978-1000.
- [17] RODRIGUES, J. Identificação Modal Estocástica- Métodos de análise e aplicações em estruturas de Engenharia Civil, Porto, 2004, Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 484 p.
- [18] RODRIGUES, J. R. et al. Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: Uma revisão atual. In: VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, 6º, Rio de Janeiro, 2010, Anais, Rio de Janeiro, p.1-7.
- [19] Grose, J; Sawicki, W.; Wójcicki, Z. Vibration measurements in analysis of historical structures Pomiary i analizy drgań obiektów historycznych. Wiadomości Konserwatorskie- Journal of Heritage Conservation , 32, 2012; p. 157-154.
- [20] Lopes, V. et al. Identificação dinâmica de estruturas. In: Congresso Patrimônio, Porto, 2010, Anais, Porto, p.1-21.
- [21] PINTO, J. J. de S. Os novos palácios da velha princesa: Intervenções arquitetônicas contemporâneas no sítio histórico de Sobral, Natal, 2009, Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 129 p.
- [22] INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). Inventário Nacional de Bens Arquitetônicos – IBA Sobral, 2005.
- [23] MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI. Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) D.M. del 14/01/2008. Roma, 2008.
- [24] BRANCO, M. E. M. Reforço Sísmico de Edifícios de Alvenaria- Aplicação a edifícios “Gaioleiros”, 2007, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, 98 p.
- [25] DELGADO, J. L. Avaliação sísmica de um edifício crítico em alvenaria. 2013, Lisboa, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico de Lisboa, 122 p.

- [26] FRAZÃO, M. T. de B. R. F. Modelação de um edifício “Gaioleiro” para Avaliação e Reforço Sísmico. 2013, Lisboa, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico de Lisboa, 117 p.
- [27] Simón, G. W. E. Identificación de modos cercanos de vibración de una estructura cuasi-axisimétrica: estudio complementario. Ingeniería Investigación y Tecnología, v. XIV, n.2), 2013; p. 207-222.