Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE UM EDIFÍCIO HISTÓRICO DO SÉCULO XIX CONSTRUÍDO EM ALVENARIA DE TIJOLOS MACIÇOS

F. BRANDÃO
Aluno de Graduação
LAER, Engenharia Civil, UVA
Ceará, Brasil
eng.franciscobrandao@hotmail.com

A. ALVES
Aluno de Graduação
LAER, Engenharia Civil, UVA
Ceará, Brasil
andre.eng.civ@hotmail.com

F. SANTOS
Aluno de Graduação
LAER, Engenharia Civil, UVA
Ceará, Brasil
david-santos@live.com

A. DIÓGENES
MSc, Professora efetiva
LAER, Engenharia Civil, UVA
Ceará, Brasil
aldeciragd@yahoo.com.br

E. MESQUITA
Doutorando
CONSTRUCT-LESE, FEUP
Ceará, Brasil
e.mesquita@fe.up.pt

H. VARUM
PhD, Professor Catedrático
CONSTRUCT-LESE, FEUP
Porto, Portugal
hvarum@fe.up.pt

RESUMO

Construções históricas podem ser entendidas como bens materiais que possuem elevado significado artístico, cultural, religioso, documental ou estético para uma dada sociedade, ou seja, representam, em algum aspecto, a identidade cultural de uma comunidade em um determinado período. Observadas as propriedades de durabilidade dos materiais, as construções históricas, não divergindo das demais construções, estão sujeitas a processos de degradação, sejam eles por meio de agentes ambientais ou antrópicos, ou ambas as situações. Diante desta perspectiva, este trabalho propõe-se ao estudo das características dinâmicas estruturais de uma capela do início Século XIX constituída em alvenarias de tijolos maciços, nomeadamente a Igreja de Nossa Senhora das Dores situada na cidade de Sobral, região Norte do estado do Ceará, através da modelagem numérica com recorrência ao método dos elementos finitos. Para tal, foram realizadas consultas a documentos históricos, disponibilizados pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), e inspeções *in situ* com o objetivo de coletar informações sobre as características geométricas e construtivas, e ainda informações sobre o estado atual de conservação da edificação. A modelagem 3D da estrutura foi desenvolvida em *softwar*e CAD e a análise modal no *software* ANSYS®. Os resultados obtidos permitiram a interpretação sobre o comportamento global da estrutura, no que se refere às frequências naturais e modos de vibração.
Palavras-chave: caracterização dinâmica, análise modal, Igreja de Nossa Senhora das Dores, alvenaria de tijolos maciços, análise estrutural.

ABSTRACT

Historical constructions can be understood as material goods that presents high artistic, cultural, religious, documental or esthetic values for one society, that is, they represent, in some aspect, the cultural identity of a community in a given period. Observed the properties of materials durability, historical constructions, not unlike other buildings, are submitted to process of degradation, whether through environmental agents or anthropic, or both. In this perspective, the current work proposes to study the structural dynamic characteristics of a church from Century XIX, constituted by masonry of solid bricks, namely the Nossa Senhora das Dores' Church, located in the city of Sobral, North region of the state of Ceará, through numerical modeling with recurrence to finite element method. For this, was made a documental search on files provided by Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), and *in situ* inspections with the objective of collecting information about the geometric and constructive features, and the current state of structural conservation of the construction. The 3D model was developed in CAD *software* and the modal analysis in ANSYS® *software*. The results obtained have led to the interpretation of the structure's global behavior in relation to the natural frequencies and modes of vibration.
Keywords: dynamic characterization, modal analysis, Nossa Senhora das Dores' Church, masonry of solid bricks, structural analysis.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

As construções em alvenaria tiveram origem com as primeiras comunidades sedentárias, quando o homem passou a construir seu próprio abrigo a partir de agrupamentos de pedras orientadas na vertical. A construção destas edificações baseavam-se no dimensionamento empírico, através da colocação quase que aleatória de pedras, de modo a fazer agir a ação da gravidade, e de modo a garantir uma interação de equilíbrio entre os diferentes elementos através de tensões de compressão e de atrito, quais sejam longitudinais e/ou transversais [1]. No curso dos anos, com a disponibilidade de materiais nos locais das construções, e também com o surgimento de variados métodos construtivos, a alvenaria passa a ser construída de diversas formas e tipologias, e ainda com emprego de materiais diversos como é o caso das alvenarias de pedra, alvenarias de tijolos maciços e alvenarias de adobe, entre tantas outras [2].

Em termos de propriedades mecânicas, as alvenarias podem ser consideradas como um material heterogêneo, anisotrópico e descontínuo, essencialmente devido aos seus diferentes tipos de componentes, sendo por este fato, difícil caracterizá-la mecanicamente. Segundo Roque [3], nas edificações antigas construídas em alvenaria, a natureza do material compósito, as características gerais da concepção, somadas aos efeitos acumulados de diferentes processos de degradação dos materiais, tornam estas estruturas vulneráveis a ações de caráter dinâmico, dentre as quais a ação sísmica é a mais preocupante. Contudo, isto não significa dizer que as construções em alvenarias apresentam menor desempenho ou vida útil que outros materiais, como a madeira e o concreto, por exemplo, pois são as ações no âmbito da conservação estrutural que garantirão que uma determinada estrutura seja considerada, ou não, segura.

A identificação das características dinâmicas de estruturas no âmbito da engenharia civil, consiste uma etapa fundamental para a caracterização do comportamento estrutural e ainda constitui elementos base para atividades de monitorização, uma vez que as propriedades dinâmicas estão intimamente relacionadas ao desempenho em serviço dos elementos estruturais e, consequentemente, com sua integridade. Em se tratando de construções históricas, o emprego da caracterização dinâmica é relevante não somente pelos dados coletados de frequências naturais e modos de vibração, mas também por seu caráter não-destrutivo, o que garante a repetibilidade dos ensaios sem danos ao patrimônio.

Essencialmente as edificações históricas fazem parte do patrimônio histórico, o qual pode ser entendido como todo e qualquer bem material, natural ou imóvel que possui 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. Assim, as construções históricas caracterizam-se por serem bens materiais patrimoniais sujeitos à degradação estrutural, seja ela por meio de agentes ambientais ou antrópicos.

Nesse contexto, a cidade de Sobral, localizada na região Norte do Estado do Ceará, apresenta um dos maiores e mais importantes centros históricos do país, com cerca de 1200 imóveis tombados pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). Pelo exposto, a realização de estudos que demonstrem a viabilidade do emprego de métodos de caracterização dinâmica aplicados à construções históricas mostram-se bastante relevantes, especialmente para o entendimento sobre o comportamento global estrutural destas edificações, e também como forma de contribuição para a tomada de decisões sobre a preservação do patrimônio e manutenção da segurança estrutural.

Como forma de contribuição ao meio tecnocientífico, o presente trabalho tem por objetivo realizar a caracterização dinâmica, no que se refere à obtenção das frequências naturais e respectivos modos de vibração, de uma edificação histórica do patrimônio histórico sobralense, qual seja, a Igreja de Nossa Senhora das Dores, uma capela do início Século XIX construída em alvenaria de tijolos maciços, localizada às margens do Rio Acaraú.

2. CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS

2.1 Análise Modal

A caracterização modal de uma estrutura, descrita em termos de frequência natural, amortecimento e modos de vibração, é de suma importância para a análise do seu comportamento dinâmico. Enquanto que na análise estática se estuda o comportamento estrutural quando as variações temporais dos deslocamentos da estrutura ocorrem em intervalos de tempo suficientemente longos, de forma que efeitos inerciais possam ser desprezados, na análise dinâmica,

busca-se estudar o comportamento estrutural quando os efeitos inerciais não podem ser desprezados, isso, através da identificação das propriedades dinâmicas da estrutura ou da resposta estrutural ao longo do tempo [4].

Segundo Nóbrega e Hanai [5], a análise modal é o processo onde se utilizam técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema estrutural em estudo, com o objetivo de determinar seus parâmetros modais: frequências naturais, modos de vibração e os fatores de amortecimento modal. Estes parâmetros são frequentemente determinados por métodos teóricos, como por exemplo, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Em outras situações, o modelo matemático nem mesmo existe, sendo assim, os parâmetros modais podem ser determinados por via experimental. Quando o modelo existe, a abordagem experimental pode servir para a verificação e a validação dos resultados obtidos no modelo analítico.

Definindo os termos anteriormente citados, tem-se que o amortecimento é o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada (principalmente pela geração de calor e/ou energia). O amortecimento determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação. Já as frequências naturais de uma estrutura indicam a taxa de oscilação livre da mesma, após cessada a força que provocou seu movimento. Em outras palavras, representa o quanto a estrutura pode vibrar quando não há força aplicada sobre ela. Uma mesma estrutura possui diversas frequências naturais, pois ela pode vibrar livremente em várias direções. A mais importante frequência natural é a primeira, menor entre todas, chamada de frequência fundamental [5]. Por fim, os modos de vibração caracterizam a forma como uma estrutura poderá vibrar, sendo que a forma de vibração está intimamente relacionada a cada uma das frequências naturais de uma estrutura. Na Figura 1 tem-se um exemplo de um edifício com seus 3 primeiros modos de vibração.

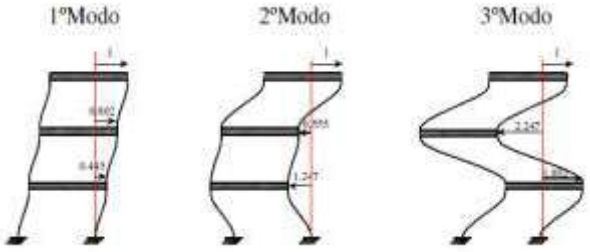

Figura 1: Configurações modais de um edifício de 3 pavimentos
Fonte: Espada [6]

Considerando uma estrutura discretizada por nós e não amortecida, pode-se calcular as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura, a partir da seguinte equação:

$$([K] - \omega_j^2 [M])\, \varphi_j = 0 \quad (1)$$

Onde os termos são respectivamente:

[K] = matriz de rigidez da estrutura;
[M] = matriz de massa da estrutura;
ω_j^2 = autovalor e quadrado da j-ésima frequência natural;
φ_j = autovetor que é o j-ésimo modo natural de vibração ou modo não amortecido.

2.2 Utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) em análise de estruturas

O Método dos Elementos Finitos (MEF) surgiu pelo desenvolvimento de métodos matriciais para a análise de estruturas no âmbito do desenvolvimento da indústria aeroespacial Americana, no final da década de 1940. Contudo, só com o desenvolvimento de computadores mais potentes na década de 60, o MEF foi amplamente divulgado e hoje é usado na solução dos mais variados problemas de Engenharia [7].

Segundo Mendes [7], devido aos avanços computacionais, e consequentemente do MEF, ao longo das últimas décadas, tornou-se possível a solução de vários tipos de problemas dinâmicos, e o desenvolvimento de estudos sobre inúmeros fenômenos que variam de grandeza, direção ou sentido no tempo. Desta forma, para além das ações permanentes, ações como a movimentação de pessoas e de motores de máquinas sobre lajes, incidência do vento em edifícios altos, tráfego rodoviário sobre pontes e ocorrência de sismos, passaram a ser fundamentais no dimensionamento de estruturas.

No MEF, a estrutura analisada é dividida em um número discreto de elementos finitos, como o elemento triangular ilustrado pela Figura 2. Considera-se que estes elementos estão ligados entre si por pontos nodais, formando assim uma malha de elementos finitos. Conhecido o comportamento de cada elemento finito, faz-se a soma dos comportamentos individuais de cada um que resulta no comportamento global da estrutura em estudo. Na Figura 3 têm-se um exemplo de uma malha de elementos finitos já discretizada.

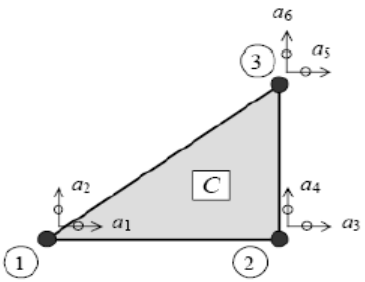

Figura 2: Elemento finito bidimensional triangular
Fonte: Justo [8]

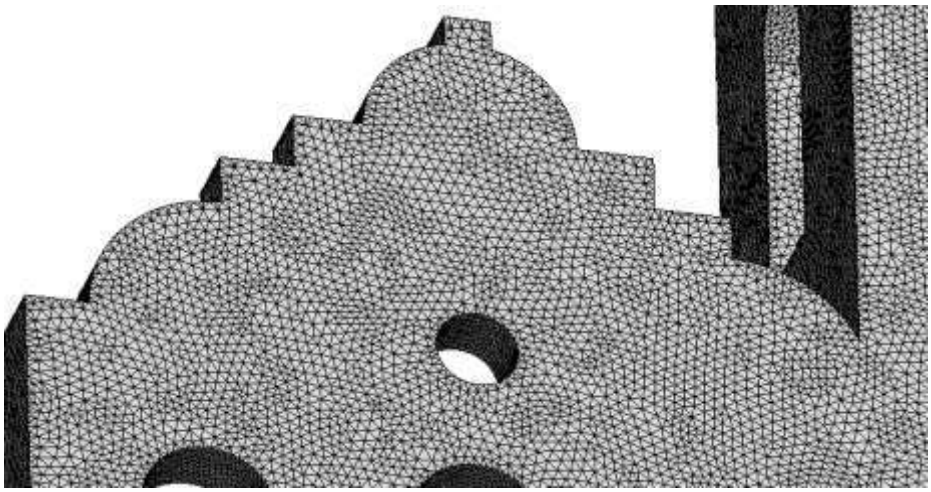

Figura 3: Exemplo de malha de elementos finitos tetraédricos de 10 nós

O MEF é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais, que permite obter soluções teóricas sobre o estado de tensão e de deformação de um sólido, com uma geometria qualquer, sujeito a ações externas e é atualmente o método numérico mais utilizado para as soluções aproximadas dos problemas de Engenharia, como por exemplo o dimensionamento de grandes estruturas, bem como simulação do comportamento de estruturas em situação dinâmica, por exemplo, atingidas por um sismo [8].

2.3 Modelagem numérica de estruturas em alvenaria

A modelagem numérica de edifícios em alvenaria constitui um desafio para a engenharia de estruturas, fundamentalmente devido ao fato da alvenaria ser um material constituído por blocos, juntas e interfaces entre estes elementos que apresentam propriedades mecânicas distintas. Além disso, devido à grande variedade de materiais e técnicas utilizadas no período da construção dos edifícios, sob o ponto de vista da modelagem estrutural, a alvenaria constitui um material de elevada complexidade. Assim, os métodos de análise utilizados em edifícios de alvenaria podem apresentar distintos níveis de rigor e complexidade em função da forma como as ações atuantes são representadas nos modelos, da geometria do edifício e do comportamento e propriedades dos materiais utilizados na modelagem [9].

Em relação às técnicas de modelagem, Costa [10] e Lourenço [11] explicam que podem ser realizadas de três formas, quais sejam, Micro-modelagem detalhada: onde são modeladas separadamente as unidades de alvenaria, argamassa e interfaces unidade-argamassa, sendo as unidades de alvenaria e argamassa representados por elementos contínuos e as interfaces unidade-argamassa por elementos descontínuos; Micro-modelagem simplificada: a modelação das unidades é

ampliada até aos eixos médios da argamassa, e são representadas por modelos contínuos, sendo o comportamento das juntas e das interfaces representados em conjunto como elementos descontínuos; e Macro-modelagem: é efetuada a representação das unidades, da argamassa, e da interface unidade-argamassa como um único elemento continuo equivalente, os macroelementos, estes que são modelos simplificados que reproduzem as características do comportamento da estrutura como um todo. Abaixo tem-se a Figura 4, onde é ilustrada cada uma das três técnicas de modelagem estrutural.

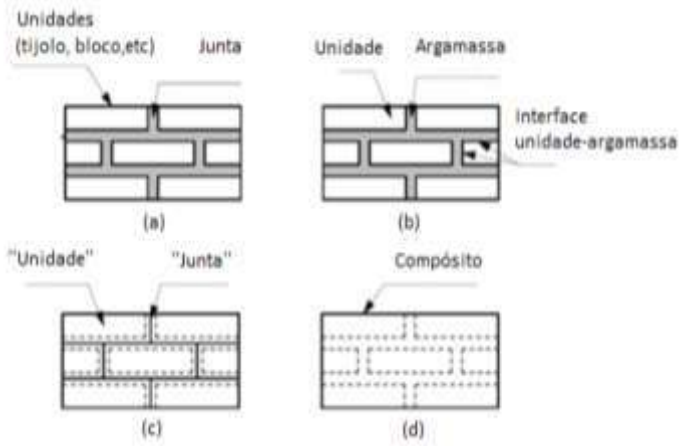

Figura 4: Estratégia de Modelagem: (a) Parede de alvenaria; (b) Micro-modelagem detalhada; (c) Micro- modelagem simplificada. (d) Macro- modelagem
Fonte: Lourenço[12]

Conforme ressalta Roque [13], outro fator de muita importância na modelagem de estruturas de alvenaria é o conhecimento acerca das propriedades mecânicas dos materiais (Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson, Densidade, etc.), pois a correta calibração do modelo é intimamente dependente destas propriedades. Para a realização de modelos numéricos que traduzam com exatidão o comportamento real das estruturas, é importante determinar com algum rigor as suas propriedades mecânicas. Parâmetros como o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (v), que permitem estimar a rigidez dos elementos estruturais, bem como a sua deformabilidade e distribuição de esforços, e o peso específico (w), necessário ao cálculo da parcela da carga correspondente ao peso próprio, na medida em que este tem influência sobre a massa do sistema estrutural, afetam drasticamente a resposta dinâmica de um sistema estrutural.

Os parâmetros acima referidos são fortemente influenciados pelas propriedades de cada um dos componentes que constituem as alvenarias, como as propriedades físicas e mecânicas das pedras e tijolos. Porém graças ao contributo de vários pesquisadores que desenvolveram trabalhos na área, no sentido de estabelecer critérios objetivos de diferenciação e identificação entre as várias soluções construtivas de paredes de alvenaria e das suas respetivas caraterísticas e propriedades mecânicas, é possível ascender a um conjunto de valores obtidos através de resultados experimentais, com o objetivo destes servirem como valores de referencia para a elaboração de modelos numéricos [14].

Na Itália tem havido um vasto trabalho de pesquisa e caraterização de alvenarias, devido à grande quantidade de edifícios em alvenaria existentes no país, o grau de risco a que estão sujeitos devido à ocorrência de sismos e à necessidade de preservação do patrimônio. Destas pesquisas resultaram uma variedade de dados que foram compilados e resumidos em forma de tabelas, que vêm dispostas no regulamento italiano *"Norme Tecniche per le Costruzioni"* (NTC) de 2008, como a da Figura 5, de onde foram extraídos os valores do Módulo de Elasticidade (E) e de Peso específico(W), utilizados na modelagem da Igreja de Nossa Senhora das Dores. A Figura 5 apresenta os valores das propriedades mecânicas a adotar para paredes construídas com recurso a argamassas pobres, ou simplesmente pela justaposição das pedras entre si. 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 estes valores tabelados, adaptados à realidade italiana, para a elaboração dos modelos de cálculo [14].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Tipologia di muratura	f_m (N/cm^2)	τ_0 (N/cm^2)	E (N/mm^2)	G (N/mm^2)	w (kN/m^3)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Figura 5: Valores de referência dos parâmetros mecânicos e peso específico médio para diversas tipologias de alvenaria
Fonte: NTC [15]

3. CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

3.1 Aspectos históricos e construtivos

A Igreja de Nossa Senhora das Dores, datada de 1810, foi construída onde antes existia um pequeno nicho localizado junto à antiga Rua do Rio, em Sobral, Ceará. A Igreja foi incorporada à urbanização da Margem Esquerda do Rio Acaraú com tratamento especial de piso no Largo das Dores, implantação de bancos e iluminação e um pequeno anfiteatro de frente para a margem esquerda do Rio Acaraú [16].

A Igreja foi construída em alvenaria de tijolos maciços, onde a planta caracteriza-se por uma nave central de maior proporção e uma nave lateral de menor proporção. No mesmo alinhamento da nave central localiza-se o altar, que se separa desta por um grande arco. Nos fundos do altar encontram-se uma pequena sacristia e um banheiro. O acesso ao coro se dá por uma escadaria na torre. O grau de ornamentação da Igreja é pequeno, tanto internamente quanto externamente. O edificação possui uma implantação diferenciada, pois é um dos únicos edifícios antigos da área cuja implantação, ainda que parcialmente, aceitou voltar-se para o Rio Acaraú, estando com sua face Norte virada para a Rua das Dores e sua face Sul voltada para a margem esquerda do Rio Acaraú [17]. A Figura 6 mostra a planta baixa da Igreja de Nossa Senhora das Dores, onde se pode ver claramente o altar no final da nave central de maior proporção.

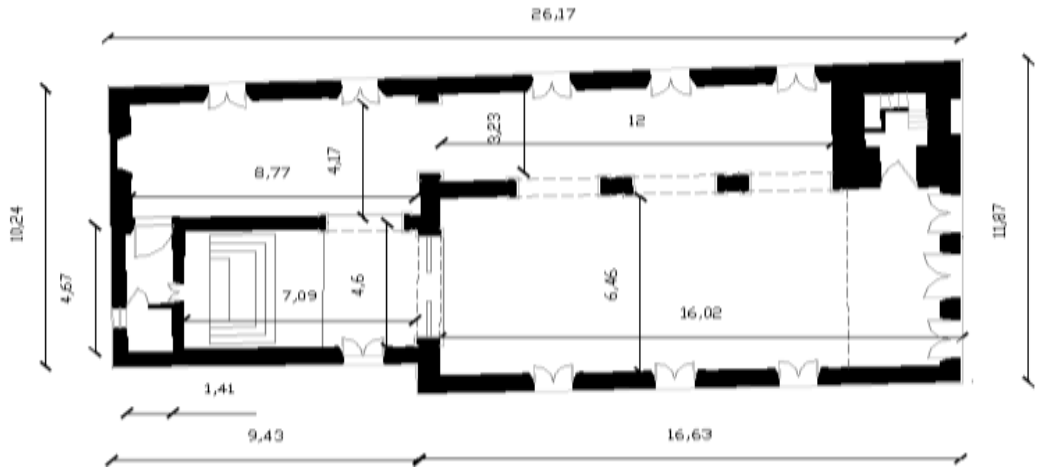

Figura 6: Planta Baixa da Igreja de Nossa Senhora das Dores
Fonte: IPHAN [17]

A Figura 7 mostra a representação em CAD de todas as quatro fachadas da Igreja de Nossa Senhora das Dores, onde se observam com maior clareza os detalhes das respectivas fachadas.

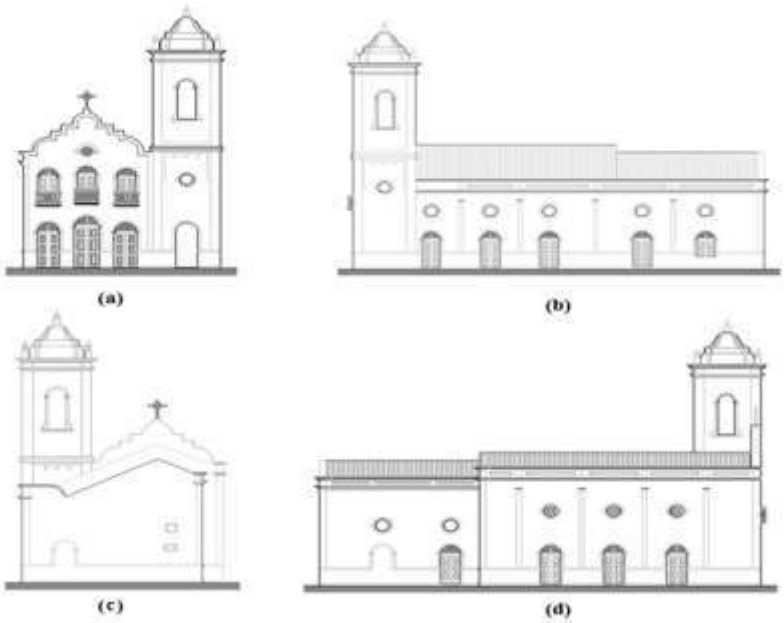

Figura 7: Vistas da Igreja das Dores: (a) fachada frontal (Oeste), (b) fachada lateral (Sul), (c) fachada fundos (Leste) e (d) fachada lateral (Norte)
Fonte: IPHAN [17]

3.2 Estado de conservação

A inspeção visual, mesmo que forneça dados qualitativos, é ainda uma ferramenta bastante útil no processo de avaliação e diagnóstico de uma estrutura. Logo, a combinação das informações oriundas da inspeção visual com ensaios globais potencializa a eficiência de uma potencial intervenção estrutural. Neste trabalho, para a realização da avaliação *in situ* ao edificado foram seguidas as recomendações do Boletim Técnico do ALCONPAT: Caracterização, avaliação e recuperação estrutural de construções históricas.

Durante a inspeção visual à Igreja de Nossa Senhora das Dores foram constatados poucos danos aparentes à estrutura, dos quais destacam-se: destacamento de revestimento, como indicados na Figura 8, algumas poucas fissuras nas proximidades dos arcos das portas, e na fachada frontal, destacamento do revestimento com exposição da alvenaria.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



(a) (b)

Figura 8: (a) Danos na Fachada Lateral (Sul) e (b) Danos na Fachada Frontal (Oeste) da Igreja de Nossa Senhora das Dores

De maneira geral a Igreja de Nossa Senhora das Dores apresenta um bom estado de conservação, essencialmente devido ao trabalho conjunto de órgãos municipais, estaduais e federais. Os danos encontrados podem ser resumidos, em termos gerais, como sendo oriundos do efeito da umidade, que tem provocado focos de eflorescência, principalmente nas bases da fachada da Igreja. Em termos estruturais, não foram encontradas evidencias de danos que comprometessem a estabilidade da Igreja, uma vez que os danos catalogados pela equipe do Laboratório de Avaliação e Recuperação Estrutural-LAER/UVA concentram-se nos revestimentos das fachadas da Igreja.

4. METODOLOGIA

4.1 Inspeção em campo e modelagem numérica

A inspeção estrutural com o objetivo de coletar informações sobre as características construtivas, geométricas, bem como o estado de conservação da Igreja de Nossa Senhora das Dores foi realizada em outubro de 2015. Para além de informações sobre a geometria e métodos construtivos, foi realizado um registro fotográfico da estrutura e, em específico, de seus respectivos danos estruturais aparentes, como os mostrados na seção 3.2 deste trabalho. De modo a considerar as caraterísticas geométricas da Igreja de Nossa Senhora das Dores observadas em campo e com auxílio aos registros fornecidos pelo IPHAN-Subseção de Sobral, a estrutura foi modelada primeiramente em 3D em programa CAD, e seguidamente foi exportada para o programa Ansys®, onde foram inseridas no modelo as propriedades físico-mecânicas necessárias à realização da análise dinâmica.

A malha utilizada para discretização do modelo numérico foi caracterizada por elementos tetraédricos de 10 nós, adotados devido ao melhor contorno das formas curvas presentes na estrutura. O módulo de elasticidade (E) e o peso específico (w) da alvenaria de tijolos maciços foram extraídas da NTC [15], sendo estas propriedades comumente adotadas por diversos autores como Nunes [9], Roque [14], Delgado [18] e Ferreira [19]. Já o coeficiente de Poisson (ν) foi o mesmo valor utilizado no estudo de Delgado [18]. Ressalta-se que estes valores foram obtidos mediante extensa pesquisa bibliográfica levando em consideração as características da estrutura e também o tipo de modelagem, neste caso a Macro-modelagem como explicado no Item 2.3 deste trabalho.

4.2 Análise modal da estrutura

A análise modal foi realizada por meio do programa Ansys®, onde foram inseridas as propriedades físico-mecânicas das alvenarias no modelo, mostrada na Tabela 1, e de onde foram extraídos os 6 primeiros modos de vibração juntamente com suas respectivas frequências naturais e períodos.

Tabela 1- Propriedades mecânicas do material do modelo

E [GPa]	W [kN/m^3]	ν
1,50	18	0,2

Foram extraídos também os deslocamentos totais da estrutura para cada modo de vibração e os deslocamentos direcionais, nas direções X, Y e Z, os quais são mostrados na seção 5 do presente trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dada a escassez de literatura disponível sobre as propriedades das alvenarias brasileiras, e ainda sobre alvenarias históricas, a modelagem numérica considerou características físico-mecânicas de alvenarias semelhantes as alvenarias encontradas no estado do Ceará. Essencialmente, as alvenarias italianas utilizadas na etapa de calibração do modelo apresentam espessuras dos tijolos inferiores à espessura média de tijolos maciços característicos do estado do Ceará, em torno de 5-6 cm de espessura. Contudo, como o presente estudo tem por objetivo uma análise global da estrutura a nível de segurança, e dada a variabilidade das propriedades físico-mecânicas das alvenarias de tijolos maciços, a adoção de índices oriundos da normativa italiana não descaracteriza a qualidade das análises realizadas, além de ser uma prática comum de recorrência quando os dados sobre o material estudado não estão disponíveis na literatura.

Após a devida calibração do modelo numérico da Igreja de Nossa Senhora das Dores, as seis primeiras frequências naturais e seus respectivos períodos foram extraídos e os resultados são mostrados na Tabela 2 e também um comparativo entre eles é realizado na Figura 9.

Tabela 2- Frequências e períodos dos seis primeiros modos vibração

Modo	f [Hz]	T [s]
1	2,23642	0,44714
2	2,61836	0,38192
3	2,87333	0,34803
4	3,11522	0,32100
5	3,53650	0,28277
6	4,61575	0,21665

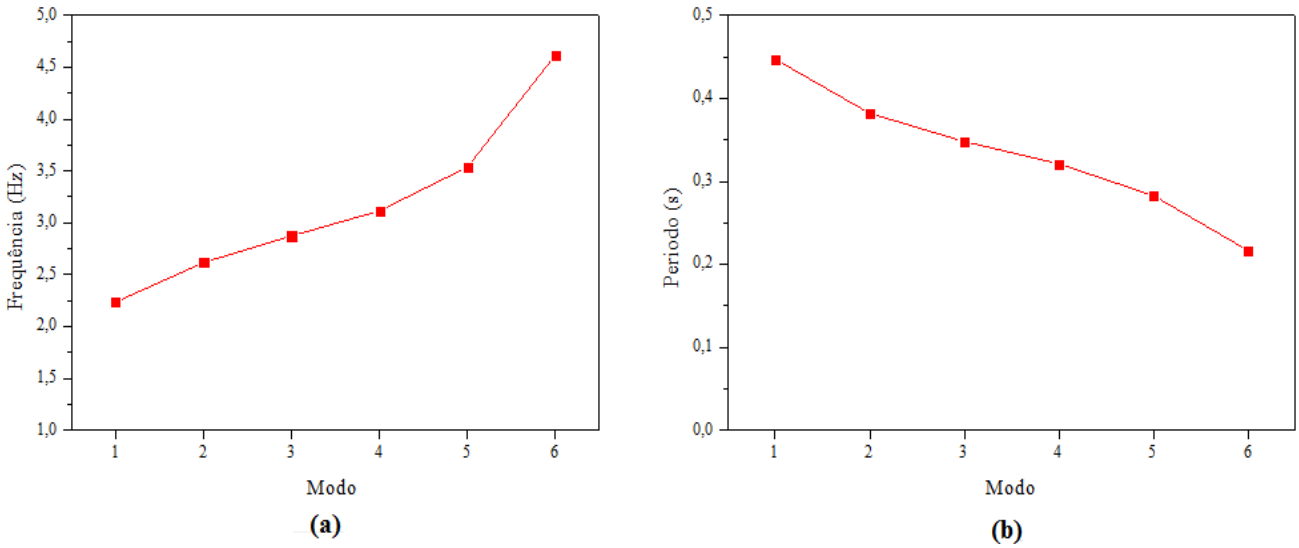

Figura 9: (a) Frequências naturais e (b) períodos para cada um dos seis primeiros modos de vibração

A partir da análise das frequências, verifica-se as mesmas aumentam e os períodos diminuem de acordo com o aumento do número de modos de vibração que são extraídos. A frequência mais importante de uma análise modal é a primeira, pois tem o maior período. Estruturas com frequências muito altas e em zonas sísmicas, quando da ocorrência de um sismo, se a frequência fundamental da estrutura coincidir com a frequência de excitação gerada pelo sismo, a mesma pode entrar em um fenômeno oscilatório chamado de ressonância e vir a colapsar. Na Tabela 3 são mostrados os valores dos deslocamentos direcionais máximos e os deslocamentos totais obtidos para cada modo de vibração da estrutura. O sinal negativo dos deslocamentos indica que a estrutura se deslocou no sentido negativo do respectivo eixo de referência, de acordo com o sistema de eixos adotados e indicados nas Figuras 10 e 11 a seguir.

Tabela 3- Deslocamentos máximos direcionais e deslocamento total para cada modo de vibração

Modo	Desl. máximo em X [mm]	Desl. máximo em Y[mm]	Desl. máximo em Z [mm]	Desl. Total [mm]
1	0,21507	-0,02415	0,00868	0,21518
2	0,09635	-0,05045	-0,02138	0,10876
3	0,13009	0,09488	0,01742	0,13080
4	0,19482	-0,05809	-0,01589	0,19483
5	0,26299	-0,01664	-0,013226	0,26316
6	0,14093	0,09289	0,01046	0,14111

Analisando-se a Tabela 3, observa-se que as maiores contribuições para os deslocamentos totais da estrutura provêm dos deslocamentos no eixo X, os quais apresentam valores de deslocamentos muito próximos aos deslocamentos totais para os modos analisados. Em relação aos deslocamentos no eixo Y, somente o 3º e 6º modo de vibração apresentam valores próximos aos valores de deslocamentos totais da estrutura, quando comparados com os demais modos. Já os deslocamentos no eixo Z, foram os menores deslocamentos direcionais encontrados, e o maior foi o deslocamento referente ao 2º modo de vibração, cujo valor foi de 0,02138mm, no sentido negativo do eixo Z (para baixo), em relação ao sistema de eixos adotados.

A Figura 10 mostra os 6 primeiros modos de vibração da Igreja de Nossa Senhora das Dores, com as frequências, os períodos e o sistema de eixos de referência indicados. Pelos resultados, evidencia-se que a alvenaria lateral esquerda da Igreja tem seus deslocamentos excitados para o 1º, 2º e 6º modos de vibração, enquanto que a torre lateral sofre deslocamentos para o 2º, 3º e 4º modos. Contudo, é a alvenaria dos arcos, seguramente devido sua esbeltez geométrica, que está submetida a deslocamentos para o maior número dos modos, essencialmente 2º, 3º, 4º, 5º e 6º. Em se tratando do comportamento de arcos de alvenaria, estes em geral, apresentam uma maior vulnerabilidade de deslocamentos que alvenarias das paredes.

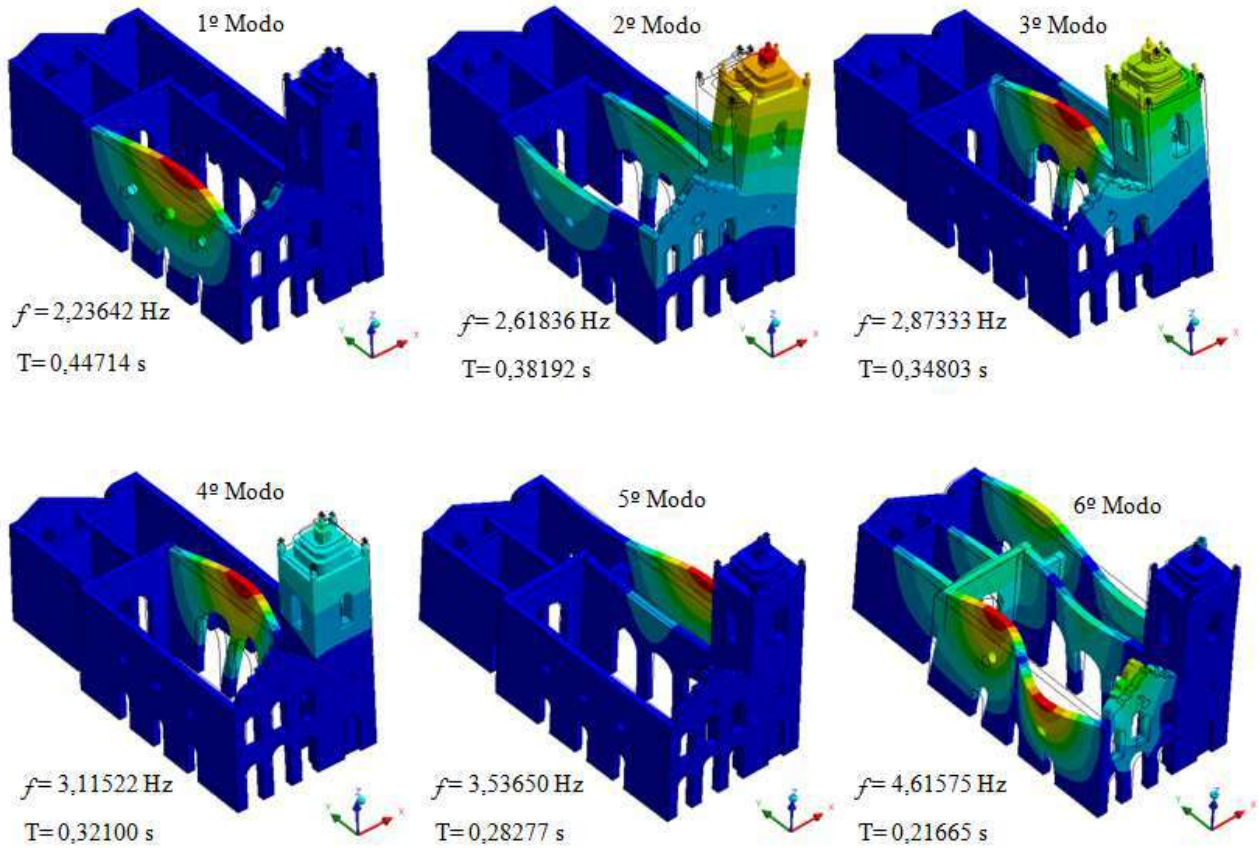

Figura 10: Seis primeiros modos de vibração da estrutura

Verifica-se que os 2º e 3º modos são quase semelhantes devido ao pequeno aumento da frequência entre eles, porém a área solicitada e valores dos deslocamentos totais são diferentes. Os modos 4 e 5 também são quase semelhantes, porém

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

também apresentam divergência quanto a localização e aos valores dos deslocamentos totais. A Figura 11 mostra os deslocamentos direcionais (X, Y e Z) para o 1º e 6º modos de vibração.

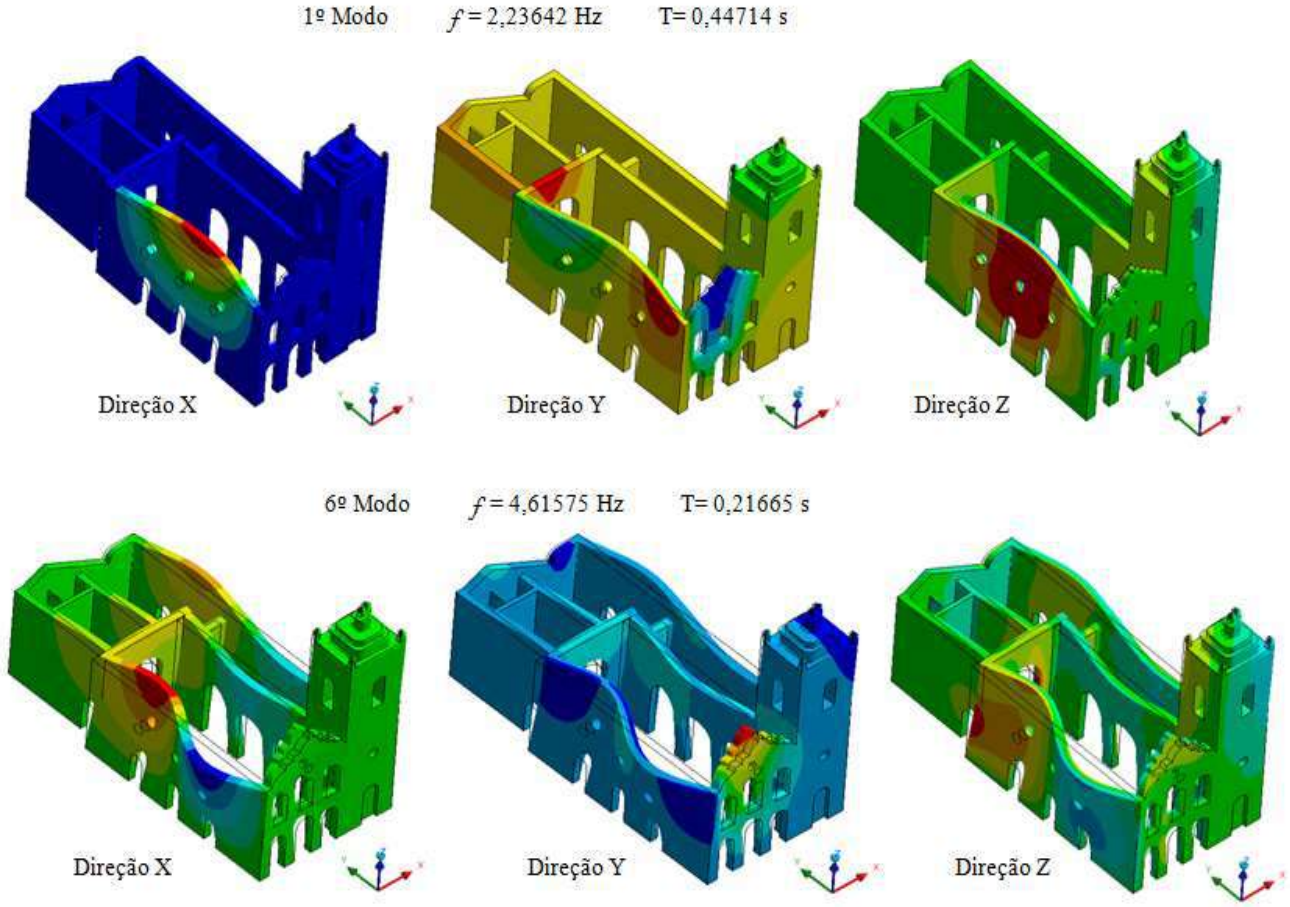

Figura 11: Primeiro e sexto modos de vibração da estrutura nas direções X,Y e Z com frequências e períodos indicados

Em relação aos deslocamentos direcionais do 1º e 6º modos indicados na Figura 11, e seus respectivos valores na Tabela 3, verifica-se que em módulo, o 1º modo de vibração apresenta deslocamento máximo em X maior que o deslocamento máximo em X do 6º modo, deslocamento máximo em Y menor que o deslocamento máximo em Y do 6º modo e deslocamento máximo em Z menor que deslocamento máximo em Z do 6º modo.

6. CONCLUSÕES

Sendo a Igreja de Nossa Senhora das Dores correspondente a uma estrutura do patrimônio histórico sobralense, buscou-se neste trabalho, definir um modelo numérico que representasse da melhor forma possível a estrutura em análise, a fim de garantir segurança nos resultados da análise modal. Através da realização da inspeção *in situ* pode-se verificar o estado atual de conservação da Igreja, evidenciando-se a ocorrência de poucos danos, essencialmente destacamentos no revestimento externo e fissuras. Contudo, os danos observados não apresentam risco ao comprometimento da segurança da estrutura, e de modo geral, a Igreja de Nossa Senhora das Dores pode ter seu estado de conservação considerado como bom.

Na análise modal verificou-se que a solicitação a deslocamentos do maior número de paredes ocorre no 6º modo de vibração, porém como o valor do deslocamento total deste modo é menor que o valor do deslocamento total do 1º modo de vibração, mesmo que o 1º modo apresente um menor número de alvenarias solicitadas, os deslocamentos neste modo devem ser amplamente considerados e tidos em conta numa potencial intervenção que objetive a redução do risco estrutural. Observou-se também que o maior valor de deslocamento ocorre no 5º modo de vibração, já o menor ocorre no 2º modo. Ressalta-se ainda que, mesmo não apresentando os maiores deslocamentos, a região dos arcos, no interior da Igreja, apresenta deslocamentos para o maior numero de modos, nomeadamente 2º, 3º, 4º, 5º e 6º modos de vibração, sendo desse modo considerada uma potencial zona de surgimento de fissuras.

Estudos desta natureza, aplicados à edificações históricas contribuem para a implementação do conhecimento a cerca do comportamento global e vulnerabilidade das estruturas, constituindo ferramentas de apoio à tomada de decisões sobre intervenções com foco na preservação e manutenção da segurança do patrimônio histórico.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN, pelo suporte necessário à realização deste trabalho. Esequiel Mesquita agradece a Fundação CAPES e ao Ministério da Educação do Brasil pela Bolsa de Doutorado Pleno no Exterior, Processo nº 10023/13-5.

8. REFERÊNCIAS

[1] Marques, R. F. P. *Metodologias Inovadoras no Cálculo Sísmico de Estruturas em Alvenaria Simples e Confinada*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil/Estruturas,Universidade do Minho, Guimarães, 2012. 248 p.

[2] Calcaterra, A. *Una metodologia per la caratterizzazione dei parametri meccanici di murature esistenti: micromodellazione e modelli di danno. Caso studio: Civita di Bagnoregio*.Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Padova, Padova. 2013.171 p.

[3] Roque, J. C. A. *Metodologia Integrada para Avaliação e Mitigação da Vulnerabilidade Sísmica das Construções Históricas em Alvenaria: A Igreja dos Jerónimos como Caso de Estudo*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil/Estruturas, Universidade do Minho, Guimarães, 2009. 231 p.

[4] Torii, A. J. *Análise dinâmica de estruturas com o método dos elementos finitos generalizado*. Tese de Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. 223 p.

[5] Nóbrega, P. G. B. da; Hanai, J. B. de. " A Análise Modal na Avaliação de Estruturas de Concreto Pré-moldado".1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado, São carlos, 2005, pp. 1-10.

[6] Espada, M. I. R. *Desenvolvimento de modelos para análise dinâmica de estruturas. Aplicação a barragens de betão e estruturas auxiliares*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010. 182 p.

[7] Mendes, P. T. de F. *Análise dinâmica de uma estrutura. Estudo numérico e experimental*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil/Estruturas, 2012, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012. 102 p.

[8] Justo, R. A. E. G. *Comparação do Desempenho e de Funcionamento de Programas Comerciais (ANSYS e SAP2000) Focado à Análise Sísmica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil/Estruturas e Geotecnia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010. 85 p.

[9] Nunes, R. F. G. *Modelação e análise de estruturas de edifícios existentes em alvenaria*. Dissertação de Mestrado em Reabilitação Urbana, Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, 2013. 143 p.

[10] Costa, C.M. R. *Análise numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009. 618 p.

[11] Lourenço, P. B. "Computations on historic masonry structures", *Progress in structural engineering and materials*, 2002,4, pp. 301–319.

[12] Lourenço, P. B. *Computational strategies for masonry structures*. Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, 1996. 2010 p.

[13] Roque, J. C. A. *Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2002. 338 p.

[14] Minhalma, A. P. S. S. do N. *Análise Modal de um Edifício de Paredes de Alvenaria Resistente*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil /Estruturas e Geotecnia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015. 89 p.

[15] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) D.M. del 14/01/2008. Roma.

[16] Pinto, J. J. de S. *Os novos palácios da velha princesa: Intervenções arquitetônicas contemporâneas no sitio histórico de Sobral*. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. 129 p.

[17] Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). Inventário Nacional de Bens Arquitetônicos – IBA Sobral, 2005.

[18] Delgado, J. L. *Avaliação sísmica de um edifício crítico em alvenaria*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2013. 122 p.

[19] Ferreira, A. M. O. L.*Modelação de paredes em alvenaria estrutural de tijolo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil/Estruturas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014. 82 p.

[20] Mesquita, E. *et al. Boletim Técnico: Caracterização, avaliação e recuperação estrutural de construções históricas.* ALCONPAT-BRASIL: Janeiro, 2016.