CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DE UMA CONSTRUÇÃO HISTÓRICA DE ALVENARIA DE TIJOLOS MACIÇOS

SEISMIC BEHAVIOR CHARACTERIZATION OF A HISTORIC CONSTRUCTION OF CLAY BRICK MASONRY

CARACTERIZACÍON DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA CONSTRUCCÍON HISTÓRICA DE MAMPOSTERÍA

F. BRANDÃO
Engenheiro Civil
GEM/UVA
Ceará; Brasil
eng.fsbrandao@gmail.com

L. MOTA
Acadêmica de Engenharia Civil
UVA
Ceará; Brasil
larissagmota@gmail.com

A. DIÓGENES
Professora, Me
GEM/UVA
Ceará; Brasil
aldeciragd@yahoo.com.br

M. BETTI
Professor, PhD
DICEA/UNIFI
Florença; Itália
mbetti@dicea.unifi.it

E. MESQUITA
Professor, PhD
CENTRE-FAS/NUTEC
Ceará; Brasil
mesquita.e@outlook.com

RESUMO

Os sismos são uma das grandes causas de perda de patrimônio material ao redor do mundo e no caso das construções históricas de alvenaria, isso é ainda mais grave, pois, para este tipo de construção, de modo específico, a ocorrência de sismos, mesmo que de pequena magnitude, pode ocasionar danos graves e até mesmo o seu colapso. No Brasil, o município de Sobral preserva um grande patrimônio arquitetônico em seu centro histórico, um dos maiores e mais importantes do país, e desde 2008 tem sido observada intensa atividade sísmica na região, onde em 21/05/2008 ocorreu o sismo de maior magnitude, 4,2 m_b. Assim sendo, visando contribuir à preservação e segurança do edificado histórico de Sobral frente às ações sísmicas, este trabalho apresenta a caracterização do comportamento sísmico de um importante exemplar do patrimônio histórico sobralense, a Igreja de Nossa Senhora das Dores. Para isso, primeiramente foi construído um modelo da estrutura em 3D, o qual teve suas propriedades mecânicas calibradas por meio do Ensaio de Vibração Ambiental e posteriormente, foi realizada a análise sísmica da construção utilizando o software Ansys®, tendo como excitação sísmica de base, os acelerogramas do sismo San Juan de los Llanos, ocorrido em 15/06/2014 no México, de magnitude 4,1. De acordo com os resultados obtidos, foi possível identificar as zonas frágeis da estrutura que podem ser as mais suscetíveis a sofrerem danos graves para o cenário sísmico considerado.
Palavras-chave: Sobral. Sismos. Construção histórica. Alvenaria. Danos.

ABSTRACT

The earthquakes are one of the major causes of damages to heritage buildings across the world. In relation to the masonry heritage constructions, the occurrence of earthquakes, in a specific way, even considering small magnitudes, can presenting serious damage or provoking the structural collapse. In Brazil, the Sobral downtown keep a large number of heritage buildings in its historic center that is one of the biggest and most important of Brazil. Since 2008, an intense seismic activity has been observed in Sobral region, where at 05/21/2008 an earthquake of 4.2 m_b magnitude was registered. Following, aiming to contribute for preservation and safety of Sobral's heritage constructions under seismic actions, this paper presents a seismic behavior characterization of the Nossa Senhora das Dores Church. In this purpose, a 3D model of structure was done and calibrated based on environmental vibration testing. For the seismic analysis, the Ansys® software was used, having as input excitation the accelerograms of the San Juan de los Llanos earthquake, of 4.1 magnitude, occurred in 06/15/2014 in Mexico. The results obtained, allowed to identify the most fragile zones of the Nossa Senhora das Dores Church for the seismic hazard scenario considered.
Keywords: Sobral. Earthquakes. Heritage construction. Masonry. Damage.

1. INTRODUÇÃO

Sismos são vibrações da crosta terrestre causadas principalmente pela movimentação das placas tectônicas e se propagam em todas as direções sob a forma de ondas sísmicas. Esses fenômenos podem ocorrer em qualquer parte do globo terrestre, sendo que sua magnitude, intensidade e recorrência estão intimamente relacionadas à localização geográfica e às condições geológicas da região. O Brasil é considerado um país de baixa sismicidade devido à sua posição geográfica na Placa Sul Americana, pois toda sua extensão territorial está localizada na região central da placa, estando, dessa forma, longe das bordas, onde se registram atividades sísmicas bem mais intensas.

Entretanto, mesmo o Brasil este país tendo uma baixa sismicidade, isso não significa dizer que o mesmo seja assímico, pois sismos relevantes já ocorreram no território brasileiro, como na cidade de Pacajús, no Estado do Ceará, em 1980, com magnitude 5,2 m_b (TEIXEIRA et al., 2000); em João Câmara, no Estado do Rio Grande do Norte, em 1986, de magnitude 5,1 m_b (VELOSO, 2012); os sucessivos sismos que atingiram a região da Serra da Meruoca, próximo a Sobral, no Ceará, em 2008, sendo o maior deles de magnitude 4,2 m_b (OLIVEIRA, 2015); e o maior sismo já registrado no Brasil, que de acordo com Assumpção et al. (2016), teve magnitude de 6,2 m_b, ocorreu em 1955, em Porto dos Gaúchos, no Estado do Mato Grosso.

Os sismos podem causar perdas materiais e humanas em todo o mundo. No caso das construções de alvenarias, é ainda mais grave, pois estas apresentam fraca resistência à solicitação das forças devidas aos sismos, o que acaba por causar danos parciais à estrutura ou mesmo seu colapso total. A alvenaria pode ser considerada como um material heterogêneo, anisotrópico e descontínuo, isto se dá pelo fato dela ser composta por diferentes componentes, sendo por isso, difícil de caracterizá-la mecanicamente. Para Roque (2009), a natureza do material e as características gerais da concepção, somadas aos efeitos acumulados de diferentes processos de degradação dos materiais, tornam as estruturas antigas de alvenaria vulneráveis a ações de caráter dinâmico, dentre as quais a ação sísmica pode ser considerada a mais preocupante.

De maneira geral, os danos que os sismos causam nas estruturas estão associados ao risco sísmico na construção e dependem de três fatores principais: a perigosidade sísmica, que é a intensidade da ação sísmica local; a vulnerabilidade sísmica, que representa a capacidade da estrutura de resistir às solicitações sísmicas; e a exposição sísmica, que é ligada ao valor arquitetônico da construção, ou seja, sua relevância patrimonial e também às consequências em termos de danos e perdas de vidas (BARBIERI, 2013).

Segundo Preciado (2015) grande parte das construções históricas do mundo está localizada em zonas sísmicas com diferentes níveis de risco sísmico, como: México, Itália, Portugal, Turquia, China; e existe um grande interesse por parte das nações e da comunidade científica na preservação desse patrimônio para a humanidade, fato esse evidenciado pelo grande volume de pesquisas sobre esta temática nos últimos anos.

Desta forma, a compreensão sobre o comportamento das estruturas quando submetidas a sismos contribui para a redução de perdas materiais e humanas (MOTA, DIÓGENES e MESQUITA, 2017), pois permite redirecionar os recursos no sentido de se encontrar soluções que melhorem o desempenho sísmico e a segurança do edificado. Nesse sentido, a cidade de Sobral, localizada no Estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil, preserva um grande patrimônio arquitetônico em seu centro histórico, um dos maiores e mais importantes do Brasil, com mais de 1.200 construções tombados pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e desde 2008 tem sido registrada intensa atividade sísmica local. Visando contribuir à preservação e segurança do patrimônio histórico sobralense frente às ações sísmicas, este trabalho apresenta a caracterização do comportamento sísmico de um importante exemplar desse patrimônio, a Igreja de Nossa Senhora das Dores, uma construção do início do século XIX construída em alvenaria de tijolos maciços.

2. A AÇÃO DOS SISMOS SOBRE AS CONSTRUÇÕES

2.1 Vulnerabilidade das construções antigas de alvenaria

De maneira geral, o comportamento sísmico das construções é algo que está relacionado a um conjunto de fatores, dentre os quais se destacam: o valor da ação sísmica atuante, a tipologia construtiva e a qualidade

da construção. Com isso, esse comportamento pode variar em função de todas estas características, e os danos observados podem se manifestar de várias formas (POMBA, 2007).

Tomaževič (1999) comenta que as tipologias de edifícios de alvenaria variam de um país para outro ou de uma região para outra dentro do mesmo país, porém os danos ocasionados pelos sismos podem ainda assim ser organizados e classificados de uma maneira mais uniforme, realizando-se uma análise dos padrões dos danos observados, os quais podem ser resumidos em: Fendas entre as paredes e pavimentos; Fendas nos cunhais e nas interseções das paredes; Colapso para fora do plano das paredes exteriores; Fendas nas vergas e/ou nos parapeitos; Fendas diagonais nas paredes estruturais; Colapso parcial ou total das paredes estruturais; e Colapso parcial ou total do edifício. Na Figura 1 pode-se observar os danos em duas construções de antigas de alvenaria causados pelo sismo de magnitude 6,0 M_L ocorrido em 24/08/2016 na região central da Itália, na qual nota-se que o sismo age sobre as partes fracas da estrutura provocando os danos e posteriormente o colapso.

Figura 1 - Danos em estruturas de alvenaria atingidas pelo sismo de magnitude 6,0 M_L ocorrido em 24/08/2016 na região central da Itália



Fonte: Corriere della Sera, 2016.

O estudo da vulnerabilidade sísmica de uma construção histórica, ou seja, da sua suscetibilidade ao dano quando atingida por um sismo, é importante, pois permite, em tempo hábil, o redirecionamento dos recursos necessários à atenuação das perdas materiais, e em alguns casos, humanas. Tendo em conta que o risco sísmico é inevitável, os esforços de minimização do impacto dos sismos, devem ser direcionados no sentido de encontrar soluções que melhorem o desempenho sísmico do edificado (ORTEGA et al., 2015).

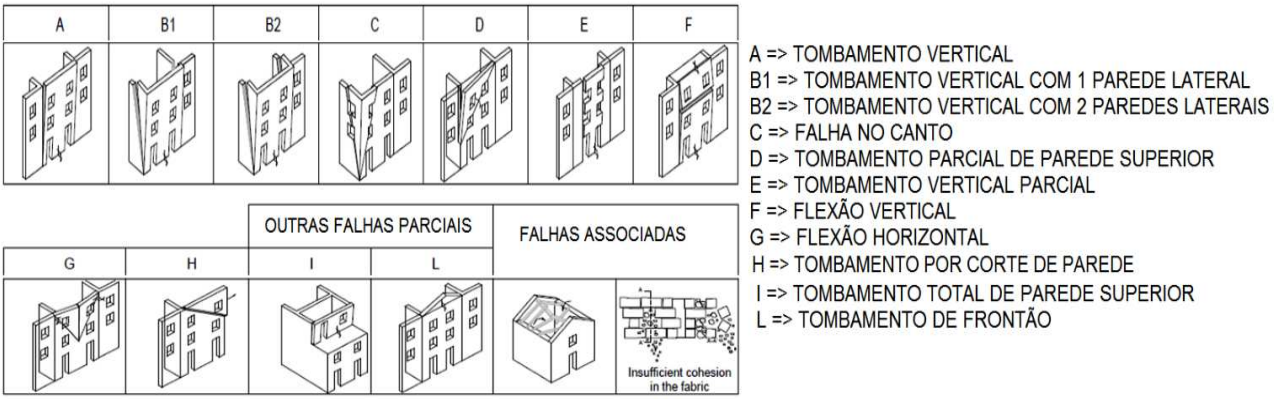
2.2 Mecanismos de colapso

A forma como uma estrutura sofre um dano devido a um sismo se dá por meio dos mecanismos de colapso. Esses mecanismos agem na estrutura para causar os danos e podem ser classificados em duas modalidades, quais sejam: mecanismos de 1º modo, que agem para fora do plano, e de 2º modo, que agem no plano (COLOMBINI, 2014).

Os mecanismos de 1º são comumente classificados em: tombamento simples, tombamento composto, flexão vertical e flexão horizontal. Estes mecanismos causam o colapso total ou parcial da estrutura para fora do plano das paredes e estão intimamente relacionados às ligações deficientes das paredes do plano às paredes ortogonais e com os pavimentos. Já os mecanismos de 2º modo são tipicamente de cisalhamento com deslocamento horizontal, cisalhamento com fissuração diagonal e flexo-compressão. Os mecanismos de 2º modo agem no plano das paredes e causando corte ao longo destas. Esses cortes, em muitos casos não implicam em colapsos da estrutura, mas sim em trincas e deformações expressivas.

D'Ayala e Speranza (2002) realizaram um estudo e identificaram alguns mecanismos de colapso de paredes gerados por sismos ocorridos na Itália, conforme mostrado na Figura 2, e que servem de base na avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios em alvenaria. A Figura 2 apresenta os mecanismos de A a G,que são mecanismos que agem para fora do plano das paredes, o mecanismo H, ocorre no plano, os mecanismos I e L, que estão relacionados a colapsos localizados, e os dois últimos, sem letra, referem-se ao colapso de cobertas e das paredes de alvenaria com coesão insuficiente.

Figura 2 - Principais mecanismos de colapso em edifícios de alvenaria



Fonte: Adaptada de D'Ayala e Speranza, 2002.

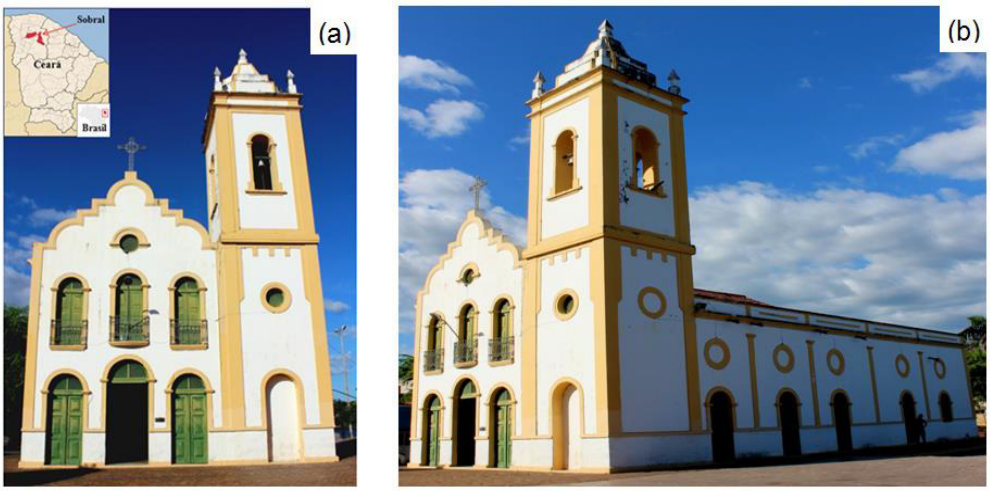
É evidente que as construções antigas em alvenaria apresentam grande vulnerabilidade frente às ações sísmicas, contudo, não significa dizer que este tipo de construção apresente menor desempenho ou vida útil que outros materiais, como a madeira e o concreto armado por exemplo, pois são as ações no âmbito da conservação estrutural que garantirão que uma determinada estrutura seja considerada ou não, segura.

3. ESTUDO DE CASO

3.1 A Igreja de Nossa Senhora das Dores

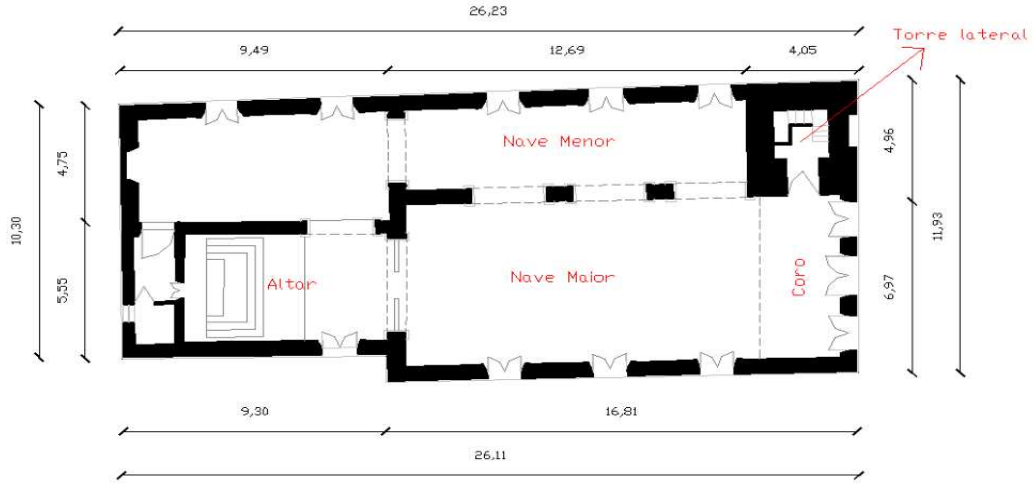
A Igreja de Nossa Senhora das Dores (Figura 3), é uma importante edificação histórica que faz parte do Centro Histórico da cidade de Sobral. Está situada próximo às margens do Rio Acaraú, tem sua estrutura em alvenaria de tijolos maciços e é tombada pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). Conforme Pinto (2009), a Igreja das Dores, como é conhecida na cidade, data de 1810 e foi construída no local onde antes existia um pequeno nicho localizado junto à antiga Rua do Rio Acaraú. Segundo IPHAN (2005), a igreja possui uma torre única e lateral que não segue a regra neoclássica de seus elementos das fachadas, pois foi concluída após 1924.

Figura 3 - Vista (a) da fachada principal e (b) lateral da Igreja de Nossa Senhora das Dores



Sua planta, ilustrada na Figura 4, caracteriza-se por uma nave central de maior proporção (6,46mx16,02m) e uma nave lateral de menor proporção (3,23mx12,00m). No mesmo alinhamento da nave central localiza-se o altar, que se separa desta pelo Arco Triunfal. Após o atar, encontram-se uma pequena sacristia e dependências utilitárias. O acesso ao assoalho (coro) dá-se por uma escadaria na única torre lateral, com 20,50 m de altura. O grau de ornamentação da Igreja é pequeno, tanto internamente quanto externamente.

Figura 4 - Planta baixa da Igreja de Nossa Senhora das Dores



Fonte: Adaptada de IPHAN, 2005.

Quanto ao interior da edificação, apresentado na Figura 5, pode-se observar na Figura 5 (a) com maiores detalhes os arcos laterais que separaram as duas naves, enquanto que na Figura 5 (b) é visto o assoalho de madeira. O grau de ornamentação da Igreja é pequeno tanto internamente quanto externamente.

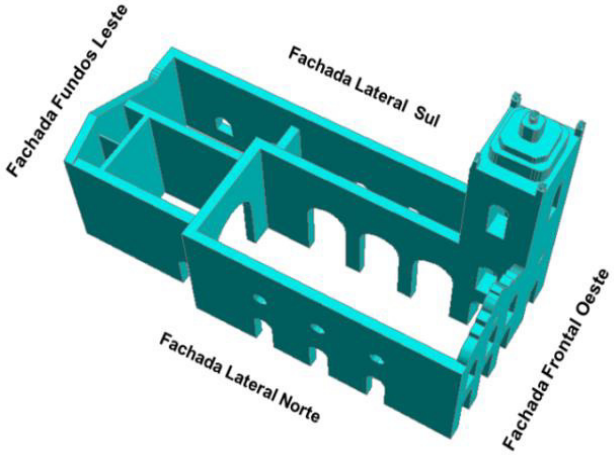
Figura 5 - Vista Interna da Igreja das Dores: (a) vista dos arcos e (b) vista do assoalho



3.2 Modelagem numérica da estrutura

O modelo 3D da Igreja de Nossa Senhora das Dores foi construído como sendo um macromodelo, de modo que foram consideradas todas as suas características geométricas observadas nas plantas, fornecidas pelo IPHAN-CE em formato CAD, e também em campo, através da inspeção visual que foi realizada. A Figura 6 apresenta o modelo 3D com a indicação das suas respectivas fachadas.

Figura 6 - Vista do modelo 3D da Igreja das Dores



Buscou-se construir um modelo o mais próximo possível da estrutura real, porém, algumas simplificações foram feitas. Os detalhes ornamentais das fachadas e das portas não foram modelados, bem como a cobertura e a escada da terre lateral, só que neste caso, suas cargas foram estimadas e aplicadas nas paredes que as sustentam. Para a escada utilizou-se um dos valores do carregamento para escadas da NBR 6120 de ABNT (1980). Já para o assoalho (coro), foi calculada uma carga de 1,25 kN/m^2 para cada parede que lhe serve de apoio. O forro foi considerado o mesmo do trabalho de Branco (2007). Quanto ao peso da cobertura, adotou-se o peso do trabalho de Neves (2008). Ao peso do foro mais o peso da cobertura decidiu-se acrescentar uma sobrecarga de 50% do valor total por questão de segurança, visto que a ABNT (1980) não especifica a sobrecarga para coberturas. As cargas aplicadas ao modelo são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Cargas aplicadas ao modelo numério da Igreja

Q_{escada} (kN/m^2)	$Q_{assoalho}$ (kN/m^2)	$Q_{forro + cobertura}$ (kN/m^2)
2,50	1,25	2,85

As propriedades mecânicas adotadas para as alvenarias da Igreja de Nossa Senhora das Dores foram obtidas na literatura existente na área, onde, para o Módulo de Elasticidade (E), Peso específico (W), Resistência à compressão (f_c) foram utilizados os valores médios dos dados regulamento italiano NTC de 2008 (MIT, 2008), sendo selecionada o tipo de alvenaria "Muratura in mattoni pieni e malta di calce" que representa respectivamente "Alvenaria de tijolo maciço com argamassa de cal", tipologia construtiva da presente estrutura. A resistência à tração (f_t), foi considerada como sendo 5% do valor da resistência à compressão adotada. Por fim, o coeficiente de Poisson (v) foi o mesmo considerado nos trabalhos de Branco (2007), Delgado (2013) e Frazão (2013). Contudo, visando uma melhor precisão nos resultados, o modelo numérico foi calibrado através da realização de um Ensaio de Vibração Ambiental (EVA), do qual foram obtidas as três primeiras frequências naturais da edificação (Tabela 2) para os três primeiros modos de vibração, que serviram de base para calibrar o modelo.

Tabela 2 – Frequências experimentais da Igreja das Dores

Modo	Freq. Experimental (Hz)
1	2,391
2	2,880
3	3,125

Na calibração do modelo numérico, o módulo de elasticidade foi ajustado de modo que a primeira frequência natural do primeiro modo de vibração do modelo se aproximasse o mais próximo possível do valor obtido no ensaio experimental, e, por consequência, as demais se ajustariam mediante o ajuste da primeira. Concluída a calibração, as propriedades mecânicas calibradas que foram inseridas no modelo numérico, são indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da alvenaria calibradas

E (GPa)	W (kN/m^3)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	ν
1,70	18,00	3,20	0,16	0,20

Fonte: Adaptada de MIT (2008) e Delgado (2013)

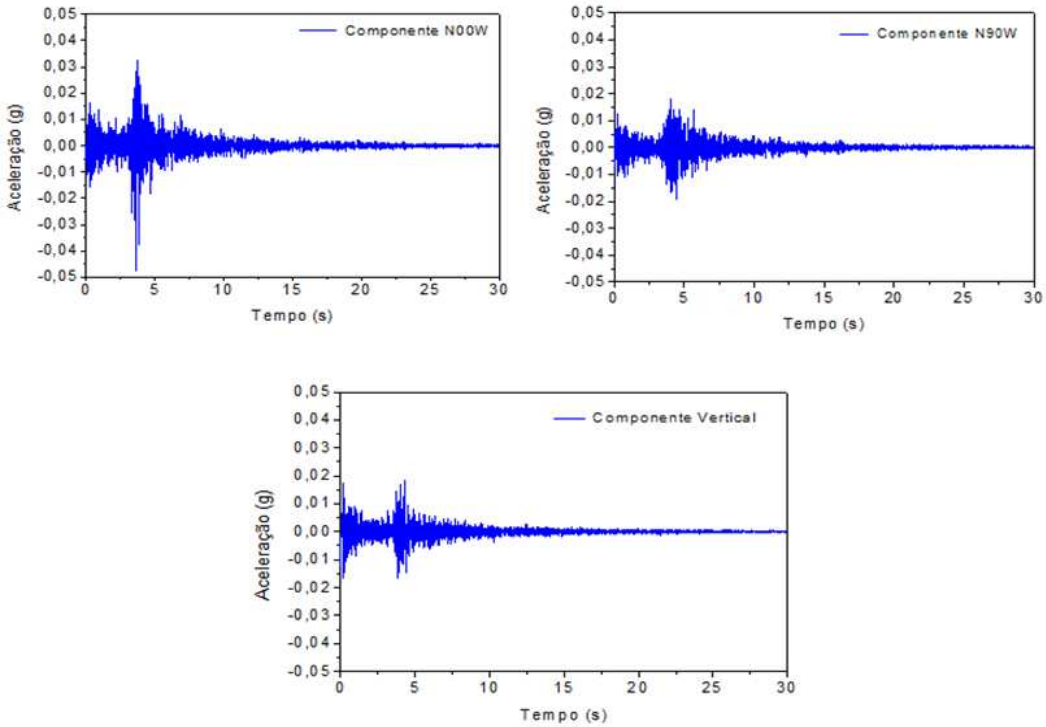
A discretização do modelo em elementos finitos foi relizada no software Ansys® (versão 17.1), onde foram inseridas as cargas da Tabela 1 e as propriedades mecânicas da Tabela 3. Para sua discretização, se utilizou uma malha de 500 mm de lado, o que gerou 53.889 elementos e 93.380 nós. O elemento escolhido foi o SOLID187.

3.3 Análise sísmica

Na análise sísmica da igreja foram consideradas as três componentes do sismo San Juan de los Llanos ocorrido em 15/06/2014 às 06h48min (hora local), a 36 km de Ometepec, Guerrero, México, de magnitude 4,1 com aceleração máxima do solo igual a 0,048 g na componente N00W, espaçadas em intervalos de tempo de 0,005 s, obtidas na Base de Datos de Registros Acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana (ver PEREZ-YANEZ (2014)). Este sismo foi escolhido devido a sua magnitude ser condizente com a realidade

sísmica de Sobral, pois o maior sismo lá registrado teve magnitude 4,2 m_b. Os acelerogramas do sismo San Juan de los Llanos são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Acelerogramas das componentes do sismo San Juan de los Llanos



As componentes do sismo foram aplicadas diretamente à base do modelo numérico de forma ortogonal por meio da análise transiente por superposição modal utilizando o software Ansys®. A componente N00W foi aplicada na direção X, a componente S90W na direção Y e a componente Vertical na direção Z no modelo 3D da Igreja. O intervalo de integração dos acalerogramas foi de 0,02 s totalizando 1.500 pontos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor compreensão, os resultados foram divididos em duas subseções, onde na subseção 3.1 são apresentados e discutidos os deslocamentos direcionais nos três eixos do modelo (X, Y e Z) após a ação do sismo sobre a estrutura; e na subseção 3.2, tem-se as tensões principais de tração e compressão na estrutura depois de cessada a ação sísmica e também, os picos destas durante os 30 s de solicitação.

4.1 Deslocamentos direcionais

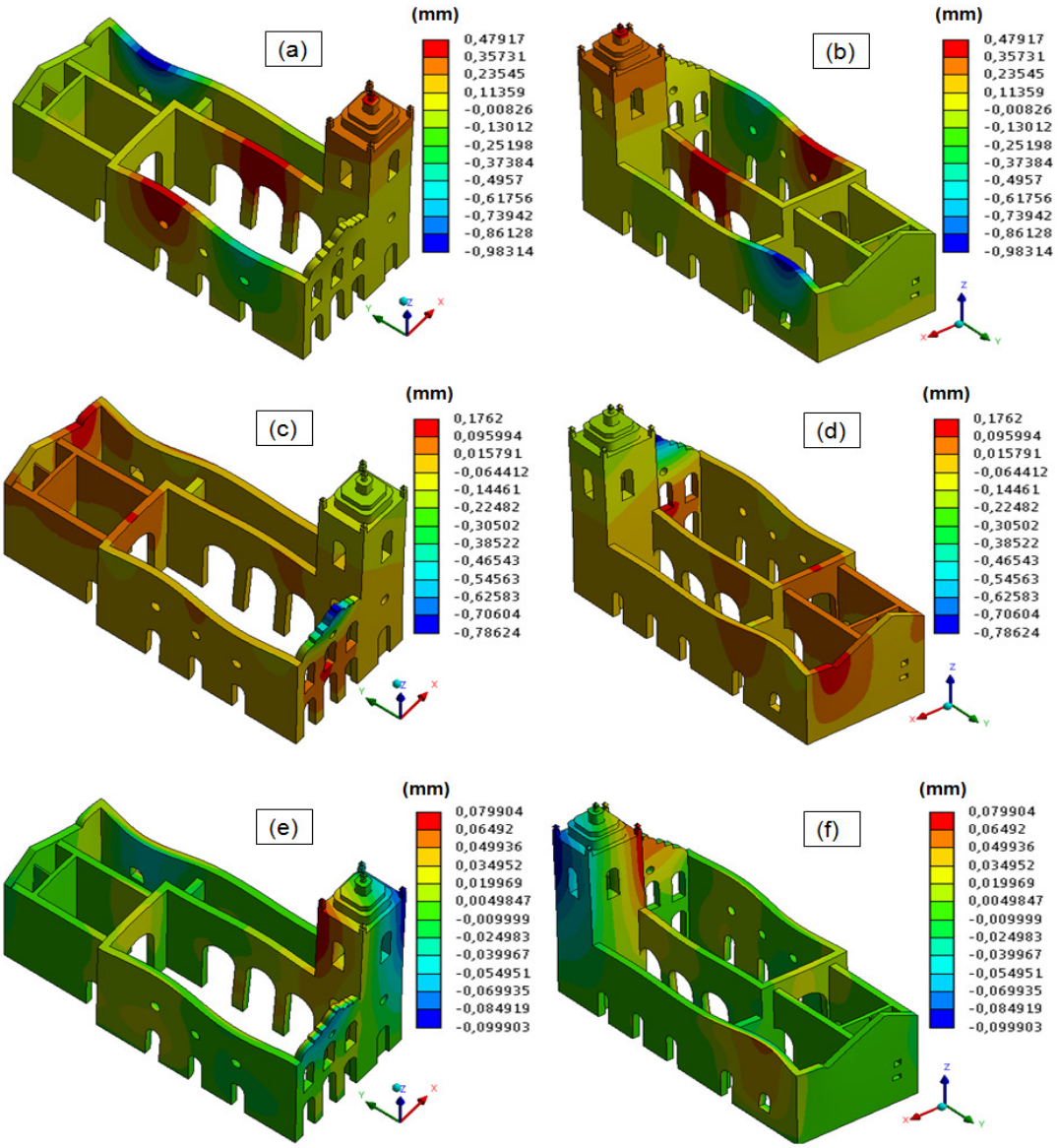
Os deslocamentos direcionais indicam a translação de partes da estrutura em cada uma das direções do sistema de eixos considerados, nesta análise X e Y estão na direção horizontal e Z na direção vertical. Cessada a ação do sismo aplicado ao modelo numérico da Igreja de Nossa Senhora das Dores, obtiveram-se as configurações deformadas dos deslocamentos direcionais indicados na Figura 8.

Na direção X (Figura 8 (a) e (b)) observa-se que o maior deslocamento na direção X positiva correspondente a 0,479 mm, ocorre em três regiões, quais sejam: parte da parede da fachada lateral Norte; parte da região dos arcos centrais que separam as duas naves e no topo da torre lateral. Já o maior deslocamento na direção X negativa e que é o maior, em módulo, neste eixo, ocorre em uma região da parede da fachada lateral Sul bem próxima à fachada dos fundos Leste e tem valor de 0,983 mm.

Em relação aos deslocamentos direcionais em Y (Figura 8 (c) e (d)), verifica-se que o maior valor na direção Y positiva é 0,176 mm e é evidenciado na parte superior da parede da fachada dos fundos Leste, no topo do arco de frente apara o altar e na parte central da fachada frontal Oeste. Para a direção Y negativa, pode ser constatado um deslocamento máximo de 0,786 mm, em módulo, no topo da fachada frontal Oeste. Por fim,

para deslocamentos na direção Z (Figura 8 (e) e (f)) constata-se que o deslocamento mais expressivo na direção Z positiva equivale a 0,079 mm e ocorre na diagonal traseira da torre lateral. Quanto ao maior deslocamento na direção Z negativa verifica-se que este se localiza na diagonal frontal da torre lateral e no topo da fachada frontal Oeste, e seu valor, em módulo, é igual a 0,099 mm.

Figura 8 - Deslocamentos direcionais após o sismo: (a) e (b) direção X; (c) e (d) direção Y; (e) e (f) direção Z



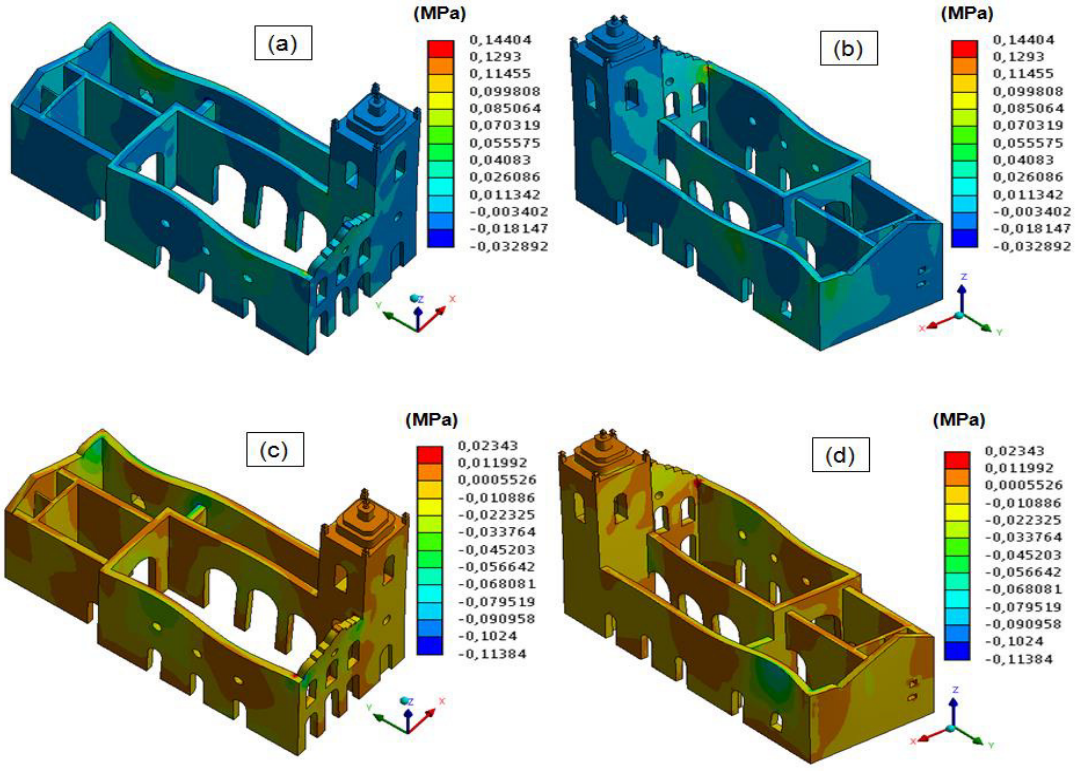
Em relação aos mecanismos de colapso observados após o sismo, foram identificados o mecanismo de flexão vertical para fora do plano XZ e o mecanismo de flexão horizontal para fora do plano YZ, localizados na parede da fachada frontal Oeste e na região da parede da fachada lateral Sul próxima à fachada fundos Leste, respectivamente. Em síntese, foi constatado que os deslocamentos no eixo Z do modelo numérico foram os menores em comparação com os outros dois eixos (X e Y) e isso está relacionado com a dificuldade que o sismo tem de "levantar" a estrutura, pois, as ações sísmicas, apesar de terem componentes verticais, são mais expressivas nas direções horizontais, como se pode verificar na análise realizada, na qual o eixo que apresentou maiores deslocamentos direcionais foi o eixo X horizontal.

4.2 Tensões principais

As tensões principais de tração e compressão, que indicam a máxima tensão a qual a estrutura está submetida após o sismo é mostrada na Figura 9. A maior tensão de tração na estrutura localiza-se na ligação da parede da fachada frontal Oeste à parede da fachada lateral Norte (Figura 9 (a)), e corresponde a 0,144 MPa. Essa tensão ocorreu devido ao deslocamento da fachada frontal Oeste para fora do plano XZ causado pelo mecanismo de flexão vertical, o que acabou por tracionar a ligação. Em algumas regiões internas da parede da fachada lateral Sul (Figura 9 (a)) são encontradas tensões de tração de aproximadamente 0,085 MPa, assim como na parede da fachada lateral Norte e do fundo Leste (Figura 9 (b)), que tem zonas com tração de 0,070 MPa. Todas as tensões encontradas são inferiores a tensão de resistência à tração da alvenaria da Igreja, 0,16 MPa.

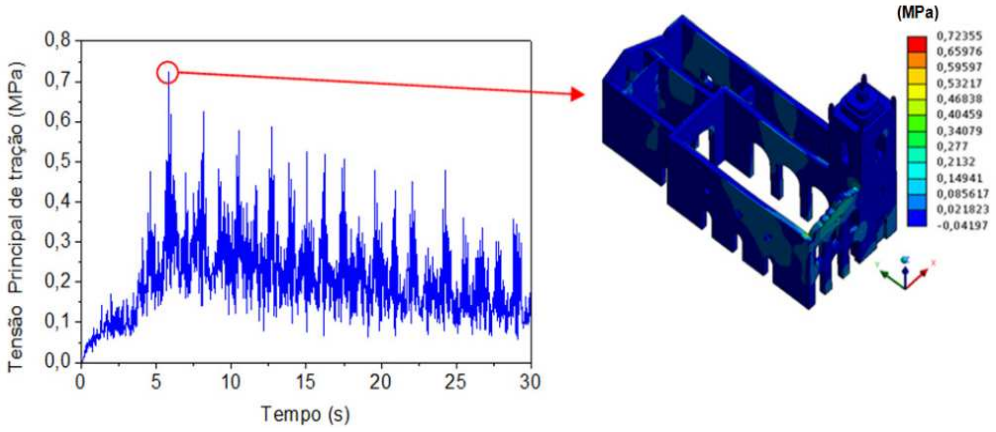
Para as tensões principais de compressão, constatou-se que a maior solicitação correspondeu a 0,113 MPa e ocorreu na ligação da parede da fachada lateral Sul à parede do arco menor localizado na fundo da nave menor (Figura 9 (c)). Verifica-se também compressão em outras regiões da estrutura, dentre as quais está uma zona da parede da fachada frontal Oeste localizada próxima da ligação desta parede com a parede da fachada lateral Norte (Figura 9 (c)) cuja tensão é de aproximadamente 0,102 MPa; uma zona da parede da fachada lateral Sul (Figura 9 (c)) comprimida em 0,056 MPa; e algumas as partes da parede da fachada lateral Norte (Figura 9 (d)) que têm tensões de aproximadamente 0,033 MPa. As tensões explicitadas são bem inferiores a máxima tensão de compressão suportada pela alvenaria do modelo que é 3,2 MPa

Figura 9 - Tensões principais após o sismo: (a) e (b) tensões principais de tração; (c) e (d) tensões principais de compressão



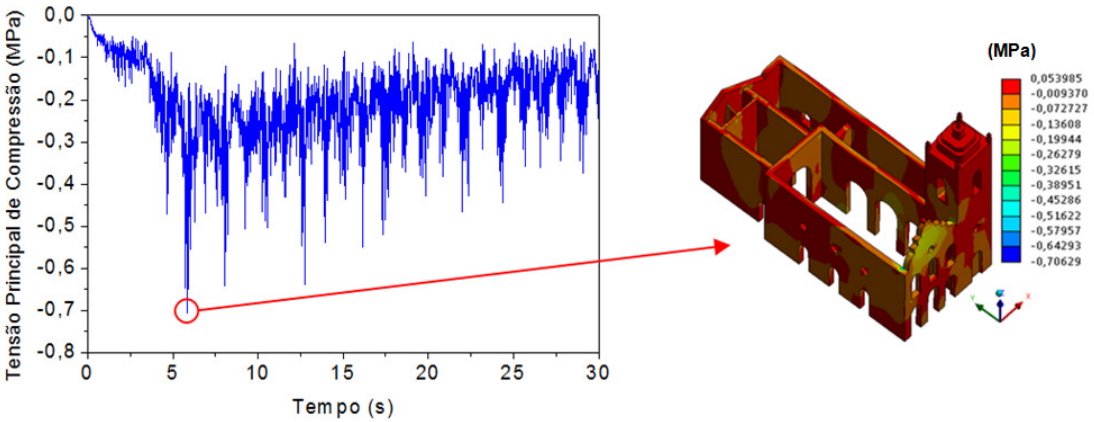
Durante a ação do sismo San Juan de Los Llanos sobre a Igreja de Nossa Senhora das Dores foi constatado alguns importantes picos das tensões principais de tração e compressão. Para a tensão principal de tração o pico verificado foi de 0,723 MPa no instante t=5,78 s e ocorreu na ligação da parede da fachada lateral Norte à da fachada frontal Oeste, pois esta última tende a deslocar-se para fora do plano XZ, o que causa uma tração excessiva nesta ligação. Constata-se que este pico é bastante superior a tensão de resistência a tração da alvenaria, indicando desta forma que a região submetida a tal solicitação sofreu ruptura por tração excessiva. A Figura 10 mostra o andamento da tensão principal de tração durante os 30 s do sismo e traz também a indicação do pico juntamente com a distribuição de tensões na igreja.

Figura 10 - Tensão principal de tração na igreja com indicação de sua distribuição no pico verificado



O pico da tensão principal de compressão ocorreu no instante t= 5,92 s e correspondeu a 0,706 MPa. Esta tensão é ainda muito inferior à máxima tensão de compressão admissível para a alvenaria da estrutura, que foi de 3,20 MPa. Desta forma, não há ruptura de nenhuma região da estrutura, visto que a tensão de resistência do material não foi ultrapassada. A Figura 11 traz o andamento desta tensão durante a os 30 s solicitação sísmica, bem como a sua distribuição no modelo numérico, onde se pode verificar o pico desta tensão, ocorreu também na ligação da parede da fachada lateral Norte à da fachada frontal Oeste, devido a esta última deslocar-se agora, para dentro do plano XZ no sentido interno da igreja e com isso, tende a comprimir excessivamente a ligação mencionada.

Figura 11 - Tensão principal de compressão na igreja com indicação de sua distribuição no pico verificado



Analisando-se todos os picos dos resultados obtidos verifica-se que para a tensão principal de tração e para a tensão principal de compressão, que foram de 0,723 MPa em t= 5,78 s e de 0,706 MPa em t= 5,92 s, respectivamente, este picos ocorrem próximo aos instantes em que os acelerogramas tem seu pico de aceleração máxima do solo, onde para a componente N00W foi de 0,048 g em t=3,645 s, para a componente N90W foi de 0,019 g em t=4,45 s e para a componente Vertical foi de 0,018 g em t=4,31 s, indicando desta forma, que estes picos de aceleração tiveram forte influência no pico dos resultados obtidos, uma vez que, quanto maior o valor da aceleração do acelerograma, maiores deslocamentos e tensões estes podem ocasionar na estrutura.

5. CONCLUSÕES

A Igreja de Nossa Senhora das Dores é uma construção histórica de grande relevância para o patrimônio histórico sobralense e também do Brasil. Neste trabalho foi definido um modelo numérico que representasse da melhor forma possível o comportamento da estrutura frente a solicitações sísmicas. Através da realização do ensaio de vibração ambiental foi possível identificar as três primeiras frequências naturais da construção, que serviram de base para a calibração do modelo numérico.

Na análise sísmica da igreja com o sismo San Juan de Los Llanos, esse que tem magnitude compatível com a realidade sísmica de Sobral, foram obtidos os deslocamentos direcionais e as tensões principais de tração e compressão, bem como os seus picos durante os 30 s de solicitação. De maneira geral, o comportamento sísmico da Igreja de Nossa Senhora das Dores foi caracterizado por deslocamentos não tão expressivos, porém, em relação às tensões principais de tração foi verificado um pico no instante t=5,78 s correspondente a 0,723 MPa, na ligação da parede da fachada frontal Oeste à parede da fachada lateral Norte, o que indicou a ruptura desta região por tração excessiva, pois esta tensão foi superior a tensão de tração admissível para a alvenaria da Igreja 0,16 MPa. Quanto as tensões principais de compressão, também foi constatado um pico de 0,706 MPa no instante t=5,92 s e também ocorreu na ligação da parede da fachada lateral Norte à da fachada frontal Oeste, entretanto, a zona aqui comprimida não sofreu ruptura por compressão excessiva, visto que esse valor foi muito inferior a tensão de compressão máxima suportada pela alvenaria da igreja, a qual correspondeu a 3,20 MPa.

Pelos resultados obtidos, foi possível identificar as zonas frágeis da construção que podem ser as mais suscetíveis a sofrerem danos graves para o cenário sísmico considerado. Assim, conclui-se que estudos desta natureza, aplicados às construções históricas, além de contribuírem para o conhecimento sobre o comportamento global e vulnerabilidade destas estruturas frente às ações sísmicas, são ferramentas importantes que podem auxiliar na tomada de decisões sobre intervenções com foco na melhora do seu desempenho sísmico, bem como, na preservação e manutenção da segurança estrutural do edificado histórico.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e à Paróquia de Nossa Senhora da Conceição, em Sobral, pelo suporte e informações para o desenvolvimento deste trabalho. Francisco Brandão agradece a Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA) pela bolsa de iniciação científica concedida no âmbito do programa PIC/PBPU/UVA.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

BARBIERI, G.; BIOLZI, L.; BOCCIARELLI, M.; FREGONESE, L.; FIRGERI, A. Assessing the seismic vulnerability of a historical building. **Engineering Structures**, v. 57, p. 523–535, nov. 2013.

BRANCO, M. E. M. **Reforço Sísmico de Edifícios de Alvenaria**- Aplicação a edifícios "Gaioleiros". 2007. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

COLOMBINI, S. **Vulnerabilità sismica di edifici esistenti in cemento armato e in muratura**. Roma: EPC Editore, 2014.

CORRIERE DELLA SERA.**Terremoto del 24 agosto in Centro Italia, le immagini della devastazione**. (2016). Disponível em: <http://www.corriere.it/foto-gallery/cronache/16_agosto_24/terremoto-notte-centro-italiacrolli-si-temono-molte-vittime-dca15e52-69ac-11e6-a553-980eec993d0e.shtml>. Acesso em: 13/11/2017.

D'AYALA, D.; SPERANZA, E. An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings. In: 12th European Conference on Earthquake Engineering (12ECEE), 2002, London. **Proceedings...**London: Elsevier Science Ltd., 2002. p. 1-10.

DELGADO, J. L. **Avaliação sísmica de um edifício crítico em alvenaria**. 2013. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2013.

FRAZÃO, M. T. de B. R. F. **Modelação de um edifício "Gaioleiro" para Avaliação e Reforço Sísmico**. 2013. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2013.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Inventário Nacional de Bens Arquitetônicos – IBA Sobral**, 2005.

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI. **Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) D.M. del 14/01/2008**. Roma, 2008.

MOTA, L.; DIÓGENES, A.; MESQUITA, E. Método simplificado de avaliação da vulnerabilidade estrutural de construções históricas. In: XIII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas-CINPAR, 13, 2017, Crato. **Anais**...Crato, 2017. p. 101-117.

NEVES, S. M. L. C. **Análise Sísmica de um Edifício da Baixa Pombalina**. 2008. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.

OLIVEIRA, P. H. S. de. **Sismicidade e esforços tectônicos na Zona Sísmica Acaraú, Nordeste do Brasil**. 2015. 121 p. Tese (Doutorado Geodinâmica e Geofísica)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ORTEGA, J.; VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B.; RODRIGUES, H.; VARUM, H. Seismic vulnerability of vernacular buildings in urban centres-the case of Vila Real de Santo António. In: CORREIA, MR. R.; LOURENCO, P. B.; VARUM, H. (Org). **Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture**. London: Taylor and Fracis Group, 2015. p. 219-226.

PEREZ-YANEZ CITLALI; RAMIREZ-GUZMAN LEONARDO; RUIZ G ANA LAURA; DELGADO D ROSARIO; MACIAS C MARCO A; SANDOVAL G HECTOR; ALCANTARA N LEONARDO; QUIROZ R ARTURO. (2014). Strong Ground Motion Database System for the Mexican Seismic Network, AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, diciembre 14-19.

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

POMBA, F. J. C. **Comportamento Sísmico de um edifício de pequeno porte**. 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) IST- Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

PRECIADO, A. Seismic vulnerability and failure modes simulation of ancient masonry towers by validated virtual finite element models. **Engineering Failure Analysis**, v. 57, p. 72–87, nov. 2015.

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. 2009. 231 p. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil/Estruturas)- Universidade do Minho, Guimarães, 2009.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. de; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

TOMAŽEVIČ, M. **Earthquake**- resistant design of masonry buildings. London: World Scientific, 1999.

VELOSO, J. A. V. **O Terremoto que mexeu com o Brasil**. Brasília: Thesaurus, 2012.