A ANÁLISE ESTRUTURAL COMO FERRAMENTA DE SUPORTE NA AVALIAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS

STRUCTURAL ANALYSIS AS TOOL OF SUPPORT OF HERITAGE CONSTRUCTIONS ASSESSMENT

EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMO HERRAMIENTA DE SUPORTE PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS

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

J. FERNANDES
Acadêmico de Engenharia Civil
CENTRE-Faculdade Ari de Sá (FAS)
Ceará; Brasil
jpffaculdade@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

As edificações históricas são estruturas de grande relevância para a sociedade, pois fazem parte da história e cultura de um povo. Estudos sobre a conservação e a segurança estrutural do patrimônio edificado, tendo como recurso a análise estrutural como forma de determinar os esforços estruturais, suas relações com o desenvolvimento de danos, deformações e estabilidade, são de grande valia na avaliação destas construções. Neste sentido, este trabalho apresenta a análise estrutural da Igreja de Nossa Senhora das Dores, uma importante construção histórica do Século XIX constituída por alvenarias de tijolos maciços, pertencente ao Centro Histórico de Sobral, cidade localizada na região norte do Estado do Ceará. Para isso, foi feita a modelagem 3D da estrutura em software CAD, utilizando registros geométricos fornecidos pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), e posteriormente, o modelo foi exportado para o software ANSYS®, onde foi discretizado em elementos finitos e a análise estrutural linear, foi realizada. A partir dos resultados obtidos, identificaram-se as regiões da estrutura com maiores deslocamentos direcionais nos três eixos considerados (X, Y e Z), com maiores deformações e maiores concentrações de tensões de tração e compressão.

Palavras-chave: Análise estrutural. Construção histórica. Preservação. Segurança estrutural. Sobral.

ABSTRACT

Heritage constructions are structures of high relevance to society due to the fact that they are part of the history and culture of community. Studies concerned with conservation and structural safety of historical buildings using structural analysis as way of to determine the structural tension distribution, and its relationships with damage occurrence, and stability, are very important in to assessment of this type of constructions. Thus, this paper presents a structural analysis of the Nossa Senhora das Dores Church, an important heritage construction from XIX century built with vernacular masonry, basically clay brick masonry. The church is located at Historical Center of Sobral, in the North region of Ceará State. In this purpose, a 3D modeling was performed through CAD software, using geometric data provided by Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). The model was exported to ANSYS® software, where it was discretized in finite elements and a linear static structural analysis was carried. The results found allowed to identify the main regions of the church with highest directional displacement (in X, Y and Z), deformations and tensile and compression stress.

Keywords: Structural analysis. Heritage construction. Preservation. Structural safety. Sobral.

1. INTRODUÇÃO

As construções históricas constituem parte do patrimônio histórico material de uma sociedade sendo desta forma, estruturas de grande relevância, pois representam em algum aspecto, parte da história e identidade cultural de um povo. De acordo com Roca et al. (2010), os estudos sobre a conservação e a segurança estrutural do patrimônio edificado, tendo como recurso a análise estrutural, são de grande valia na avaliação destas estruturas pois, permitem conhecer o estado geral das solicitações impostas à estrutura, seja pelas cargas permanentes, como peso próprio, seja também através das cargas acidentais ou excepcionais como os sismos.

Diferentemente das construções contemporâneas, para as quais as propriedades estruturais de seus componentes e materiais já são exaustivamente estudadas, além do fato de que boa parte dos esforços científicos atualmente estarem focados para desenvolvimento de novos materiais e sistemas estruturais para aplicações futuras nas construções, as construções históricas constituem ainda um campo pouco explorado. Com isso, estudar este tipo de construção é interessante não só como contribuição à valorização e preservação da memória de uma determinada sociedade, mas também permite o desenvolvimento de técnicas de reabilitação para estas estruturas que, quando eficazmente aplicadas, permitem a recolocação destas, como parte ativa em suas comunidades, além de contribuir para a redução da necessidade de novas construções (MESQUITA et al., 2015).

Ao se estudar as construções históricas deve-se ter em conta que será uma tarefa interdisciplinar a qual une a engenharia com a história. Considerando a parte de engenharia, podem-se encontrar diversos métodos e ferramentas computacionais que servem de auxílio na avaliação do comportamento mecânico das destas estruturas, sendo um dos métodos mais empregados o Método dos Elementos Finitos (MEF). Consequentemente, a escolha do método de análise depende basicamente das informações solicitadas e compatibilidade, custo e tempo-eficácia da ferramenta de análise em relação à estrutura analisada (ROCA et al., 2010).

Destaque especial deve ser dado às construções históricas de alvenaria, um dos materiais de construção mais antigos e difundidos no mundo. Sendo a alvenaria um sistema constituído por blocos, juntas e interfaces entre esses elementos, pode-se dizer que é um material heterogêneo, anisotrópico e descontínuo, fato este, que faz com que seja difícil caracterizá-las mecanicamente, pois apresenta propriedades mecânicas distintas (BRANDÃO et al., 2016). Além disso, conforme Nunes (2013), devido a grande variedade de materiais e técnicas utilizadas no período da construção dos edifícios, em se tratando de edificações antigas, sob o ponto de vista da modelagem estrutural, a alvenaria constitui um sistema construtivo de elevada complexidade. Desta forma, 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.

Diante deste cenário, a análise estrutural, utilizando métodos computacionais como o MEF, surge como uma ferramenta indispensável, pois permite conhecer o estado de tensão da estrutura quando submetida aos mais diversos tipos de carregamentos e, além disso, permite identificar o fluxo de tensões, deslocamentos, deformações e as possíveis zonas críticas da construção.

No estudo realizado por Saloustros (2013), por exemplo, a análise estrutural via MEF foi utilizada para avaliar a integridade estrutural e compreender os efeitos dos danos na nave principal e corredores laterais da Iglesia del Monasterio de Poblet na Espanha, uma construção em grande parte de alvenaria do século XII. Arias (2013), também utilizou a análise estrutural para avaliar a capacidade de carga das abóbodas de um edifício do Hospital Sant Pau, um grande complexo patrimonial declarado patrimônio da humanidade pela UNESCO localizado em Barcelona, Espanha.

Em Pulido et al. (2016), encontra-se um estudo sobre a análise estrutural da sobre catedral de Valencia, na Espanha, no qual um modelo em elementos finitos foi manipulado mediante a eliminação seletiva de alguns elementos estruturais que gerou cinco variações do mesmo modelo e onde as análises mostraram a função de cada elemento eliminado. Os resultados mostraram o comportamento estrutural e os sistemas construtivos utilizados na construção de igrejas góticas no mediterrâneo.

E tem-se ainda o trabalho de Roca et al. (2010), onde os autores fazem uma grande explanação sobre a análise estrutural de construções históricas de alvenaria destacando a importância deste tipo de análise e mostrando os métodos clássicos e os mais avançados.

Como visto, a analise estrutural das construções históricas mostra-se bastante relevante e pode ser utilizada como uma ferramenta de suporte no processo de avaliação destas estruturas. Nesse sentido, este trabalho trata da análise estrutural de uma importante construção histórica brasileira localizada na cidade de Sobral, Estado do Ceará, nomeadamente Igreja de Nossa Senhora das Dores, uma edificação que foi construída no início do Século XIX em alvenaria de tijolos maciços, e ainda, de modo complementar, visa contribuir à preservação e segurança do patrimônio histórico de Sobral.

2. ESTUDO DE CASO

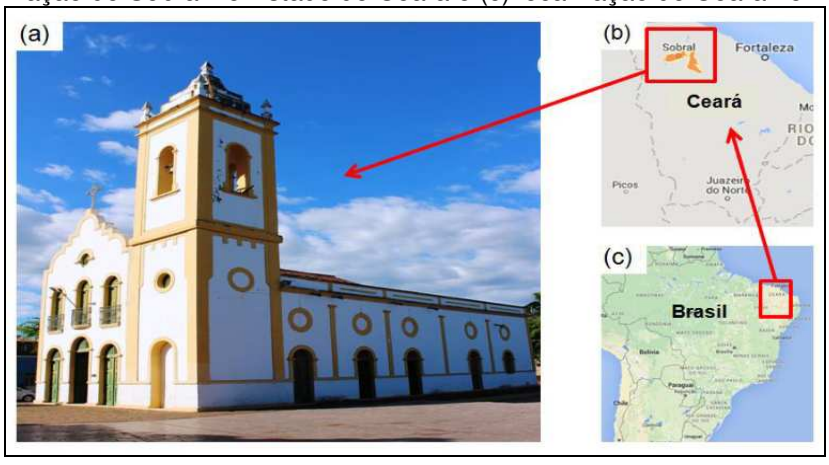
2.1 Características históricas e construtivas da Igreja de Nossa Senhora das Dores

No ano de 1999, o centro antigo de Sobral, cidade localizada na região norte do Estado do Ceará, foi tornado “Patrimônio Nacional” pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). O centro histórico de Sobral conta com mais de 1.200 construções tombadas, dentre as quais estão igrejas, casarões, museus, monumentos, espaços públicos, entre outros. De acordo com IPHAN (2005), no Estado do Ceará, além de Sobral, apenas as cidades de Icó, Aracati e Viçosa do Ceará tiveram conjuntos urbanos tombados.

Uma das construções históricas tombadas no Centro Histórico de Sobral de grande relevância patrimonial é a Igreja de Nossa Senhora das Dores (Figura 1 (a)) que segundo Pinto (2009), data da década de 1810 e foi construída no local junto à antiga Rua do Rio próximo às margens do Rio Acaraú. Sua implantação é peculiar, pois é um dos únicos edifícios antigos da área cuja implantação, mesmo que parcialmente, aceitou voltar-se para o Rio Acaraú. A Igreja foi incorporada à urbanização da Margem Esquerda do Rio Acaraú com tratamento especial de piso no Largo das Dores, implantação de bancos, iluminação e pequeno anfiteatro localizado logo ao lado da edificação.

A estrutura da igreja é composta por alvenaria de tijolos maciços com dimensões médias de 35,50cmx17cmx5,0cm (comprimento, largura, altura) e foi construída utilizando-se técnicas construtivas locais com os materiais disponíveis na época, sendo o ajuste comum, o tipo de amarração utilizado. A igreja possui apenas uma única torre lateral que não segue a regra neoclássica de seus elementos das fachadas, pois conforme Pinto (2009), foi concluída somente após o ano de 1924.

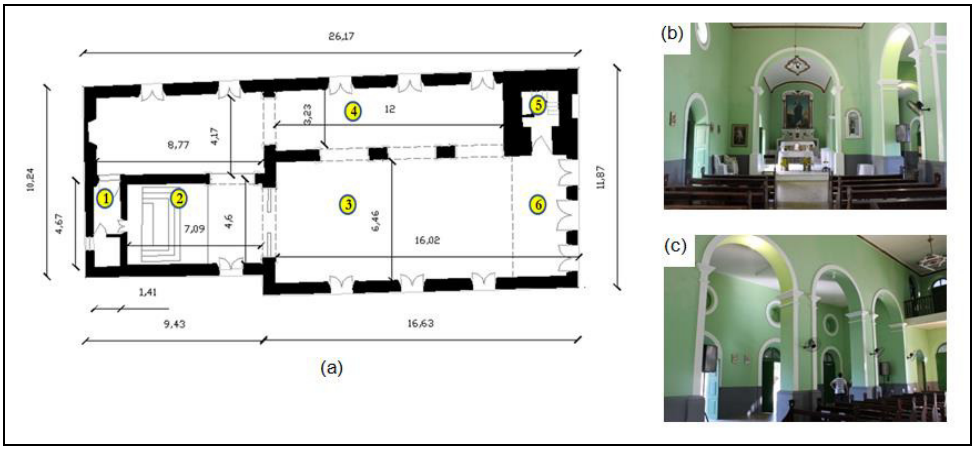
Figura 1- Igreja de Nossa Senhora das Dores: (a) vista das fachadas frontal Oeste e de lateral Sul, (b) localização de Sobral no Estado do Ceará e (c) localização do Ceará no Brasil



A planta baixa da edificação (Figura 2 (a)), é caracterizada por duas naves, sendo uma central de dimensões 6,46mx16,02m e uma nave lateral de menor com dimensões de 3,23mx12,00m. Além disso, verifica-se que no mesmo alinhamento da nave central localiza-se o altar, que se separa desta pelo Arco Triunfal, e logo após o altar, tem-se uma pequena sacristia e dependências utilitárias.

Observa-se também que a igreja, como já dito, possui apenas uma única torre lateral, com aproximadamente 20,50 m de altura e o acesso ao assoalho é feito por meio de uma escada nesta torre. O grau de ornamentação da Igreja é pequeno, tanto internamente quanto externamente. Ainda na Figura 2 pode-se ver o interno da edificação em maiores detalhes no qual está o altar (Figura 2 (b)) e os arcos laterais (Figura 2 (c)) que separaram as duas naves.

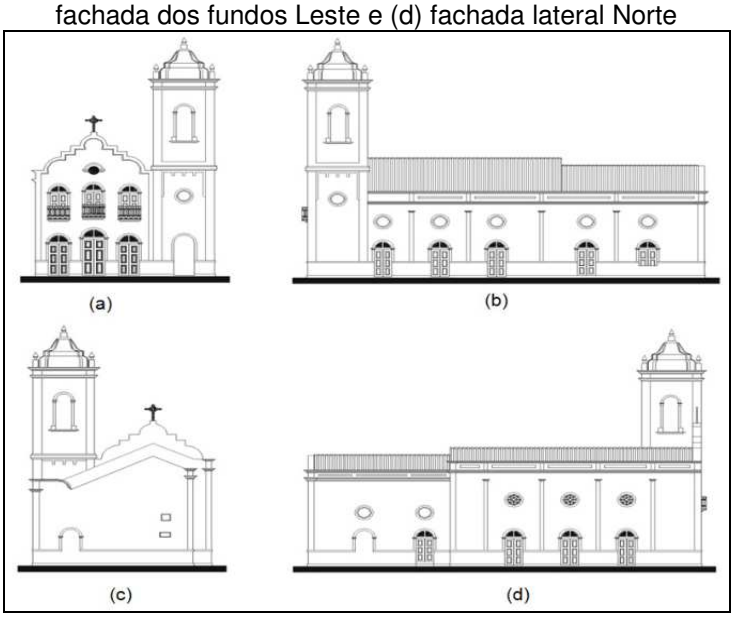
Figura 2- (a) Planta baixa da Igreja de Nossa Senhora das Dores: (1) Sacristia, (2) Altar, (3) Nave central; (4) Nave lateral, (5) Torre lateral e (6) Assoalho; (b) vista do altar e (c) vista dos arcos laterais



Fonte: Adaptada de IPHAN, 2005.

Quanto às fachadas da edificação, na Figura 3 tem-se a representação em CAD de todas as quatro fachadas, onde se observam com maior clareza os detalhes de ornamentação.

Figura 3- Vista das fachadas da Igreja das Dores: (a) fachada frontal Oeste, (b) fachada lateral Sul, (c) fachada dos fundos Leste e (d) fachada lateral Norte



Fonte: Adaptada de IPHAN, 2005.

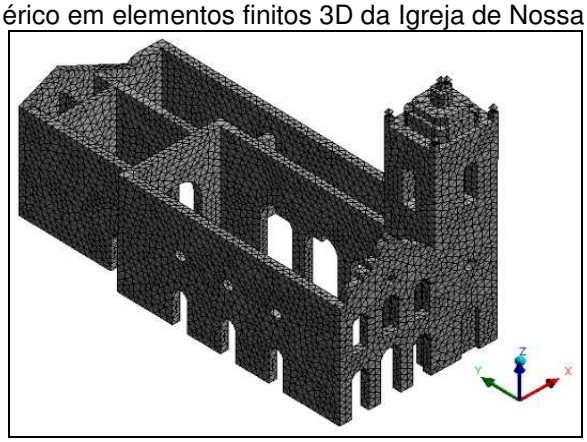
2.2 Modelagem numérica

A alvenaria é constituída por blocos, juntas e interfaces entre esses elementos, que apresentam propriedades mecânicas distintas. Com isso, pode-se dizer que a modelagem numérica de estruturas de alvenaria constitui um desafio para a engenharia de estruturas. Além disso, no caso dos edifícios históricos, devido a grande variedade de materiais e técnicas utilizadas na sua construção, modelar a alvenaria constitui uma tarefa de elevada complexidade (NUNES, 2013).

Neste trabalho, para a construção do modelo 3D da igreja, foi utilizada a técnica da macromodelagem, onde de acordo com Lourenço (2002), é efetuada a representação das unidades, da argamassa e da interface unidade-argamassa como um único elemento continuo equivalente, o macroelemento. Este modelo simplificado reproduz as características do comportamento da estrutura como um todo.

O modelo em 3D foi desenvolvido primeiramente em um software CAD e posteriormente foi exportado para o programa Ansys® (Versão 17.1) em formato sat., onde utilizou-se uma malha de 500 mm para fazer sua discretização em elementos finitos. O elemento escolhido foi o SOLID187, que é um elemento tetraédrico de 10 nós com 3 graus de liberdade em cada um. Com isso, obteve-se 53.889 elementos e 93.380 nós. A Figura 4 mostra o modelo em numérico da edificação em estudo.

Figura 4- Modelo numérico em elementos finitos 3D da Igreja de Nossa Senhora das Dores



O modelo numérico foi concebido o mais próximo possível da estrutura real, porém, algumas simplificações foram feitas para tentar minimizar a ocorrência de descontinuidades e problemas de discretização da malha de elementos finitos. Os detalhes ornamentais das fachadas e das portas foram simplificados, a escada e a cobertura também não foram modeladas, entretanto, suas cargas foram estimadas e aplicadas nas paredes quais as sustentam na forma de pressão vertical.

2.3 Carregamentos e calibração das propriedades mecânicas da alvenaria

A carga da escada existente na torre lateral da edificação foi estimada como sendo o menor valor do carregamento para escadas conforme indicações da ANBT (1980), cujo valor é de 2,50 kN/m² e esta carga foi distribuída uniformemente nas quatro paredes da torre lateral. Já em relação à carga do pequeno assoalho de madeira, localizado atrás da fachada frontal Oeste, foi considerado constituído de madeira do tipo Pinho com peso específico igual a 5,0 kN/m³. Com esse peso específico e também com as com as medidas do assoalho, obtidas na inspeção que foi realizada à estrutura, foi possível calcular sua carga, que correspondeu a 1,25 kN/m², a qual foi descarregada em cada parede de apoio para o referido assoalho.

Para o forro que consiste numa esteira e estuque à base de cal e gesso, muito comum naquela época, utilizou-se o carregamento adotado foi de 0,60 kN/m², mesmo do trabalho de Branco (2007). Já o peso da cobertura, foi obtido do trabalho de Neves (2008), que correspondeu a 1,30 kN/m², o qual já considera todos os elementos da cobertura (ripas, telhas, caibros e treliças). Somando-se estas duas cargas, o resultado foi de 1,90 kN/m². Como a ABNT (1980) não especifica a sobrecarga para cobertas, neste trabalho, por questão de segurança, decidiu-se acrescentar uma sobrecarga de 50% (0,95 kN/m²) do valor da carga total do telhado (1,90 kN/m²). Portanto, o carregamento total da coberta é de 1,90 kN/m² mais 0,95 kN/m², que resulta em 2,85 kN/m². Na Tabela 1 tem-se todas as cargas aplicadas ao modelo numérico.

Tabela 1 – Carregamento aplicado ao modelo numérico da igreja

Tipo de carga	Valor (kN/m²)
Escada	2,50
Assoalho	1,25
Forro+Cobertura	2,85

Em relação às propriedades mecânicas da alvenaria, dada a impossibilidade de sua determinação in situ, recorreu-se a literatura existente na área para defini-los. Para o Módulo de Elasticidade (E), Peso específico (w), Resistência à compressão (f_c), optou-se por utilizar os valores médios do regulamento italiano "Norme Tecniche per le costruzioni" do ano de 2008 (MIT, 2008) e para o coeficiente de Poisson (v), foi considerado o valor dos trabalhos de Branco (2007), Delgado (2013) e Frazão (2013), que corresponde a 0,20. Para a resistência à tração das alvenarias (f_t), neste estudo foi considerado como sendo 5% do valor adotado para a resistência à compressão.

Como não foi possível extrair corpos de prova da estrutura da igreja para caracterizar as propriedades mecânicas da alvenaria, foi realizado um Ensaio de Vibração Ambiental (EVA) para identificar as frequências naturais da edificação e calibrar o modelo numérico de forma indireta ajustando o seu módulo de elasticidade. Antes de se realizar o ensaio em campo, foi feita uma análise modal preliminar do modelo utilizando a ferramenta Modal Analysis no software Ansys® na interface Workbench para se ter uma estimativa das primeiras frequências naturais da edificação.

Na execução do EVA foi utilizado um acelerômetro triaxial do tipo piezoelétrico, com frequência de amostragem entre 0Hz e 100Hz configurável através de um software desenvolvido em Labview pelo Instituto de Telecomunicações de Aveiro, Portugal. Após a coleta, tratamento dos dados e obtenção das três primeiras frequências naturais da igreja, fez-se a calibração do modelo numérico, a qual teve como base as frequências naturais obtidas no EVA. Para isso, ajustou-se no software Ansys® apenas o módulo de elasticidade adotado para a alvenaria, tendo como limite, o valor máximo imposto pela norma técnica italiana (E=1,8 GPa). O módulo de elasticidade foi ajustado de modo que a frequência natural do primeiro modo de vibração no software chegasse o mais próximo possível do valor obtido no ensaio experimental, e as demais frequências, se ajustariam mediante a modificação da primeira. O valor mais próximo entre a frequência natural do primeiro modo de vibração extraída no EVA e a extraída no Ansys® foi obtido para o módulo de elasticidade igual a 1,70 GPa. Os resultados das frequências naturais experimentais e numéricas, bem como o erro associado a cada uma, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2- Comparativo entre as frequências experimentais e numéricas da Igreja das Dores

Modo de vibração	Freq. EVA (Hz)	Freq. Ansys® (Hz)	Erro (%)
1º	2,391	2,403	0,502
2º	2,880	2,806	2,569
3º	3,125	3,084	1,312

Os erros entre as frequências naturais experimentais obtidas no EVA e as numéricas obtidas no Ansys® não ultrapassaram o limite usualmente aceitável de 5% (Mesquita et al., 2017; Brandão et al., 2018), pois o maior erro foi de 2,569% que está bem abaixo desse limite. Com isso, pode-se dizer que o modelo numérico está calibrado e suas propriedades mecânicas são indicadas na Tabela 3.

Tabela 3- Propriedades mecânicas adotadas no modelo numérico calibrado

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

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

2.4 Análise estrutural

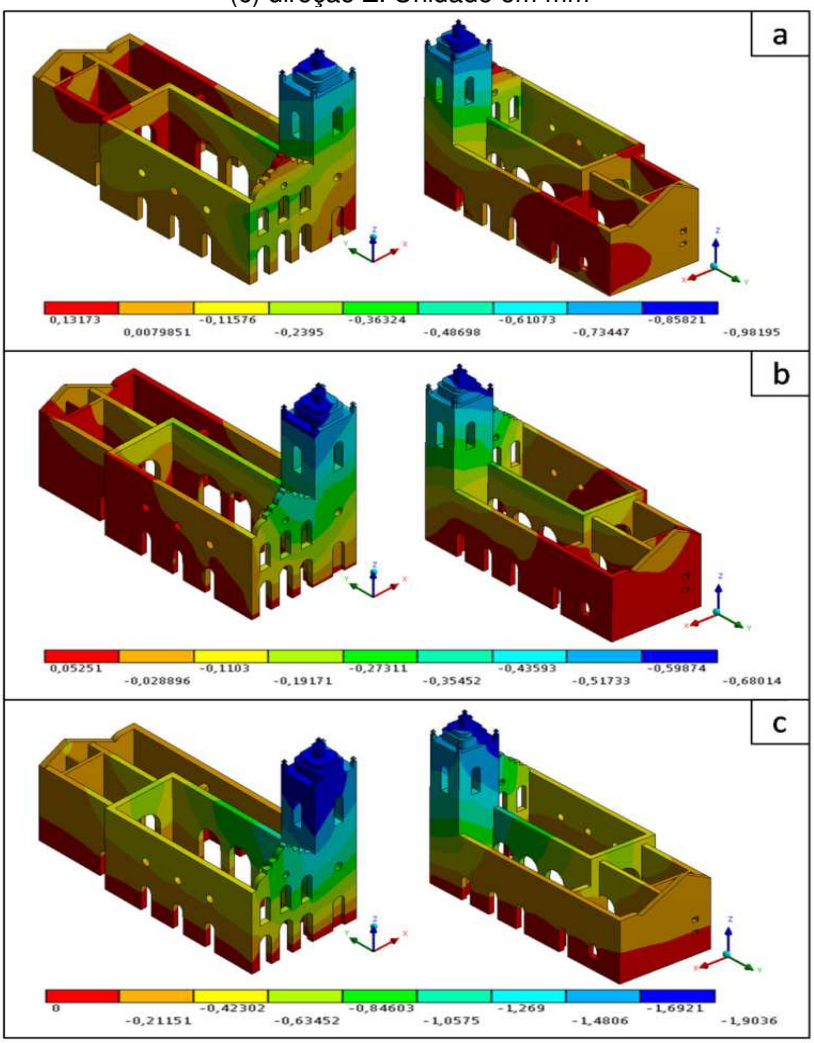
A análise estrutural da Igreja de Nossa Senhora das Dores foi realizada utilizando-se a opção Static Structural do software Ansys® na interface Workbench, na qual foram aplicados os carregamentos da Tabela 1 e as propriedades mecânicas da alvenaria da Tabela 3. Nesta análise não foi considerada a ação de cargas dinâmicas, como o vento, visto que trata-se de uma análise estática com abordagem linear elástica na qual apenas a ação do peso próprio da estrutura e das cargas, já descritas, foram consideradas. Os resultados obtidos são expressos em termos de tensões, deformações e deslocamentos direcionais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Deslocamentos direcionais

O comportamento estático da Igreja de Nossa Senhora das Dores quando esta é submetida apenas a ação de suas cargas permanentes, eventuais sobrecargas adicionadas e da força da gravidade, é primeiramente expresso em termos de seus deslocamentos direcionais que indicam a direção das translações de partes da estrutura da construção em relação ao sistema de eixos adotados no modelo numérico em 3D. Na Figura 5 (a) são evidenciados os deslocamentos na direção X horizontal, onde se pode constatar que a máxima amplitude na direção X positiva corresponde a 0,131 mm e ocorre em distintas regiões da estrutura, quais sejam: base diagonal da torre lateral, topo da parede da fachada frontal Oeste, parte inferior da ligação da parede dos arcos centrais à parede do arco maior em frente ao altar, região superior da parede da fachada lateral Norte, grande parte da parede da fachada lateral Sul se estendendo até uma parte da parede da fachada dos fundos Leste, e por fim, algumas zonas internas na parte dos fundos da edificação. Já na direção X negativa, constata-se que o maior deslocamento, em módulo, localiza-se no topo da torre lateral e tem valor de aproximadamente 0,981 mm. Na mesma torre verifica-se logo a partir das aberturas, deslocamentos variando entre 0,363 mm e 0,981 mm, demonstrando desta forma que as maiores translações na estrutura ocorrem neste elemento e na direção negativa de X.

Figura 5- Deslocamentos direcionais da Igreja de Nossa Senhora das Dores: (a) direção X, (b) direção Y e (c) direção Z. Unidade em mm

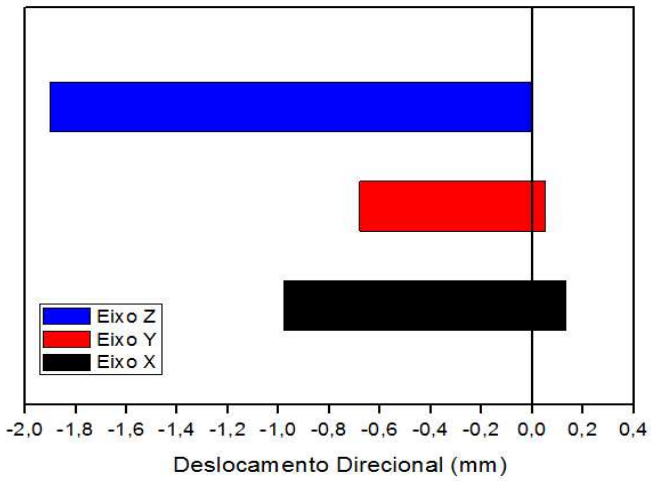


Para os deslocamentos na direção Y horizontal, ilustrados na Figura 5 (b), observa-se também que o maior valor ocorre em muitas regiões da estrutura e neste caso equivale 0,052 mm. As regiões nas quais se

verifica este deslocamento são respectivamente: alguns poucos pontos na base da parede da fachada frontal Oeste, grande parte das paredes das fachadas laterais Norte e Sul e parede da fachada dos fundos Leste, regiões internas como as dos arcos centrais e a parede dos fundos do altar. Na direção Y negativa pode-se observar um deslocamento direcional, em módulo, de 0,680 mm localizado no topo da torre lateral e assim como os deslocamentos na direção X verifica-se também que na mesma torre, a partir das aberturas, encontram-se deslocamentos entre 0,354 mm até o máximo, 0,680 mm, indicando novamente que este elemento é o que mais sofre translações.

Em relação aos deslocamentos na direção Z vertical apresentados na Figura 5 (c), constata-se que na direção Z positiva, ou seja, sentido para cima, não existem deslocamentos visto que as cargas são aplicadas na vertical no sentido negativo deste eixo e, portanto não acarretam em deslocamentos positivos, além disso, a base da igreja foi considerada engastada ao solo, o que também contribui para deslocamentos nulos nesta direção. Entretanto, para os deslocamentos na direção Z negativa, ou seja, no sentido para baixo, verifica-se um valor máximo, em módulo, de 1,903 mm no topo da torre lateral mostrando assim que novamente a torre lateral foi o elemento mais afetado e que sofreu maiores translações. O eixo Z foi a direção que apresentou maiores deslocamentos direcionais, em módulo. Um comparativo entre os máximos valores destes deslocamentos em cada eixo considerado, com as suas respectivas direções de translação (Positiva e Negativa), é melhor explicitado na Figura 6 a seguir.

Figura 6- Comparativo entre os máximos deslocamentos direcionais da Igreja de Nossa Senhora das Dores

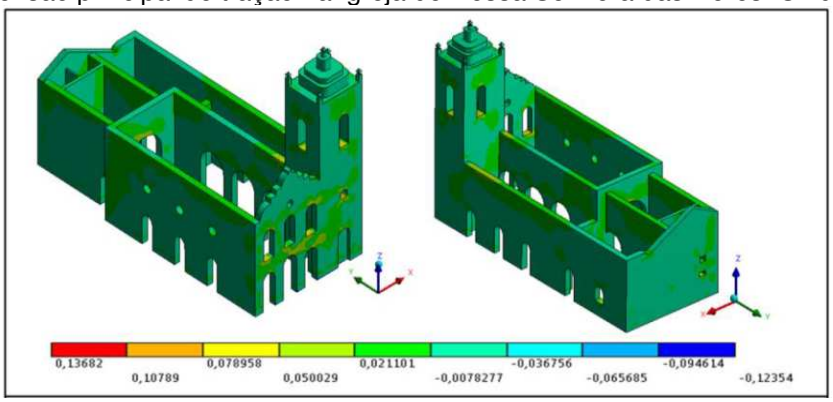


Analisando-se a Figura 6, verifica-se que para o eixo Z a estrutura só apresentou deslocamentos no sentido negativo do respectivo eixo e ainda, comparando os seus resultados com as outras duas direções, constata-se que em Z o deslocamento máximo foi o maior. Para as outras duas direções (X e Y), observa-se que em Y os deslocamentos foram menores do que na direção X, tanto no sentido positivo quanto no sentido negativo do eixo.

3.2 Tensões

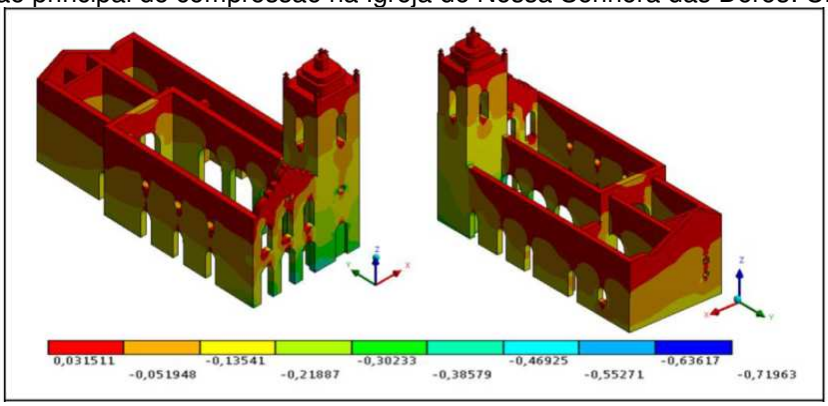
Quanto às tensões principais atuantes na Igreja de Nossa Senhora das Dores, na Figura 7 são mostradas as tensões principais de tração, na qual é possível identificar os maiores valores no centro do arco de frente ao altar, nas aberturas da fachada frontal Oeste, nas aberturas da torre lateral e na de ligação entre os arcos centrais com a torre lateral, que corresponde a aproximadamente 0,136 MPa. Essa tensão, é ainda inferior ao valor admissível para a tensão de tração da alvenaria do modelo numérico (0,16 MPa), desse modo, estas regiões não se encontram sujeitas ao risco de sofrerem ruptura por tração excessiva, porém, caso seja efetuado um aumento de cargas, haverá também um aumento de tensões e possivelmente a mesma poderá sofrer ruptura.

Figura 7- Tensão principal de tração na Igreja de Nossa Senhora das Dores. Unidade em MPa



A tensão principal de compressão é apresentada na Figura 8 onde se pode observar que a região mais comprimida localiza-se na parte inferior da parede da fachada frontal Oeste, mais precisamente, na região de ligação desta à torre lateral e corresponde a aproximadamente 0,719 MPa. Verifica-se também tensões de tração de 0,031 MPa na região superior das paredes, no topo da torre lateral, nas aberturas da fachada frontal Oeste e da torre lateral e também na região central de todos os arcos. Para as duas tensões mencionadas na Figura 8, seus valores são inferiores as tensões de resistência da alvenaria do modelo numérico, seja para tração (0,16 MPa), seja para compressão (3,20 MPa).

Figura 8- Tensão principal de compressão na Igreja de Nossa Senhora das Dores. Unidade em MPa

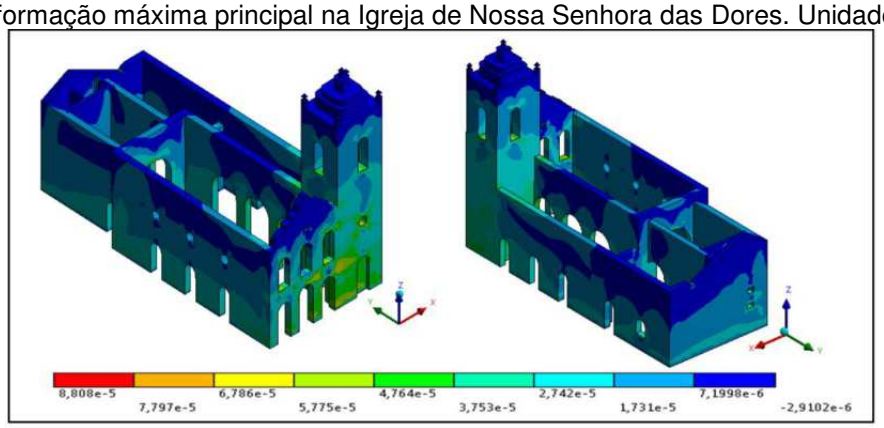


De forma geral, para ambas as tensões principais, os máximos valores encontrados, são ainda muito inferiores aos máximos admissíveis adotados para a alvenaria do modelo numérico. Com isso, não ocorrem rupturas por tração ou compressão excessiva nas regiões identificadas.

3.3 Deformações

A deformação máxima principal na estrutura da Igreja de Nossa Senhora das Dores é vista na Figura 9, na qual se identifica que a maior deformação ocorre na abertura circular localizada na meia altura da torre lateral na parede da fachada frontal Oeste e equivale a $8{,}808 \times 10^{-5}$ mm/mm. Nesta mesma fachada pode-se ainda encontrar deformações variando entre $4{,}764 \times 10^{-5}$ mm/mm a $7{,}797 \times 10^{-5}$ mm/mm. Na parede da fachada lateral Sul, mas precisamente da base da torre lateral entendendo-se até sua meia altura também podem ser identificadas deformações que variam de $3{,}753 \times 10^{-5}$ mm/mm a $5{,}775 \times 10^{-5}$ mm/mm. Em todas as regiões mencionadas, todas as deformações explicitadas são muito pequenas e não comprometem a estabilidade da estrutura.

Figura 9- Deformação máxima principal na Igreja de Nossa Senhora das Dores. Unidade em mm/mm



Os resultados obtidos, em termos dos deslocamentos direcionais, tensões e deformações, apresentam valores numéricos baixos que são compatíveis com o carregamento aplicado. Desta forma pode-se dizer que a Igreja de Nossa Senhora das Dores apresenta-se estável frente ao cenário de cargas aplicado.

4. CONCLUSÕES

Sendo a Igreja de Nossa Senhora das Dores uma construção histórica de grande relevância patrimonial para a cidade de Sobral, este estudo objetivou realizar sua análise estrutural com o intuito de identificar os deslocamentos, tensões e deformações os quais a estrutura está submetida, quando agem sobre ela, somente as cargas permanentes e eventuais sobrecargas, e ainda, buscou-se com este trabalho, mostrar a importância da análise estrutural como forma de auxiliar nos estudos sobre a conservação e a avaliação da segurança estrutural do patrimônio histórico edificado, uma vez que, ao se identificarem as regiões da estrutura com esforços elevados, onde em alguns casos ultrapassam os limites de resistência dos materiais estruturais, pode-se traçar suas relações com o desenvolvimento de danos na edificação e propor soluções de reforço e manutenção das zonas mais afetadas.

Pelos resultados aqui obtidos, foi possível identificar as regiões da Igreja de Nossa Senhora das Dores com maiores deslocamentos, deformações e tensões, onde em relação aos valores máximos dos deslocamentos e deformações, verificou-se que estes foram muito pequenos e não comprometem a estabilidade da estrutura. Para as tensões principais, no caso da tensão de tração identificou-se um valor máximo de 0,136 MPa, que está bem próximo da resistência a tração do material do modelo numérico, a qual foi considerada 0,16 MPa. Já para a tensão principal de compressão, a máxima encontrada foi de 0,719 MPa, que é muito inferior a compressão a qual resiste o material do modelo numérico, 3,20 MPa. De forma geral, a estrutura não apresenta ruptura das alvenarias por tração ou compressão excessiva.

Em conclusão, pode-se destacar a analise estrutural como uma ferramenta eficiente para a avaliação de estruturas e, no caso das construções históricas, é ainda mais relevante, pois contribui à segurança estrutural e preservação patrimônio histórico edificado.

5. 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 no 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.

6. REFERÊNCIAS

ARIAS, J. C. **Structural Analysis of a vault of the Administration building of the Hospital Sant Pau**. 2013. 104 p. MSc Dissertation (Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions)- Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2013.

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

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.

BRANDÃO, F.; ALVES, A.; SANTOS, F.; DIÓGENES, A.; MESQUITA, E.; VARUM, H. Caracterização dinâmica de um edifício histórico do Século XIX construído em alvenaria de tijolos maciços. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções-CBPAT 2016, 2, 2016, Belém. **Anais**...Belém: Casa Leiria, 2016. p. 745-756.

BRANDÃO, F.; MESQUITA, E.; DIÓGENES, A.; ANTUNES, P.; VARUM, H. Dynamic characterization of a heritage construction from 19th century. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 7, p. 52-75, 2018.

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.

LOURENÇO, P. B. Computations on historic masonry structures. **Progress in structural engineering and materials**, v. 4, n. 3, p. 301–319, 2002.

MESQUITA, E.; BRANDÃO, F.; DIÓGENES, A.; ANTUNES, P.; VARUM, H. Ambient vibrational characterization of the Nossa Senhora das Dores Church. **Engineering Structures and Technologies**, v. 9, n. 4, p. 170-182, 2017.

MESQUITA, E.; PAUPÉRIO, E.; ARÊDE, A.; VARUM, H. **Boletim Técnico**: Caracterização, avaliação e recuperação estrutural de construções históricas. ALCONPAT-BRASIL: Janeiro, 2015.

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

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.

NUNES, R. F. G. **Modelação e análise de estruturas de edifícios existentes em alvenaria**. 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado em Reabilitação Urbana)- Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, 2013.

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.

PULIDO, V. L.; DURÁ, A. A.; FENOLLOSA, E.; BOQUERA, A. M. Análisis constructivo y estructural de la catedral de Valencia. **Informes de la Construcción**, v. 68, n. 543, p.1-10, 2016.

ROCA, P; CERVERA, M.; GARIUP, G.; PELA', L. Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 17, n. 3, p. 299–325, 2010.

SALOUSTROS, S. **Structural Analysis of the Church of the Poblet Monastery**. 2013. 141 p. MSc Dissertation (Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions)- Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2013.