Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA EDIFICAÇÃO HISTÓRICA DO SÉCULO XVIII

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

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

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

E. MESQUITA
Doutorando
CONSTRUCT-LESE, FEUP
Porto, Portugal
emesquita@feup.pt

A. DIOGENES
Professora M.S.c
LAER, Engenharia Civil, UVA
Sobral, Brasil
aldeciragd@yahoo.com.br

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

RESUMO

A Igreja do Rosário foi construída em 1767, sendo a igreja mais antiga de Sobral. Sua estrutura é constituída predominantemente por alvenarias autoportantes de tijolos maciços. Ademais, devido sua importância histórica, ela é considerada um edifício de grande valor patrimonial. Todavia, por ser um edifício histórico, e levando-se em consideração a natureza peculiar dos métodos construtivos utilizados em edificações antigas, apresenta limitações quanto a aplicação das normas e códigos modernos. Consequentemente, fica dificultada a sua análise estrutural e, por conseguinte, seu diagnóstico, sendo assim necessárias análises especificas para cada edificação, através de métodos mais complexos como os métodos computacionais. Objetivando contornar esse problema e contribuindo para uma análise da segurança estrutural, uma análise numérica linear foi realizada para a Igreja do Rosário, sendo construído um modelo de elementos finitos utilizando o software comercial *Ansys*. O modelo representou satisfatoriamente o comportamento do edifício, onde foi possível observar as zonas de maiores concentrações de tensão e as possíveis zonas críticas.
Palavras-chave: patrimônio histórico, análise estática, modelagem numérica, caracterização estrutural, MEF.

ABSTRACT

The Rosário's Church was built in 1767, and it's the oldest church of Sobral. Its structure is composed mostly by masonry walls. Moreover, due to its historical importance, it is considered a building of great patrimonial value. However, because it is a historical heritage, and considering the peculiar nature of the constructive methods used in heritage structures, it shows limitations on the application of the modern standards and codes. Consequently, its structural analysis gets harder, as well as its diagnoses. Therefore, it is necessary specific analysis for each building, through more complex methods as those based on the computational methods. In order to get over this issue and contributing to a analysis of the structural safety, a linear numerical analysis was made for the Rosário's Church, building a finite elements model using the comercial software *Ansys*. The model represented satisfactorily the real behavior of the building, and it was possible to observe the biggest tension concentration zones and the possible critical zones.
Keywords: heritage constructions, static analysis, numerical modelling, structural characterization, FEM.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Os monumentos históricos de uma sociedade constituem elementos físicos com grande valor documental, pois evidenciam a história do desenvolvimento de um povo. Por conta disso, essas obras possuem um valor inestimável perante a sociedade na qual se inserem [1]. Justamente por serem uma fonte histórica que sobrevive por vários anos, essas obras são de suma importância para a sociedade. Todavia, devido más condições de manutenção, a segurança estrutural de edifícios históricos pode ter maior dependencia de aplicação frequência de medidas de manutenção quando comparadas a construções modernas. Em virtude disso é que muitos desses edifícios são tombados, como forma de prevenção à intervenções que alterem seu aspeto original ou essência construtiva. Uma vez recuperados e reinseridos no âmbito das construções comercialmente ativas, tais como museus, restaurantes, lojas de comércio, dentre outros exemplos, acabam por se tornar elementos de grande valorização e atrativo local.

Merece ainda destaque o fato de que a maioria dessas construções históricos foram construídas de alvenaria, um dos materiais de construção mais antigos e difundidos no mundo. Alvenaria é a combinação de unidades ligadas por suas superfícies e unidas com argamassa, podendo tais unidades serem pedras, tijolos, adobe, ladrilhos, estuques ou blocos pré-moldados [2]. Nesse sentido, a alvenaria é definida como um material compósito, não homogêneo e anisotrópico, e por ser um material heterogêneo, o seu comportamento depende das propriedades mecânicas de seus componentes, apresentando, pois, características próprias, como o mecanismo de falha dos componentes, que, quando carregados, a tensão ou compressão se apresentam de forma similar [3].

A forma de uso mais eficaz de construção de alvenaria pode ser vista em estruturas autoportantes, nas quais se executa uma variedade de funções, tais como suporte de cargas, divisão dos espaços, além de proporcionar isolamento térmico e acústico, bem como proteção contra incêndios e condições meteorológicas. Todavia, até meados do século XX não haviam métodos de engenharia e códigos disponíveis para a concepção de edifícios de alvenaria. Dessa forma, os projetos de elementos estruturais, tais como a espessura das paredes, profundidade de fundação, o espaçamento, entre outros, eram baseados na experiência do construtor [4]. Consequentemente, as características das alvenarias de uma antiga estrutura também são difíceis de serem estimadas, uma vez que não existia, à época de sua construção, códigos normativos que fornecessem informações sobre os requisitos mínimos a serem aplicados. Portanto, analisar um edifício histórico significa realizar uma verdadeira investigação sobre a história de uma estrutura composta de elementos que, quase sempre, foram expostos as mais variadas situações ambientais e de carregamentos. Em adição, seria errado esperar que um edifício antigo satisfizesse os mais recentes critérios de projeto, embora o edifício possa ter superado a sua expectativa de vida.

Assim, pode-se inferir que analisar o reforço das estruturas históricas sempre foi uma tarefa difícil, em virtude da complexidade geométrica e da falta de conhecimento sobre o material utilizado, além de modificações estruturais durante o tempo e o envelhecimento do material. Uma melhor compreensão do mecanismo de transferência de carga, tanto da gravidade e do sistema de resistência laterais de tais estruturas, é questão fundamental para uma análise estrutural detalhada, e a consequente compreensão dos seus resultados [4].

Consequentemente, a análise estrutural é uma ferramenta indispensável, pois, mesmo quando os resultados dos cálculos e a análise não possam ser mais precisos, eles podem indicar o fluxo das tensões e as possíveis áreas críticas [2]. Logo, com o desenvolvimento de métodos computacionais, a análise de elementos finitos se tornou um valioso instrumento para a análise de estruturas históricas, motivo pelo qual é vastamente utilizada, em diferentes tipos de análises, permitindo soluções bem específicas para cada caso, representando, juntamente com os ensaios não-destrutivos, importantes técnicas de avaliação da segurança estrutural de edifícios históricos.

Dentre os vários trabalhos, pode-se destacar o estudo de caso de Lourenço et al. [5], o qual realizou a avaliação da segurança estrutural do Mosteiro dos Jerónimos, em Lisboa. Através da discussão do caso de estudo, os autores salientam como os resultados obtidos a partir de simulações numéricas avançadas em estruturas históricas são importantes para a compreensão do comportamento estrutural. Ademais, o trabalho demonstra que os modelos numéricos também podem ser usados como "um laboratório numérico", no qual a sensibilidade dos resultados aos parâmetros do material de entrada, ações e condições de contorno, podem ser eficientemente analisados, oferecendo informações valiosas na concepção e compreensão dos ensaios in situ e monitoramento estrutural.

Além disso, a importância de estratégias numéricas apropriadas também tem sido discutidas por Cardoso et al.[6]-[7]. Estes autores apontam a importância das condições de contorno na modelagem numérica através da análise de edifícios antigos de alvenaria no centro de Lisboa que sofreram a ação sísmica em 1755. Eles propõem um método interativo

para a avaliação, que consiste em identificar o dano aos elementos estruturais ou conexões e modelar sua rigidez conforme a análise.

Binda [8] analisou a Basílica de San Vitale, em Ravenna (Itália), um edifício bizantino que apresenta fissuras e deformação excessiva. Os autores construíram um modelo de elementos finitos de toda a basílica, levando em consideração os resultados da investigação topográfica e dos ensaios *in situ*, que foram concebidos como um primeiro passo para a compreensão do comportamento estrutural. Através do modelo, foi possível identificar a origem do padrão das fissuras pesquisadas e detectadas a partir concentrações de tensões, com valores de pico perto da resistência à tração de alvenaria.

Nos estudos realizados por Betti et al. [9]-[10] é exposta a modelagem e a análise de edifícios de alvenaria históricos de importância cultural, apresentando metodologia de análise numérica prática para os diversos problemas da engenharia. Estes trabalhos sugerem que a compreensão do comportamento estrutural de edifícios históricos é um processo interativo, que começa a partir de estratégias preliminares de modelagem mais simplificadas, e que não limitam a praticidade em um primeiro momento. Somente a partir da compreensão do comportamento estático de uma maneira mais geral, os edifícios do patrimônio cultural requerem uma abordagem maior, destinada a recolher todas as informações possíveis (numérica e experimental), necessárias para se emitir um parecer técnico apropriado e crítico.

Este presente trabalho proporciona uma contribuição ao estudo do comportamento estrutural de uma Igreja construída com paredes de alvenarias autoportantes, datada de século XVIII, a partir da construção de um modelo simplificado de elementos finitos.

2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFICIO

Localizada no atual centro comercial da cidade de Sobral, a igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos (Figura 1) foi construída no ano de 1767, sendo a Igreja mais antiga do centro histórico sobralense.



Figura 1: Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos

Uma de suas características mais marcantes é o frontão, que em muito se assemelha às feições barrocas, graças aos seus movimentos curvilíneos, os quais formam uma abertura em formato de arco, disposta centralmente e enriquecida com a inserção de uma cruz, além de quatro pináculos dispostos nas laterais do frontão. A Igreja do Rosário, a mais antiga de Sobral, sofreu algumas modificações por iniciativa do então vigário geral Pe. José Tupinambá da Frota, tais como as ampliações laterais em 1914 . Em 1926, já como bispo, Dom José mudou o piso de tijolos por ladrilhos hidráulicos e mandou retirar as tribunas laterais típicas do século XVIII. Entre 1941 e 1942 foi reformado o altar mor conforme projeto do italiano Agostinho Balmes Odisio[11]. Além disso, a riqueza da arquitetura da igreja é marcada pela inserção de técnicas não-eruditas, muito populares à época, possuindo uma fachada principal simétrica e portas e janelas cujas aberturas estão em forma de arco. As fachadas laterais, por sua vez, apresentam as mesmas características de portas, porém as janelas estão em formatos circulares. Estes detalhes podem ser verificados nos cortes da Fachada na Figura 2.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

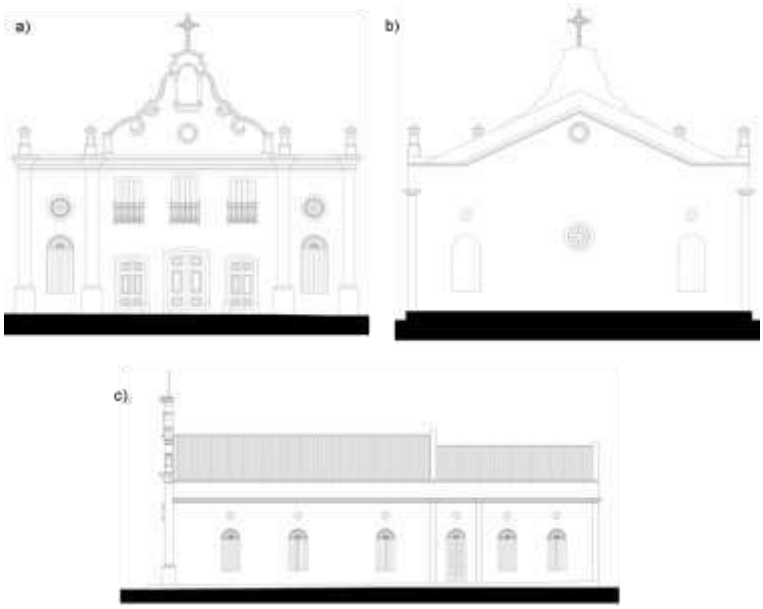


Figura 2 Cortes das fachadas da Igreja do Rosário (a) fachada principal (b) fachada fundo (c) fachada lateral

A igreja tem área de ocupação de aproximadamente 540 m², possuindo externamente 5 portas (3 na fachada frontal e mais 1 em cada fachada lateral). As janelas posseum arcos e são 17 em sua totalidade (5 na fachada frontal, 2 na fachada de fundo e mais 5 em cada fachada lateral). As paredes externas tem espessura de 57 cm, com excessão da parede da fachada frontal que tem 1,05 m de espessura enquato as paredes internas da nave principal tem 0,89 cm de espessura. O frontão tem altura de 14 m.

Internamente, a igreja é composta de uma nave central e duas naves laterais, dispostas uma de cada lado, onde se dividem pela presença de arcos. Também apresenta um arco maior, o qual separa o altar da nave principal. Existe, ainda, uma pequena câmara por detrás do altar. Estes detalhes podem ser melhor verificados na Figura 3.

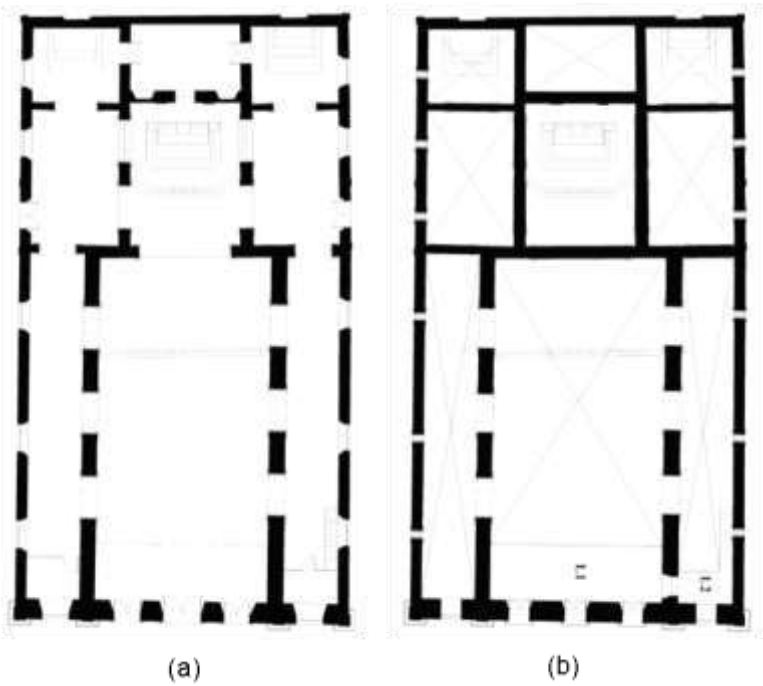


Figura 3: Planta baixa da área interna da igreja: a) pavimento inferior; b) pavimento superior

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

No pavimento superior há apenas duas lajes, como se pode ver na Figura 3 A laje L1 tem área de 26,2 m² e a laje L2 tem área de 4,5 m².

Em relação ao estado atual de conservação da estrutura, uma inspeção técnica realizada no dia 09 de novembro de 2015 demostrou que a igreja apresenta algumas fissurações em alguns pontos da fachada, essencialmente concentrados nas regiões arqueadas das aberturas. Essas fissuras podem ser observadas na Figura 4 . Um exemplo de como se apresentam estas fissuras pode ser observado na Figura 5.

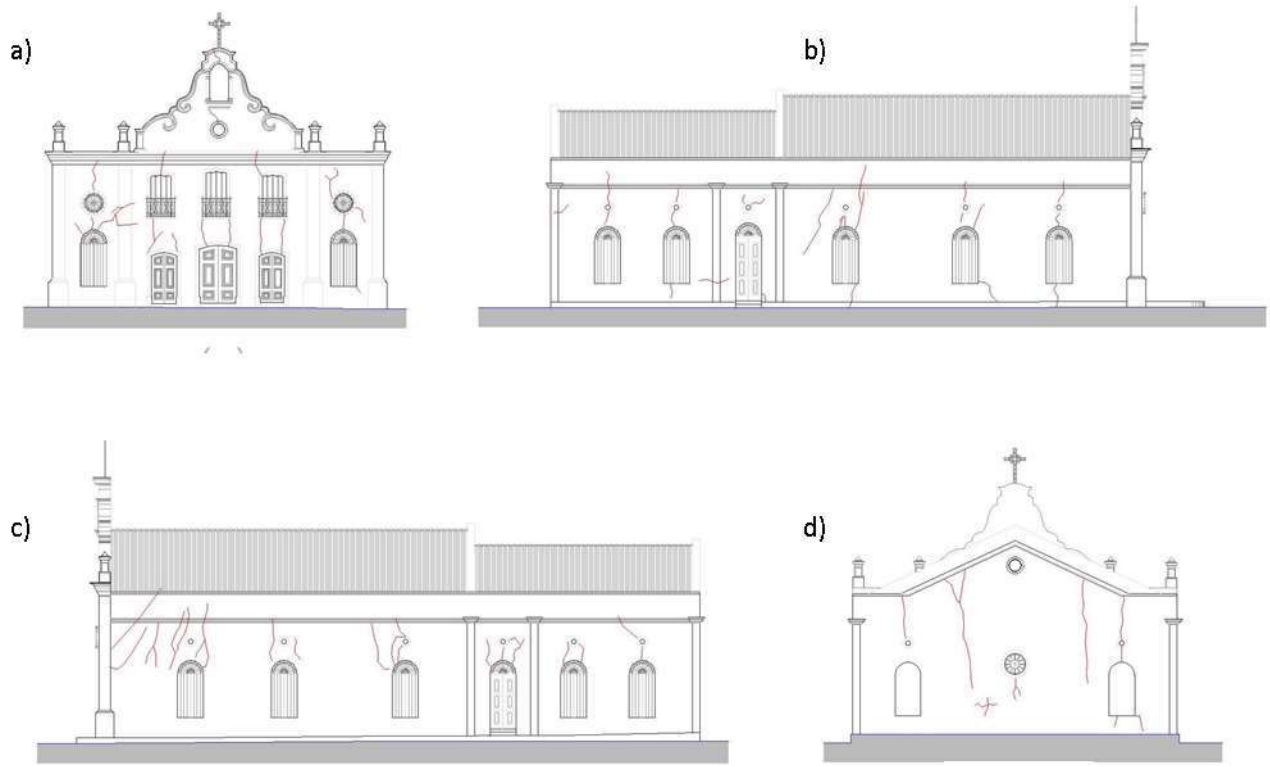


Figura 4: Mapa de Fissuração


Figura 5: Fissura na fachada lateral.

A igreja foi construida através de alvenaria de tijolos maciços unidos por argamassa de cal. Para a realização da análise numérica foram utilizados os valores apresentados nas literaturas para essa técnica construtiva, os quais podem ser observados na Tabela 1, que trata das propriedades dos materiais.

Tabela 1: Propriedades dos materiais adotadas no presente estudo

E [GPa]	w [KN/m^3]	ν
1.50	18	0.2

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

No presente artigo foi estudada um estutura de alvenaria autoportante de tijolos maciços, nomeadamente a Igreja do Rosário. Para tal, foi construído um modelo tridimensional de elementos finitos, considerando-se uma macromodelagem, com material isotrópico, e comportamento no regime elástico. As propriedades do matérias utilizadas foram as listadas anteriormente.

O modelo geométrico foi construído apenas para as paredes de alvenaria, a cobertura formada de madeira e telhas cerâmico não foram considerados no modelo e seus respectivos pesos próprios, 1,5 kN/m^2, foram aplicados nas paredes autoportantes por pressões normais a superfície superior das mesmas. A escada e a laje também não foram consideradas no modelo diretamente e o carregamento referente a essas peças, quais sejam, 2,5 kN/m^2 e 2,0 kN/m^{2,} foram incluídos na forma de carregamentos verticais concentrados distribuídos em nós ao longo da localização da reação geradas por estes membros na estrutura de alvenaria. Sendo todo o carregamento da estrutura calculado de acordo com as recomendações das normas brasileiras [12].

A geometria da Igreja foi concebida o mais preciso possível de acordo com um levantamento geométrico realizado pelo IPHAN[13] em um software CAD. Algumas minorações foram feitas para se tentar minimizar a ocorrência de descontinuidades e discretização de pequenos elementos em regiões onde não fossem formadas pelo compósito alvenaria, já que esta hipótese não respeitaria a macro-modelagem assumida anteriormente. As paredes foram modeladas com a espessura constante, apesar de todas apresentarem uma variação de espessura de aproximadamente 1 cm. Nas aberturas de portas e janelas, na face interna da igreja, apresentam uma pequena diminuição na espessura da parede, para qual neste modelo foi assumido como constante. Adicionalmente, detalhes ornamentais foram simplificados, os pináculos foram simplificadamente discretizados com seções retangulares constantes, porem com o critério de permanecer com a área da seção transversal igual a área real. Além do mais, o frontão perdeu a características curvilíneas acentuadas sendo assumido como uma curva suave, porém, obedecendo a silhueta original.

Em quaisquer lugares onde as informações não foram disponíveis, suposições foram tomadas da forma mais razoável possível, sempre assumindo que foram usadas técnicas construtivas similares em todo o prédio, resultando em soluções análogas.

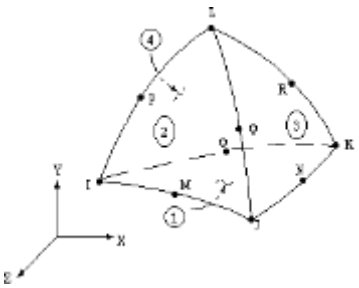


Figura 6: SOLID92 3-D 10-Node S'ólido tetraedrico estrutural[14]

O modelo geométrico descrito anteriormento foi discretizado por elementos tetraedricos finitos com o auxilio do programa *Ansys (versão 12.1)*. Este elemento (Figura 6) é formado por 10 nós tendo 3 graus de liberdade cada nó: translações no nó x, y e z. Tetrahedricos são elementos extremamente flexíveis, e são completamente compatíveis com a malha automática de um modelo 3D. Este elemento permite que seja analisados modelos sujeitos tanto a compressão vertical e flexão, na qual faz as tensões verticais variarem através das seções das paredes. Alem do mais, as superfícies curvelineas, dos arcos e janelas, podem ser modeladas mais precisamente usando o elemento composto por 10 nós. O elemento 3D pode ser observado na Figura 7, consistindo em 88728 nós, 47032 elementos.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

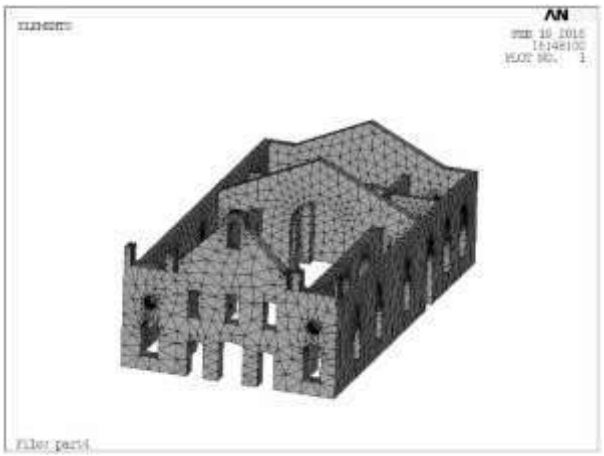


Figura 7: Modelo de elementos finitos da Igreja do Rosário

4. RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

A analise numérica foi realizada com ambos os carregamentos permanentes e acidentais.Os resultados das análises através do método de elementos finitos está resumido nas Figura 8-11. Pela análise das tensões verticais apresentadas na figura 8, é possível indentificar três regiões principais com distintos níveis de carregamentos, a região superior que inicia-se na parte superior e vai até aproximadamente a abertura dos vãos de portas e janelas, com aproximadamente 2,5 metros de de altura, possui um carregamento médio de 0,3 MPa de compressão, nessa região também se encontram as tensões verticais nulas. A segunda região compreende-se aproximadamente nos 2,5 metros centrais nas quais possuem uma tensão média de compressão de 0,7 MPa e a terceira região pode ser localizada na parte inferior com uma altura similar das outras duas, apresentando uma tensão média de compressão por volta de 1,35 MPa. Em alguns lugares devido as concentrações de tensões ocasionadas pela geometria (disposição das aberturas e ligação das paredes) são observadas tensões de compressão superiores a 1,7 MPa. Pode-se destacar o canto inferior dos encontros das paredes ortogonais e a região localizada próximo ao arco principal da fachada frontal, que apresenta valores de compressão por volta de 3 MPa. Alguns locais se observa a presença de tensões de tração com a máxima tração apresentada de 0,7 MPa, de modo específico, são observadas essas tensões nos vértices dos arcos das aberturas de janelas e portas.

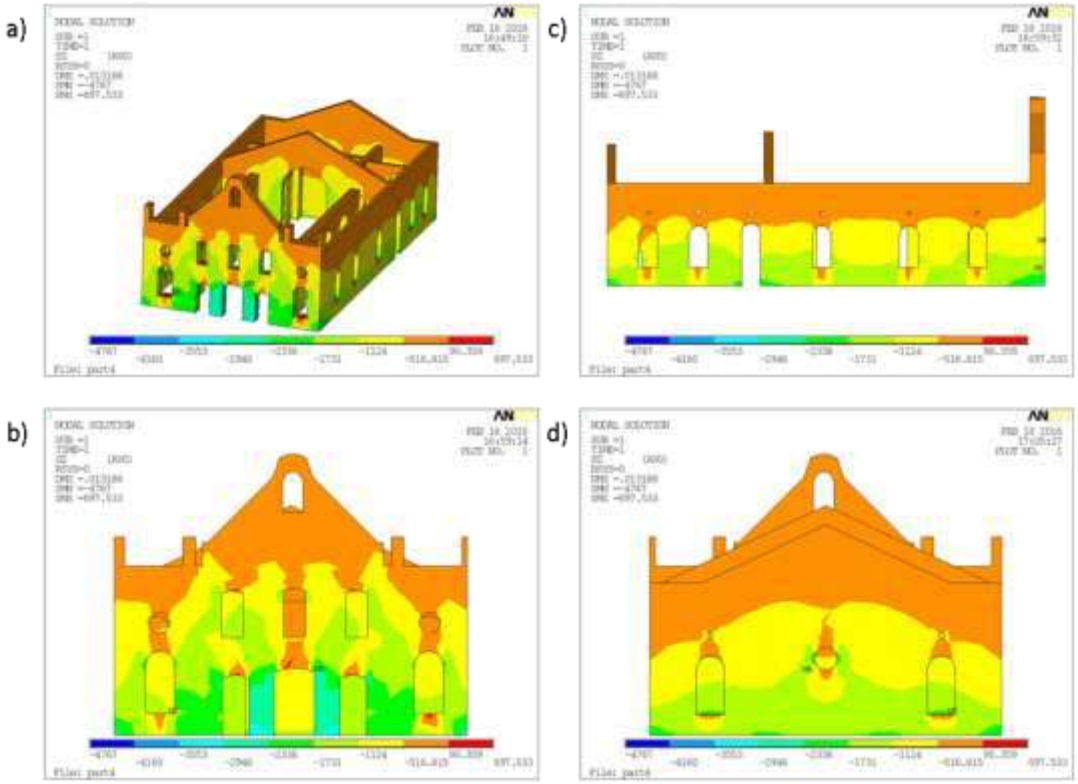


Figura 8: Tensões verticais (Unidades em kPa: a)Vista Geral b) Fachada Frontal c)Fachada Lateral d)Fachada Posterior

O resultados em das tensões máximas de tração (primeira tensão principal) estão plotados na Figura 9. Mostrando uma valor médio em praticamente toda a edificação, 0,05 MPa de compressão, excetuando-se pelas regiões proximas as aberturas, com valores entre 0,1 e 0,5 MPa de tração, chegando até 1,1 MPa de tração na meio dos vãos arqueados. Na base das ligações das paredes ortogonais apresentam-se também picos de tensões de compressão por volta de 0,7 MPa. Adicionalmente, na Figura 10, está plotados os valores referente a tensão máxima de compressão, (terceira tensão principal), onde se pode observar uma tração máxima de 0,29 MPa e uma compressão média de 3 MPa, porém com um pico de aproximadamente 5 MPa em pouquíssimos pontos que pode ser explicado pelo refinamento da malha. Por último mostra-se na Figura 11 mostra-se os valores das deformações referentes a primeira deformação principal, nas quais pode se observar valores máximos de 0,786 mm.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

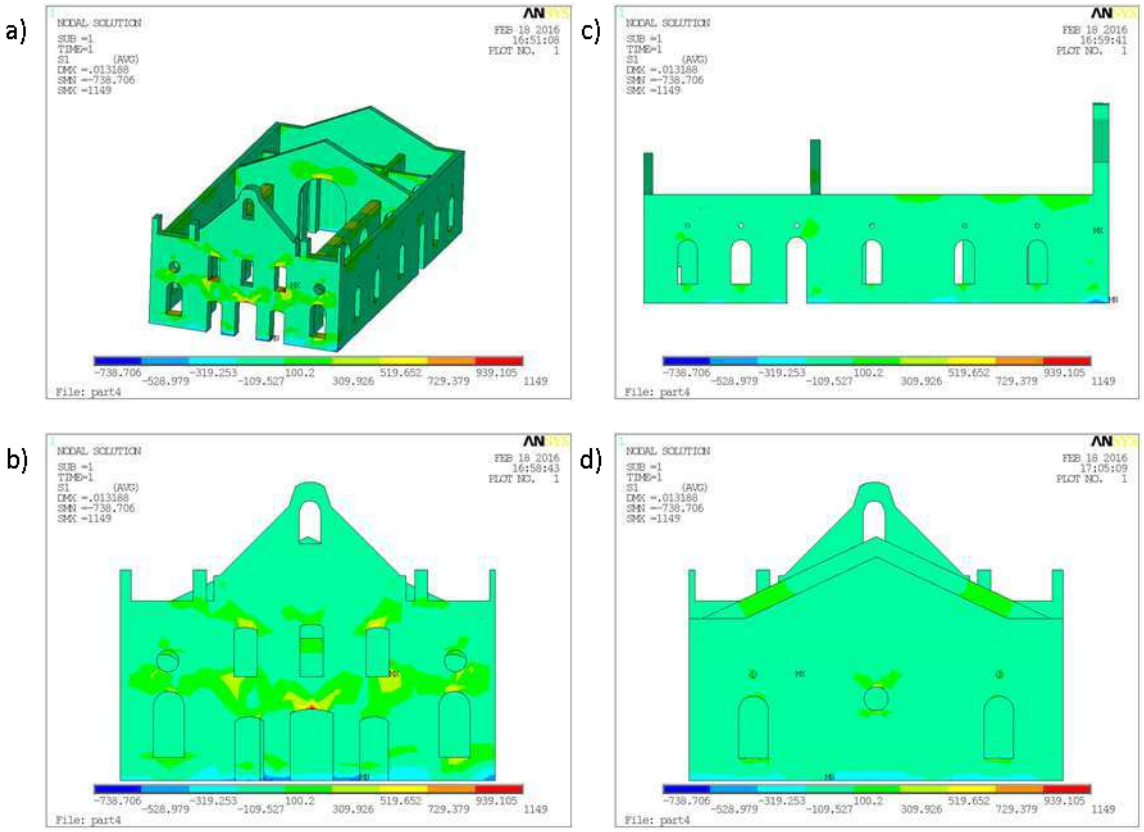


Figura 9: Tensões máximas de tração (Unidades em kPa: a) Vista Geral; b) Fachada Frontal; c) Fachada Lateral; d) Fachada Posterior

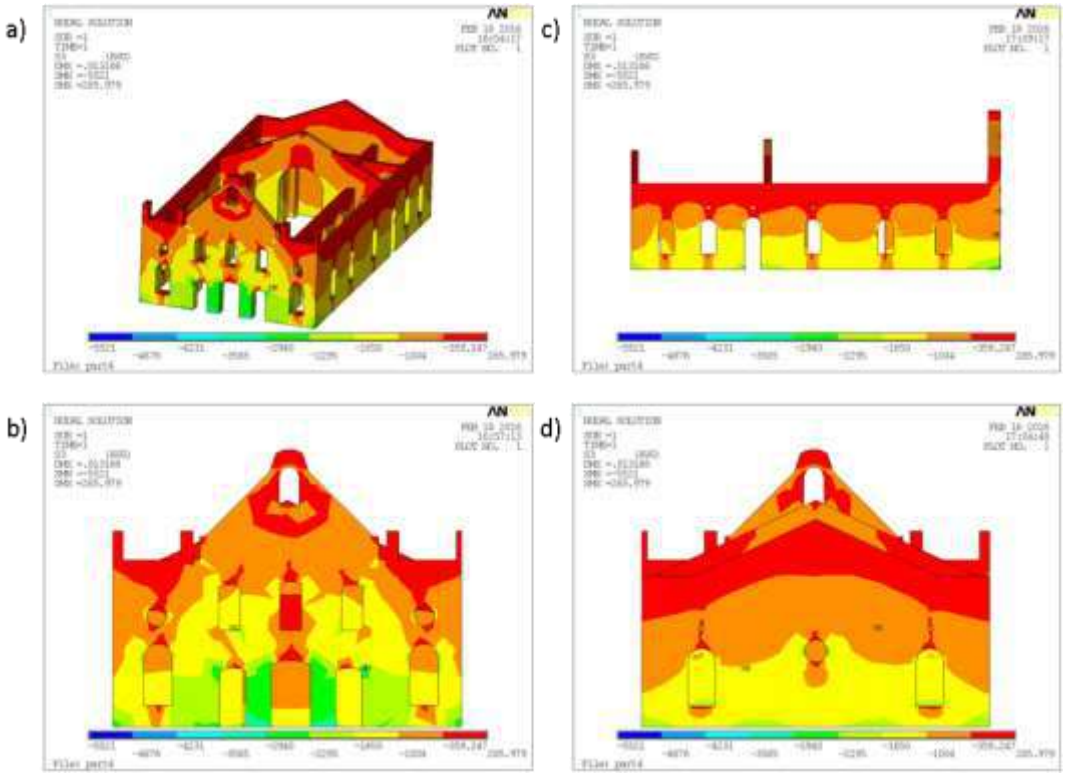


Figura 10: Tensões máximas de compressão (terceira tensão principal):(Unidades em kPa: a) Vista Geral; b) Fachada Frontal; c) Fachada Lateral; d) Fachada Posterior

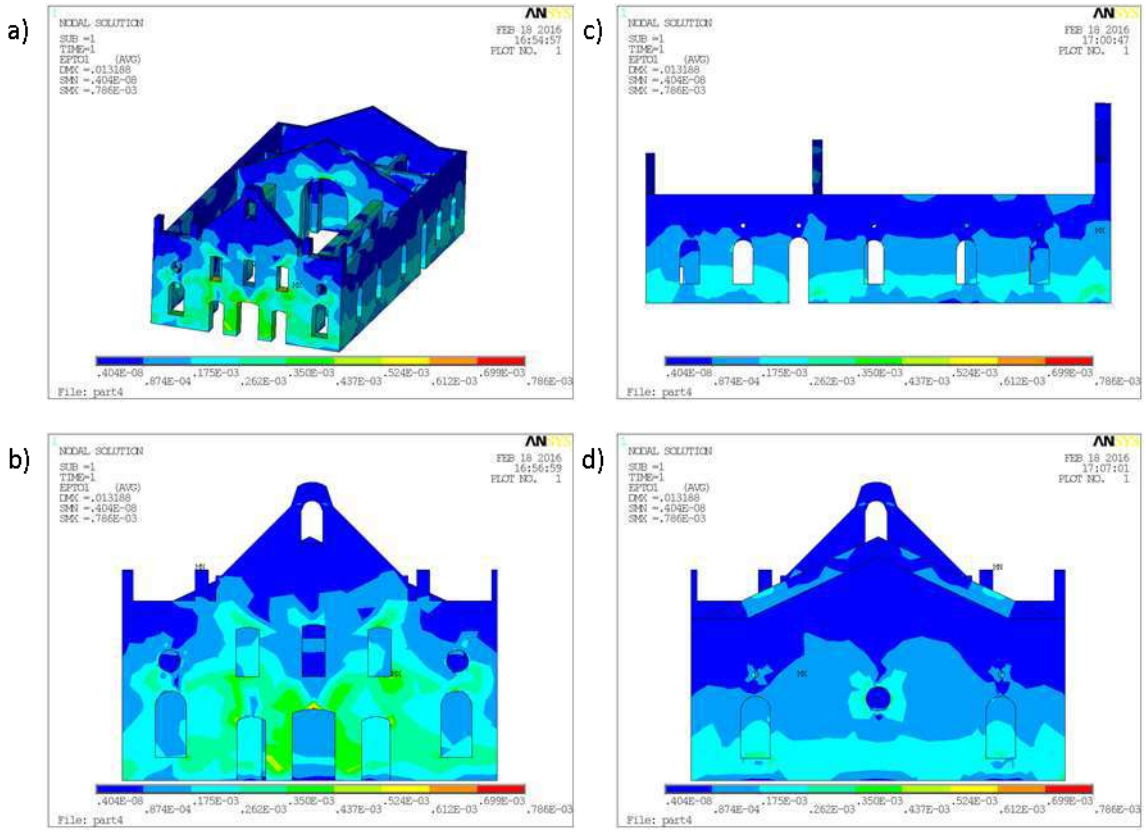


Figura 11: Primeira deformação principal (unidades em metro): a) Vista Geral; b) Fachada Frontal; c) Fachada Lateral; d) Fachada Posterior

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um análise estrutural da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos, situada em Sobral, uma edificação histórica do século XVIII. O estudo de edificações históricas envolve um grande numero de icógnitas tais como: propriedades dos materias, geometria da estrutura, danos, conexão entre elementos entre outros. Esta grande variedade de dados a serem investigados resulta em um processo multidisciplinar, complexo e oneroso, requerindo assim uma etapa de planejamento. Uma das etapas adequadas é a utilização de modelos simplificados, os quais podem oferecer indicações para melhorar a investigação *in situ* e propor soluções preliminares adequadas a investigação.

A análise estática mostrou que a configuração estrutural da igreja é adequada para suportar os efeitos do carregamento vertical (marjoritriamente peso próprio), o que é usual para prédios históricos de alvenaria. Foi possível também obsevar as regiões mais tensionadas da estrutura, além de sugerir as regiões mais vulneráveis. Em conclusão, esse tipo de analise é uma ferramente é eficiente para a contribuição ao estudo da conservação estrutural. Na qual é sugerida para uma grande variedade de edifícios patrimoniais, tenho em vista a sua adaptabilidade e eficácia.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

[1] P. B. Lourenço, "The ICOMOS methodology for conservation of cultural heritage buildings : concepts , research and application to case studies," in *International Conference on 13 Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historic Buildings and Structures.*, 2014.

[2] ICOMOS, "Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage." 2001.

[3] P. B. Lourenço, *Computational strategies for masonry structures*, vol. 70, no. 08. 1996.

[4] S. Ahmad, R. A. Khan, and H. Gupta, "Seismic Performance of a Masonry Heritage Structure," no. 4, pp. 335–340, 2014.

[5] P. B. Lourenço, K. J. Krakowiak, F. M. Fernandes, and L. F. Ramos, "Failure analysis of Monastery of Jerônimos, Lisbon: How to learn from sophisticated numerical models," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 14, no. 2, pp. 280–300, 2007.

[6] R. Cardoso, M. Lopes, and R. Bento, "Seismic evaluation of old masonry buildings . Part I : Method description and application to a case-study," vol. 27, pp. 2024–2035, 2005.

[7] R. Bento, M. Lopes, and R. Cardoso, "Seismic evaluation of old masonry buildings. Part II: Analysis of strengthening solutions for a case study," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 14, pp. 2014–2023, 2005.

[8] A. Taliercio and L. Binda, "The Basilica of San Vitale in Ravenna: Investigation on the current structural faults and their mid-term evolution," *J. Cult. Herit.*, vol. 8, no. 2, pp. 99–118, 2007.

[9] M. Betti, G. Bartoli, and M. Orlando, "Evaluation study on structural fault of a Renaissance Italian palace," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 7, pp. 1801–1813, 2010.

[10] M. Betti, M. Orlando, and A. Vignoli, "Static behaviour of an Italian Medieval Castle : Damage assessment by numerical modelling," *Comput. Struct.*, vol. 89, no. 21–22, pp. 1956–1970, 2011.

[11] SECULT, "Igreja de Nossa Senhora do Rosário." [Online]. Disponível: http://cultura.sobral.ce.gov.br/espaco/id:19/. [Acessado: 05-Jan-2016].

[12] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações." Rio de Janeiro, Brazil; 1980.

[13] IPHAN, "Inventário Nacional de Bens Brquitetônicos – IBA." Sobral, 2005.

[14] "Ansys Manual." [Online]. Disponível: http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-92.htm. [Acessado: 01-Jan-2016].