CBPAT 2020 ANAIS
CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
DE 15 A 17 DE ABRIL | FORTALEZA - CE
http://dx.doi.org/10.4322/CBPAT.2020.266
ISBN 978-65-86819-05-2

ANÁLISE NUMÉRICA DA IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO, ICÓ, CEARÁ

SOEIRO, MARCOS ANDREW RABELO
Professor, Mestre
UNIFOR/LAREB
Ceará; Brasil
marcos@duosestruturais.eng.br

FEITOSA, EDUARDO RICARTE
Aluno de Graduação
UNIFOR
Ceará; Brasil
eduardoricarte17@hotmail.com

PINTO, MARCELO FREIRES
Aluno de Graduação
UFC - Russas/LAREB
Ceará; Brasil
marcelofreires18@gmail.com

MESQUITA, ESEQUIEL FERNANDES
Professor, PhD
UFC – Russas/LAREB
Ceará; Brasil
emesquita@ufc.br

RESUMO

Muitos dos patrimônios materiais são edificações construídas décadas ou até mesmo séculos atrás e apresentam sinais visíveis de desgaste na sua estrutura, portanto, é de fundamental importância a preservação destes monumentos. O recurso da análise estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma excelente ferramenta de auxílio na avaliação do estado de segurança destas estruturas, uma vez que a partir desta ferramenta podem-se obter respostas estruturais da edificação. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise estrutural da Igreja de Nossa Senhora do Rosário, datada do século XIX, a fim de obter as respostas estruturais da Igreja, identificando as regiões da edificação que sofreram maiores deslocamentos nas três direções (X, Y e Z), aonde se concentraram as maiores tensões de tração e compressão, além da obtenção das frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. Os resultados deste trabalho contribuem para o entendimento do comportamento da estrutura da edificação, servindo de auxílio para futuras adoções de medidas de intervenção.
Palavras-chave: Análise estrutural, MEF, Icó, Dinâmica.

ABSTRACT

Many of the heritage constructions were built decades or even centuries ago and show visible signs of wear on their structure, so preserving these monuments is of fundamental importance. Structural analysis via Finite Element Method (FEM) is an excellent tool to help assess the safety status of these structures, since from this tool structural responses of the building can be obtained. Thus, the objective of this work is to performe a structural analysis of the Church of Our Lady of the Rosary, dated from the XIX century, in order to obtain the structural responses of the Church, identifying the regions of the building that suffered major displacements in the three directions (X, Y and Z), where the highest tensile and compressive stresses were concentrated, besides obtaining the natural frequencies and their respective modes of vibration. The results of this work contribute to the understanding of the behavior of the building structure, serving as an aid for future interventions.
Keywords: Structural analysis, FEM, Icó, Dynamic.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Lourenço (LOURENÇO, P. B., 2014) edifícios históricos desempenham grande importância perante a sociedade, pois além de evidenciarem a história do desenvolvimento de um povo também possuem valor documental, por se tratar de um elemento físico, merecendo assim, sua proteção.

Baseadas nesse conceito de preservação, muitas ações vêm sendo propostas pelo IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional), orgão responsável pelo tombamento destes edifícios à nivel nacional, em parceria com estados e municípios, a fim de permitir que comunidades descubram o valor do seu patrimônio histórico e os transforme em polos de atividades culturais, turísticas e de geração de emprego.

Porém, grande parte dos patrimônios materiais tombados são edificações construídas há vários anos, por isso demonstram em sua estrutura visíveis sinais de desgaste causados por intempéries ambientais ou falta de manutenção adequada, aliados ao fato de que na época de suas construções, os materiais e o controle tecnológico eram de origem

ISBN 978-65-86819-05-2

duvidosa, além de a mão de obra, escrava muitas vezes, não era treinada para realizar tais serviços. (FEITOSA, 2018) (ARAÚJO, 2018)

Tais desgastes comprometem o funcionamento adequado da estrutura, a tornando vulnerável, podendo levá-la à ruína caso não seja feita nenhuma intervenção na edificação. Sabendo da importância e necessidade da conservação destes bens, foram estabelecidos em 2003, pelo ICOMOS (Conselho Internacional de Monumentos e Sítios), princípios a serem seguidos durante a análise estrutural, necessários para a conservação das construções históricas. (ICOMOS, 2003)

Um dos primeiros pontos abordados por (ICOMOS, 2003), está relacionado à caracterização estrutural da edificação, que possui grande relevância no processo de conservação. Segundo (SOEIRO, Marcos Andrew e ARAÚJO e colab., 2019) para a etapa de caracterização estrutural, busca-se maiores informações sobre o funcionamento estrutural e sobre as propriedades resistentes dos materiais da construção histórica que serão usados como base para a modelagem numérica do edifício. Sendo assim, (ICOMOS, 2003) sugeriu que essa etapa fosse dividida em três subgrupos, nomeadamente: caracterização do material, a caracterização de danos e caracterização geométrica.

A caracterização do material, seria o mais difícil de ser realizado, pois seriam necessários a utilização de ensaios em campo, de preferência não destrutivos (END), como, por exemplo, o método ultrassônico, onde são coletadas as velocidades ultrassônicas e, a partir delas, obtido o módulo de elasticidade. Segundo (ALVES e colab., 2016), as propriedades obtidas por estes ensaios são, por muitas vezes, o módulo de elasticidade e as tensões resistentes do material. Quando não se é possível obter os valores dos parâmetros experimentalmente, usualmente utiliza-se ou de tabelas fornecidas em normas técnicas, como a NTC (Norme Tecniche per le Costruzioni) de 2008.

No caso das alvenarias, a determinação destas propriedades é mais difícil e complexa, uma vez que são estruturas compostas por diferentes materiais, sendo considerado como um material heterogêneo, anisotrópico e descontínuo, essencialmente devido aos seus diferentes tipos de componentes, dificultando assim, a determinação de suas propriedades através de representações numéricas (PELETEIRO, 2002)(BRANDÃO, 2016).

Já na caracterização de danos, é feita a identificação da natureza dos danos (fissuras, corrosão, deslocamentos etc.), a sua localização nos elementos estruturais e a caracterização da sua intensidade (BEZERRA, 2018). E para finalizar a etapa de modelagem numérica, temos a caracterização geométrica, que é definida como a modelagem da construção histórica com todos os detalhamentos dos elementos componentes do sistema estrutural

Tais etapas são necessárias para se obter um modelo numérico que represente adequadamente o comportamento da estrutura, pois tal modelo servirá de base para as análises computacionais, estáticas e/ou dinâmicas, nas quais obteremos as respostas estruturais da edificação, tais como: deformações e deslocamentos, tensões máximas e mínimas, além de suas frequências naturais e modos de vibração.

A Igreja de Nossa Senhora do Rosário (Figura 1), localizada no município de Icó, Estado do Ceará, é umas das edificações que necessitam destes cuidados, sendo escolhida como estudo de caso para a realização de sua caracterização estrutural.

A Igreja de Nossa Senhora do Rosário, foi construída em 1828 na parte setentrional da vila pela sociedade colonial, a exemplo de muitas outras cidades brasileiras, no fim das ruas Dr. Inácio Dias e General Pirangibe. Naquele período, a segregação social dos indivíduos de classes menos favorecidas, que eram considerados desprezíveis e tratados como simples objetos, em relação aos mais abastados, era comum. (LIMA, 1995)

Portanto, a importância histórica dessa edificação está intimamente ligada à religiosidade dos negros, que tinham a Virgem do Rosário como protetora. Este local era considerado o lugar de refúgio dos homens pardos, pois devido à discriminação racial ostensivamente declarada na época era naquele templo religioso, e somente nele, que os negros escravos podiam assistir aos atos religiosos. Tal era o preconceito racial que a referida Igreja era chamada de Igreja dos Escravos, posteriormente Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pardos. (VIANA, 2011)

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma caracterização estrutural, estática e dinâmica, além de reunir dados históricos relevantes para a sua conservação, de forma a entender o estado atual da edificação, e contribuir assim com o meio tecno científico.

ISBN 978-65-86819-05-2



Figura 1: Igreja de Nossa Senhora do Rosário (FEITOSA, 2018)

2. ANÁLISE NUMÉRICA DE EDIFICAÇÕES EM ALVENARIA

As análises estruturais são excelentes ferramentas de auxílio para caracterização estrutural de uma edificação, sendo esta, a idealização do comportamento da estrutura, que pode ser expresso por diversos parâmetros, tais como pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura, assim como frequências naturais e modos de vibração. De uma maneira geral, a análise estrutural tem como objetivo a determinação de esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), e das correspondentes tensões, bem como a determinação dos deslocamentos e correspondentes deformações da estrutura. (MARTHA, 2010)

Dentre os métodos numéricos utilizados para a realização da análise estrutural, se encontra o MEF (Metódo dos Elementos Finitos), que devido aos avanços computacionais se tornou uma importante ferramenta para caracterização estrutural. De acordo com (SOEIRO, M. A. R., 2012), o método consiste em criar um modelo estrutural no computador e dividir esse modelo em uma malha com pequenos elementos finitos, nos quais são baseados em teorias estruturais, como a teoria das vigas, e formulações matemáticas apropriadas. Assim, para cada caso de análise poderá ser empregado um elemento finito apropriado, como os mostrados na Figura 2.

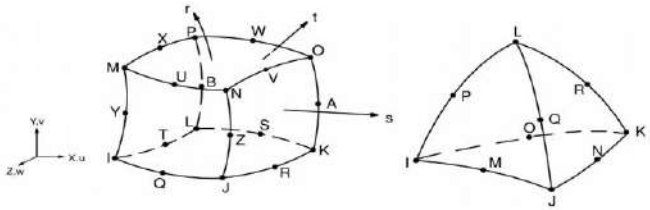

Figura 2: Elemento finito poliédrico de 20 nós (esquerda) e elemento finito tetraédrico de 10 nós (direita) (ANSYS, 2016)

Neste trabalho foram realizados as análises estruturais estática linear e modal, cabendo um embasamento teórico mais detalhado.

Segundo (NÓBREGA e HANAI, 2005) a análise modal é definida como um processo de técnicas teóricas e experimentais, que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo que simula o comportamento dinâmico da estrutura em estudo, com o intuito de calcular os seus parâmetros modais, nomeadamente, as frequências naturais, os modos de vibração e os fatores de amortecimento modal.

As frequências naturais representam a taxa de oscilação livre, ou seja, o quanto a estrutura vibra após cessada sua excitação, sendo a frequência natural mais importante, já que a estrutura pode vibrar em várias direções, a primeira, menor entre todas, denominada frequência fundamental. Já os modos de vibração caracterizam como a estrutura vibra, a partir de cada frequência natural. Por último, o amortecimento é a propriedade interna de dissipar energia, em outras palavras, é o fenômeno que dissipará a energia cinética inerente ao movimento da estrutura após posta a vibrar (NÓBREGA e HANAI, 2005)(BRANDÃO, 2016)(SOEIRO, Marcos Andrew e ARAÚJO e colab., 2019).

No entanto, para que a modelagem numérica e as análises estruturais, sejam realizadas, precisamos caracterizar o material. Segundo (AZEVEDO, 2016), algumas propriedades do material devem ser conhecidas, tais como, o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (v), que permitem estimar a rigidez dos elementos estruturais, além de sua deformabilidade e distribuição de esforços, e o peso específico (w) do material, que permite realizar o cálculo da parcela de carga correspondente ao peso próprio.

ISBN 978-65-86819-05-2

Em relação a representação numérica da estrutura da Igreja, que no caso é constituida de paredes de alvenaria sólidas com grandes dimensões, garantindo adequadamente a distribuição de tensões uniformemente, (LOURENÇO, Paulo B, 1996) aconselha a utilização da macromodelagem, por se mostrar mais prática, reduzindo o custo computacional na análise. Na macromodelagem, os blocos de alvenaria e a argamassa são representados como um único elemento contínuo.

Ainda de acordo com (LOURENÇO, Paulo B, 1996), outras duas formas de representação numérica podem ser realizadas, como a micromodelagem detalhada, onde os blocos e a argamassa são representados como elementos contínuos e separados, e a interface bloco-argamassa como um elemento descontínuo e a micromodelagem simplificada, onde as unidades são compostas pelo bloco e a argamassa em volta dele juntos, e o comportamento das juntas entre as unidades como um elemento descontínuo.

As três formas de representação numérica de alvenarias são mostradas na Figura 3.

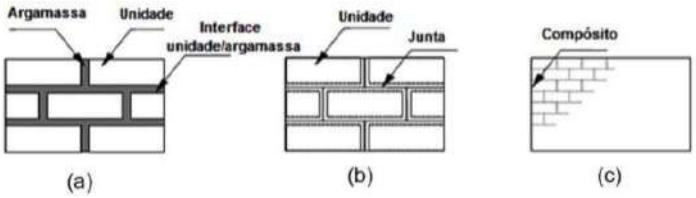

Figura 3: Técnicas de modelagem: (a) micro modelagem detalhada; (b) micro modelagem simplificada; (c) macro modelagem (LOURENÇO, Paulo B, 1996)

3. CARACTERIZAÇÃO DA IGREJA DO ROSÁRIO

Segundo (SOEIRO, Marcos Andrew e FEITOSA e colab., 2019), a Igreja de Nossa Senhora do Rosário integra um dos mais de 300 imóveis tombados como patrimônio histórico pelo IPHAN, pertencentes ao Conjunto Arquitetônico e Urbanístico de Icó, Ceará. É uma edificação que se destaca por ser um dos monumentos mais antigos da cidade, construída em 1828 pela sociedade colonial do Icó que tinha grande fervor católico. Além disso, tem uma importância histórica relevante, pois somente nela que os negros escravos podiam assistir aos atos religiosos (LIMA, 1995).

Portanto, a importância histórica dessa edificação está intimamente ligada à religiosidade dos negros, que tinham a Virgem do Rosário como protetora. Este local era considerado o lugar de refúgio dos homens pardos, pois devido à discriminação racial ostensivamente declarada na época era naquele templo religioso, e somente nele, que os negros escravos podiam assistir aos atos religiosos. Tal era o preconceito racial que a referida Igreja era chamada de Igreja dos Escravos, posteriormente Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pardos (VIANA, 2011).

De acordo com (SOEIRO, Marcos Andrew e FEITOSA e colab., 2019), o templo possui três naves e na nave central está o altar principal, que guarda imagens como a de Santa Luzia, São Benedito e Nossa Senhora da Apresentação, além da imagem principal de N. Sra do Rosário. A Igreja possui um cruzeiro à sua frente e sua fachada é composta por duas torres, uma de cada lado, sendo a sineira à sua esquerda, medindo cerca de 24m de altura, base quadrada e terminação piramidal, também quadrada (Figura 4). As três portas principais, correspondentes à nave central, são almofadadas e as superiores são guarnecidas por balcões de ferro e os vãos das portas principais possuem arco. Os frontões das áreas correspondentes às circulações lateral direita e esquerda são triangulares, com cimalhas encurvadas e alteadas, volutas e coruchéus diversos.

A Figura 5 mostra a planta baixa do pavimento térreo da Igreja, que possui 30,89m de comprimento e 17,24m de largura, e está dividida em 10 ambientes. A partir do átrio (A), encontramos logo à sua frente a nave principal (C) ladeada por duas naves laterais (D e E).

Cada uma dessas naves é separada por quatro aberturas em forma de arco assentes em pilares, além de portas e janelas que dão acesso ao exterior. O coro (B), construído em madeira, fica localizado logo na entrada da nave principal (C), com acesso por meio de uma escada de madeira na nave lateral esquerda (D), onde também fica localizada a torre sineira. À frente da nave principal encontra-se o altar ladeado por duas alas (também chamadas de braços).

ISBN 978-65-86819-05-2

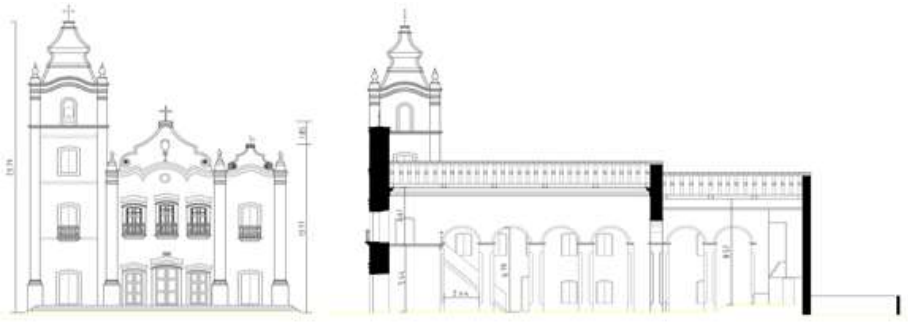

Figura 4: Fachada frontal e corte lateral

No braço esquerdo (H) fica localizado o altar do santíssimo e no direito (i) a sacristia com um banheiro. Logo atrás do altar (F) está o depósito (G), onde ficam guardados utensílios históricos utilizados nas celebrações. Há ainda um cemitério (J), que fica atrás do depósito e das duas alas, separado por uma parede com apenas um acesso, pelo braço direito.

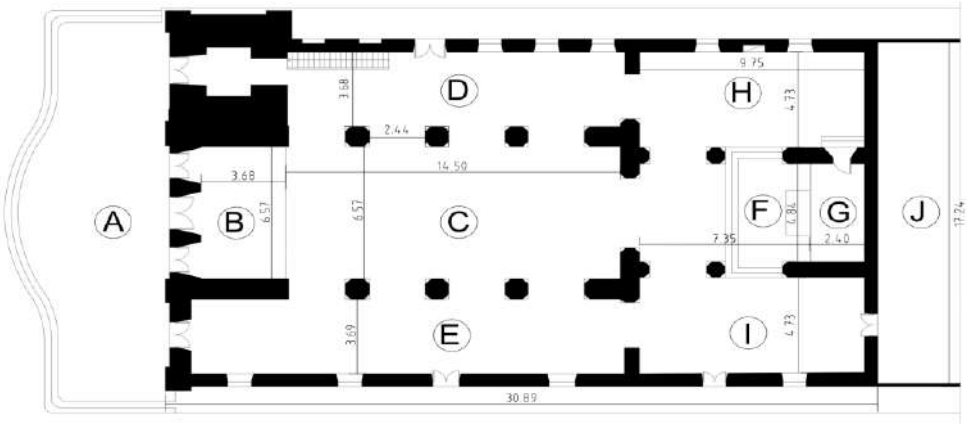

Figura 5: Planta baixa

A estrutura da igreja é composta por alvenaria de tijolos maciços com espessuras variando entre 56cm e 100cm em todo o corpo da Igreja, e 218cm na base da torre sineira, e foi construída utilizando-se técnicas construtivas locais com os materiais disponíveis na época, sendo o ajuste comum, o tipo de amarração utilizado.

4. MODELO NUMÉRICO

Um modelo tridimensional utilizando o software Ansys® foi construído a partir do levantamento geométrico realizado "in loco" e com base em diversos desenhos em formato cad elaborados pelo IPHAN, que prontamente nos disponibilizou. Procurou-se, durante a criação do modelo, seguir fielmente as características geométricas extraídas das plantas de arquitetura e visualizadas "in loco". Entretanto, alguns elementos tiveram sua representação simplificada no modelo, como os detalhes arquitetônicos ao redor das portas, na região superior da fachada frontal e da torre sineira, por exemplo, pois além de serem formas bastante complexas de se modelar, julgou-se que sua influência na análise seria irrelevante. A cobertura, o elemento espacial da torre e a laje do coro também não foram modelados, porém, tiveram suas massas estimadas e consideradas na análise.

A Igreja possui estrutura formada por blocos cerâmicos e argamassa, dois elementos com comportamentos e propriedades mecânicas distintas, cuja interação entre eles é bastante complexa para a modelagem numérica. O modelo foi discretizado em uma malha de 500mm (Figura 6).

Utilizou-se como elemento o SOLID 187, um tetraédrico de 10 nós com 3 graus de liberdade cada nó. A modelagem considerou que a base da igreja é engastada no solo, e desta forma, depois da discretização foram obtidos 115.179 elementos e 194.714 nós.

ISBN 978-65-86819-05-2

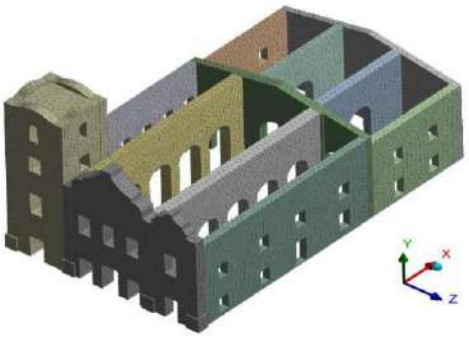

Figura 6: Modelo numérico discretizado

4.1 Propriedades do material

Como não foi possível, por ora, a realização de algum ensaio não destrutivo que nos pudesse fornecer as propriedades do material de forma mais consistente, recorreu-se à literatura para estimar as propriedades mecânicas da alvenaria. Consultou-se a (MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE, 2008) de onde obteve os valores do módulo de elasticidade (E) e peso específico (w), e a resistência à compressão (f_c), já para o coeficiente de Poisson (ν), seguiu-se os valores adotados por (BRANDÃO, 2016) e para a resistência à tração (f_t) os valores adotados por (DELGADO, 2013). Tais valores estão apresentados na Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades mecânicas adotadas no modelo numérico

E (GPa)	w (tf/m³)	ν	f_c (MPa)	f_t (MPa)
1.5	1,8	0.2	3.2	0.16

4.2 Carregamentos adotados para análise estática linear

Para a realização da análise estática linear, o carregamento acidental referente a escada que fica localizada na torre lateral da edificação foi estabelecido, conforme as recomendações da (ABNT, 1980), como sendo o mínimo para cargas desta natureza (0,25tf/m²), assim como, para efeitos de carregamento permanente (revestimento e peso próprio), foi atribuído uma carga de revestimento no valor de 0,13tf/m² e um peso específico de 2,5tf/m³ para o material da escada (concreto armado), de acordo com a (ABNT, 1980). Toda a carga da escada foi distribuída uniformemente nas quatro paredes da torre lateral.

Já em relação ao assoalho de madeira (coro), que fica localizado atrás da fachada frontal Sul, foi adotado um carregamento acidental de 0,2 tf/m², assim como um peso específico igual a 0,5 tf/m³, levando em consideração que este foi executado em madeira do tipo Pinho. Toda a carga do coro foi posteriormente descarregada nas suas paredes de apoio.

O carregamento utilizado para o forro das cobertas, feito em lambri de madeira de lei encerada, foi de 0,06 tf/m², o mesmo utilizado por (EDUARDO e BRANCO, 2007) em seu trabalho. Já a carga referente ao peso próprio da coberta foi de 0,13 tf/m², obtido do trabalho de (NEVES, 2008) já levando em consideração todos os componentes da cobertura (ripas, telhas, caibros e treliças). Somando estas duas parcelas, o resultado do carregamento permanente é de 0,19 tf/m².

Já para o carregamento acidental, como não há nenhuma recomendação da ABNT em relação a sobrecarga para cobertas, neste trabalho decidiu-se utilizar uma carga de 0,05 tf/m².

Acima da torre sineira existe um elemento espacial, no qual possui aproximadamente um volume 13,4m³, que devido sua complexidade arquitetônica, não foi modelado, todavia, sua carga foi considerada, partindo que o elemento espacial é feito todo em concreto, e adotando o peso específico (w) de 2,5 tf/m³, totalizou-se uma carga aplicada pontualmente na laje de topo da torre de 33,5tf.

No Quadro 2 estão representados os carregamentos aplicados ao modelo numérico, exceto os valores do peso-próprio da estrutura, que pode ser obtido através da utilização dos peso específicos de seus correspondentes materiais e as medidas dos elementos.

ISBN 978-65-86819-05-2

Quadro 2 – Carregamentos adotadas no modelo numérico

Elemento	Carga permanente (kN/m²)	Carga acidental (kN/m²)	Peso Específico (kN/m³)
Escada	1,3	2,5	25,0 (concreto)
Forro + Cobertura	0,19*	0,5	0,0*
Assoalho (coro)	0,0	2,0	5,0 (pinho)
Torre	0,0	0.0	25,0 (concreto)

(* o valor de 0,19 já contempla o peso próprio da coberta, pois foi adotado de acordo com NEVES, 2008, não sendo necessário o uso do peso específico para cálculo de tal valor).

4.3 Massas adotadas para análise modal

Como se trata de uma análise modal, a consideração de cargas não se aplica, pois não teria influência alguma nos resultados, sendo de importância a aplicação das massas referentes apenas ao peso próprio dos elementos. Sendo assim, para a consideração das massas referentes à da laje do coro, das coberturas, formada pelo madeiramento (ripas, caibros e tesouras) e as telhas cerâmicas, da escada e da torre, foram consideradas os valores de peso específico constantes do Quadro 2. Assim, o Quadro 3 apresenta os valores destas massas estimadas.

Quadro 3 – Massas adotadas no modelo numérico

Elemento	Massas (kg)
Coro	1910
Cobertura + Forro	94750
Escada	1150
Torre	33500

5. RESULTADOS

5.1 Análise modal

Uma vez realizada a análise modal, os 20 primeiros modos de vibração com suas respectivas frequências e períodos foram obtidos, juntamente com a porcentagem de massa modal efetiva para cada modo de vibração da Igreja do Rosário (Quadro 4). Nas direções X, Y e Z, a soma das massas modais efetivas para estes 20 primeiros modos, foram de 59.22%, 0.02% e 67.06%, respectivamente. Sendo assim, a direção Z apresenta as maiores porcentagens, demonstrando uma grande influência nas deformações modais nesta direção, como podemos observar na Figura 7, onde os 20 primeiros modos possuem deformações em Z muito maiores que nas demais direções, sendo o modo 2 (Figura 8B) o com maior valor de massa modal efetiva, aproximadamente 16.52%.

O eixo X também possui uma certa influência nos modos de vibração, sendo o modo 5 (Figura 8E) e o modo 10 (Figura 9B), com 19.1% e 11.55%, respectivamente, os modos com maiores massas modais efetivas, o equivalente a aproximadamente metade de toda a massa modal efetiva nesta direção.

Já na direção Y, a massa modal efetiva foi aproximadamente zero, não gerando influência alguma nos modos de vibração da estrutura.

A partir da análise do Quadro 4, verifica-se que conforme aumentamos o número de modos de vibração, as frequências aumentam e os períodos diminuem proporcionalmente.

A frequência natural mais importante é a primeira, menor entre todas, designada por fundamental, no valor de 1.982Hz, sendo importante ressaltar que, em estruturas convencionais, a primeira frequência é sempre a mais preponderante ao movimento oscilatório, e caso a frequência de excitação do ambiente, como sismos e vento, iguale esta frequência podemos ter o fenômeno da ressonância, que pode levar a estrutura à ruína.

Analisando os 6 primeiros modos de vibração da Igreja do Rosário (Figura 8), evidencia-se que as alvenarias laterais externas e as das aberturas dos arcos da nave central, tem seus deslocamentos excitados para todos os 6 modos de

ISBN 978-65-86819-05-2

vibração. A torre possui deslocamentos para o 4°, 5° e 6° modos. A fachada frontal teve seus deslocamentos excitados apenas nos dois últimos, 5° e 6° modos de vibração.

Quadro 4 – Respostas modais

Modo	Frequência	Período	Massa modal efetiva		
	f (Hz)	*T (s)*	U_x (%)	U_y (%)	U_z (%)
1	1,982	0,504	0,003	0,000	6,846
2	2,454	0,407	0,104	0,000	16,581
3	2,812	0,355	0,076	0,000	5,537
4	3,235	0,309	6,028	0,008	13,519
5	3,290	0,303	19,101	0,004	2,098
6	3,675	0,272	9,119	0,001	2,374
7	4,135	0,241	0,176	0,001	13,580
8	4,297	0,232	1,485	0,000	0,053
9	4,809	0,207	1,952	0,000	0,149
10	4,971	0,201	11,547	0,000	0,614
11	5,245	0,190	4,538	0,000	0,077
12	5,410	0,184	0,258	0,000	0,112
13	5,758	0,173	0,249	0,000	1,130
14	6,144	0,162	0,941	0,000	0,092
15	6,443	0,155	0,001	0,001	1,019
16	7,005	0,142	1,134	0,000	0,174
17	7,105	0,140	0,010	0,001	0,544
18	7,278	0,137	0,196	0,000	0,460
19	7,603	0,131	0,969	0,000	0,044
20	7,761	0,128	1,331	0,003	2,059

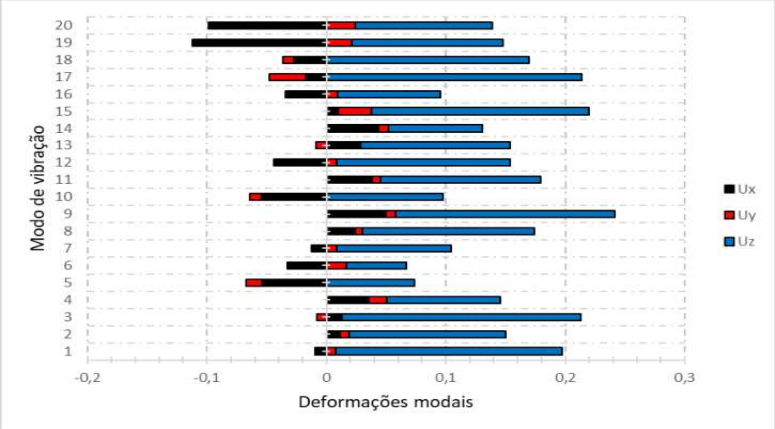

Figura 7: Deformações modais nos eixos X, Y e Z

Logo, as paredes da nave central e as laterais externas, além da torre, foram os elementos que apresentaram a maior vulnerabilidade aos deslocamentos, principalmente devido as grandes aberturas em arcos e a altura livre da torre, que aumentam consideravelmente a esbeltez deles.

Analisando as maiores deformações modais, observa-se que os maiores valores foram encontrados na direção de Z, referentes aos modos 17 (Figura 9D), 3 (Figura 8C), 1 (Figura 8A), 9 (Figura 9A) e 15 (Figura 9C), respectivamente com os valores de 0.213, 0.20, 0.189, 0.183 e 0.182.

A parede lateral externa direita da Igreja foi solicitada isoladamente, nos modos 3 e 17, enquanto a parede lateral externa esquerda foi solicitada isoladamente pelos modos 1 e 15.

Na direção X, as maiores deformações modais foram referentes aos modos 19 (Figura 9E) e 20 (Figura 9F), com valores de 0.112 e 0.098, respectivamente, ambos com os menores períodos.

ISBN 978-65-86819-05-2

Os modos 5 (Figura 8E), 6 (Figura 8F) e 10 (Figura 9B), foram os modos que solicitaram todas as paredes simultaneamente, sendo inclusive, os três modos com mais participação nas massa modais efetivas na direção X.

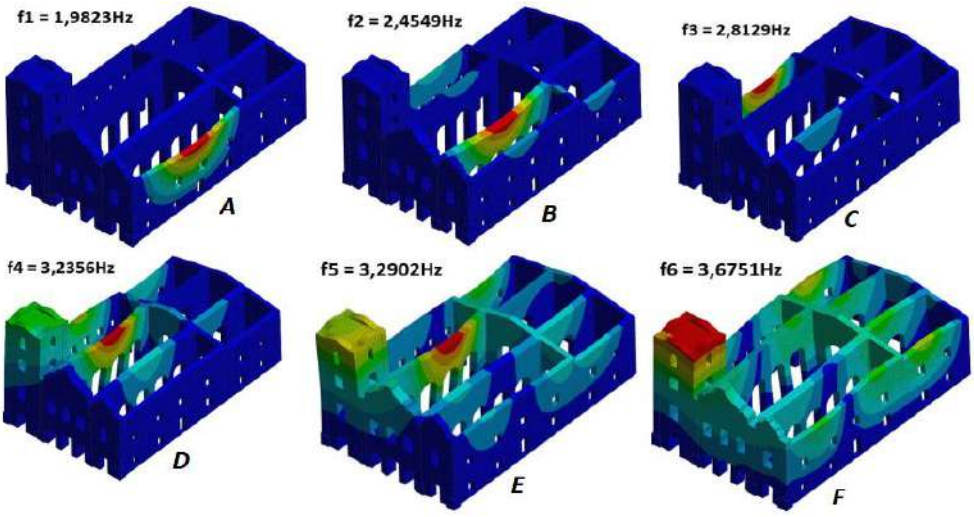

Figura 8: Modos de vibração: (A) 1° modo, (B) 2° modo, (C) 3° modo, (D) 4° modo, (E) 5° modo, (F) 6° modo

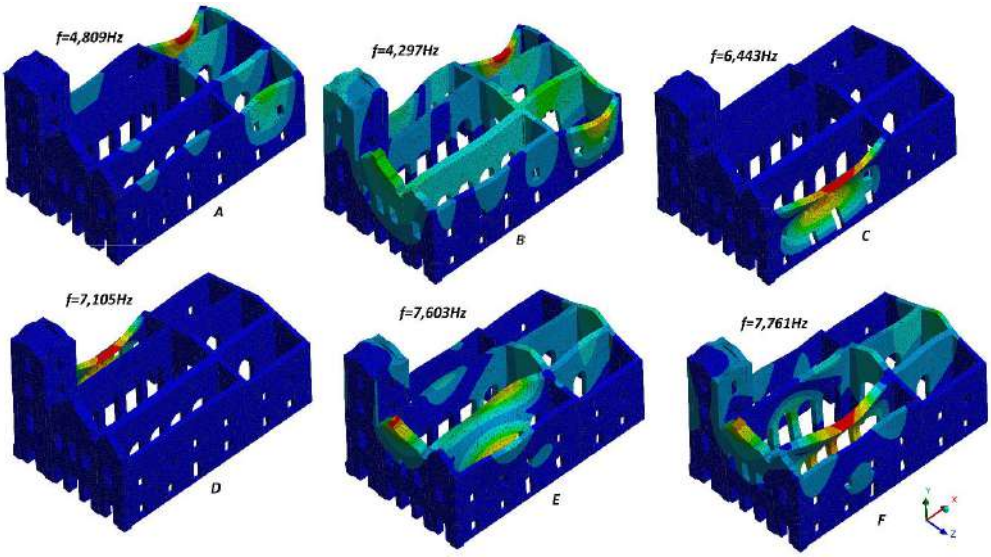

Figura 9: Modos de vibração: (A) 9° modo, (B) 10° modo, (C) 15° modo, (D) 17° modo, (E) 19° modo, (F) 20° modo

5.2 Análise estática

O desempenho estático da Igreja de Nossa Senhora do Rosário, quando submetida apenas a ação de suas cargas permanentes, eventuais sobrecargas adicionadas e da força da gravidade, será ilustrado em função de seus deslocamentos direcionais, que indicam a direção das deformações da edificação em relação ao sistema de eixos adotados no modelo numérico em 3D. Analisando a Figura 10A, que representa os deslocamentos na direção X, pode-se observar que o valor do deslocamento máximo para o sentido positivo desta direção é 0,236 mm e ocorre na parede central esquerda. Já no sentido negativo de X, constata-se que o maior deslocamento, em módulo, está localizado no lado direito do topo da torre e tem valor de aproximadamente 0,562 mm. Na mesma torre pode-se verificar que logo a partir das aberturas os deslocamentos variam de 0,207 a 0,562 mm

Os deslocamentos na direção Y vertical apresentadas na Figura 10B, nos mostram que os deslocamentos na direção Y positiva, ou seja, para cima, são praticamente nulos pois todas as cargas são aplicadas no sentido contrário e portanto, não acarretam em deslocamentos positivos. Além disso, considerou-se que a base da igreja é engastada ao solo, fato que contribui para que os deslocamentos sejam nulos. Porém, para os deslocamentos no sentido negativo do eixo Y, ou seja,

ISBN 978-65-86819-05-2

para baixo, verifica-se um valor máximo, em módulo, de aproximadamente 2,268mm no topo da torre lateral, mostrando assim que a torre foi novamente o elemento que sofreu mais deslocamentos. Podemos destacar ainda que esta direção foi a que apresentou os maiores deslocamentos direcionais, em módulo.

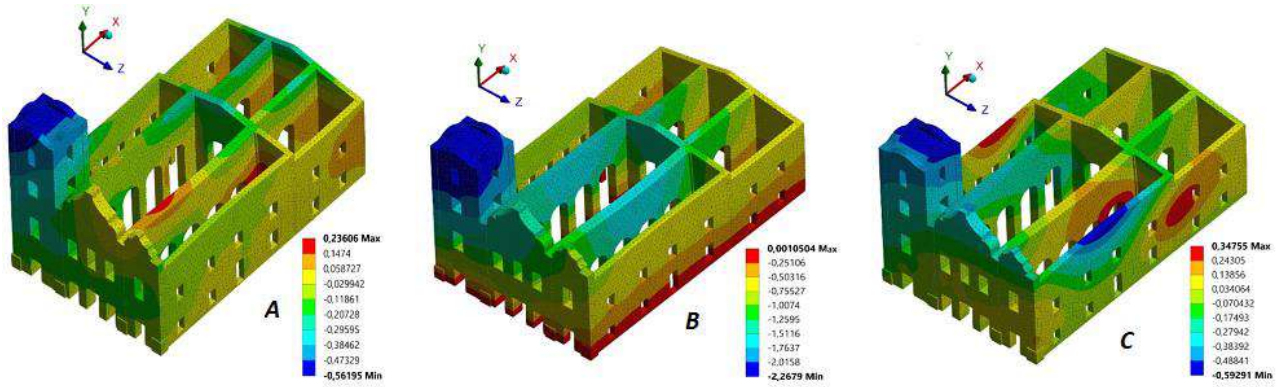

Figura 10: Deslocamento direcional no eixo X (mm)

Os deslocamentos na direção Z horizontal, ilustrados na Figura 10C, demonstram que o maior valor no sentido positivo deste eixo acontece em locais variados e, é de aproximadamente 0,348mm. As regiões onde se observa estes valores máximos são: parede lateral esquerda, parede central esquerda e parede lateral direita. Já na direção Z negativa o pico de deslocamentos é de aproximadamente 0,593mm e ocorre no topo da parede lateral esquerda. A torre lateral também sofre grandes deslocamentos nesta direção que chegam, em módulo, a 0,550mm.

O deslocamento total na estrutura da edificação em questão é vista na Figura 11 a seguir, na qual se identifica que o maior deslocamento ocorre no topo da torre lateral, principalmente em sua parte frontal, e equivale a aproximadamente 2,375mm. Além disso, podemos observar que em boa parte da construção os deslocamentos evidenciados são muito pequenos e portanto não comprometem a estabilidade da estrutura

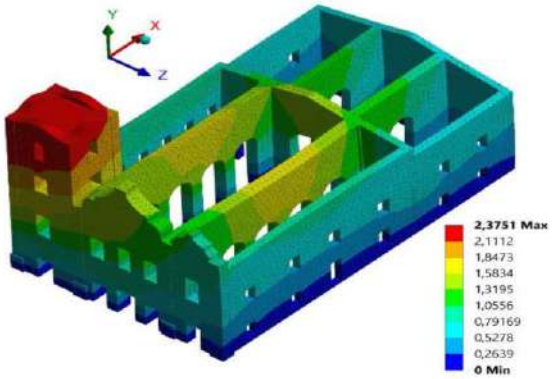

Figura 11: Deslocamento total (mm)

A Figura 12 apresenta as tensões normais máximas e mínimas atuantes na Igreja de Nossa Senhora do Rosário. Nela podemos verificar que os maiores valores de tração são registrados na fachada frontal, mais precisamente na parte inferior das aberturas das janelas, e corresponde a aproximadamente 0,177MPa. Essa tensão de tração é cerca de 10% superior ao valor utilizado como admissível para este modelo numérico (0,16MPa). Devido ao fato da tensão de tração encontrada na simulação ter sido maior do que a resistência a tração considerada no modelo, estas regiões estariam sujeitas ao risco de ruptura por tração excessiva, porém, não foi constatada nenhuma patologia (fissura) nestes pontos durante a visita feita à Igreja no dia 26 de outubro de 2018. Além disso, podemos observar ainda na Figura 12 que a região mais comprimida se localiza na torre lateral e seu valor máximo é de 0,77MPa. Esse valor é quase 76% inferior a tensão de resistência a compressão da alvenaria considerada neste modelo numérico (3,20MPa), portanto quanto à tensão de compressão não há nenhum risco de ruptura.

ISBN 978-65-86819-05-2

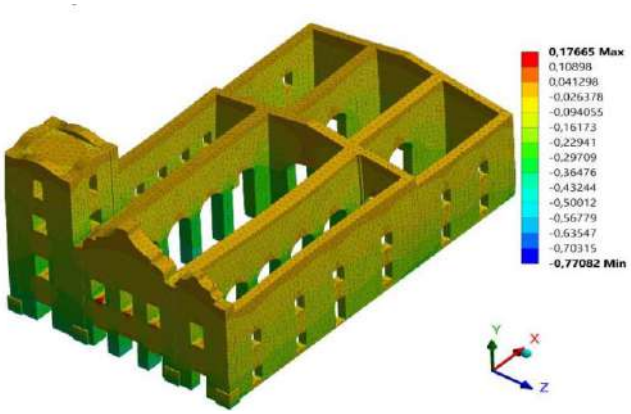

Figura 12: Tensões normais

6. CONCLUSÕES

A Igreja de Nossa Senhora do Rosário é um monumento valiosíssimo para a população de Icó em vários aspectos, como histórico, arquitetônico, cultural e religioso. Sendo assim, buscou-se neste trabalho simular através de um modelo numérico o comportamento dinâmico da estrutura. Porém, devido à escassez de dados, não foi possível determinar as propriedades mecânicas da alvenaria que compõe a estrutura, recorrendo-se então a literatura para estimar tais valores.

Com as plantas geométricas obtidas e visita técnica realizada, foi possível realizar uma modelagem em 3D quase que fiel a estrutura, garantindo-se assim maior exatidão nos resultados.

Na análise modal verificou-se que grande parte da massa da Igreja é deslocada no sentido de Z, devido à falta de travamento neste sentido, com uma outra parte no sentido de X, mas na direção de Y nenhuma massa se desloca.
Verificou-se que os 6 primeiros modos de vibração são os principais para análise, pois eles possuem os maiores períodos e solicitam os elementos mais esbeltos da estrutura com frequência, como a torre, as paredes laterais externas e as internas com os arcos, sendo estes os principais elementos a serem analisados numa possível intervenção futura.

Em relação a análise estática, verificou-se que todos os deslocamentos ocorridos possuem ordem de grandeza pequenas em relação ao tamanho da Igreja, tendo como maior deslocamento o valor de 2,268mm na torre sineira, elemento este que nas três direções possui os maiores deslocamentos. Em termos de tensão de compressão, a segurança da Igreja está garantida, pois as tensões encontradas são muito menores à resistente, porém, em termos de tensão de tração, as aberturas de janelas da fachada central, apresentaram valores próximos maiore que a tensão resistente.

No seguimento deste este trabalho, sugere-se para trabalhos futuros que sejam feito um ensaio não destrutivo pelo método de vibração ambiental e/ou ultrassom, a fim de se obter/estimarem as frequências naturais da estrutura, possibilitando assim uma calibragem numérica do modelo para que sejam encontradas as propriedades mecânicas reais da alvenaria utilizada na estrutura da Igreja.

Por fim, conclui-se que a utilização da análise numérica como ferramenta de suporte à segurança estrutural dos patrimônios históricos apresenta resultados bastante satisfatórios, permitindo identificar regiões de vulnerabilidade e o comportamento global da estrutura, auxiliando em tomada de decisões para futuras intervenções que possam contribuir na preservação das construções.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6120 Cargas para o cálculo de estruturas de edificações NBR 6120 Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. . [S.l: s.n.]. , 1980

ALVES, André e colab. **Estimativa do módulo de elasticidade global de uma edificação histórica de alvenaria de tijolos maciços pelo método ultrassônico**. n. April, 2016.

ANSYS. **Theory Reference Ansys**. . [S.l: s.n.]. , 2016

ISBN 978-65-86819-05-2

ARAÚJO, Cássio Garcia. **Análise numérica de um patrimônio histórico em icó como auxílio ao monitoramento estrutural**. 2018. 69 f. Universidade de Fortaleza, 2018.

AZEVEDO, Domingos Flávio de Oliveira. **Análise estrutural com Ansys Workbench**. [S.l: s.n.], 2016.

BEZERRA, Gabriel Braga Diniz. **Análise numérica como ferramenta de suporte à avaliação da segurança estrutural do patrimônio histórico**. 2018. 70 f. 2018.

BRANDÃO, F. **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT: Caracterização dinâmica de um edifício histórico do século xix Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT**. n. April, p. 1–12, 2016.

DELGADO, Joana Louro. **Avaliação sísmica de um edifício crítico em alvenaria**. 2013. 201 f. Instituto Técnico de Lisboa, 2013.

EDUARDO, Miguel e BRANCO, Moura. **Reforço Sísmico de Edifícios de Alvenaria Engenharia Civil**. 2007. 113 f. Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

FEITOSA, Eduardo Ricarte. **Análise computacional de uma edificação histórica – estudo de caso igreja nossa senhora do rosário - icó**. 2018. 78 f. Universidade de Fortaleza, 2018.

ICOMOS. **Icomos Charter - Principles for the Analysis , Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage**. Architectural Heritage, p. 3–6, 2003. Disponível em: <https://ancientgeorgia.files.wordpress.com/2012/04/recommendations_icomos-principles-and-guidelines.pdf>.
LIMA, Miguel Porfírio De. **Icó em fatos e memórias**. . [S.l: s.n.], 1995.

LOURENÇO, P. B. The ICOMOS methodology for conservation of cultural heritage buildings: Concepts, research and application to case studies. 2014, [S.l: s.n.], 2014. p. 945–954.

LOURENÇO, Paulo B. **Tesis de Lourenço: Computational strategies for masonry structures**. [S.l: s.n.], 1996.

MARTHA, Luiz Fernando. **Métodos básicos da análise de estruturas**. Rio de janeiro: [s.n.], 2010.

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE. **NTC 2008-Decreto Ministeriale 14/1/2008**. 2008. Disponível em: <http://www.gazzettaufficiale.it/>.

NEVES, Sílvia Margarida. **Análise Sísmica de um Edifício da Baixa Pombalina Engenharia Civil**. 2008. 123 f. Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

NÓBREGA, Petrus Gorgônio B Da e HANAI, João Bento De. **A Análise Modal na Avaliação de Estruturas de Concreto Pré-moldado Resumo 1 Introdução**. 1° Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado, n. 1, p. 11, 2005.

PELETEIRO, Suzana Campana. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural**. 2002.

SOEIRO, M. A. R. **Avaliação da segurança de torres metálicas para escoramentos de estruturas de concreto armado**. 2012. 111 f. Universidade Federal do Ceará, 2012.

SOEIRO, Marcos Andrew e ARAÚJO, Cássio García e colab. **Análise numérica de uma construção histórica de alvenaria de tijolos maciços do século XVIII**, 2019.

SOEIRO, Marcos Andrew e FEITOSA, Eduardo Ricarte e colab. **Caracterização dinâmica da igreja de nossa senhora do rosário em Icó, ceará**. n. outubro, p. 1–16, 2019.

VIANA, Francirton Josino. **Icó: seu patrimônio, conhecer e preservar**. 2011. Universidade Estadual da Paraíba, 2011.