



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MARCELO FREIRES PINTO**

**ANÁLISE SÍSMICA NÃO LINEAR DE IGREJA EDIFICADA NO SÉCULO XVIII**  
**EM ALVENARIA VERNACULAR**

**RUSSAS**

**2019**

MARCELO FREIRES PINTO

ANÁLISE SÍSMICA NÃO LINEAR DE IGREJA EDIFICADA NO SÉCULO XVIII EM  
ALVENARIA VERNACULAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a banca examinadora da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Graduado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

P729a Pinto, Marcelo Freires.

Análise sísmica não linear de igreja edificada no século VXIII em alvenaria vernacular / Marcelo Freires Pinto. – 2019.

66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

1. Análise sísmica. 2. Não linear. 3. Patrimônio histórico. I. Título.

CDD 620

---

MARCELO FREIRES PINTO

ANÁLISE SÍSMICA NÃO LINEAR DE IGREJA EDIFICADA NO SÉCULO XVIII EM  
ALVENARIA VERNACULAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a banca examinadora da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Graduado em Engenharia Civil.

Aprovada em: 11 / 11 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues  
Instituto Politécnico de Leiria (IPL)

Dedico este trabalho a minha família,  
especialmente aos pais e minha irmã.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela saúde, força e motivação.

A minha família, pelo incentivo e apoio durante toda minha vida.

A Brena Kelly pelo suporte, paciência e compromisso.

Aos meus amigos, pela união e força em todos momentos.

Ao Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, pela orientação e contribuições que foram essenciais a esse trabalho e a minha formação acadêmica.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior e Prof. Dr. Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma, pelos bons momentos de convivência e aprendizado, críticas e sugestões recebidas.

Aos meus professores, que tanto se empenharam em proporcionar significativas contribuições para meu crescimento pessoal e profissional.

“Não é a força, mas a constância dos bons resultados que conduz os homens à felicidade.”

(Friedrich Nietzsche)

## RESUMO

A aplicabilidade de abordagens computacionais investigativas permite simular mecanismos estruturais não convencionais pertencentes ao patrimônio histórico, onde a conversão de solicitações em mecanismos danosos a segurança e aos parâmetros de desempenho está intimamente relacionada a salvaguarda de variáveis culturais e econômicas. Tratar do desenvolvimento de atividades dessa natureza ainda se configura um desafio, constatada as limitações de dados técnicos referentes a elevada divergência de métodos construtivos e procedimentos investigativos passíveis as exigências desse grupo de edificações. Nesse sentido, faz-se necessário tomar consciência do valor desses bens como herança comum para que perdurem em gerações futuras, bem como promover e publicitar ações que possam ser associadas a ferramentas em prol do resguardo. Ao passo disso, o presente trabalho objetiva analisar, sob simulações não lineares em regime estático, o comportamento de uma edificação em alvenaria vernacular do século XVIII sob solicitações sísmicas, a Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos. Para tanto, foi confeccionado um modelo tridimensional da edificação via Método dos Elementos Finitos (MEF) para se proceder uma análise modal em regime elástico, posterior a isso, a identificação de fragilidades permitiu confeccionar dois modelos numéricos adicionais de pórticos equivalentes em elementos de barra para análise sísmica não linear do tipo *pushover*, para solicitações nos eixos longitudinal e transversal da edificação. Os resultados em regime elástico indicaram dois modos de vibração com participação de massa predominantemente para cada um dos eixos analisados, seguidos de solicitações na torre sineira para os dois eixos com o segundo montante de massa efetiva dentre os dez modos extraídos. Logo, a análise modal validou o interesse na confecção de modelos em pórticos para a torre sineira, objetivando a elaboração de curvas de capacidade resistente, ao passo que a análise não linear identificou deslocamentos com magnitude de até 0,134 metros em uma conjuntura onde o regime plástico que se inicia com deformações de 0,042 metros. Esses resultados forneceram informações de grande valia para o auxiliar em ações que exijam decisões técnicas, atribuindo as simulações numéricas, a forma de um instrumento investigativo passível de alinhamento com os pressupostos de segurança e durabilidade exigidos em edificações patrimoniais.

**Palavras-chave:** Análise sísmica. Não linear. Patrimônio Histórico.



## ABSTRACT

The applicability of investigative computational approaches allows simulating for unconventional structural mechanisms of the historical heritage, where the conversion of requests into mechanisms detrimental to safety and performance parameters is closely related to historical, cultural and economic factors. Addressing the development of activities of this nature is still a challenge, considering the limitations of technical data regarding the high divergence of construction methods and investigative procedures subject to the requirements of this group of buildings. In this sense, it is necessary to be aware of the value of these assets as a common heritage to last in future generations, as well as to promote and publicize actions that may be associated with tools for the protection. Therefore, the present work aims to analyze, under nonlinear simulations in static regime, the global behavior of a building in vernacular masonry of the eighteenth century, the Church Nossa Senhora do Rosário dos Pretos. To this end, a three-dimensional model of the building was constructed using the Finite Element Method (FEM) to carry out a modal analysis in elastic regime. After that, the identification of weaknesses allowed the creation of two additional numerical models of equivalent gantries in bar elements. nonlinear *pushover* seismic analysis for requests on the longitudinal and transverse axes of the building. The results in elastic regime indicated two vibration modes with mass participation predominantly for each of the analyzed axes, followed by bell tower requests for the two axes with the second amount of effective mass among the ten extracted modes. Therefore, the modal analysis validated the interest in the construction of bell tower models for the elaboration of resistant capacity curves, while the nonlinear analysis identified the first requested region in the longitudinal axis, in modal analysis, as a critical region, with target displacement up to 0,134 meters in a plastic scenario that begins with 0,42 meters deformations. These results provided valuable information to assist in actions that require technical decisions, assigning numerical simulations, the form of an investigative instrument that can be aligned with the safety and durability assumptions required in heritage buildings.

**Keywords:** Seismic analysis. Nonlinear. Historical Heritage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Vista da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos.....	16
Figura 2	– Localização da cidade Aracati no Ceará.....	21
Figura 3	– Registro fotográfico da Vila de Aracati.....	22
Figura 4	– Vista de topo da Igreja: (a) planta baixa do interior da Edificação; (b) Vista superior da Edificação; (c) Detalhe do Túmulo do Monsenhor Bruno presente no Jardim.....	23
Figura 5	– Fachadas da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos: (a) Fachada frontal; (b) Fachada posterior; (c) Fachada Lateral esquerda e (d) Fachada lateral direita.....	24
Figura 6	– Detalhes ornamentais no interior da edificação.....	25
Figura 7	– Registro Fotográfico do colapso parcial da igreja em 1924.....	26
Figura 8	– Exemplificação de curva de capacidade resistente.....	28
Figura 9	– Múltiplas curvas de capacidade resistente.....	29
Figura 10	– Deformada de um edifício para deslocamentos de piso de 3 e 5%; (a) análise dinâmica; (b) <i>pushover</i> baseado em forças; (c) <i>pushover</i> baseado em deslocamentos.....	30
Figura 11	– Incremento de carregamentos em análise <i>pushover</i> adaptativa.....	32
Figura 12	– Representação da transformação do espectro de resposta no formato ADRS.....	33
Figura 13	– Relação bi linear do sistema idealizado.....	34
Figura 14	– Determinação de deslocamentos objetivos (a) Períodos Baixos, (b) Períodos médios ou longos.....	35
Figura 15	– Formulações para obtenção do deslocamento-alvo.....	36
Figura 16	– Técnicas de modelagem: (a) Micromodelagem detalhada, (b) Micromodelagem simplificada; (c) Macromodelagem.....	37
Figura 17	– Modelos de pórticos equivalentes propostos.....	38

Figura 18 – Determinação da altura efetiva dos pórticos de alvenaria.....	39
Figura 19 – Representação gráfica do comportamento de rótulas plásticas.....	40
Figura 20 – Esforços de flexão composta sob alvenarias.....	40
Figura 21 – Representação do levantamento geométrico da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos.....	42
Figura 22 – Elemento SOLID187.....	43
Figura 23 – Modelo numérico 3D para a Igreja.....	44
Figura 24 – Representação do modelo de pórticos adotado.....	45
Figura 25 – Modelo numérico em pórticos equivalentes para as alvenarias da igreja: (a) Elemento BEAM188, (b) Pórtico transversal; (c) Pórtico longitudinal.....	46
Figura 26 – Deslocamentos para os quatro primeiros modos de vibração.....	54

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Espectro de resposta elástica para a cidade de Aracati, Ceará.....	49
Gráfico 2	– Espectro de respostas no formato aceleração-deslocamento.....	50
Gráfico 3	– Espectro de Resposta em regime inelástico para diferentes fatores de redução.....	52
Gráfico 4	– Propriedades dos dez primeiros modos de Vibração.....	53
Gráfico 5	– Curva da capacidade para o eixo Longitudinal.....	55
Gráfico 6	– Curva da capacidade para o eixo Transversal.....	56
Gráfico 7	– Curvas de capacidade regiões destacadas em análise modal.....	57

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatos registrados sobre a Igreja de Nossas Senhora do Rosário dos Pretos.....	27
Quadro 2 – Metodologia <i>pushover</i> adaptativa por forças proposta por Antoniou e Pinho.....	31
Quadro 3 – Referências geométricas dos elementos de barra dos pórticos do modelo.....	45
Quadro 4 – Propriedades mecânicas adotadas nos modelos numéricos.....	47
Quadro 5 – Considerações a respeito dos carregamentos adotados.....	48
Quadro 6 – Mecanismos, esforços e equações atribuídas aos modelos de pórticos.....	48
Quadro 7 – Frequência natural e período para os dez primeiros modos de Vibração.....	53
Quadro 8 – Resumo das propriedades para o sistema equivalente.....	58

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
MEF	Método dos Elementos Finitos
EC8	Eurocódigo 8

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>17</b>
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivos Gerais.....</i>	<i>17</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos .....</i>	<i>18</i>
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho.....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Patrimônio Histórico .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>O conjunto edificado da cidade de Aracati e a Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos .....</b>	<b>21</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Caracterização Arquitetônica.....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Principais Intervenções Realizadas .....</i>	<i>25</i>
<b>2.3</b>	<b>Metodologias não-lineares de análise sísmica .....</b>	<b>28</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Método PUSHOVER .....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.1.1</i>	<i>PUSHOVER convencional .....</i>	<i>30</i>
<i>2.3.1.2</i>	<i>PUSHOVER adaptativo.....</i>	<i>31</i>
<i>2.3.1.3</i>	<i>Método N2 .....</i>	<i>32</i>
<b>2.4</b>	<b>Modelagem Numérica .....</b>	<b>36</b>
<i>2.4.1</i>	<i>Modelo de pórticos equivalentes .....</i>	<i>38</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Rótulas Plásticas.....</i>	<i>39</i>
<b>3.1</b>	<b>Modelos numérico .....</b>	<b>43</b>
<i>3.1.1</i>	<i>Modelo numérico 3D.....</i>	<i>43</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Modelos numéricos em Pórticos Equivalentes .....</i>	<i>44</i>
<b>3.2.</b>	<b>Caracterização dos Materiais e Métodos Construtivos .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Carregamentos Aplicados .....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.</b>	<b>Caracterização do Espectro de Resposta.....</b>	<b>48</b>

<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Espectro Inelástico e Análise Modal .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2</b>	<b>Curvas de Capacidade .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3</b>	<b>Deslocamento alvo .....</b>	<b>57</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A garantia da identidade cultural de uma sociedade é uma variável intimamente associada as atividades desenvolvidas em prol da preservação de bens materiais remanescentes. Baseia-se em uma relação de resultados e considerações que, além de contribuições a favor da garantia de seguridade, publicita o valor sociocultural e consentimento de resguardo.

A humanidade tem vindo progressivamente a tomar maior consciência da unidade dos valores humanos e a considerar os monumentos antigos como uma herança comum, assumindo coletivamente a responsabilidade da sua salvaguarda para as gerações futuras e aspirando a transmiti-los com toda a sua riqueza e autenticidade. (in Carta de Veneza, 1964, P. 105)

No que trata das edificações componente do patrimônio histórico, os desafios permeiam sob diferentes modalidades, sobretudo no desenvolvimento de ações investigativas aplicáveis ao grupo, para possibilitar a caracterização e reprodução de propriedades mecânicas e de durabilidades de materiais minimamente conhecidos e pouco apresentados em literatura.

Na mesma conjuntura, a obtenção de informações ainda é limitada à métodos e técnicas investigativas em aperfeiçoamento, de possível replicação ao patrimônio histórico. Segundo Brandonisio (2015, p.479), “a escolha da técnica é associada ao seu procedimento eficaz em casos semelhantes e a ideia de não modificar o comportamento estrutural original”.

De acordo com Mesquita (2017, p. 2)

A eficiência das ações de manutenção ou reabilitação exige conhecimento específico acerca das características e comportamento estrutural das construções patrimoniais, posto que estas podem divergir em seus métodos construtivos e propriedades em comparação com as construções contemporâneas, projetadas sob códigos construtivos.

Desse modo, as abordagens numéricas computacionais aplicáveis ao patrimônio histórico são desenvolvidas para materiais possuintes de propriedades inabituais, sob relações estimadas, posterior reprodução e análise dos comportamentos individuais e global do sistema, para então, simular, elaborar e verificar simulações numéricas, tornando-a atualmente, uma atividade infrequente e desafiadora.

Nesse sentido, Roca (2010) afirma, que os estudos sobre a conservação e a segurança estrutural do patrimônio histórico edificado, recorrendo-se a análise estrutural via

MEF como meio de análise, são ferramentas de grande valia na avaliação destas estruturas pois, permitem conhecer o estado geral das solicitações que são impostas à estrutura, sejam elas por cargas permanentes, cargas acidentais ou cargas excepcionais.

As simulações a respeito do comportamento de elementos estruturais se tornam atividades investigativas com inúmeras premissas e finalidades, em grande maioria, consideram estudos de casos associados e possíveis avaliações interventivas, aplicabilidades executivas e auxílio a tomada de decisões. Isso se decorre à favorável adaptabilidade do método a inúmeras situações problema e a praticidade na resolução de sistemas de equações diferenciais proporcionadas por ferramentas computacionais.

De modo geral, o presente trabalho corresponde a um estudo de caso com uso de ferramentas numéricas, desenvolvido na Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos, componente do conjunto histórico da cidade de Aracati, Ceará, e protegida desde 2001 pelo Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937. Trata-se de uma edificação em alvenaria vernacular, edificada no ano de 1775 como alternativa para atender a demanda de escravos convertidos ao catolicismo, vista a segregação racial vigente nos templos da época.

Diante a conjuntura, foram confeccionados modelos numéricos para estudo não linear da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos (Figura 1), no qual se fez uso de levantamentos geométricos e aplicação do Método dos Elementos Finitos via ferramentas computacionais.

Figura 1 – Vista da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera-se também o espectro de resposta caracterizado para a região, os resultados obtidos em análise modal prévia em regime elástico e respostas para distintas

situações de carregamentos estáticos. De modo que o presente trabalho possibilite caracterizar as alvenarias da edificação para sismos de maneira global e investigue possíveis mecanismos de danos que possam comprometer a segurança e durabilidade, bem como, avaliar a aplicabilidade dessas simulações sob a forma de ferramenta investigativa. Portanto, o trabalho contribui para publicitar informações que vem a contribuir para técnicas de caracterização do patrimônio e a preservação de edificados.

## **1.1 Justificativa**

A importância do patrimônio histórico exige métodos investigativos que contribuam para sua preservação e funcionamento dentro dos parâmetros de desempenho e segurança. São edificações de elevado valor social, econômico e cultural, com significativa influência na preservação da memória de um povo.

Metodologias de caracterização e identificação de zonas susceptíveis a mecanismos danosos que sejam de possível aplicabilidade para patrimônio histórico são de grande proveito, visto os desafios pertinentes nas atividades necessárias a serem desenvolvidas. Em regime não linear, são associadas uma melhor idoneidade nos resultados, e atrelado a isso, reduções de custos e tomadas de ações interventivas sob maior confiança.

No que trata de análises dinâmicas no Brasil, sobretudo para ações sísmicas, fomentar pesquisas dessa natureza é uma ação associada a uma veiculação de informações limitadas sob um cenário infrequente, constatada a posição geográfica ausente de fortes instabilidades tectônicas. Contudo, há a existência recorrente de registros sísmicos com significativas proporções danosas, evidenciando a necessidade de incluir tais considerações em atividades técnicas preventivas e corretivas.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivos Gerais***

Analisar o comportamento estrutural em regime estático não linear da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos, para verificação de seguridade e caracterização sob ações sísmicas. Denominada de análise *pushover*, a metodologia é sujeita à aplicabilidade com o auxílio de ferramentas computacionais para execução de modelos numéricos com o intuito da caracterização global da estrutura com o máximo de idoneidade, por espectros de resposta,

análises modais em regime elástico, curvas de capacidade resistentes e deslocamento alvo.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Apresentar uma metodologia de análise da estabilidade estrutural que auxilie na manutenção da segurança e a tomada de decisões em edificações históricas;
- Analisar os resultados modais em regime elástico como ferramenta de suporte em análise não linear, com o método *pushover*;
- Caracterizar o espectro de resposta para região geográfica na qual a edificação está inserida;
- Fazer uso das informações disponíveis em literatura, para confecção de curvas de capacidade resistente, para os eixos longitudinal e transversal, sensíveis a ações sísmicas;
- Estudar a sensibilidade das curvas de capacidade para diferentes carregamentos e identificar a situação de maior vulnerabilidade para a edificação.

### **1.3 Organização do trabalho**

O presente trabalho se encontra organizado em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução ao tema, comenta a respeito de fatores introdutórios a respeito do tempo, ressalta a importância e os desafios acerca do tema, e disserta brevemente sobre a conjuntura em que estudos dessa natureza se fazem necessários. E também, apresenta os objetivos do trabalho e a estrutura adotada.

Em sequência, o segundo capítulo trata de um breve resumo bibliográfico tratando das metodologias presentes no desenvolvimento do trabalho, com ênfase em análises sísmicas não-lineares aplicáveis em alvenarias históricas. São tópicos válidos para compreensão da necessidade e aplicabilidade de ferramentas computacionais via Método dos Elementos Finitos (MEF).

Em consonância com o tópico anterior, o terceiro capítulo apresenta o estudo de caso, menciona uma descrição sucinta das propriedades estruturais da edificação que foram aplicadas ao modelo, bem como os diferentes modelos computacionais adotados e a caracterização do espectro de resposta para a região na qual a edificação se insere. Neste capítulo também são apresentadas as variáveis utilizadas no procedimento de análise sísmica não-linear.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises desenvolvidas, incluindo a análise modal e estruturais estática não linear, ambas auxiliando na interpretação da resposta global da estrutura. Ademais, também são realizadas comparações entre os resultados de sensibilidade sísmica para os referidos eixos.

Diante a conjuntura apresentada, o quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir resultados. Ao passo que se vê uma breve discussão a respeito do valor atrelado ao desenvolvimento de trabalhos dessa natureza e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Patrimônio Histórico

Segundo a Carta de Cracóvia (2000), o patrimônio histórico edificado é definido como, “o conjunto das obras do homem nas quais uma comunidade reconhece os seus valores específicos e particulares e com os quais se identifica. A identificação e a valorização destas obras como patrimônio é, assim, um processo que implica a seleção de valores”.

Ainda na mesma carta, ao tratar de monumentos que compõem o patrimônio histórico, cita-se “uma entidade identificada como portadora de valor e que constitui um suporte da memória. Nele, a memória reconhece aspectos relevantes relacionados com atos e pensamentos humanos, associados ao curso da história e, todavia, acessíveis a todos.”

No âmbito nacional, a partir da criação da Constituição Federal de 1988, são apresentados itens para definir o patrimônio cultural brasileiro material e imaterial. No Artigo nº 216 do documento se tem:

Constitui patrimônio cultural brasileiro os bens de natureza material e imaterial, tomados individualmente ou em conjunto, portadores de referência à identidade, à ação, à memória dos diferentes grupos formadores da sociedade brasileira, nos quais se incluem: I -as formas de expressão; II -os modos de criar, fazer e viver; III -as criações científicas, artísticas e tecnológicas; IV -as obras, objetos, documentos, edificações e demais espaços destinados às manifestações artístico-culturais; V -os conjuntos urbanos e sítios de valor histórico, paisagístico, artístico, arqueológico, paleontológico, ecológico e científico (BRASIL, 1988).

Ao tratar das atividades referentes a conservação e preservação do patrimônio histórico, bem como seu reconhecimento e classificação, têm-se instituições que oportunizam ações que asseguram o direito à memória, contribuem para o desenvolvimento socioeconômico, preservam e fortalecem a identidade cultural de grupos sociais.

Vinculado ao Governo Federal, vê-se o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPAHN), como o principal responsável pelo resguardo e promoção do patrimônio nacional. Criado em 13 de janeiro de 1937, embasado na Lei nº 378, conta hoje com vinte e sete superintendências, trinta e sete escritórios técnicos e seis unidades especiais, distribuídos em todo território nacional.

A nível mundial, tem-se a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), criada em 16 de novembro de 1945. Vinculado a entidade, o

Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios (ICOMOS) é uma organização não governamental que se dedica ao desenvolvimento de ações em prol da preservação e valorização de monumentos materiais e não materiais.

Dentre as atividades desenvolvidas pelo ICOMOS, tem-se a Lista do Patrimônio da Humanidade, que representa os bens culturais e naturais reconhecidos pela UNESCO em 167 países, totalizando um montante de 1121 propriedades. Dessas, o Brasil apresenta vinte e duas, com 15 referentes ao patrimônio cultural e 7 ao patrimônio natural. Segundo Fraga (2015), por meio de acesso as informações multidisciplinares, a ICOMOS permite que as intervenções nos patrimônios sejam efetuadas com segurança e sabedoria.

## **2.2 O conjunto edificado da cidade de Aracati e a Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos**

O conjunto histórico edificado na cidade de Aracati foi reconhecido em 2001 como patrimônio histórico nacional pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). No Estado do Ceará, distante 150 km da capital, Fortaleza, é composto por bens de diferentes naturezas, encontram-se prédios, casarões, sobrados, igrejas e outras, somando mais de 2500 edificações de elevadas diversidades arquitetônicas e valor sociocultural.

Figura 2 – Localização da cidade Aracati no Ceará



Fonte: Adaptado de Wikimédia Commons, (2006).

Quanto à história do Centro Histórico da cidade de Aracati, de acordo com o IPHAN, em 1747, foi fundada a Vila de Santa Cruz do Aracati, próximo às margens do Rio Jaguaribe. Sua criação foi determinada pela carta régia daquele ano, junto com o seu local de criação, houve delimitações da praça e as reservas de terreno para construção da Casa da Câmara e da Igreja Matriz.

Figura 3 – Registro fotográfico da Vila de Aracati



Fonte: Elaboração do cervo IBGE apud, Garcia (2011).

Favorecida por sua localização geográfica a leste do estado, a Vila de Santa Cruz do Aracati mantinha proximidade com o Rio Jaguaribe, além de pouca distância ao mar, um fator relacionado a movimentos migratórios e fortalecimento de relações comerciais. Desse modo, intensificado por processos sociais, a vila passa a condição de cidade em 1842.

Com a intensificação da comercialização de carnes secas e couro nas proximidades do Rio Jaguaribe, a região se tornou um centro comercial de grande relevância para a região e atrativo para interessados em comercializar e produtos oriundos de atividades pecuárias. E em 1880 as autoridades impõem exigências as novas construções a respeito do alinhamento das ruas, para a preservação do desenvolvimento da cidade de maneira ordenada.

Dentre as edificações que compõem o conjunto, destaca-se a Igreja de Nossa



Senhora do Rosário dos Pretos. Foi construída no século XVIII por escravos convertidos ao catolicismo e motivados pela segregação social vigente nos regulamentos dos templos daquela época, que não permitiam a participação de pessoas de pele escura nas cerimônias.

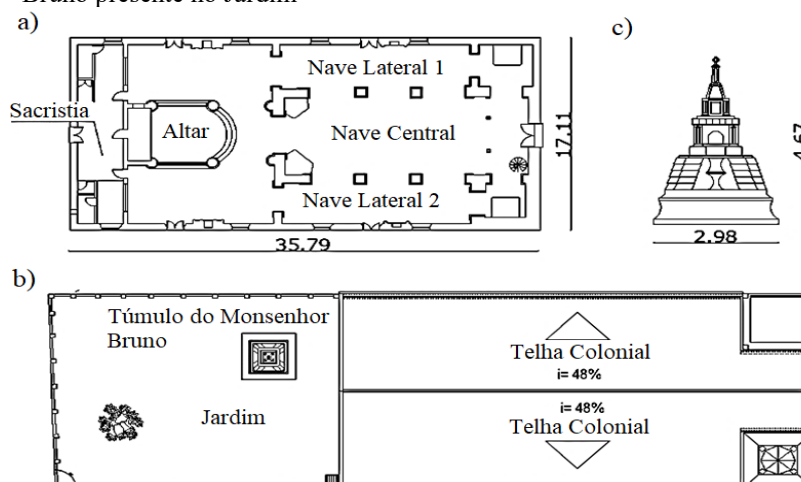
Na década de 1770, o número de escravos convertidos ao catolicismo já havia se tornado significativo, surge então a necessidade de se construir um templo onde poderiam praticar sua religião. Contudo, tratava-se de uma época em que o Brasil ainda se configurava como colônia de Portugal, com elevando número de imigrantes e forte práticas segregativas raciais.

A construção da Igreja se deu após doações do capitão Feliciano Gomes da Silva e sua esposa Floriana Ferreira da Silva. Foram apresentados aos interessados pedra e casal, um terreno e licenças para a erguer e benzer a edificação construída, nomeando-a de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos para distinguir da Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário dos Brancos

### 2.2.1 Caracterização Arquitetônica

A análise dos levantamentos permitiu observar que a Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos atualmente é composta por uma nave central e dois átrios laterais de traço retangular, com dimensões de 17,11 de largura e 35,79 de comprimento, compondo uma área total de aproximadamente 612 m<sup>2</sup>, conforme a Figura 4.

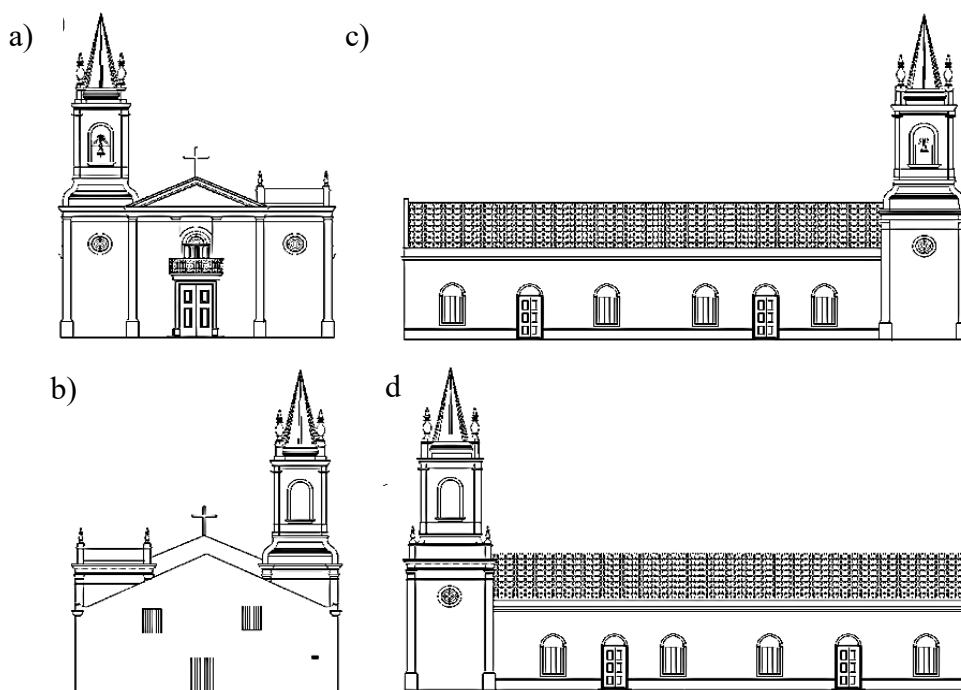
Figura 4 – Vista de topo da Igreja: (a) planta baixa do interior da Edificação; (b) Vista superior da Edificação; (c) Detalhe do Túmulo do Monsenhor Bruno presente no Jardim



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma análise do levantamento geométrico, permite observar a existência de quatro fachadas. Na fachada principal, encontram-se a porta principal de entrada para a Igreja, assim como a torre sineira a esquerda, frontão triangular e pilastras (Figura 5.a). Na fachada de fundo, que liga a sacristia a um jardim murado, existem apenas a presença de duas janelas, que se abrem para o Consistório, localizado sobre a sacristia (Figura 5.b). As fachadas laterais esquerda e direita apresentam estruturas similares. Com seis esquadrias em cada fachada (Figura 5.c e Figura 5.d).

Figuras 5 – Fachadas da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos: (a) Fachada frontal; (b) Fachada posterior; (c) Fachada Lateral esquerda e (d) Fachada lateral direita

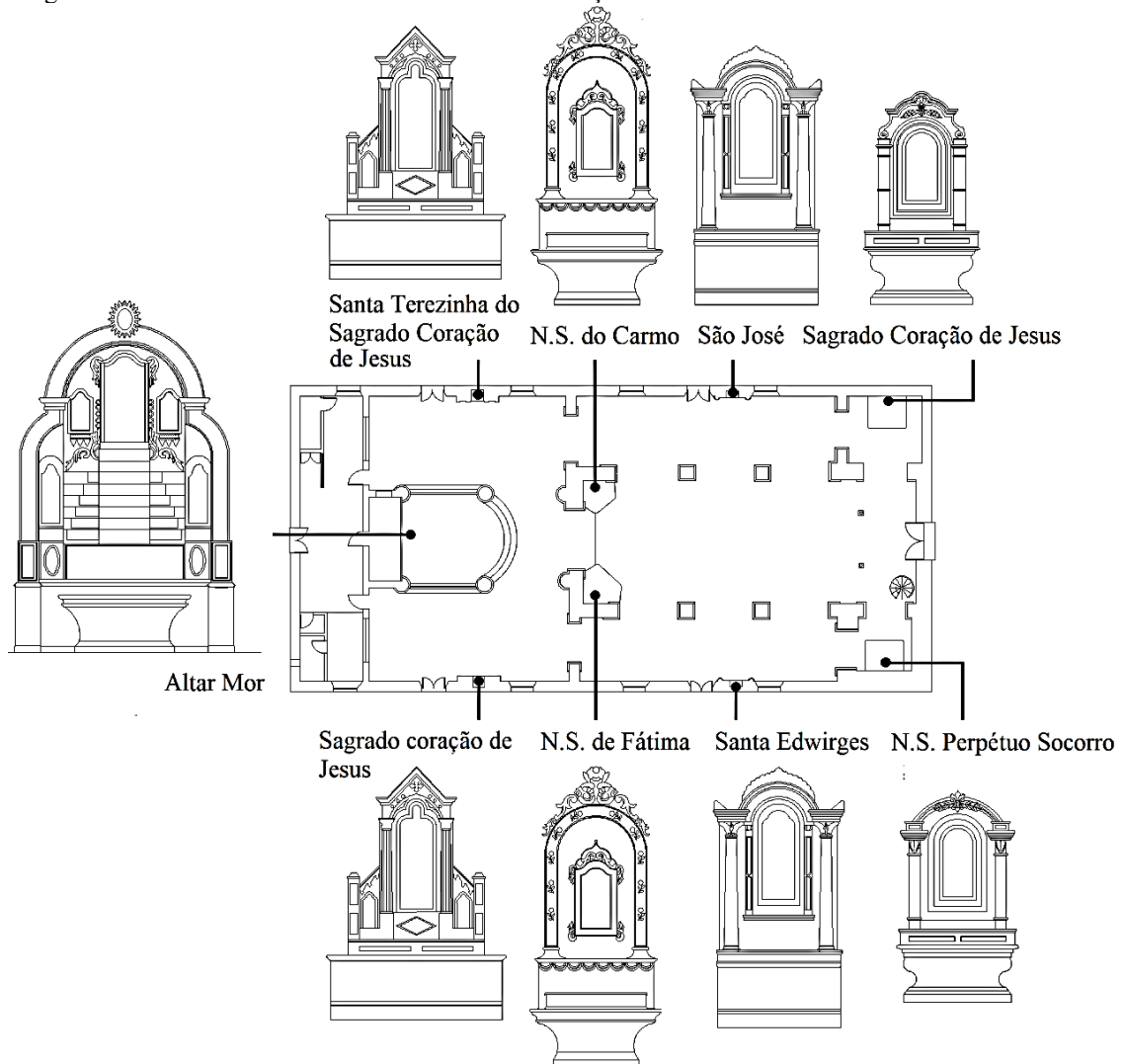


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Segundo IPHAN (1998), a Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos, possui uma aparência maciça, de proporções avantajadas e poucos vãos abertos na fachada principal. Provavelmente, sofreu alterações no século passado, quando foram introduzidos alguns elementos neoclássicos.

A igreja apresenta elementos arquitetônicos com função ornamental por grande parte do seu interior, com formas e traçados que se distinguem consideravelmente entre os elementos de alvenaria vernacular. O emprego desses elementos arquitetônicos para destacar imagens sacras em igrejas é uma prática recorrente e adotada no entorno do perímetro interno da edificação (Figura 6).

Figura 6 – Detalhes ornamentais no interior da edificação



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.2 Principais Intervenções Realizadas

No processo de avaliação estrutural de uma construção histórica, um dos primeiros pontos citados pelo relatório do ICOMOS, é a importância do levantamento de informações para o planejamento de intervenções estruturais, pois estas construções podem ter sofrido severas intervenções em seus elementos estruturais ao longo dos anos, e há a necessidade de se saber sobre as propriedades dos materiais e os métodos construtivos utilizados, sob pena de descaracterização da construção histórica. (Monteiro; Santos; Mesquita, 2015)

Inicialmente, a Igreja era composta apenas pela capela-mor com alas à sua direita e esquerda. Não se sabe o período exato das construções das primeiras ampliações, há apenas

uma estimativa. Por exemplo, não há certeza sobre o ano de construção da torre sineira, apenas que, a partir do ano de 1859, ela já existia (BESERRA, 2016 apud ALVES, 2017).

Ao decorrer do tempo, a incidência de ações naturais e antrópicas proveniente do ambiente no qual a Igreja se insere, motivaram inúmeras alterações na estrutura e arquitetura da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos. Para exemplificar, tem-se a enchente que destruiu a nave lateral direita no ano de 1924 (Figura 7), onde foram exigidas uma série medidas de recuperação que se estenderam até o ano de 1930.

Figura 7 – Registro Fotográfico do colapso parcial da igreja em 1924



Fonte: IPHAN.

Conforme Bezerra (2018, p. 27), “em 1877, houve mais ampliações com a criação das naves laterais e de arcos nas paredes que antes eram as fachadas laterais. Não há registro sobre se os arcos foram feitos na parede já existente ou se a parede foi demolida para a execução da nova estrutura”.

Análogo ao evento anterior, em 1974 inúmeras famílias de regiões próximas ao templo, ficaram desabrigadas. Ao assumir a função de abrigo, fragilizada pelas intensas chuvas e não disposta para receber essa finalidade, a Igreja passa a manifestar danos proveniente das sobrecargas que lhes foram incididas, necessitando de uma intervenção que foi finalizada apenas em 1982. Como afirma REIS (2009), parcela do madeiramento que compunha o forro da edificação foi substituído por lajes de concreto armado.

Em 2010 a Paróquia de Nossa Senhora do Rosário passa a arrecadar dízimo para realizar manutenções nas edificações, por meio da implantação da Pastoral do Dízimo. Segundo

a TV Sinal no ano de 2013, a Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos foi incluída no Programa “PAC Cidades Históricas”, criado pelo Governo Federal no ano de 2013. Para atender às cidades que possuem bens tombados pelo IPHAN, há o PAC Cidades Históricas com R\$ 1,6 bilhão destinado a 425 obras de restauração de edifícios e espaços públicos, em 44 cidades de 20 estados brasileiros.

Segundo Bezerra (2018, p. 31), “em novembro de 2018, após uma visita feita ao local e informações recebidas de moradores da região, descobriu-se que a Igreja em estudo se encontra interditada por apresentar problemas no telhado”.

Diante a conjuntura apresentada, buscou-se estabelecer uma ordem cronológica dos fatos dispostos em literatura, para uma melhor compressão do que foi se tem registrado.

Quadro 1 – Fatos registrados sobre a Igreja de Nossas Senhora do Rosário dos Pretos

<b>Ano</b>	<b>Fato registrado</b>
1775	A igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos é edificada
1859	Período em que os registros já apontam a existência da torre sineira
1877	Ampliação com criação das naves laterais e uso de arcos onde antes eram fachadas
1924	Enchente destruiu a nave lateral direita
1930	Recuperação dos danos causados
1974	Outro período de cheias causa danos severos, também, em razão de abrigar inúmeras famílias desabrigadas
1980	Aplicação de forro em concreto armado nas naves laterais
1982	Retorno das atividades
2001	Reconhecida como patrimônio histórico nacional pelo IPHAN
2010	É realizada uma arrecadação de dízimo para a manutenção das igrejas, onde os vitrais e pinturas da igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos foram readequados
2013	A Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos é incluída no programa "PAC Cidades Históricas", do Governo Federal, onde são destinados R\$1,6 bilhão
2018	A igreja é interditada sob constatação de problemas no telhado

Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 2.3 Metodologias não-lineares de análise sísmica

Na conjuntura abordada, o presente capítulo apresenta tópicos a respeito da abordagem utilizada. Disserta-se uma breve descrição da metodologia de análise *pushover* para análise sísmica não linear em análises estático-estruturais, as suas principais ramificações entre convencional e a metodologia N2 proposta pelo Eurocódigo 8 (2010).

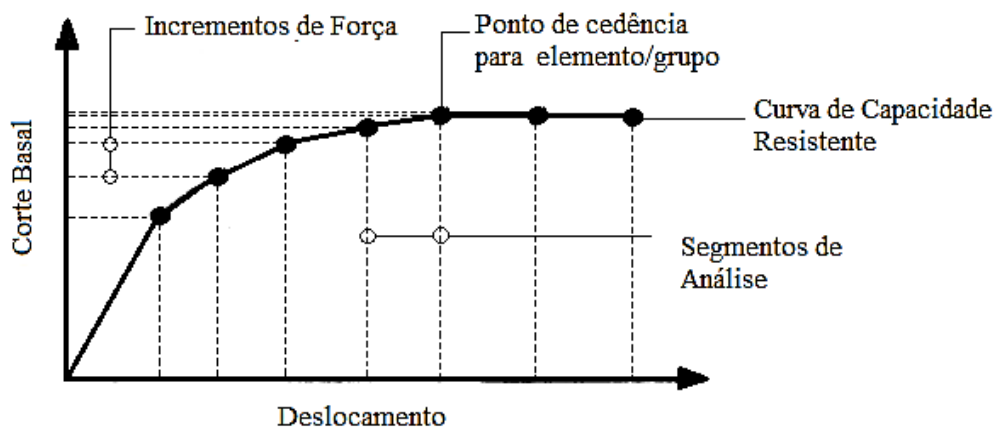
### 2.3.1 Método *PUSHOVER*

Antoniou e Pinho (2004), afirmam que apesar da sua relativa simplicidade e facilidade de uso, as técnicas *pushover* fornecem informações de resposta características, que não podem ser obtidas pela aplicação de qualquer análise linear elástica.

Para Coutinho (2008, p. 7), “o uso da análise estática não linear, denominada de análise *pushover* mais recentemente, remonta à década de 70, no entanto, só após ganhar importância nos últimos 20 anos é que começaram a surgir publicações dedicadas a este tema”.

A técnica baseia-se na confecção de modelos estruturais em elementos finitos, sob considerações de comportamento não linear, que pode ser modulado por rótulas plásticas para simular efeitos nas seções transversais e inseridas ao se atingir um valor pré-determinado em função da capacidade resistente da seção. Isso se desenvolve com a inserção de esforços gravídicos e solicitações laterais por piso, de modo que sejam registrados os deslocamentos no ponto de controle associados a incrementos de forças laterais para que seja possível se configurar a curva de capacidade do modelo, Figura 8.

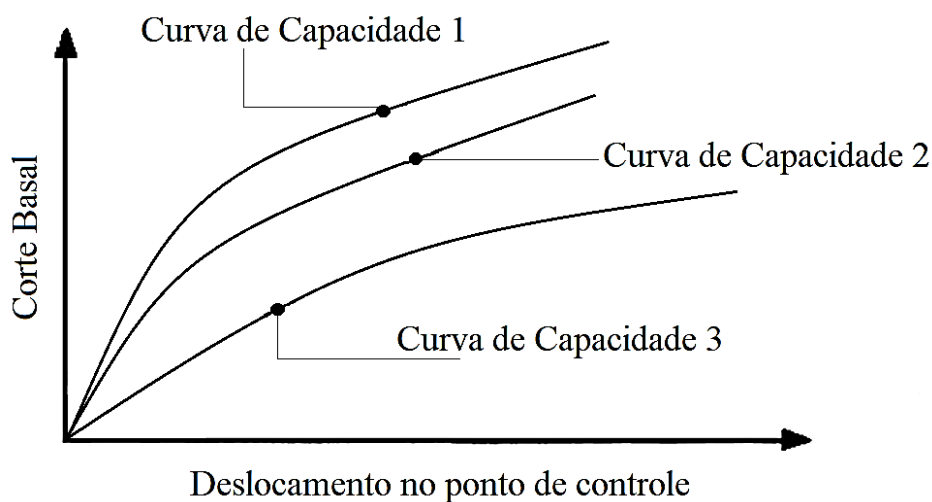
Figura 8 – Exemplificação de curva de capacidade resistente



Fonte: Adaptado de ATC,1996.

Pode-se também considerar outras distribuições de cargas, desde que as forças de inércias sejam devidamente representadas em análise estática. Essa adoção proporciona a confecção de múltiplas curvas de capacidade para um mesmo eixo da estrutura analisada, que pode ser tomada como uma ferramenta auxiliar no processo investigativo, visto seu potencial de prover informações globais da estrutura ou elementos sob considerações de múltiplos cenários danosos a estrutura.

Figura 9 – Múltiplas curvas de capacidade resistente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa perspectiva, Krawinkler e Seneviratna (1998) reforçam que os resultados obtidos análise estática não-linear deve ser comparada com as exigências e níveis de desempenho, visto que o objetivo de uma análise *pushover* é a avaliação da estimativa do comportamento para o sistema estrutural.

Ainda segundo mesmo o autor, a análise *pushover*, baseia-se na hipótese que o mecanismo estrutural pode ser associado a um sistema de um grau de liberdade, não possuindo embasamento teórico rigoroso. Nessa conjuntura, surgem diferentes procedimentos devido a flexibilidade da metodologia.

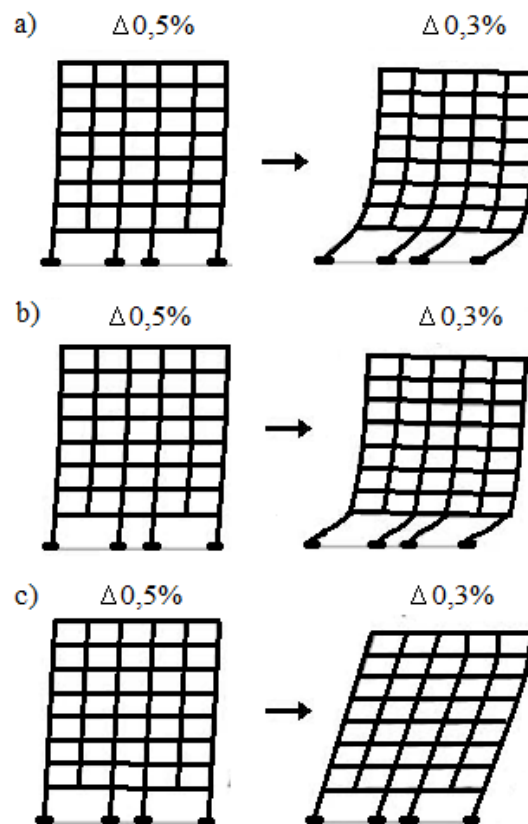
Segundo Elnashai (2002), pode-se proceder mais análises inelásticas para um melhor controle dos modos de dimensionamento sísmico, desde que sejam verificadas, mesmo que as análises estáticas não-lineares apresentem resultados de adequada precisão e com boa representatividade do comportamento dinâmico da estrutura analisada.

### 2.3.1.1 PUSHOVER convencional

A técnica consiste na aplicação de forças ou deslocamentos com constância, também objetivando a formulação de curvas de capacidade, perfis de deslocamentos entre pisos e perfis de corte. Disso, surgem técnicas ramificadas, classificadas de acordo com a condição inserida no modelo, *pushover* convencional por forças ou *pushover* convencional por deslocamentos, as duas abordagens de maior abrangência.

Segundo Antoniou e Pinho (2004), o método *pushover* convencional, baseado no incremento de deslocamentos, é capaz de camuflar algumas características relevantes da estrutura, adotado o incremento constante em toda análise. Os autores ainda reforçam a hipótese, alegando que as deformações se manifestam na estrutura com distribuições semelhantes a um comportamento elástico, ao passo que esforços são concentrados nas rótulas plásticas (Figura 10).

Figura 10 – Deformada de um edifício para deslocamentos de piso de 3 e 5%; (a) análise dinâmica; (b) *pushover* baseado em forças; (c) *pushover* baseado em deslocamentos



Fonte: Antônio e Pinho (2014, com adaptações).



### 2.3.1.2 PUSHOVER adaptativo

O método consiste na aplicação de solicitações, por forças ou deslocamentos, com forma pré-determinada até um determinado ponto, que pode ser estabelecido pelo colapso ou por uma intensidade de deformação desejada. Ao passo disso, pode-se dizer que, exceto pelo fato de a carga ser variável por incrementos, o procedimento para determinação da curva de capacidade para análises adaptativas é semelhante ao descrito para análises convencionais.

Conforme Antoniou e Pinho (2004, apud Mota, 2010, p. 11), consideram as fases descritas como as representativas da evolução das metodologias *pushover* adaptativas. O autor também apresenta uma descrição do procedimento que envolve solicitações por força (Tabela 2).

Quadro 2 – Metodologia *pushover* adaptativa por forças proposta por Antoniou e Pinho

Etapa		Observação
1 <sup>a</sup>	Definição do vetor inicial de carga e a inércia de massa	A carga inicial deve ser uniforme para não distorcer as configurações do vetor de carregamento
2 <sup>a</sup>	Cálculo do fator de carga	Pode ser obtido de duas formas: incrementos controlados por algoritmos ou controlar as respostas para obter valores que possibilitem calcular o fator de carga.
3 <sup>a</sup>	Cálculo do vetor de escalonamento	Obtido pela combinação dos vectores de cada modo de vibração considerados
4 <sup>a</sup>	Atualização do vetor de carga	O vector de carregamento (P) no passo t, é obtido por adição do vector de carregamento do incremento anterior.

Fonte: Antoniou e Pinto (2004, com adaptações).

Nos trabalhos que contribuíram para o avanço de técnicas referentes a essa metodologia, destaca-se os trabalhos desenvolvidos por Elnashai (2001). O autor apresentou, sob a perspectiva de um único algoritmo, um procedimento adaptativo que considera uma densa

bibliografia a respeito do assunto, incluindo a degradação de rigidez estrutural e o aumento de período para diferentes modos de vibração da estrutura.

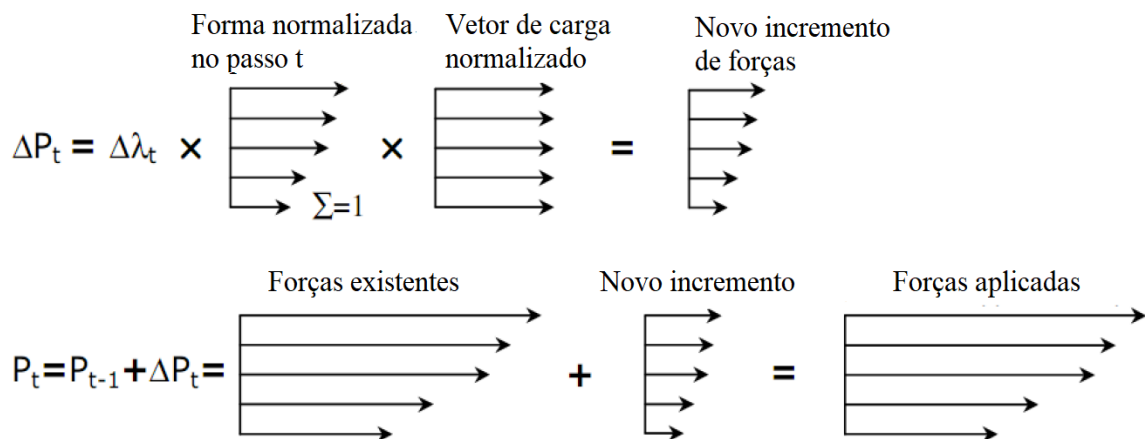
Segundo o mesmo autor esta última metodologia pode ser considerada como representativa do estado de arte das metodologias de análise estática não-linear. Tal como na metodologia *pushover* normal a sua vertente adaptativa pode ser abordada quer pela imposição de deslocamentos ou forças.

Para a quantificar a representa a força modal no piso (F), recorre-se ao produto direto de quatro termos, são eles, o fator de participação modal ( $\Gamma$ ), o valor do modo de vibração ( $\Phi_{ij}$ ), a massa do piso ( $M_i$ ) e o fator de ampliação espectral ( $S_a$ ). As forças modais por piso são obtidas da seguinte forma:

$$F_{ij} = \Gamma \times \Phi \times M_i \times S_a \quad (2.1)$$

É válido ressaltar que a componente deve ser atualizada em função do incremento referente ao fator de carga ( $\lambda_t$ ) e dos vetores de carregamento inicial ( $P_0$ ) e vetores carregamento para a etapa do procedimento ( $P_t$ ) e para a etapa anterior ( $P_{t-1}$ ). (Figura 11)

Figura 11 – Incremento de carregamentos em análise *pushover* adaptativa



Fonte: Antoniou e Pinto (2004, com adaptações).

### 2.3.1.3. Método N2

Para se definir a curva de capacidade resistente, deve-se buscar estabelecer relações entre a força de corte basal inserida no modelo e o deslocamento de todo sob aplicação de

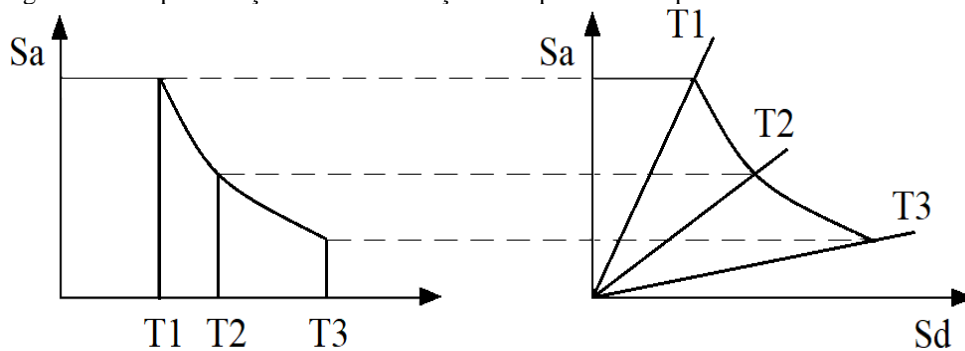
solicitações laterais progressivas. Para isso, o método define a força lateral normalizada ( $F_i$ ), em função da massa do piso ( $m_i$ ) e deslocamentos normalizados ( $\phi_i$ ) do modo de vibração condicionante.

$$F_i = m_i \cdot \phi_i \quad (2.2)$$

Devido a associação gráfica que lhes é estabelecida a caracterização do espectro de respostas pode ser representada em função das relações entre o espectro de resposta de aceleração ( $S_{ae}$ ) e o espectro de resposta de deslocamento ( $S_{de}$ ), no formato ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum). Segundo Mota (2010, p. 16), “o formato se baseia em uma conhecida relação expressa em equações que o gráfico corresponde a um leque de retas passando pela origem, cada uma associada a um dado período”.

$$S_{ae} = \frac{4\pi^2 \cdot S_{de}}{T^2} \quad (2.3)$$

Figura 12 – Representação da transformação do espectro de resposta no formato ADRS



Fonte: Silva (2008, com adaptações).

Para o regime inelásticos, é válida a equação 1, mas ao passo que se objetiva determinar o espectro inelástico, são determinados fatores de redução ( $q_u$ ), com base em valores constantes de ductilidade, empregando-se a equação 2 para se obter o comportamento gráfico das variáveis.

$$S_a = \frac{S_{ae}}{q_u} \quad (2.4)$$

$$S_d = \frac{\mu \times S_{de}}{q_u} \quad (2.5)$$

$$qu = \frac{(\mu-1)T}{T_c} + 1 \quad \text{para } T < T_c \quad (2.6)$$

$$qu = \mu \quad \text{para } T \geq T_c \quad (2.7)$$

Ao assumir que a resposta da estrutura esteja representada em um sistema de múltiplos graus de liberdade e que pode ser associada a uma representação equivalente a um único grau. Para isso, foi necessária a transformação da curva de capacidade, pela aplicação de um coeficiente de transformação ( $\Gamma$ ), aplicável ao corte basal ( $F_b$ ) e ao deslocamento no ponto de controle ( $d_n$ ), para a obtenção da força ( $F^*$ ) e deslocamento ( $d^*$ ) para o sistema de um grau de liberdade. Esse processo pode ser sintetizado pelas equações abaixo.

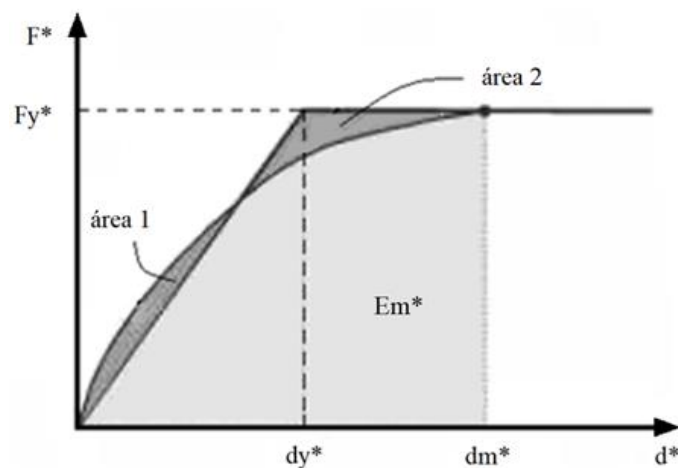
$$\Gamma = \frac{\sum F_i}{\sum \left(\frac{F_i^2}{m_i}\right)} \quad (2.8)$$

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad (2.9)$$

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma} \quad (2.10)$$

Posterior a isso, para determinação do período elástico do sistema equivalente ( $T^*$ ), é necessário a determinação de uma representação bi linear do espectro (Figura 13). Nessa representação, a rigidez pós-cedência deve ser igual a zero e a energia de deformação igual à do sistema real, em outras palavras, as áreas devem ser numericamente iguais.

Figura 13– Relação bi linear do sistema idealizado



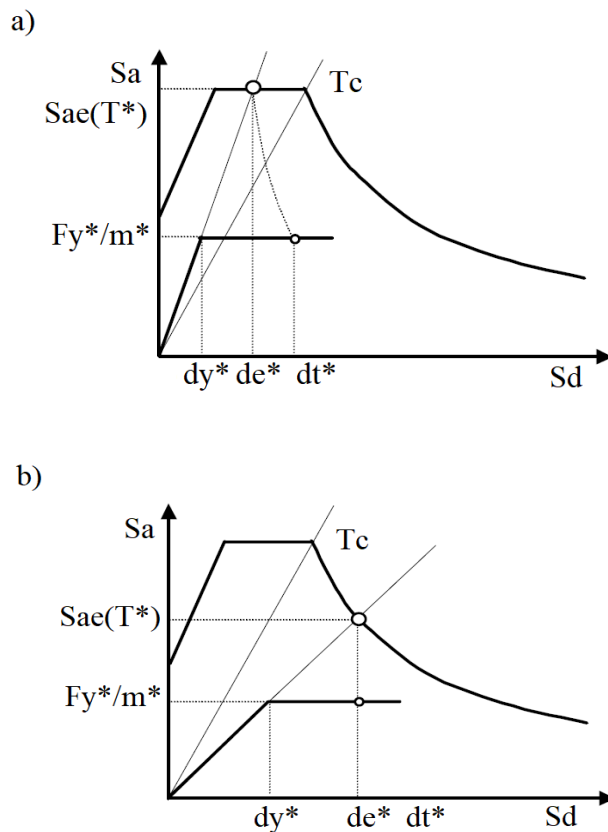
Fonte: Eurocódigo 8 (2010, com adaptações).

Com a curva determinada, pode-se dizer que a resistência do modelo fica definida ao corte basal ( $Fy^*$ ) e ao deslocamento de cedência ( $dy$ ). Então, pode-se aplicar a equação 2.10 para obtenção do período equivalente e, posteriormente, o deslocamento objetivo de\*.

$$T = 2\pi \sqrt{m \cdot \frac{dy^*}{Fy^*}} \quad (2.10)$$

Por fim, define-se que o deslocamento alvo dependerá das características dinâmicas do sistema, extraídas das curvas de capacidade e espectro de respostas. Assim, possibilita-se distinguir o comportamento gráfico em sistemas de período baixo e períodos médios ou longos (Figura 14).

Figura 14 – Determinação de deslocamentos objetivos: (a) Períodos Baixos, (b) Períodos médios ou longos



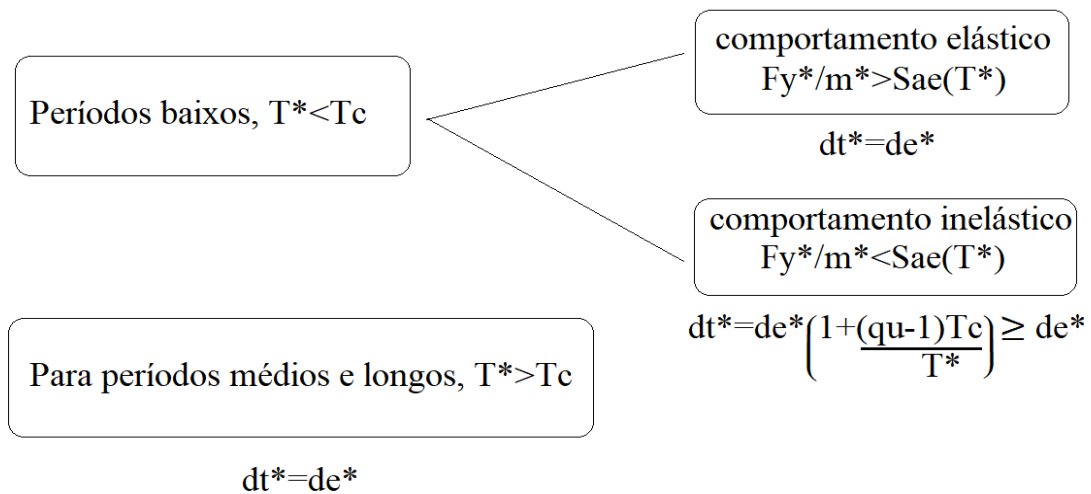
Fonte: Eurocódigo 8 (2010, com adaptações).

O modelo pode se enquadrar em opções de cálculo para períodos baixos, com  $T^* < T_c$ , cabendo ainda identificar se a estrutura apresenta comportamento elástico ou inelástico.

Ao passo disso, a formulação para períodos médios e longos, onde o  $T^* > T_c$ , o deslocamento alvo é equivalente ao deslocamento objetivo.

$$de^* = Sae(T^*) \cdot \left(\frac{T^*}{2\pi}\right)^2 \quad (2.11)$$

Figura 15 – Formulações para obtenção do deslocamento-alvo



Fonte: Elaborado pelo autor.

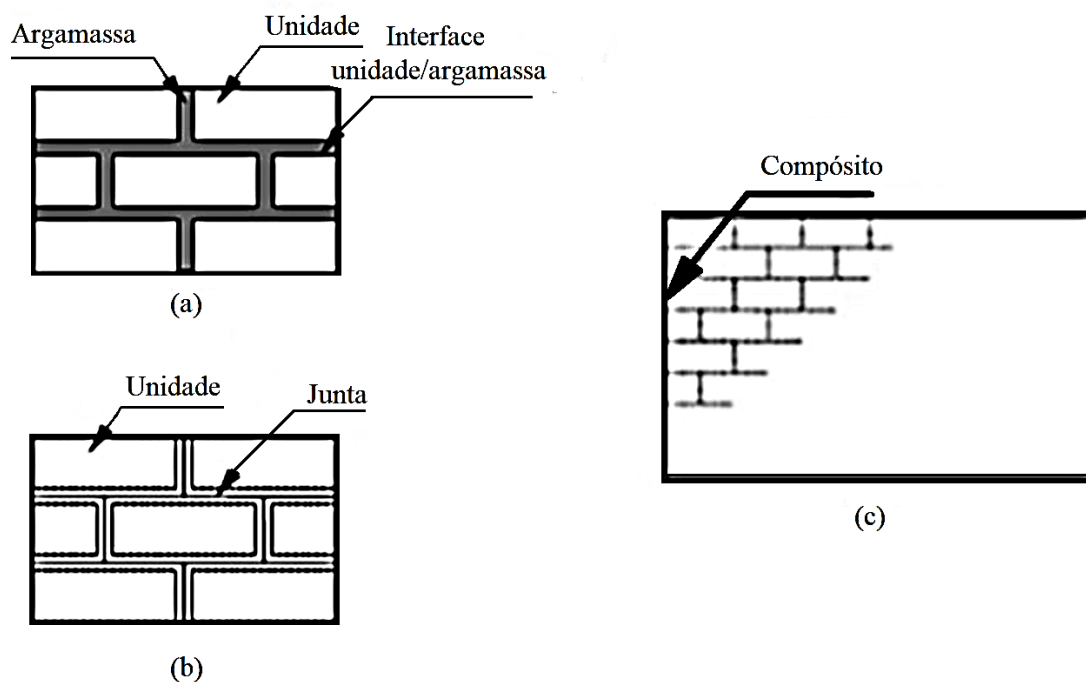
## 2.4 Modelagem Numérica

De acordo com Cervera *et. al* (2010), os estudos sobre a conservação e a segurança estrutural do patrimônio histórico edificado, recorrendo-se a análise estrutural via MEF como meio de análise, são ferramentas de grande valia na avaliação destas estruturas pois, permitem conhecer o estado geral das solicitações que são impostas à estrutura, sejam elas por cargas permanentes, cargas acidentais ou cargas excepcionais. Estas informações são importantes, por exemplo, para se reduzir a intensidade das intervenções e os custos associados a manutenção e preservação de edificações históricas.

Analisar as estruturas históricas ainda compreende a um desafio da engenharia. Que em razão da complexidade geométrica, ou pela falta de conhecimentos sobre os materiais utilizados; citar-se ainda as constantes modificações estruturais no decorrer do tempo e o envelhecimento dos próprios materiais (SANTOS *et al.*, 2016, p. 317).

Para Lourenço (2002), a *micro-modelação* é aplicável quando se pretende averiguar com grande detalhe o comportamento localizado da alvenaria e a *macro-modelação* quando a estrutura é composta por paredes com dimensões tais que a tensão ao longo do elemento pode ser considerada uniforme.

Figura 16 – Técnicas de modelagem: (a) Micromodelagem detalhada, (b) Micromodelagem simplificada; (c) Macromodelagem



Fonte: Lourenço (2002, com adaptações).

Peleteiro (2002), afirma que em cada modelagem apresenta vantagens e desvantagens, a sua escolha depende somente do objetivo a ser alcançado. Ainda nesse contexto, é válido ressaltar que, a resolução numérica de sistemas de equações diferenciais parciais, permitem alcançar soluções sobre o estado de tensão e de deformação de qualquer sólido, seja qual for a sua geometria e ainda sujeita a diversas ações (BRANDÃO, F., et al., 2016).

A técnica de macro-modelagem permite considerar, para o comportamento do material, leis do comportamento não linear. Isso implica que, cada macro-elemento apresentará, à custa de leis constitutivas pré-estabelecidas, forças e deformações generalizadas o que por sua vez acarretarão uma representação mais rigorosa do comportamento do material obtendo-se resultados com maior nível de idoneidade (Nunes, 2013).

Conforme Roque (2002), para uma autenticidade no comportamento real da estrutura, é necessária a calibração do modelo numérico com as propriedades mecânicas dos materiais, os quais são: Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson, Densidade, etc.

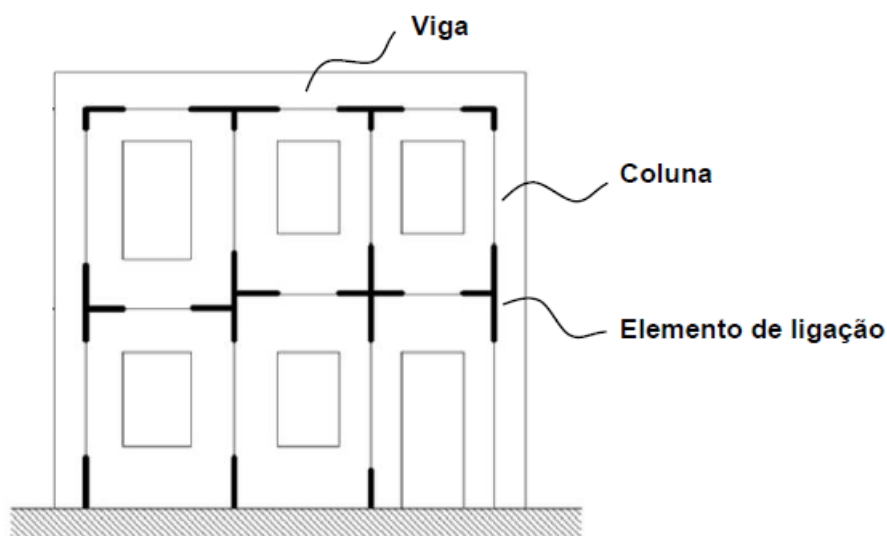
### 2.4.1 Modelo de pórticos equivalentes

No que trata do modelo geométrico, a proposta é idealizar um pórtico equivalente constituído por elementos de barra, de modo a simular vigas e colunas em alvenaria. Esses elementos são conectados por outros, denominados elementos de ligação, ambos unidos por nós em comum.

De acordo com Pereira (2009, p. 33)

Uma parede de um edifício, solicitada no seu plano, pode ser modelada com recurso a um pórtico equivalente onde cada membro é representado por um único macro-elemento (com um número limitado de graus de liberdade), constituindo uma coluna. Os lintéis também são representados por macro-elementos, constituindo vigas. O modelo é, portanto, constituído por colunas e vigas, ligadas entre si através de elementos de ligação rígidos.

Figura 17 – Modelos de pórticos equivalentes propostos

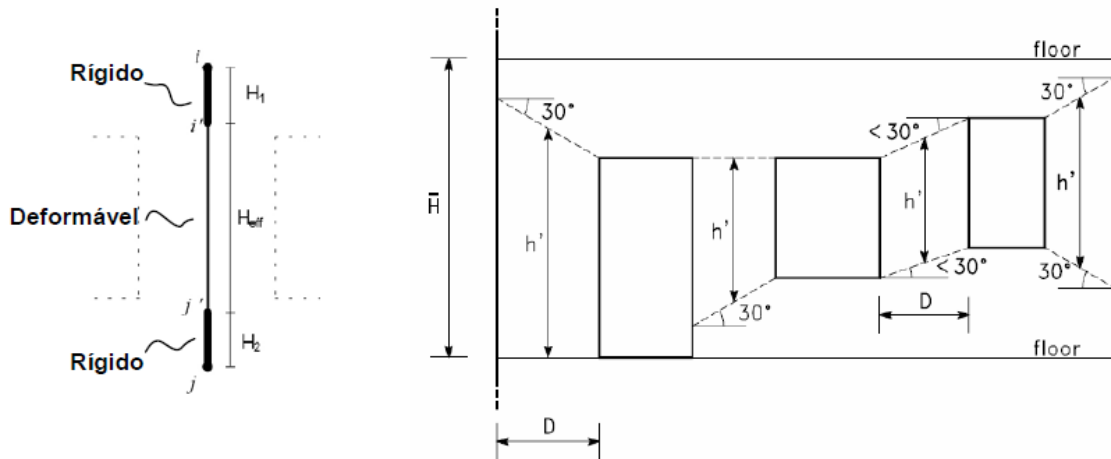


Fonte: Pereira (2009, p. 34).

Assim, Pereira (2009, p. 40) relata que “a idealização de uma parede de uma fachada ou empena de um edifício num pórtico equivalente é bastante expedita, particularmente se o processo for levado a cabo com o auxílio de programas de desenho assistido por computador que possibilitem a exportação directa do modelo para o programa de análise numérica”. Para isso, a obtenção das características geométricas foi feita com base nos trabalhos de Dolce (1989), (Figura 18).



Figura 18 – Determinação da altura efetiva dos pórticos de alvenaria



Fonte: Pereiro (2009, p. 39).

Observa-se que esse modelo conta com a apresentação de um modelo no qual a coluna é representada por 3 segmentos de barra ao longo do elemento, sendo a calculável a parte central deformável e, com base no valor obtido, permite-se quantificar as dimensões das extremidades rígidas. A altura efetiva ( $H_{ef}$ ) pode ser obtida com o uso da equação 2.12, desde que sejam estabelecidas as geometrias referentes a altura obtida da relação geométrica ( $h'$ ), largura do elemento vertical ( $D$ ) e altura entre pisos ( $H$ ).

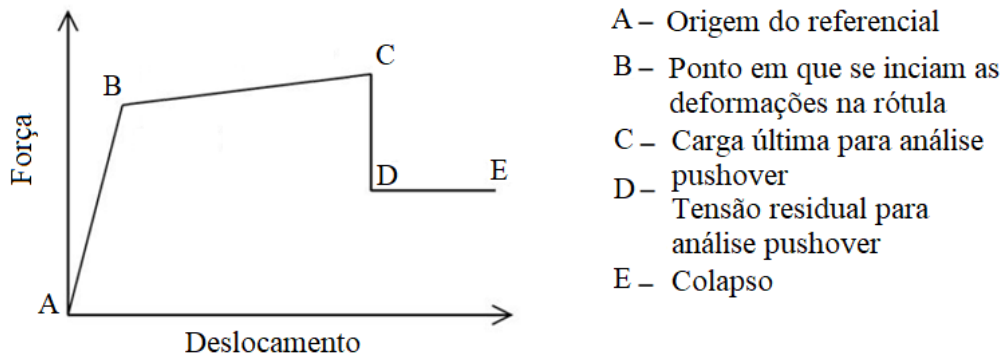
$$H_{ef} = h' + \frac{1}{3} \times D \times \frac{(H-h')}{h'} \quad (2.12)$$

#### 2.4.2 Rótulas Plásticas

As rótulas plásticas são elementos aplicados em análises não lineares com o objetivo de permitir modelar com simplicidade os comportamentos não lineares de elementos. Por meio de parâmetros, pode-se criar relações quantitativas para esforços axiais, cortantes e momentos, bem como, é possível adotar diferentes condições de posicionamento ao longo do elemento.

Nesse sentido, percebe-se a existência de curvas que relacionam força e deslocamento de elementos de barra que são aplicáveis na caracterização de rótulas, para que possa ser possível a determinação do ponto de maior deformação. Segue abaixo um exemplo de curva, definida por Força e Deslocamento, no qual pode-se observar os pontos determinantes para o formato dessa curva.

Figura 19 – Representação gráfica do comportamento de rótulas plásticas

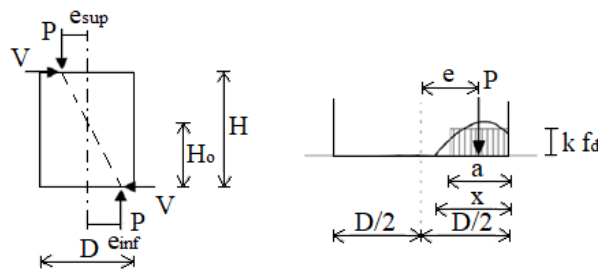


Fonte: adaptado de [20] CSI – Analysis Reference Manual for SAP2000®, ETABS®, and SAFE™, Computers and Structures, Inc., Berkeley, 2007.

O primeiro tramo da curva, correspondente ao trecho AB, caracteriza a deformação inicial no elemento de barra, visto que ainda não foi atingido regime plástico. Nesse sentido, a correspondência às rótulas ocorre apenas a partir do momento que a deformação ultrapassa o ponto B. A partir do ponto C, torna-se perceptível a ocorrência de deformações permanentes associadas ao colapso do material. Por fim, o intervalo delimitado pelos pontos D e E, correspondem as sollicitações que colapsam o material.

Para a quantificação da resistência das alvenarias, adotou-se três mecanismos de colapso, são esses, flexão composta, fendilhação diagonal e deslizamento. Desse modo, a figura abaixo apresenta uma representação dos esforços de flexão composta sob alvenarias.

Figura 20 – Esforços de flexão composta sob alvenarias



Fonte: Magenes, G.; Bolognini D. e Braggio, C. (2000, com adaptações)

Esses esforços resistentes podem ser estimados, desde que sejam conhecidas as dimensões do elemento em análise, a tensão de compressão na seção ( $\sigma$ ) e tensão máxima de compressão adotada ( $f_d$ ), faz-se uso de um fator de distribuição normal a um retângulo, com multiplicador de 0,85 (Equação 2.13).

$$Mrd = \frac{\sigma_o \cdot D^2 \cdot t}{2} \left(1 - \frac{\sigma_o}{k \cdot f_d}\right) \quad (2.13)$$

Dada a relação entre os esforços cortantes e momentos fletores, pode-se estimar a magnitude de esforços transversos associados a flexão que ocorreu no plano, tendo como base os diagramas de momentos. Com isso, o momento resistente já conhecido é identificado como o produto entre o esforço transversal e a distância da secção de controlo à região neutra, também já conhecida.

$$Vrd = \frac{\sigma_o.D^2.t}{2.H_o} \left(1 - \frac{\sigma_o}{k.f.d}\right) \quad (2.14)$$

Ao tratar da resistência a mecanismos de fendilhação diagonal, faz-se uso da formulação apresentada por Turnšek e Sheppard (1980). O autor adota coesão (cu) e um parâmetro ( $\zeta$ ) que relacionar a geometria do elemento de alvenaria, definido pela razão entre as duas variáveis.

$$Vrd = \frac{1,5.cu.D.t}{\zeta} \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{1,5.cu}} \quad (2.15)$$

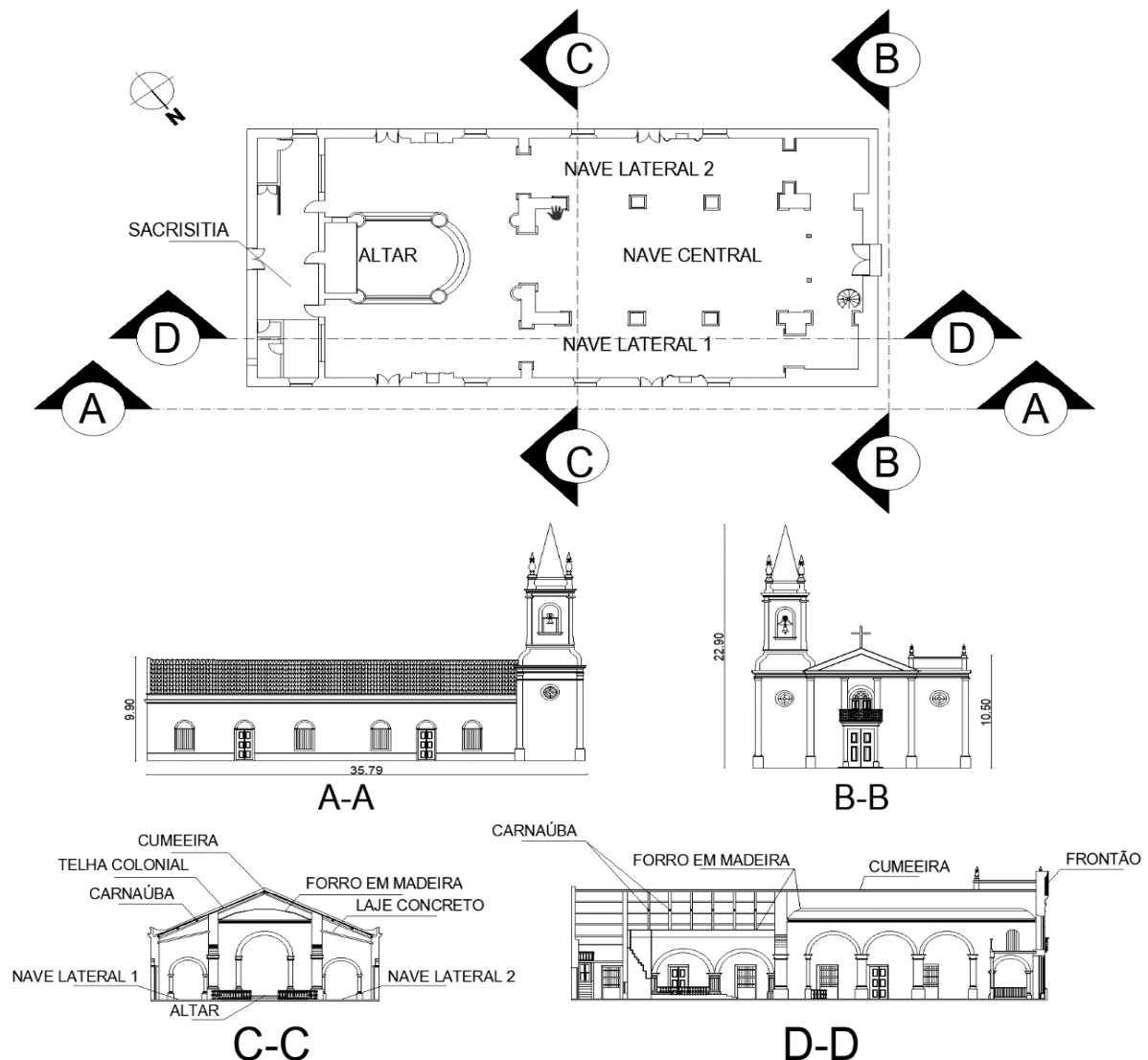
De modo análogo, faz-se uso das considerações dispostas em literatura para quantificar o cortante referente a mecanismos de deslizamento. Desse modo, o Eurocódigo 6 (2000), Eurocódigo 8 (2010), e no regulamento italiano (2003), permitem deduzir o esforço de corte resistente com a equação abaixo, onde se percebe o uso de coesão (cu) e do ângulo de atrito interno ( $\phi$ ).

$$Vrd = \frac{1,5.cu + \sigma.tan\phi}{1 + \frac{3.H_o}{\sigma.D}cu} (D.t) \quad (2.16)$$

### 3 ESTUDO DE CASO

A relação proporcionada pelo emprego de alvenarias com função estrutural é responsável por vincular funções estruturais a elementos também arquitetônicos, com atuação de mecanismos de distribuição de esforços não perceptíveis a primeira impressão. Desse modo, aliou-se levantamentos (Figura 21) geométricos e visitas técnicas a edificação para viabilizar hipóteses a respeito edificação.

Figura 21 – Representação do levantamento geométrico da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados obtidos, o presente estudo fez uso de três modelos numéricos para o desenvolvimento das análises. Optou-se por confeccionar um modelo tridimensional associado a parcela das atividades de caracterização não linear e uma análise modal prévia da estrutura em regime elástico, com resultados que pudessem indicar regiões de interesse investigativo em análises locais para elaboração mais dois modelos de pórticos em alvenaria, para os eixos longitudinal e transversal da edificação.

A presença de elementos arquitetônicos sem função estrutural em um modelo numérico é associada a uma série de exigências para garantir maior refino no processo de confecção da malha e ainda sujeitar o modelo a descontinuidades, acúmulo de tensões e um maior número de elementos, tornando as simulações mais dispendiosas. Análogas

considerações podem ser submetidas a elementos cuja substituição por carregamentos seja de viabilidade comprovada, sem haver alterações nos mecanismos estruturais da edificação.

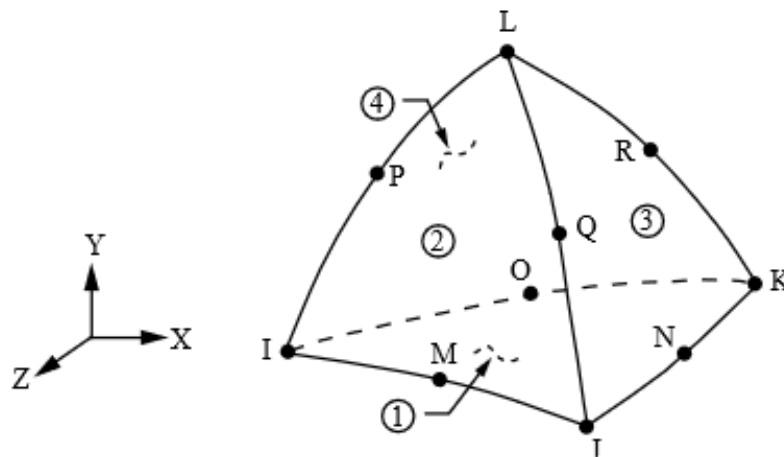
Desse modo, a aplicação dos métodos numéricos para se proceder com a execução das simulações, fez-se com software ANSYS®, versão 17.1. E para se evitar erros durante a discretização da malha em elementos finitos, buscou-se realizar simplificações geométricas que excluíssem a presença de elementos arquitetônicos sem função estrutural, substituindo elementos de forro, madeiramentos, escadas e lajes por carregamentos equivalentes.

### 3.1 Modelos numérico

#### 3.1.1 Modelo numérico 3D

Para tanto, fez-se uso do elemento SOLID187, que compõe o conjunto pertencente a biblioteca do software utilizado, com 10 nós com 6 graus de liberdade para cada nó. Apresenta propriedades que permitem simular materiais ortotrópicos, anisotrópicos e elastoplásticos, dada sua capacidade plástica, hiperplásticas, permissão de fluência, rigidez de tensão, grandes deflexões e grandes capacidades de deformações, com formulações mistas para simular deformações.

Figura 22 – Elemento SOLID187

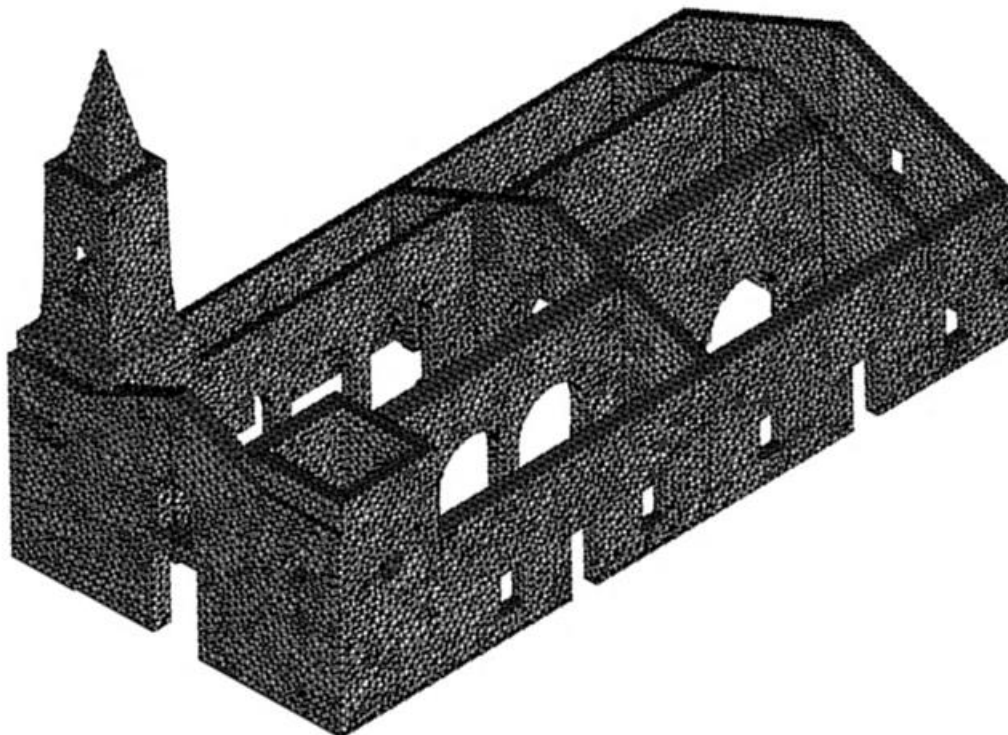


Fonte: Biblioteca ANSYS®, 17.1.

Dado nível de precisão requerido para a realizar a simulações obter resultados que expressem respostas globais da estrutura, tornou-se viável permitir a aproximação dos elementos cerâmicos e argamassados à um material compósito homogêneo com o uso de

técnicas de macromodelagem. Segundo Nunes (2013), isso implica que cada macro-elemento apresentará, à custa de leis constitutivas pré-estabelecidas, forças e deformações generalizadas, que por sua vez acarretarão uma representação mais rigorosa do comportamento do material obtendo-se resultados com maior nível de idoneidade. Por fim, o resultado foi uma malha que totalizou 144457 elementos e 242382 nós (Figura 23).

Figura 23 – Modelo numérico 3D para a Igreja

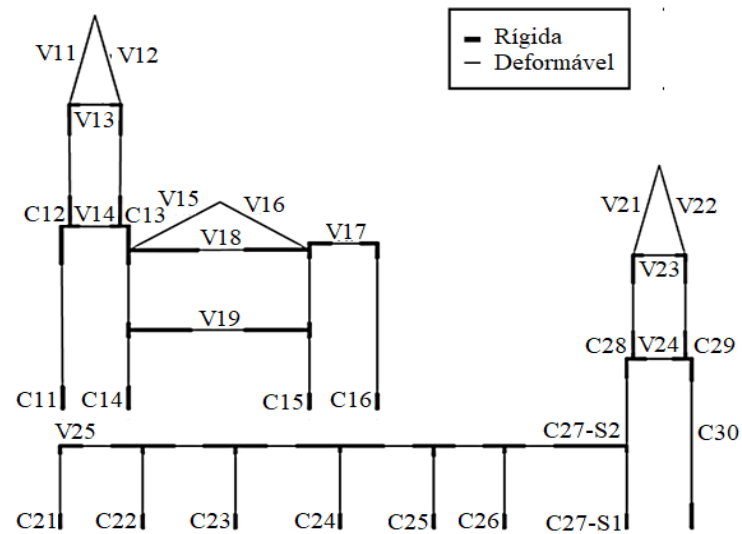


Fonte: Elaborado pelo autor.

### ***3.1.2 Modelos numéricos em Pórticos Equivalentes***

Nessa etapa, optou-se pela elaboração de modelos de pórticos equivalentes que simplificasse as estruturas compostas por alvenaria, de modo a possibilitar a inserção de rótulas plásticas diretamente nos nós. Para isso, seguiu-se o modelo de pórticos equivalentes proposto nos trabalhos de Dolce (1989), apresentados na Figura 24. As geometrias dos elementos que compoem os pórticos, no eixo perpendicular aos carregamentos, foram definidas pelas descritas no Capítulo 2, com seus resultados apresentados na (Quadro 3) abaixo.

Figura 24 – Representação do modelo de pórticos adotado



Fonte: Elaborado pelo autor.

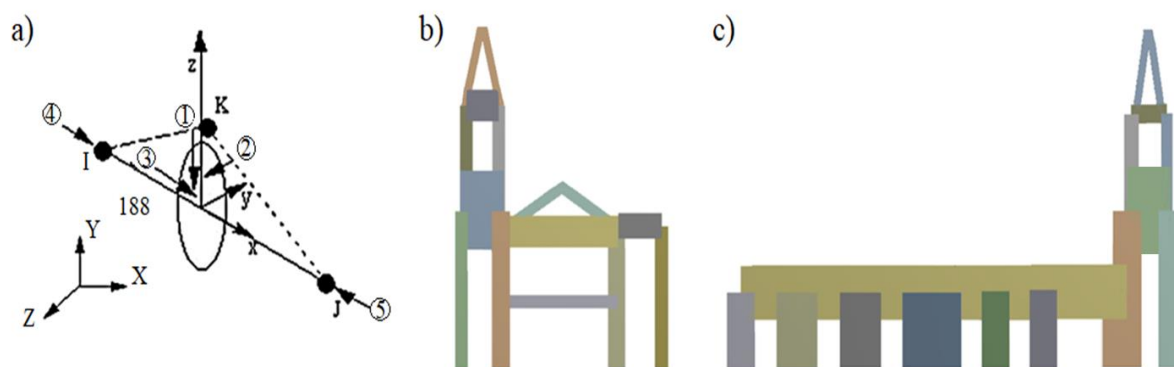
Quadro 3 – Referências e geométricas dos elementos de barras dos pórticos do modelo

	Vigas		Colunas	
	Referência	Geometria(m)	Referência	Geometria(m)
Pórtico Transversal	V11	0,40	C11	1,50
	V12	0,40	C12	0,80
	V13	2,40	C13	0,80
	V14	2,35	C14	1,35
	V15	1,00	C15	1,35
	V16	1,00	C16	0,80
	V17	1,58		
	V18	1,07		
	V19	0,26		
Pórtico Longitudinal	Vigas		Colunas	
	Referência	Geometria(m)	Referência	Geometria(m)
	V21	0,48	C21	2,250
	V22	0,48	C22	3,200
	V23	1,20	C23	3,200
	V24	2,40	C24	4,600
	V25	3,40	C25	2,100
			C26	2,100
			C27-s1	2,250
			C27-s2	2,000
			C28	0,900
		C29	0,900	
		C30	2,000	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ambos modelos foram confeccionados com o elemento BEAM188, adequado para analisar estruturas de vigas delgadas. É um elemento de viga linear 3D, composto com 2 nós, com seis graus de liberdade em cada nó, adequado para aplicações não lineares, de grande rotação e deformação não linear. Para o modelo extraído no sentido longitudinal, tem-se um total de 282 elementos e 563 nós, e para o transversal, 93 elementos e 185 nós.

Figura 25 – Modelo numérico em pórticos equivalentes para as alvenarias da igreja: (a) Elemento BEAM188, (b) Pórtico transversal; (c) Pórtico longitudinal



Fonte: (a) Biblioteca ANSYS® 17.1.; (b) e (c) elaborado pelo autor.

### 3.2. Caracterização dos Materiais e Métodos Construtivos

No ano de 1775, inicia-se a construção da edificação de maneira simples, primeiramente contou apenas com duas alas laterais e capela-mor no seguimento da nave central. Esse fato ter sido providenciado por escravos convertidos ao catolicismo é visto como um símbolo da resistência negra a segregação racial na época colonial brasileira.

Em termos de materiais, Alves et al. (2016), reforça que a Igreja possui paredes de alvenaria em tijolo cerâmico maciço com espessura média de 60 cm e suporta uma cobertura, com treliças de madeira com caibros e terças de carnaúba, e um telhado de duas águas com inclinação de 48%.

O seu piso é ladrilho hidráulico sobre outro piso de tijoleira. Nas naves laterais, há lajes pré-moldadas sob a estrutura de madeira original, apoiada sobre a alvenaria. (ALVES, 2017).

Para a atribuição das propriedades mecânicas do material, recorreu-se a literatura existente afim de encontrar dados usuais para a caracterização dessas alvenarias. Onde o Módulo de Elasticidade (E) e a Resistência a Tração (ft) foram obtidos no trabalho desenvolvido por Branco (2007).

Também foram estimados, o Peso Específico (w) e a Resistência à Compressão (fc)



foram obtidos através dos parâmetros estimados na NCT (MIT,2008) e o Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), nos trabalhos de (Brandão, 2017), Branco (2007) e Frazão (2013).

Quadro 4 – Propriedades mecânicas adotadas nos modelos numéricos

<b>Propriedade mecânica</b>	<b>Magnitude</b>
E (GPa)	1,70
w (kN/m <sup>3</sup> )	18,00
f <sub>c</sub> (MPa)	3,20
f <sub>t</sub> (MPa)	0,16
$\nu$	0,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Carregamentos Aplicados

Para a quantificação das solicitações atuantes, recorreu-se a literatura. E a primeira observação sob os carregamentos trata da distinção na aplicação das cargas nas alvenarias laterais, que conta com a sobreposição de lajes pré-moldadas de concreto armado e forro de madeira com caibros e terças de carnaúba, ao passo que na nave central é mantida apenas o madeiramento.

Em seguida, para o cálculo das lajes em concreto pré-moldado, foram analisados e com base no levantamento geométrico foi estipulado o volume empregado. Então, aplicou-se uma carga acidental de 0,5 KN/m<sup>2</sup> sobre o concreto com o peso específico do 25 kN/m<sup>3</sup>, de acordo com NBR 6120 (1980).

Posteriormente, os carregamentos do madeiramento, adotaram os parâmetros propostos por Brandão (2017), que considera NBR 6120 (1980) também os trabalhos de Branco (2007) e Neves (2008). Foi considerado um carregamento de 0,6 KN/m<sup>2</sup> sobre o forro executado com técnicas vernaculares a base de cal e gesso.

Ainda sobre esse carregamento, foi acrescentado a representação de ripas, telhas, caibros e treliças, com 1,30 KN/m<sup>2</sup>. E referente a sobrecargas e cargas acidentais, recomenda-se um acréscimo 0,5 KN/m<sup>2</sup>, conforme NBR 6120 (1980), e um acréscimo de 50% por Branco (2017) e, totalizando um montante de 3,35 KN/m<sup>2</sup>.

Quadro 5 – Considerações a respeito dos carregamentos adotados

Elemento	Representação	Consideração
Lajes de concreto	Carga acidental	0.5 KN/m <sup>2</sup>
	Peso específico	25 KN/m <sup>3</sup>
Madeiramento	Forro em madeira	0.6 KN/m <sup>2</sup> +50%
	Ripas, telhas, caibros e treliças	1.3 KN/m <sup>2</sup> +50%
	Carga acidental	0.5 KN/m <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que trata dos carregamentos inseridos nos nós dos modelos de pórticos em elementos de barra, recorreu-se a literatura para atribuição de parâmetros para quantificar a resistência do modelo a flexão para fendilhação diagonal, e para mecanismos de deslizamentos. As equações e as metodologias de quantificação desses esforços foram dissertadas no capítulo anterior e estão presentes no Quadro 6 abaixo.

Quadro 6 – Mecanismos, esforços e equações atribuídas aos modelos de pórticos

Mecanismos	Esforços Resistentes	Equação
Flexão Composta	$M_{rd} = \frac{\sigma_0 \cdot D^2 \cdot t}{2} \left(1 - \frac{\sigma_0}{k \cdot f_d}\right)$ e $V_{rd} = \frac{\sigma_0 \cdot D^2 \cdot t}{2 \cdot H_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{k \cdot f_d}\right)$	2.13 e 2.15
Fendilhação Diagonal	$V_{rd} = \frac{1,5 \cdot c_u \cdot D \cdot t}{\xi} \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma_0}{1,5 \cdot c_u}\right)}$	2.15
Deslizamento	$V_{rd} = \frac{1,5 \cdot c_u + \sigma_0 \cdot \tan \phi}{1 + \frac{3 \cdot H_0}{\sigma_0 \cdot D} \cdot c_u} \cdot D \cdot t$	2.16

Fonte: Pereira (2009, com adaptações).

### 3.4. Caracterização do Espectro de Resposta

Para a caracterização do espectro de resposta foram seguidos parâmetros da NBR 15421 (ABNT, 2006). A região foi caracterizada como passível a acelerações sísmicas horizontais de aproximadamente 0,49 m/s<sup>2</sup>. Também foram aplicados fatores de ampliação (Ca e Cv), com intensidades de 1,6 e 2,4, para possibilitar a quantificação das acelerações espectrais

ags0 e ags1 e obter o espectro com as equações abaixo.

$$Ags0 = Ca \cdot ag \quad (3.1)$$

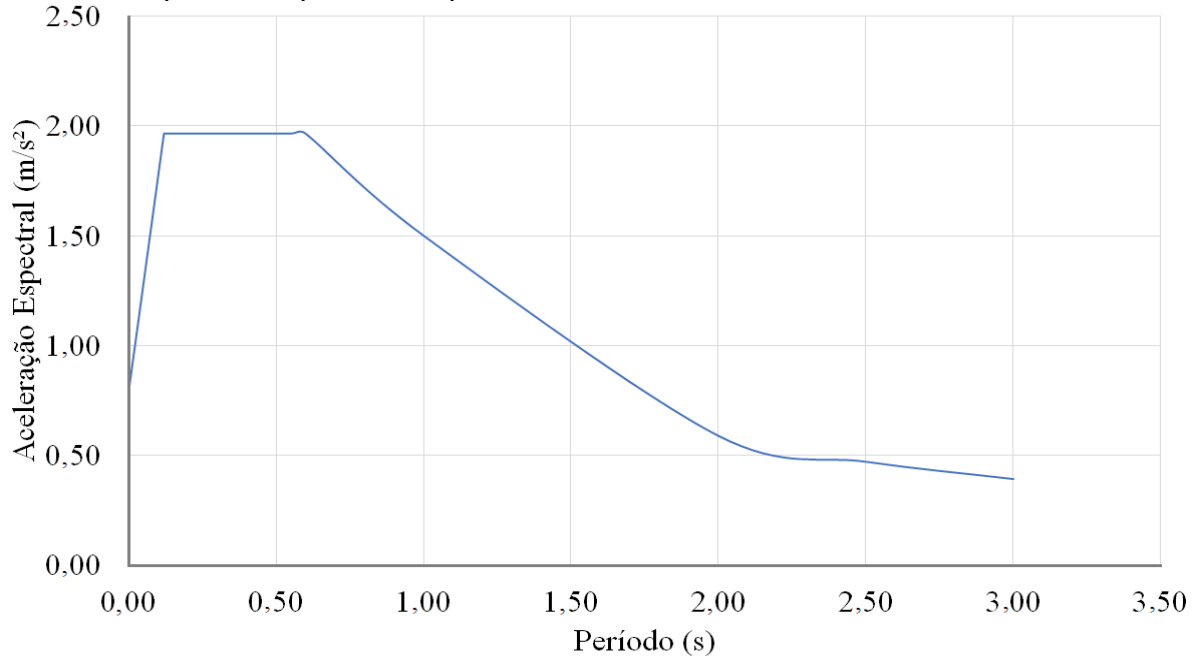
$$Ags1 = Cv \cdot ag \quad (3.2)$$

$$Sa(T) = Ags0 \cdot \left(18,75 \cdot T \cdot \frac{Ca}{Cv} + 1\right) \quad \text{para } 0 < T \leq 0,08 \cdot \frac{Cv}{Ca} \quad (3.3)$$

$$Sa(T) = 2,5 \frac{Ags0}{T} \quad \text{para } 0,08 \cdot \frac{Cv}{Ca} \leq T \leq 0,04 \cdot \frac{Cv}{Ca} \quad (3.4)$$

$$Sa(T) = \frac{Ags1}{T} \quad \text{para } 0,04 \cdot \frac{Cv}{Ca} \leq T \quad (3.5)$$

Gráfico 1 – Espectro de resposta elástica para a cidade de Aracati, Ceará.

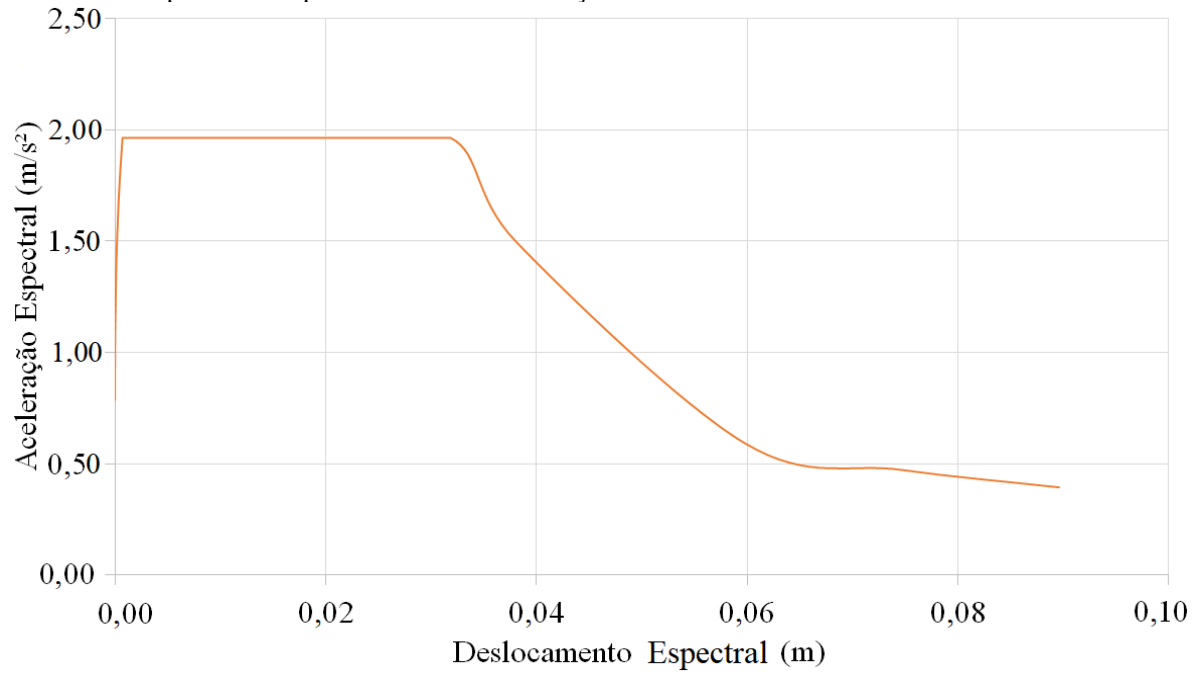


Fonte: elaborado pelo autor.

Constatou-se que a aceleração no período inicial apresenta intensidade de 0.7856 m/s<sup>2</sup>, com acréscimo constante até seu ponto de intensidade máxima, onde apresentou intensidade de 1.964 m/s<sup>2</sup> no intervalo de 0.12 até 0.6 segundos. Após esse ponto ocorre uma redução gradual da aceleração horizontal e das solicitações sísmicas.

Os dados já obtidos permitem confeccionar o espectro sob o formato aceleração-deslocamentos, de modo análogo ao gráfico anterior. Contudo, o mesmo apresenta uma relação referente ao modelo espectral sob uma perspectiva de deslocamentos associados as acelerações horizontais, conforme a Figura 27.

Gráfico 2 – Espectro de respostas no formato aceleração-deslocamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS

O presente tópico apresenta os resultados relativos ao emprego da metodologia de análise sísmica não linear *pushover* convencional, em uma edificação histórica. Trata-se da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens pretos, que compõe o conjunto patrimonial da cidade de Aracati, no Ceará, datado do século XVIII, conta com o emprego de alvenarias vernaculares com função estrutural.

Para tanto, seguiu-se as recomendações do Eurocódigo 8 (2010), que exige no mínimo duas distribuições de forças, a primeira trata de carregamentos uniformes proporcionais a massa da estrutura, a segunda, com base no modo de vibração fundamental da estrutura e magnitude definida pelo produto da massa pelo deslocamento modal. Também foi acrescido um carregamento triangular crescente com a altura e proporcional a massa da estrutura.

Com o intuito de se analisar os eixos longitudinal e transversal da igreja, primeiramente se caracterizou o espectro de resposta inelástico para a região e se procederam simulações prévias em regime elástico. Isso com o intuito de obter informações iniciais a respeito das propriedades que a estrutura pode apresentar sob demanda de fenômenos que introduzam oscilações, e assim, identificar possíveis regiões de maior vulnerabilidade a mecanismos danoso, para implementação durante a confecção de modelos em pórticos equivalentes para análises locais.

Nesse sentido foi possível extrair dados referentes a dois modelos em pórticos equivalentes para os eixos longitudinal e transversal, e também um modelo geométrico tridimensional para obtenção dos resultados em análise modal e análises não linear das regiões solicitadas nos primeiros modos de vibração. Os modelos em pórticos incluem a torre sineira, constatado a possível vulnerabilidade do elemento proporcionada por sua esbeltez.

De modo geral, os resultados não lineares para a estrutura em alvenaria se baseiam em grupos de curvas de capacidade associadas aos carregamentos aplicados nos modelos, para os eixos longitudinal e transversal. Ademais, para a situação crítica, foram obtidos e analisados os pontos de deslocamento objetivo que competem a parâmetros de funcionamento dessa estrutura histórica, correspondendo a um possível deslocamento máximo.

O procedimento adotado abrange variáveis da estrutura que fornecem informações relevantes para o contexto de atividades sísmica da região. São esses, as rigidezes iniciais e totais proporcionadas pelas alvenarias, o deslocamento de cedência, e também, inferências a respeito do comportamento global da estrutura em regime não linear.

#### 4.1 Espectro Inelástico e Análise Modal

O espectro de resposta inelástico é definido com base em fatores de redução para representar a dissipação de energia presente no sistema (equação 4.1 e 4.2). Por fim, as magnitudes inelásticas associadas à valores de ductibilidade constante se tornam de possível estimativa com o uso das equações (4.3 e 4.4).

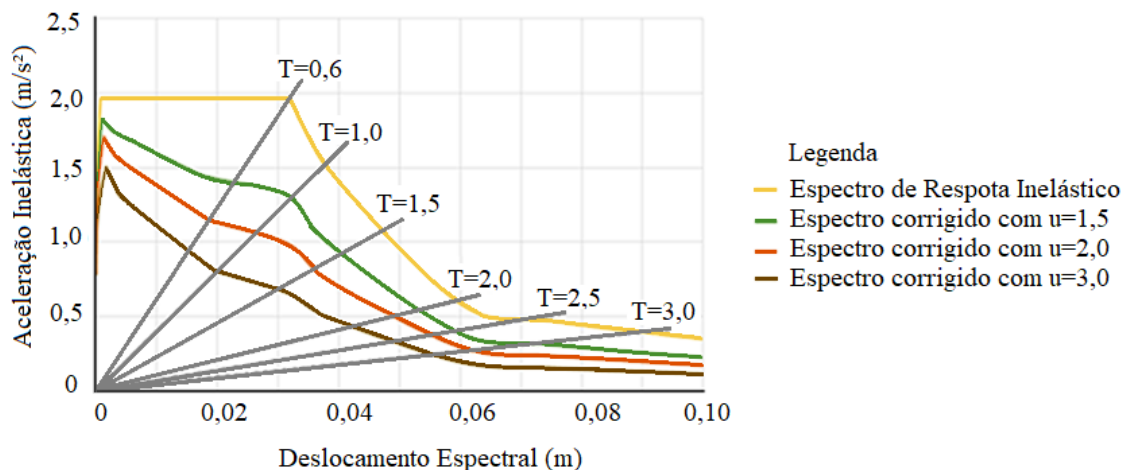
$$q_u = (u - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \quad \text{para } T < T_c \quad (4.1)$$

$$q_u = u \quad \text{para } T \geq T_c \quad (4.2)$$

$$A_s = \frac{S_{ae}}{q_u} \quad (4.3)$$

$$S_d = \mu \frac{S_{de}}{q_u} \quad (4.4)$$

Gráfico 3 – Espectro de Resposta em regime inelástico para diferentes fatores de redução



Fonte: Elaborado pelo autor.

O espectro de resposta inelástico foi obtido no formato aceleração-deslocamentos e ajustado com fatores de comportamento que possibilitaram a elaboração do espectro inelástico.

Dessa forma, verificou-se que a aceleração máxima do regime inelástico sem correção possui intensidade máxima em  $1,92 \text{ m/s}^2$  e comportamento em tramo constante até  $0,032$  metros, posterior a isso, os valores tendem a decrescer com o aumento do deslocamento. Contudo, percebe-se que a correções apresentaram intensidades máximas de  $1,82$ ;  $1,71$  e  $1,51$ , para os respectivos fatores de  $1,5$ ;  $2$  e  $3$ , onde se nota a relação de decréscimo com o aumento do fator de correção adotado e com o aumento do período.

Com relação aos resultados obtidos em análise modal, extraiu-se valores referentes

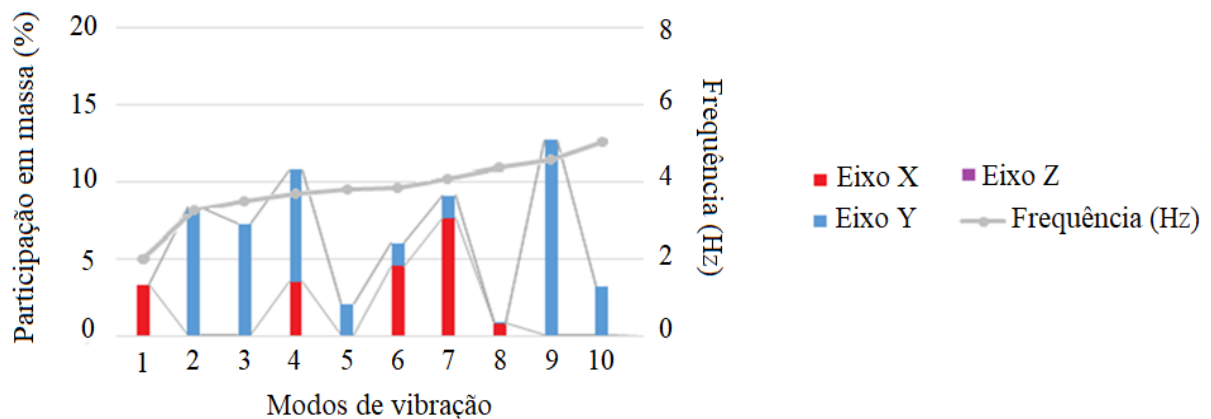
as frequências, períodos e participações de massa para os 10 primeiros modos de vibração da estrutura nos eixos longitudinal, transversal e vertical, denominados de X, Y e Z, respectivamente (Quadro 7).

Quadro 7 – Frequência natural e período para os dez primeiros modos de Vibração

Modo de Vibração	Frequência (Hz)	Período (s)	Participação de massa (%)		
			Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
1	2,02	0,49	3,35	0,00	0,00
2	3,20	0,31	0,07	8,34	0,00
3	3,45	0,29	0,06	7,22	0,00
4	3,63	0,28	3,56	7,21	0,00
5	3,73	0,27	0,09	1,99	0,00
6	3,79	0,26	4,53	1,50	0,00
7	4,00	0,25	7,69	1,40	0,00
8	4,28	0,23	0,83	0,08	0,00
9	4,46	0,22	0,10	12,60	0,00
10	4,91	0,20	0,09	3,17	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

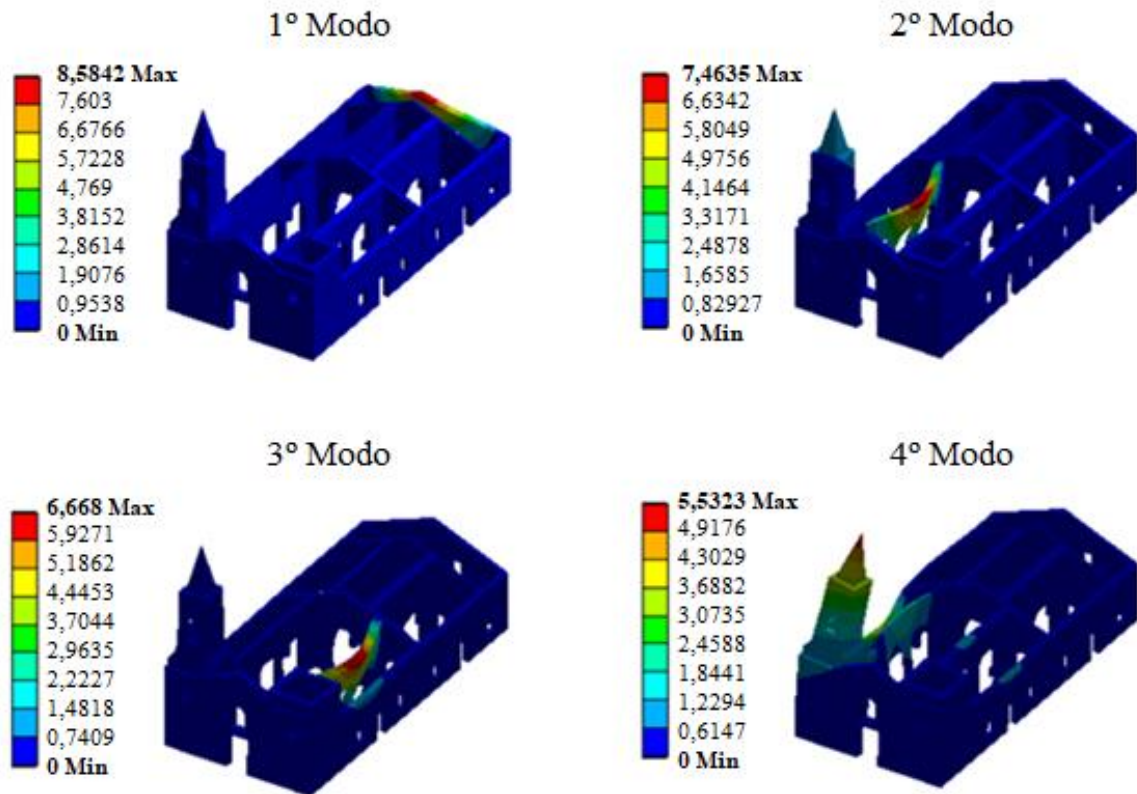
Gráfico 4 – Propriedades dos dez primeiros modos de Vibração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse sentido, também foi confeccionado os resultados de deslocamentos para os 4 primeiros modos de vibração, constatada a importância dos primeiros modos no comportamento global da estrutura (Figura 26).

Figura 26 – Deslocamentos para os quatro primeiros modos de vibração



Fonte: ANSYS, versão 17.1.

Observa-se que nos primeiros modos de vibração, predominam solicitações de flexão locais. Dentre eles, o maior destaque é a alvenaria posterior da edificação, que apresentou o maior deslocamento, com aproximadamente 8,58 mm no eixo X.

Os demais apresentam destaque as movimentações no eixo Y, com solicitações a flexão sobretudo na alvenaria lateral esquerda da nave central, que apresentou deslocamentos de até 7,43 mm. A análise ainda aponta a torre sineira como uma região de suscetibilidade a fenômenos oscilatórios, provenientes de sua geométrica.

Portanto, definiu-se que os carregamentos modais em regime estático não linear incidiriam diretamente sob as regiões referentes ao 1º e 2º modo de vibração, para os eixos longitudinal e transversal, respectivamente. Ao passo que a adoção de pórticos equivalentes que englobam a torre sineira também é válida para o desenvolvimento da análise investigativa.

## 4.2 Curvas de Capacidade

As curvas de capacidade resistentes obtidas para os modelos, são resultados gráficos de deslocamentos globais obtidos em análise estática não linear, ordenados em função

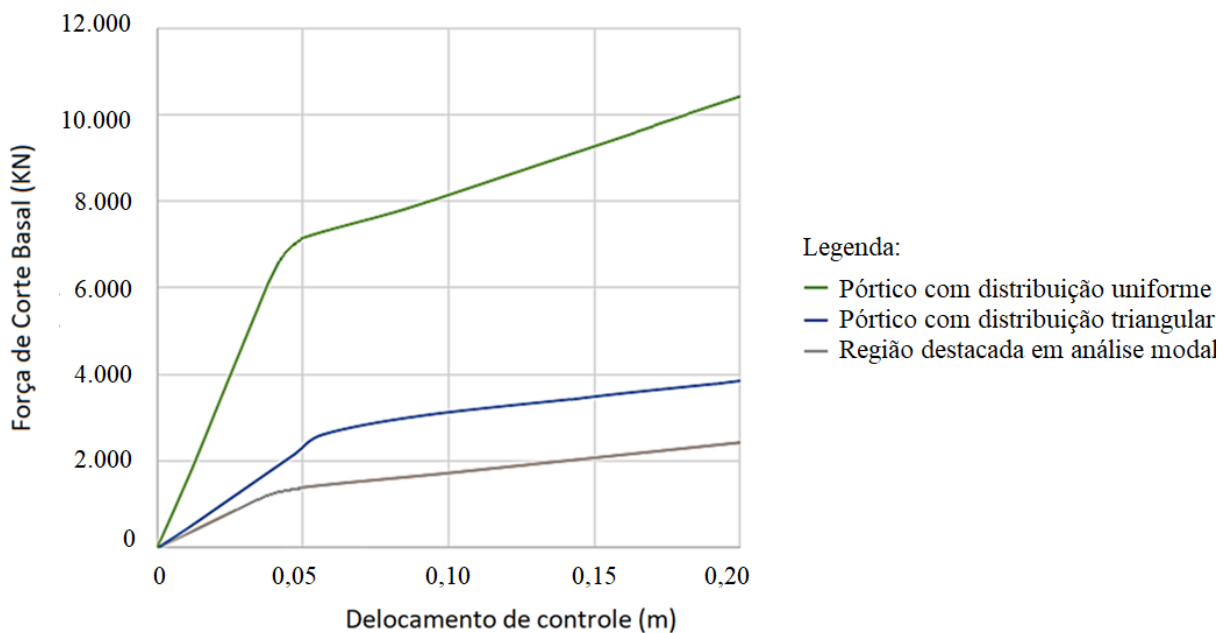


de forças de corte basais aplicadas sob a estrutura. Nesse sentido, extraiu-se resultados de forma sequencial à aplicação de esforços horizontais, expressos em carregamentos distribuídos para representação de ações sísmicas.

Abaixo seguem as curvas referentes a solicitações nos eixos longitudinal e transversal. Para cada eixo, são indicadas três situações de curvas de capacidade, a primeira e a segunda são referentes as distribuições uniformes e triangulares crescentes a partir do zero e no sentido do topo da edificação, respectivamente.

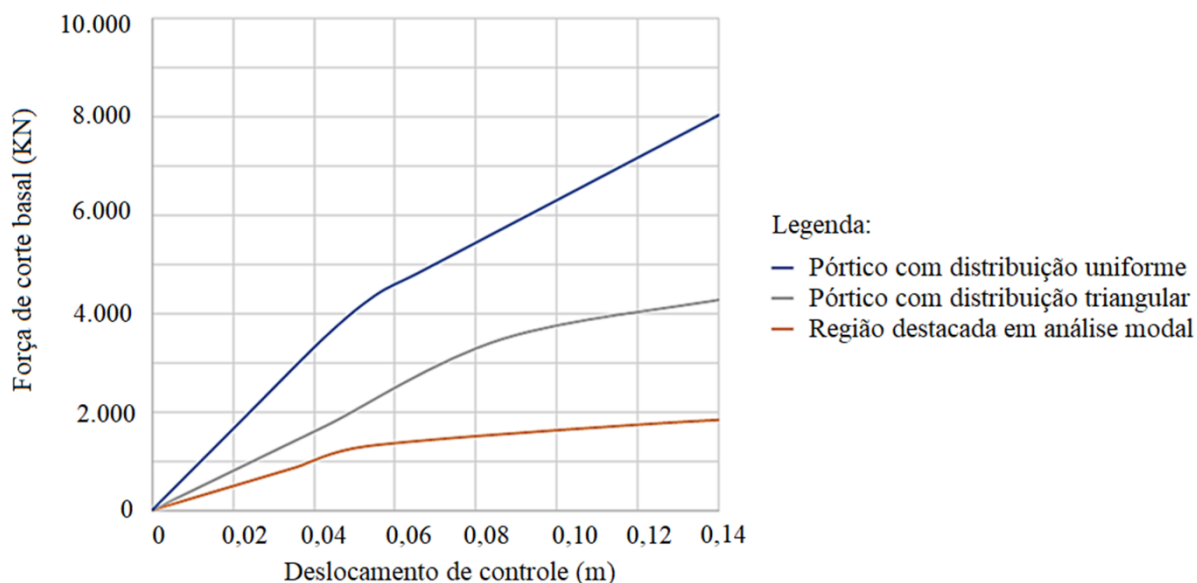
Por fim, a terceira situação adota o comportamento global da estrutura, com uso do modelo numérico tridimensional e aplicação de carregamentos proporcionais a massa da estrutura, incidindo diretamente nas regiões de maior vulnerabilidade, definidas em regime elástico. Logo, na representação gráfica, vê-se os carregamentos de corte basal sob ordenadas e os deslocamentos de controle nas abcissas.

Gráfico 5 – Curva da capacidade para o eixo Longitudinal



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – Curva da capacidade para o eixo Transversal



Fonte: elaborado pelo autor.

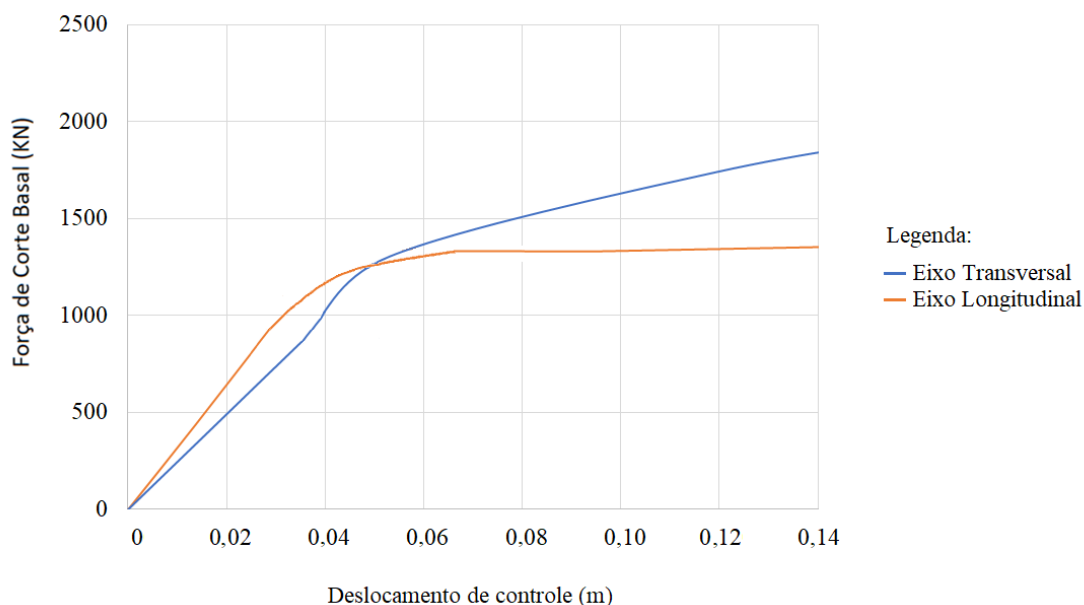
Com isso, percebe-se a distinção entre as distribuições de carregamentos adotados nos modelos, que divergiram em termos de sensibilidade sísmica, ressaltando variações do comportamento força-deslocamento e regiões com início da atuação de mecanismos plásticos.

O carregamento uniforme exigiu esforços de corte que intensificam o cisalhamento na base da edificação. Ao passo que as solicitações triangulares crescentes no sentido do topo da edificação, demonstraram maior susceptibilidade a mecanismos de flexão, evidenciando a não existência de elementos contraventantes na região superior da estrutura.

Então, ao inferir a respeito da sensibilidade da estrutura frente as solicitações deslocamentos maiores, a primeira opção de carregamento relaciona os esforços à pontos de deslocamentos de menor intensidade, devido a condição de engaste atribuída a base dos modelos. No segundo, há participativa atuação resistente das colunas centrais, elementos que propiciaram maior resistência na região central do templo, e conseqüentemente, maior concentração de esforços e deslocamentos.

Com relação as curvas para regiões solicitadas nas primeiras análises modais, seus comportamentos se aproximaram de solicitações triangulares, ainda com os maiores deslocamentos dentre as três opções, e conseqüentemente, a situação mais crítica da edificação para ambos eixos.

Gráfico 7 – Curvas de capacidade regiões destacadas em análise modal



Fonte: elaborado pelo autor.

Diante a conjuntura, os resultados obtidos demonstram curvas de capacidade resistente com sensibilidade sísmica representada por comportamentos gráficos semelhante aos modelos apresentados por Marques (2013), Nunes (2013) e Ferreira (2014).

Em análise estática, é evidente a atuação de mecanismos distintos para as regiões modais em cada eixo. Contudo, o eixo longitudinal apresentou maior sensibilidade ao surgimento de deslocamentos sob a aplicação de esforços de mesma magnitude e ao surgimento de mecanismos plásticos, por motivos associados a baixa rigidez local da estrutura, como elevados comprimento livre da alvenaria posterior e altura efetiva.

#### 4.3 Deslocamento alvo

Os pontos de desempenho foram obtidos por combinações dos resultados obtidos das curvas de capacidade e espectros de resposta, conforme a adoção do método N2 para quantificar o deslocamento alvo, tornando-os dependentes das características dinâmicas dos sistemas. Nesse sentido, adotou-se um valor médio de 150% do estimado, segundo recomendações do Eurocódigo 8 (2010), por se tratar de uma metodologia simplificada, seus resultados podem apresentar significativa dispersão dos valores reais.

De modo a simplificar o procedimento de cálculo e estabelecer o ponto de desempenho para a situação de maior vulnerabilidade na edificação, foram realizadas as análises para as solicitações aplicadas sob a análise modal (Quadro 8), visto que dentre as

solicitações empregadas aos modelos, a curva para carregamentos em região modal no eixo longitudinal apresentou menor rigidez às solicitações sísmicas.

Os valores correspondentes a  $dy^*$  tratam do deslocamento de cedência do sistema idealizado,  $T^*$  ao período elástico do sistema equivalente,  $Sae(T)$  à aceleração elástica para o período do sistema equivalente e  $de^*$  ao deslocamento objetivo, extraído do sistema idealizado para um grau de liberdade, é numericamente igual ao deslocamento alvo.

Quadro 8: Resumo de propriedades para o sistema equivalente

Variável	Solicitações longitudinais	Solicitações transversais
$dy^*$	0,051	0,043
$T^*$	2,984	3,88
$Sae(T^*)$	0,394	0,256
$de^* = dt^*$	0,089	0,096
$dt^* (150\%)$	0,134	0,144

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi constatado que a seção longitudinal apresentou um ponto de desempenho de magnitude inferior ao obtido para representar o sentido transversal. O eixo longitudinal também apresentou menor período elástico para o sistema equivalente e maior aceleração elástica, portanto, constata-se ser o eixo de maior vulnerabilidade dinâmica sob excitação por vibrações.

Segundo o EC8(2005), que define três estados limites referentes exigências de desempenhos e parâmetros de conformidade, a edificação analisada se enquadra no Estado Limite de Dano Significativo, com 10% de probabilidade de ser ultrapassada em 50 anos e um período de retorno de 475 anos. Com o acometimento de determinados elementos estruturais, encontra-se capaz de sustentar cargas verticais e com capacidade de sustentar-se após atividades de intensidade moderada, mas apresenta degradação da resistência e rigidez residual, deslocamentos moderados e manifestações danosas visíveis.

## 5 CONCLUSÃO

Esse trabalho foi desenvolvido objetivando caracterizar, frente ações sísmicas, a estrutura da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos, uma edificação histórica do século XVIII. Ao se recorrer as informações disponíveis em literatura sob caracterização das alvenarias e possíveis metodologias de análises, recorreu-se a aplicação do método N2, onde se confeccionou três modelos numéricos em elementos finitos para elaboração de curvas de capacidade resistente, e os resultados foram comparados para que fosse possível inferir a respeito do comportamento global da edificação.

Trabalhos dessa natureza representam significativa contribuição para procedimentos de caracterização estrutural de modo não destrutivo, constatado o potencial e aplicabilidade de ferramentas computacionais para identificação de zonas críticas e extração de informações a respeito da conversão de solicitações em mecanismos danosos. Desse modo, a adoção de métodos não lineares para tais atividades demonstra resultados de maior idoneidade e favorecimento a exploração de propriedades mecânicas dos materiais que não são possibilitadas em análises elástica.

O trabalho apresentou, em análise modal, os dez primeiros modos de vibração da estrutura e suas respectivas frequências, períodos e participação de massa. Em análise, identificou-se a evidente participação da alvenaria posterior no primeiro modo de vibração para o eixo longitudinal, em seguida as alvenarias que compõem a nave central no eixo transversal, e por fim, a torre sineira, que foi posteriormente incluída em modelos de pórticos equivalentes para os eixos transversal e longitudinal.

O primeiro modo de vibração trata da alvenaria posterior, com participação de massa de 3,35% para o eixo longitudinal, seguido do segundo e terceiro modo para as alvenarias centrais esquerda e direita, ambas no eixo transversal. Para a torre sineira, foi verificado uma significativa participação de massa nos eixos longitudinal e transversal, o maior montante de massa solicitada entre os quatro primeiros modos e o segundo maior entre os dez extraídos.

Diante disso, as curvas de capacidade incluíram a torre sineira nos eixos longitudinal e transversal sob carregamentos uniformes e triangulares crescentes no sentido do topo da estrutura, acrescidos também das primeiras regiões modais com maior participação de massa para cada eixo. Assim, foram obtidos diferentes comportamentos para a estrutura, configurados sob solicitações que representaram diferentes cenários de danos no qual cada carregamento exigia diferentes mecanismos resistentes.

Para os carregamentos uniformemente distribuídos, observou-se a menor

deslocamentos dos elementos estruturais, constatado uma maior solicitação de cortante na base, ao passo que as regiões de análise modal se aproximaram de carregamentos triangulares e apresentaram os maiores deslocamentos dentre as três situações para cada eixo.

Dentre os eixos analisados, o eixo longitudinal apresentou maior vulnerabilidade, sobretudo em análise modal, evidenciada já em análise modal em regime elástico por solicitações locais de flexão nas alvenarias posteriores. Além disso, a obtenção de pontos de deslocamento-alvo para o eixo, demonstram magnitudes em até 0,134 metros em uma conjuntura onde a estrutura inicia seu regime plástico em 0,042 metros, associando-se a um estado limite de danos significativos.

Os resultados obtidos possibilitaram a identificação de regiões passíveis ao comprometimento da seguridade estrutural e de maior susceptibilidade de intervenções. Desse modo, pode-se dizer que os resultados apresentaram significativo nível de satisfação, sobretudo no que trata da caracterização global das edificações a favor da preservação de bens históricos frente a solicitações sísmicas.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A. et al. **Estimativa do Módulo de Elasticidade Global de uma Edificação Histórica de Alvenaria de Tijolos Maciços pelo Método Ultrassônico**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT 2016, 2º, Belém, 2016, Anais, Belém, p. 1005-1015.

ALVES, A. **Proposição de um Método de Caracterização de Alvenarias de Edificações Históricas por Meio de Avaliação Ultrassônica**. Monografia. Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA, Sobral, 2017.

ANTONIOU, Stelios; PINHO, Rui. **Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures**. Journal of Earthquake Engineering, v. 8, n. 04, p. 497-522, 2004.

ANSYS INC. (2016). **Ansys Help, version 17.1**. Theory Reference.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas**, Brasil, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento**, Brasil, 2006.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA CASA CIVIL. **Decreto-lei nº 25, de 30 de novembro de 1937.: DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL**. Rio de Janeiro, 197. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Decreto-Lei/Del0025.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del0025.htm)>. Acesso em: 25 out. 2019.

BEZERRA, Gabriel Braga Diniz. **Análise numérica como ferramenta de suporte à avaliação da segurança estrutural do patrimônio histórico**. Fortaleza: Dissertação, 2018. 27-31 p.

BRASIL. CONSTITUIÇÃO FEDERAL. **Art. 216 da Constituição Federal de 88: Seção II, Artigo 216**. Brasil, 197. Disponível em: <[https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/CON1988\\_05.10.1988/art\\_216\\_.asp](https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/CON1988_05.10.1988/art_216_.asp)>. Acesso em: 10 set. 2019.

BRANDÃO, F. et al. **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. **Análise do Comportamento Sísmico de uma Construção Histórica do Patrimônio Sobralense**. Monografia. Universidade Estadual Vale do Acaraú –UVA, Sobral, 2017.

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

CARTA DE CRACÓVIA. **Princípios para a conservação e o restauro do patrimônio construído**. 2000. Disponível em: <

<http://www.patrimoniocultural.gov.pt/media/uploads/cc/cartadecracovia2000.pdf> >. Acesso em: 10 set. 2019.

COUTINHO, Diogo Simões do Amaral. **Análise “pushover” de edifícios em betão armado**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. 7 p. Disponível em: < <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59856/1/000129414.pdf> >. Acesso em: 15 set. 2019.

**EUROCÓDIGO 6. Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures**, European Committee for standardization, 2005.

**EUROCÓDIGO 8. Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings**, European Committee for standardization, 2005.

**EUROCÓDIGO 8. Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais acções sísmicas e regras para edifícios**, Instituto Português da Qualidade, 2010.

DE VENEZA, 1964, Carta. **Carta de Veneza 1964 - Carta internacional sobre a conservação e o restauro de monumentos e sítios**. Cadernos de Sociomuseologia, [S.l.], v. 15, n. 15, june 2009. ISSN 1646-3714. Disponível em: <<https://revistas.ulusofona.pt/index.php/cadernosociomuseologia/article/view/334>>. Acesso em: 28 out. 2019.

DIÁRIO DO NORDESTE. **Igrejas históricas de Aracati são recuperadas**. Disponível em: < <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/regional/igrejas-historicas-de-aracati-sao-recuperadas-1.585118> >. 2010. Acesso em: 2 set. 2019.

DOLCE, Mauro. **Schematizzazione e Modellazione per Azioni nel Piano delle Pareti, corso sul consolidamento degli edifici in muratura in zona sismica**, Ordine degli Ingegneri, Potenza, 1989.

FERREIRA, Ana Margarida Oliveira Louro. **Modelação de paredes em alvenaria estrutural de tijolo**. 2014. Tese de Doutoramento. Disponível em: <[https://run.unl.pt/bitstream/10362/14218/1/Ferreira\\_2014.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/14218/1/Ferreira_2014.pdf) > Acesso em: 18 set. 2019.

FRAGA, Francisco de S. M. B. de C. **Monitorização de Edifícios Patrimoniais**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.

ELNASHAI, Amr S. **Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications**. Structural engineering and mechanics, v. 12, n. 1, p. 51-70, 2001.

ELNASHAI, Amr S. **Do we really need inelastic dynamic analysis?**. Journal of Earthquake Engineering, v. 6, n. S1, p. 123-130, 2002.

SANTOS, F. et al. **Análise estrutural de uma edificação histórica do século XVIII**. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções-CBPAT. 2016. p. 317-327.

FRAZÃO, Maria Tereza de Brito Rações Franco. **Modelação de um edifício “Gaioleiro” para Avaliação e Reforço Sísmico**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2013.



BRANDONISIO, Giuseppe et al. **Restoration Through a Traditional Intervention of a Historic Unreinforced Masonry Building “Palazzo Scarpa” in Naples**. International Journal of Architectural Heritage. 2013. 7. 10.1080/15583058.2011.632468. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583058.2011.632468>> Acesso em: 8 set. 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL – IPHAN. **Patrimônio Cultural**. Disponível em: < <http://portal.iphan.gov.br> >. Acesso em: 15 set. 2019.

ICOMOS – CONSELHO INTERNACIONAL DE MONUMENTOS E SÍTIOS. **Icomos Charter- Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage**. 2003. Disponível em: <[https://www.icomos.org/charters/structures\\_e.pdf](https://www.icomos.org/charters/structures_e.pdf)> Acesso em: 15 ago. 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL – IPHAN. **Aracati-CE: Estudo para tombamento federal**. Vol.1.Dez 1998.

MONTEIRO, Livia et al. **A Igreja de Almofala: aspetos históricos e de conservação**. Revista do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, 2015, 20-33.

LOURENÇO, P. B. **Computations on Historic Masonry Structures**. Holanda, Delft University Press. 1996.

MESQUITA, Esequiel Fernandes Teixeira. **Structural characterization and monitoring of heritage constructions**. Tese de Doutorado. Universidade do Porto, Portugal, 2017. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/105447>> Acesso em: 3 jul. 2019.

MOTA, Larissa et al. **Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica à Escala Urbana: o Centro Histórico Sobralense**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções -CBPAT 2016, 2º, Belém, 2016, Anais, Belém, p. 1005-1015.

MAGENES, G.; BOLOGNINI D. e BRAGGIO, C. – **Metodi Semplificati per l’Analisi Sismica Non Lineare di Edifici in Muratura, CNR: Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti**, Roma, 2000

MARQUES, Rui Filipe Pedreira. **Metodologias inovadoras no cálculo sísmico de estruturas em alvenaria simples e confinada**. 2013.

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

NUNES, Ricardo Filipe Gomes. **Modelação e análise de estruturas de edifícios existentes em alvenaria**. 2013. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Tomar. Disponível em: <<https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/5822>> Acesso em: 3 jul. 2019.

NORMA ITALIANA – Norme Tecniche per il Progetto, la Valutazione e l’Adeguamento Sismico degli Edifici: **Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione**

**sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sísmica**, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Decreto-Lei n.º 3274 de 20 de Março de 2003.

NEVES, S. M. L. C. **Análise Sísmica de um Edifício da Baixa Pombalina**. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008. Disponível em: < <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137661650/An%C3%A1lise%20S%C3%ADsmica%20de%20um%20Edif%C3%ADcio%20da%20Baixa%20Pombalina%20-%20S%C3%ADlvia%20Neves.pdf>> Acesso em: 8 set. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA – UNESCO. **Convenção para a Proteção do Patrimônio Mundial, Cultural e Natural**. Paris, 1972. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/agencia/unesco/>> Acesso em: 15 set. 2019.

ROCA, Pere et al. Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 17, n. 3, p. 299-325, 2010.

REIS, L. **Igreja do Rosário**. Disponível em: <[http://aracati.net/site/index.php?option=com\\_content&view=article&id=143:igrejadorosario&catid=43:patrimonio&Itemid=62](http://aracati.net/site/index.php?option=com_content&view=article&id=143:igrejadorosario&catid=43:patrimonio&Itemid=62)>. 2009. Acesso em: 15 set. 2019.

ROQUE, J. C. A. **Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2002. 338 p. Disponível em: < <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/1724>>. 2009. Acesso em: 15 set. 2019.

PEREIRA, Diogo Filipe de Sousa Micael. **Estudo Sísmico de Edifícios Antigos Reforço e análise não linear**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009. 33-40 p. Disponível em: < <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139477983/dissertacao.pdf>> Acesso em: 3 jul. 2019.

PELETEIRO, Suzana Campana. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural**, São Carlos, 2002. Disponível em: < [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-09082006-110325/publico/2002DO\\_SuzanaCPeleteiro.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-09082006-110325/publico/2002DO_SuzanaCPeleteiro.pdf)> Acesso em: 2 set. 2019.

TURNŠEK, Viktor; SHEPPARD, Peter. **The shear and flexural resistance of masonry walls**. Proceedings of the International Research Conference on Earthquake Engineering, pp.517-573, Skopje, 1980

TV SINAL. **Começam serviços de elaboração do projeto de restauração da Igreja do Rosário**. Disponível em: <http://www.tvsinal.com/index.php/template/item/8086-começamserviços-de-elaboração-do-projeto-de-restauração-da-igreja-do-rosário>>. 2013. Acesso em: 22 set. 2019.