

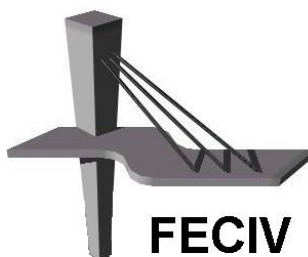


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**INFLUÊNCIA DAS ALVENARIAS DE  
PREENCHIMENTO NA DETERMINAÇÃO DO  
PERÍODO FUNDAMENTAL DE EDIFÍCIOS DE  
CONCRETO ARMADO**

**EMERSON RODRIGUES DA SILVA**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**Emerson Rodrigues da Silva**

**INFLUÊNCIA DAS ALVENARIAS DE  
PREENCHIMENTO NA DETERMINAÇÃO DO  
PERÍODO FUNDAMENTAL DE EDIFÍCIOS DE  
CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Orientador: Prof. Dr. Gerson Moacyr Sisniegas Alva**

Uberlândia, 21 de Maio de 2021.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S586i  
2021      Silva, Emerson Rodrigues da, 1991-  
Influência das alvenarias de preenchimento na determinação do período fundamental de edifícios de concreto armado [recurso eletrônico] / Emerson Rodrigues da Silva. - 2021.

Orientador: Gerson Moacyr Sisniegas Alva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.5533>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Alva, Gerson Moacyr Sisniegas, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU:624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 261, PPGE				
Data:	21 de maio de 2021	Hora de início:	9:00 h	Hora de encerramento:	12:15 h
Matrícula do Discente:	11912ECV005				
Nome do Discente:	Emerson Rodrigues da Silva				
Título do Trabalho:	Influência das alvenarias de preenchimento na determinação do período fundamental de edifícios de concreto armado				
Área de concentração:	Estruturas e Construção civil				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Interação alvenaria-estrutura e deformabilidade de ligações na análise estrutural de edifícios				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: João Kaminski Junior – CT/UFSM, Marco Antonio Silva Pinheiro – CT/UFSM e Gerson Moacyr Sisniegas Alva – FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Gerson Moacyr Sisniegas Alva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

#### Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gerson Moacyr Sisniegas Alva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/05/2021, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Kaminski Junior, Usuário Externo**, em 21/05/2021, às 15:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Antonio Silva Pinheiro, Usuário Externo**, em 21/05/2021, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2708180** e o código CRC **BAA93C8C**.

# AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus por todas as oportunidades de formação que obtive ao longo de minha vida e por todas as dificuldades impostas em minha trajetória, estas me ajudam a evoluir como profissional e principalmente como ser humano.

À minha mãe Olivia Maria de Jesus, que por sua capacidade resiliente, força e determinação, é o meu maior exemplo de ser humano.

Ao meu orientador Professor Doutor Gerson Moacyr Sisniegas Alva, por todo o seu tempo empregado neste trabalho, pela confiança no sucesso deste projeto e por toda a sua dedicação e paciência com a minha pessoa.

A todos os professores e funcionários da FECIV – UFU, que contribuíram para o meu crescimento educacional e fizeram da UFU um lugar que me lembrarei com carinho.

*“Happiness can be found, even in the darkest of times, if one only remembers to turn on the light.” (Albus Dumbledore)*

Silva, E. R. Influência das alvenarias de preenchimento na determinação do período fundamental de edifícios de concreto armado. 83 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

## Resumo

---

Em estruturas de edifícios, uma adequada estimativa de suas propriedades dinâmicas pode ser requerida. Em particular, está o período fundamental, necessário, por exemplo, na utilização do Método das Forças Horizontais Equivalentes para análises sísmicas ou na consideração dos efeitos dinâmicos do vento em estruturas esbeltas. A presença das alvenarias de preenchimento está entre os diversos parâmetros que afetam o Período Fundamental de uma estrutura. Na literatura e em códigos normativos existem diversas expressões aproximadas para a determinação do Período Fundamental de pórticos de concreto; contudo, a grande maioria considera apenas a influência da altura total da estrutura, desconsiderando diversos outros fatores como: a presença de alvenarias de preenchimento; o módulo de elasticidade; e a abertura dessas alvenarias. Além disso, as referidas expressões aproximadas apresentam resultados divergentes entre si. Neste trabalho, foram realizadas diversas simulações numéricas para a determinação do período fundamental em pórticos de concreto armado preenchidos com alvenaria para diferentes módulos de elasticidade e percentagens de aberturas. Os resultados das análises modais (via programa ANSYS) permitiram a comparação qualitativa e quantitativa dos períodos fundamentais de edifícios entre as seguintes situações: i) sem a consideração de alvenarias de preenchimento; ii) com a consideração da rigidez das alvenarias de preenchimento (sem aberturas e com aberturas). As análises modais também permitiram a comparação com as principais expressões analíticas encontradas na literatura (incluindo normas) para a obtenção aproximada dos períodos fundamentais. Os resultados confirmam que alvenarias promovem a redução do período fundamental sendo, entretanto, pouco influentes para aberturas de parede maiores que 60%. Além disso, diferenças relevantes foram observadas entre os períodos fundamentais estimados com as expressões analíticas e os obtidos com as análises modais.

Palavras-chave: Período Fundamental; pórticos preenchidos; alvenarias de preenchimento; ações horizontais.

Silva, E. R. Influence of infilling masonry in determination of the reinforced concrete building's fundamental period. 83 pp. MSc. Qualification, University of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2021.

## Abstract

---

In structures of building, an adequate estimate of its dynamic properties may be required. In particular, there is the fundamental period, necessary, for example, in the use of the method of equivalent horizontal forces for seismic analyses or in the consideration of the dynamic effects of wind in slender structures. The presence of filling masonry is among the various parameters that affect the fundamental period of a structure. In the literature and normative codes there are several approximate expressions for determining the Fundamental Period of concrete frames, however, the vast majority considers only the influence of the structure's total height, disregarding several other factors such as: the presence of filling masonry; the elasticity module; and the openings presented in the masonry. In addition, these approximate expressions present divergent results. In this paper, several numerical simulations were carried out to determine the fundamental period in reinforced concrete frames filled with masonry for different elasticity modules and percentages of openings. The results of the modal analysis (via the ANSYS program) allowed the qualitative and quantitative comparison of the fundamental periods of buildings between the following situations: i) without considering infilled masonry; ii) with the consideration of the stiffness of the infilling masonry (without openings and with openings). The modal analysis also allowed comparison with the main analytical expressions found in the literature (including standards) to approximate the fundamental periods. The results confirm that masonry promotes the reduction of the fundamental period, however, it is less influential for wall openings greater than 60%. In addition, relevant differences were observed between the fundamental periods estimated with the analytical expressions and those obtained with the modal analyses.

Keywords: Fundamental Period; infilled frames; infilling masonry; horizontal loads.

# Sumário

---

<b>Introdução.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1    Considerações iniciais .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2    Objetivos .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3    Justificativa .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4    Metodologia .....</b>	<b>12</b>
<b>1.5    Organização do trabalho .....</b>	<b>13</b>
<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1    Considerações iniciais .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2    Comportamento e modelagem de pórticos preenchidos com alvenaria .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1    Modelo de Diagonal Equivalente .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2    Consideração de aberturas em paredes no Modelo de Diagonal Equivalente .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2.1    Expressão proposta por Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012) .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2.2    Expressão proposta por Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003) .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2.3    Expressão proposta por Mondal e Jain (2008) .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3    Período Fundamental.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.1    ABNT NBR 15421 (2006).....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.2    Eurocode 8 (2004).....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.3    NBCC (1995).....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.4    Goel e Chopra (1997) .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.5    Crowley e Pinho (2004) .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.6    Crowley e Pinho (2006) .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.7    ABNT NBR 6123 (1988).....</b>	<b>45</b>
<b>2.3.8    Asteris <i>et al.</i> (2016) .....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.9    Amanat e Hoque (2006) .....</b>	<b>47</b>
<b>Metodologia .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1    Modelagem numérica.....</b>	<b>49</b>
<b>3.2    Determinação do Fator de Redução da Rigidez (<math>F_{rr}</math>) .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3    Simulações numéricas: pórticos de edifícios de múltiplos andares.....</b>	<b>53</b>
<b>Resultados e Discussões .....</b>	<b>59</b>



<b>4.1</b>	<b>Efeito das aberturas nas paredes na rigidez lateral dos pórticos.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Escolha da expressão para a determinação do fator de redução da rigidez .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3</b>	<b>Determinação do Período Fundamental.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Período Fundamental para pórtico de 2 vãos .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Período Fundamental para pórtico de 4 vãos .....</b>	<b>68</b>
	<b>Considerações Finais e Conclusões .....</b>	<b>75</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>78</b>

# Capítulo 1

## Introdução

---

### 1.1 Considerações iniciais

Neste capítulo destaca-se a relevância da contribuição de alvenarias de preenchimento na rigidez de edifícios. Também são apresentados os objetivos da presente pesquisa bem como a sua metodologia e organização (estruturação).

Com o crescimento populacional em cidades grandes, surge a necessidade da construção de novas moradias. Os edifícios se apresentam, em suma, como uma solução para o problema da escassez de espaço vivido pelas grandes cidades, gerando uma verticalização dos grandes centros. Atualmente, os edifícios têm se tornado cada vez mais altos e esbeltos. Elementos como vigas, lajes e pilares são considerados como estruturais, enquanto que as alvenarias de preenchimento usualmente têm desprezada a sua contribuição no aumento da rigidez lateral da estrutura, sendo encaradas apenas como tendo a função de vedação.

Segundo Medeiros e Franco (1999), as paredes de vedação têm como função proteger os ambientes e o próprio edifício, sendo obrigatório o cumprimento de algumas exigências fundamentais para a vedação em estruturas, tais como: estanqueidade, isolamento térmico e acústico, estabilidade mecânica, segurança ao fogo, estética, durabilidade e economia.

As paredes de alvenaria em projetos estruturais normalmente são consideradas como carga linear (apenas peso próprio) apoiadas sobre vigas e lajes, desprezando-se o seu papel como elemento estrutural. Contudo, dependendo do tipo de fixação do painel de alvenaria com a estrutura principal, tais alvenarias podem promover o enrijecimento da estrutura frente às ações horizontais, funcionando como painéis de contraventamento (MONTANDON, 2018).

O sistema de pórticos preenchidos consiste na consideração das paredes de alvenaria na estrutura reticulada dos edifícios. Estas podem ser chamadas de paredes participantes se contribuírem na resistência e na rigidez frente às ações horizontais. Desta

forma, com as alvenarias fixadas à estrutura reticulada, no momento em que o edifício sofre a ação de forças horizontais, as alvenarias irão interagir com vigas e pilares, aumentando a sua capacidade resistente e a rigidez lateral de toda a estrutura.

Diversos estudos conduzidos em todo mundo têm demonstrado resultados comparativos entre a consideração ou não das paredes de alvenaria frente a ações horizontais, como vento e sismos. Santos (2007) afirma que é unânime o aumento da rigidez e capacidade resistente de pórticos devido à presença de paredes de alvenaria. Sob o efeito de ações horizontais, o pórtico transmite esforços à alvenaria, que agora enrijece a estrutura aporticada e contribui para a redução dos deslocamentos horizontais de todo o sistema estrutural.

Apesar da estrutura composta por pórtico de concreto armado e alvenarias de preenchimento apresentarem melhores características trabalhando juntas, os projetistas ainda não consideram as alvenarias como parte estrutural em edifícios. Conforme Parsekian, Hamid e Drysdale (2013), existem pelo menos duas justificativas para mostrar que essa prática não é adequada. A primeira justificativa é que, para edifícios mais altos, as alvenarias de preenchimento oferecem boa contribuição para a rigidez global da estrutura frente às ações horizontais. Ao desconsiderá-las, as verificações associadas aos estados limites da estrutura seriam mais conservadoras. A segunda justificativa é que nem sempre a desconsideração da rigidez das alvenarias leva a um dimensionamento mais conservador. Segundo Montandon (2018), a existência de paredes em determinadas posições da estrutura pode aumentar significativamente a rigidez dessa parte da estrutura, alterando a distribuição de esforços. Dessa maneira, certos elementos estruturais podem estar submetidos a esforços maiores que os esforços obtidos no modelo estrutural, em que se despreza a alvenaria como elemento resistente. Além disso, uma distribuição não simétrica das paredes em planta pode causar torção no edifício frente à ação do vento e alterar significativamente a distribuição de esforços. Outra justificativa não mencionada por Parsekian, Hamid e Drysdale (2013) é que desconsiderar a distribuição de rigidez e de massa das paredes altera as propriedades dinâmicas da estrutura.

Além dos pórticos de concreto, os pórticos de aço também apresentam um aumento de rigidez se as paredes de alvenaria forem fixadas à estrutura reticulada. Alvarenga (2002) cita a substituição dos elementos de contraventamento de aço por

painéis de alvenaria em pórticos de aço como uma alternativa e/ou contribuição adicional ao contraventamento da estrutura, considerando tais alvenarias como barras diagonais equivalentes.

Para edifícios de concreto mais altos, as alvenarias de preenchimento apresentam uma boa contribuição para a rigidez global da estrutura frente às ações horizontais (MONTANDON, 2018). Ao mesmo tempo, a consideração da alvenaria no modelo estrutural pode deflagrar possíveis rupturas da parede (compressão, tração e cisalhamento) em verificações do estado limite de serviço conforme demonstrado nos trabalhos de Alva *et al.* (2015) e Montandon (2018).

Para consideração das paredes de alvenaria como elementos estruturais, alguns cuidados devem ser tomados quanto ao controle de qualidade dos materiais utilizados na alvenaria e execução (ALVARENGA, 2002). Tal controle de qualidade demanda um maior custo em comparação com estruturas onde a alvenaria é tratada como vedação. Contudo, o aumento da rigidez da estrutura proporcionado pelo pórtico preenchido, traz uma diminuição das seções transversais de vigas e pilares, bem como uma redução de aço empregado, resultando numa redução no custo total da edificação.

Por meio de exemplos numéricos de edifícios de múltiplos andares, Araújo (2014) mostra que a consideração da rigidez das alvenarias proporciona uma redistribuição dos esforços na estrutura, podendo levar a uma economia relevante na construção das estruturas de concreto.

Embora seja conhecido que as alvenarias contribuem com rigidez e resistência frente às ações horizontais, ainda não há um consenso sobre a consideração das mesmas no dimensionamento da estrutura principal. A falta de conhecimento acerca das propriedades mecânicas das alvenarias, o baixo controle tecnológico do material, incertezas em relação a possíveis modificações na alvenaria, como por exemplo em reformas, e ainda a presença de aberturas nas paredes (janelas e portas) costumam justificar a desconsideração das alvenarias por parte de projetistas de estruturas.

Em 2017 foi instalada a Comissão de Estudo de Alvenaria Estrutural (CE-002:123.010) do Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-002) para a atualização e unificação das normas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos – ABNT

NBR 15812 – 1:2010 – e de blocos de concreto – ABNT NBR 15961 – 1:2011. A nova norma de projeto – ABNT NBR 16868 – 1:2020 – foi aprovada e publicada recentemente. O anexo D (informativo) dessa norma apresenta uma proposta para a consideração das alvenarias de preenchimento como parte do sistema de contraventamento, denominadas *alvenarias participantes*. Assim, a ABNT NBR 16868 – 1:2020 define *alvenaria participante* como sendo a alvenaria estrutural construída no interior de um pórtico, intencionalmente dimensionada e construída como parte do sistema de contraventamento. A ABNT NBR 16868 – 1:2020 utiliza como base a norma canadense CSA S304 (2014) e recomenda o modelo de diagonal equivalente para a consideração das alvenarias participantes.

O modelo de diagonal equivalente (MDE) é o principal modelo empregado para consideração da alvenaria na rigidez da estrutura em projetos, em virtude de sua simplicidade. Neste modelo, a parede é representada por uma barra diagonal (biela) cuja seção transversal é dada pela espessura da parede e pela largura da diagonal equivalente. Esta largura pode ser definida através de diversas expressões analíticas encontradas na literatura, ou através de modelagem da parede em estado plano (ou triplo) de tensões, juntamente com o problema de contato parede-pórtico, com o auxílio do Método dos Elementos Finitos (MEF).

## 1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Comparação qualitativa e quantitativa dos períodos fundamentais de edifícios de concreto armado via análise modal (ANSYS) entre as seguintes situações: i) sem a consideração de alvenarias de preenchimento (ou desprezando-se a rigidez dessas); ii) com a consideração da rigidez das alvenarias de preenchimento sem aberturas; iii) e com a consideração da rigidez das alvenarias de preenchimento com aberturas.
- Comparação dos períodos fundamentais obtidos da análise modal (ANSYS) com as principais expressões analíticas encontradas na literatura, incluindo as expressões de normas de projeto.

### 1.3 Justificativa

Pode-se mencionar duas situações em que a determinação do período fundamental é requerida. A primeira é obtenção das forças sísmicas com o Método das Forças Horizontais Equivalentes, presente em diversas normas internacionais e inclusive na ABNT NBR 15421 (2006). A segunda situação está relacionada com efeitos dinâmicos do vento, os quais devem ser considerados, segundo a ABNT NBR 6123 (1988), em edifícios com período fundamental superior a 1 s.

Embora na literatura se encontrem diversas expressões analíticas para o cálculo estimado dos períodos fundamentais, tais expressões apresentam resultados bastante divergentes entre si. Além disso, a maioria dessas expressões consideram apenas a altura do edifício ou o número de andares na estimativa do período fundamental, desconsiderando as alvenarias de preenchimento, tanto em termos de rigidez quanto em termos de distribuição dessas no sistema estrutural. Assim, faz-se necessário um maior estudo acerca da contribuição da alvenaria como elemento estrutural na obtenção do período fundamental, levando-se em consideração diferentes características mecânicas das paredes de alvenaria e a redução da rigidez da alvenaria devido ao uso de aberturas nas paredes.

Por fim, acredita-se que a atualização da norma brasileira de projeto de alvenaria estrutural possa incentivar, no país, o emprego de alvenarias participantes como mais uma opção na contribuição de aumento de rigidez e de resistência frente às ações horizontais, tanto nas verificações do Estado Limite Último quanto nas do Estado Limite de Serviço de todo o sistema estrutural.

### 1.4 Metodologia

Inicialmente, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema, tendo um foco maior nas pesquisas que tratam da modelagem numérica de pórticos preenchidos, (incluindo a presença de aberturas) e nas expressões analíticas encontradas na literatura para a estimativa do período fundamental de edifícios.

Sobre a modelagem numérica de pórticos de edifício de múltiplos andares, foram empregados modelos de diagonal equivalente para a determinação do período fundamental, utilizando-se a expressão de Mainstone (1974) para a obtenção da largura

da diagonal equivalente. Modelos de pórtico preenchido com um vão e um andar com elementos finitos de estado plano de tensões e simulação do problema de contato alvenaria-pórtico foram utilizados como referência na avaliação de algumas expressões propostas na literatura para redução da largura da diagonal equivalente, a fim de considerar a perda de rigidez decorrente da presença de aberturas nas paredes. Esta avaliação tornou possível a escolha das expressões que foram utilizadas nos exemplos numéricos dos pórticos de múltiplos andares para a obtenção do período fundamental. Nesses modelos, foram analisadas porcentagens de abertura iguais a 0% (sem aberturas), 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (sem parede).

Foram realizadas simulações numéricas de edifícios de 3, 6, 9, 12, e 15 andares, mantendo-se fixas as propriedades mecânicas da estrutura de concreto armado, e escolhidas alvenarias com dois blocos de diferentes resistências (distintos módulos de elasticidade). As análises comparativas deram especial ênfase à perda de rigidez devido ao aumento da porcentagem de aberturas nas paredes e no consequente efeito para o período fundamental.

Todas as simulações numéricas foram realizadas com a utilização do programa ANSYS.

## **1.5 Organização do trabalho**

Este trabalho está apresentado da seguinte maneira:

- No Capítulo 1, uma introdução ao tema é apresentada, justificando o estudo, apresentando a metodologia desenvolvida e exibindo os objetivos;
- No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre a modelagem de pórticos preenchidos com alvenaria (com destaque para o modelo de diagonal equivalente) e sobre as expressões analíticas encontradas na literatura para a estimativa do período fundamental;
- No Capítulo 3, apresentam-se os modelos escolhidos para as simulações numéricas, bem como a metodologia utilizada;
- No Capítulo 4, apresentam-se todos os resultados obtidos e discussões dos mesmos;

- Por fim, no Capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões do presente trabalho e sugestão para pesquisas futuras.



# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

---

### 2.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta um breve histórico do tema. Também são apresentadas as principais expressões para a determinação da diagonal equivalente e trabalhos internacionais e nacionais acerca da determinação do período fundamental através do MEF.

O edifício *Empire State*, mostrado na Figura 2.1, construído entre 1930 e 1931 na cidade de Nova York, contribuiu para o desenvolvimento do estudo de alvenaria como preenchimento de pórticos submetidos às ações laterais. Após a sua conclusão, durante uma tempestade com rajadas de vento excedendo 145 km/h, observou-se o início de algumas fissuras em vários painéis de alvenaria nos pisos 29 e 42. Além disso, foram observadas fissuras também na interface pórtico-painel de alvenaria. Os extensômetros fixos nos pilares não registraram deformações no pórtico antes do início das fissuras no painel, apesar da alta velocidade do vento (ALVARENGA, 2002).

Figura 2.1: *Empire State Building*.



Fonte: [www.daniel.prado.name/Varios-Viajes.asp?art=376#.X1pu2HIKjIU](http://www.daniel.prado.name/Varios-Viajes.asp?art=376#.X1pu2HIKjIU).

Ainda segundo Alvarenga (2002), por apresentar uma alta rigidez, as paredes de alvenaria evitaram distorções no pórtico de aço. A partir do momento que os painéis começaram a ser solicitados além de sua capacidade de fissuração, iniciou-se um processo de perda de rigidez e, conseqüentemente, os extensômetros começaram a registrar deformações, indicando que o pórtico de aço iniciava sua participação na resistência à ação do vento. Devido a interação entre pórtico-parede, mesmo na presença de fissuras no painel, o conjunto continuou a resistir fortemente às ações laterais. (RATHBUN, 1938, *apud* ALVARENGA, 2002, p. 14).

Considerando a interação entre pórtico e paredes de alvenaria, surge a necessidade de se obter parâmetros e modelos que possibilitassem uma análise detalhada do comportamento do pórtico preenchido. Segundo Silva (2014), o modelo mais simplificado para representação do pórtico preenchido se baseia na substituição do painel de alvenaria por uma diagonal de contraventamento.

Polyakov (1956) publicou pesquisas referentes a pórticos preenchidos submetidos a forças horizontais elevadas, a fim de avaliar a resistência à tração e ao cisalhamento da alvenaria utilizada como preenchimento. Segundo Alvarenga (2002), este é o autor responsável por sugerir que as paredes de alvenaria fossem substituídas por uma diagonal comprimida.

No Brasil, o primeiro trabalho publicado envolvendo análises experimentais em pórticos preenchidos foi desenvolvido por Braguim (1989). Naquele trabalho foram consideradas as ligações semirrígidas de pórticos de aço e, posteriormente, verificou-se a influência das ligações no comportamento de pórticos preenchidos (MADIA, 2012).

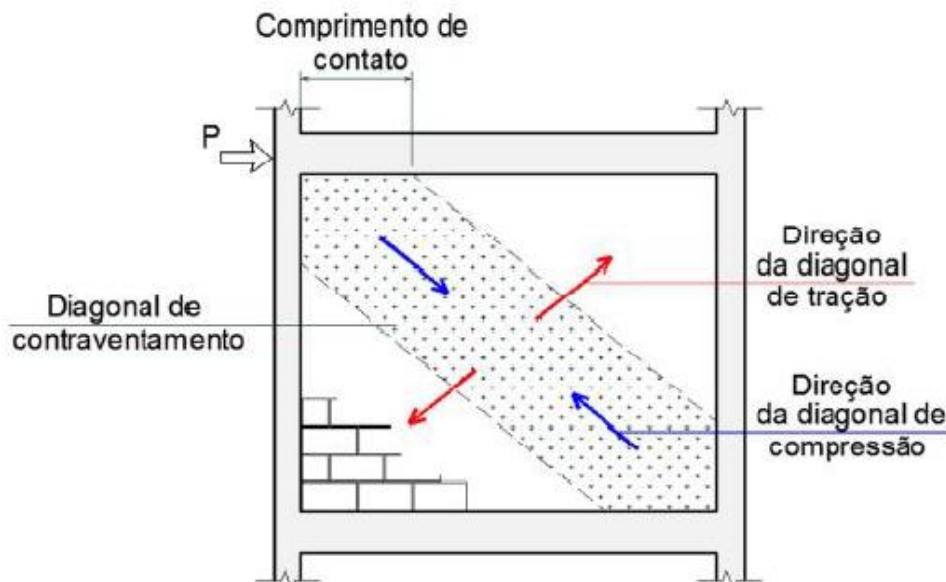
## **2.2 Comportamento e modelagem de pórticos preenchidos com alvenaria**

Paredes de alvenaria são uma técnica de construção muito antiga, sendo encontrada em diversas edificações históricas. A forma como as paredes de alvenaria se fixam às estruturas reticuladas determinará se essas absorverão esforços decorrentes das ações horizontais. Segundo Silva (2014), nas estruturas de concreto armado, as alvenarias são normalmente consideradas como elementos de vedação, contudo, quando bem executadas, as alvenarias de vedação auxiliam no contraventamento da estrutura, aumentando a rigidez global da edificação frente a ações horizontais. Já a alvenaria

estrutural, ou participante, atua junto à estrutura reticulada, resistindo a esforços de ações horizontais. Para tal, os painéis são formados por blocos industrializados ou blocos estruturais, moldados em cerâmica ou concreto.

As principais características das paredes de alvenaria são a deformabilidade e a resistência mecânica. A deformabilidade é a capacidade da alvenaria de se manter íntegra, frente à alguma solicitação, distribuindo as tensões internas ao longo do tempo e sem perda de desempenho. Segundo Madia (2012), a alvenaria é um elemento com baixa resistência à tração, porém, com alta resistência à compressão, podendo assim, ser utilizada como contraventamento em pórticos. A Figura 2.2 ilustra como se distribuem as tensões na alvenaria de preenchimento de um pórtico submetido às ações horizontais.

Figura 2.2: Distribuição de tensões na alvenaria de preenchimento de pórtico.



Fonte: Madia (2012).

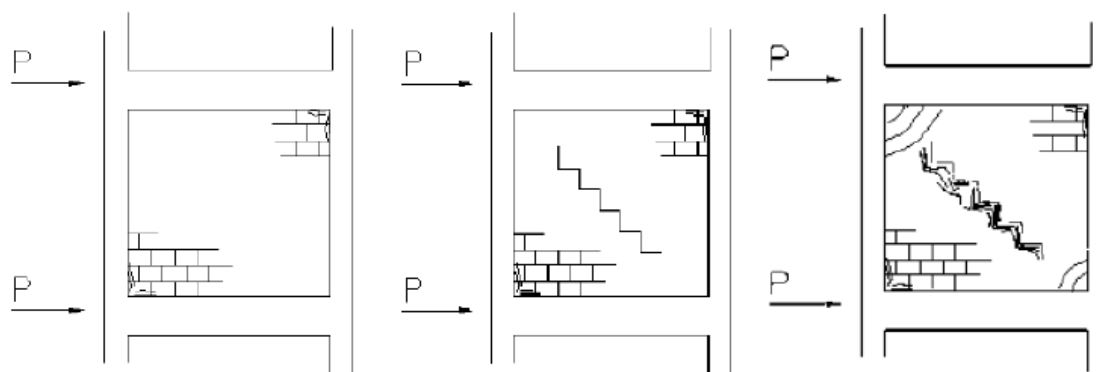
Segundo Santos (2007), tanto as paredes externas, quanto as internas, apresentam alguma resistência. Portanto, mesmo uma parede de alvenaria de vedação interfere no comportamento estrutural dos edifícios, sendo de extrema importância a sua consideração em análises estruturais.

A interação existente entre o pórtico e a alvenaria de preenchimento vem sendo amplamente estudada nos últimos anos. Tais estudos, buscam uma maior compreensão do comportamento do pórtico preenchido, por meio de modelos estruturais que levem em consideração uma maior quantidade de variáveis.

Em seu trabalho, Doudoumis (2007) mostra que o detalhamento da superfície de contato entre alvenaria e a estrutura (vigas e pilares) afeta diretamente a rigidez lateral de pórticos preenchidos. A existência da fricção nas superfícies de contato colabora para o aumento da rigidez lateral da estrutura, sendo um aumento proporcional ao valor do coeficiente de atrito.

Pórticos preenchidos apresentam três estágios de comportamento quando submetidos às ações horizontais, como apresentados na Figura 2.3. O primeiro estágio se caracteriza por um comportamento monolítico do pórtico preenchido, onde não se observa a formação de fissuras. O término desse estágio ocorre a partir do momento que são observadas as primeiras fissuras nos cantos da diagonal tracionada do conjunto pórtico-alvenaria. O segundo estágio inicia-se com o surgimento de fissuras acompanhando as juntas da argamassa de assentamento ao longo da diagonal comprimida. Isso acontece devido ao encurtamento desta diagonal e do consequente alongamento da diagonal tracionada. No terceiro e último estágio, o pórtico preenchido ainda é capaz de suportar acréscimos de carregamento horizontal, contudo, nos cantos comprimidos, a fissuração aumenta muito com o aumento do carregamento causando o esmagamento dos cantos comprimidos. Ao final deste estágio, o conjunto pórtico-alvenaria perde sua capacidade de resistir aos esforços, chegando ao limite máximo de esforços que a estrutura é capaz de resistir.

Figura 2.3: Estágios de comportamento de pórticos preenchidos.

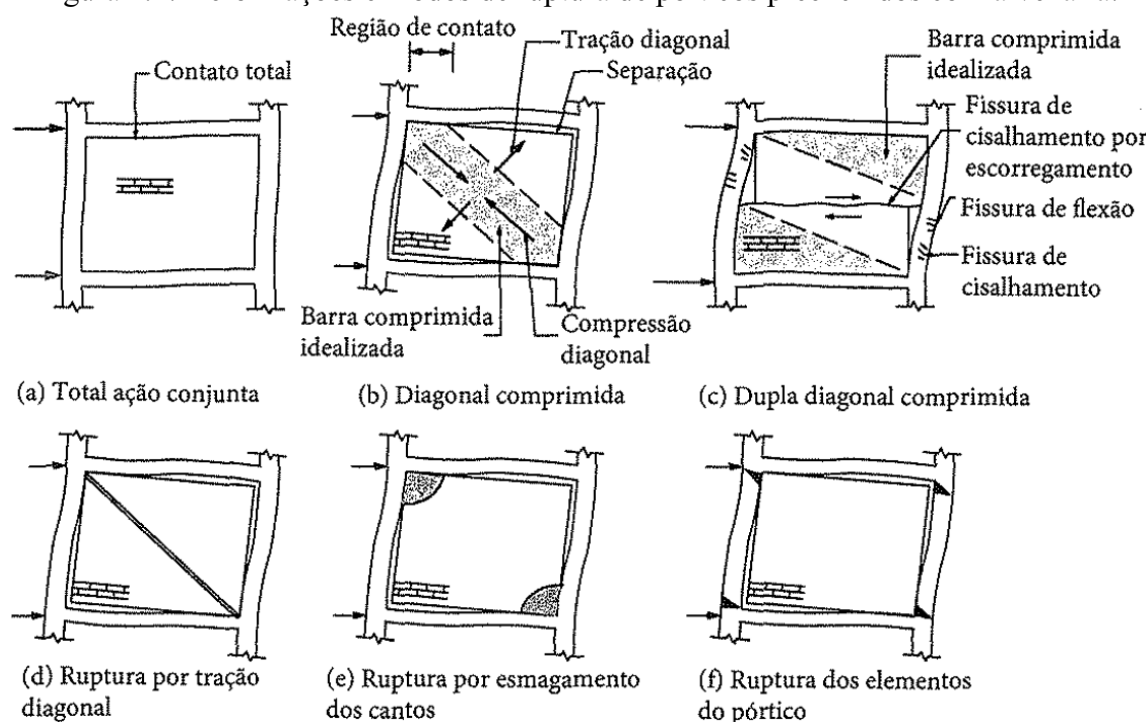


Fonte: Polyakov (1960) *apud* Santos (2007).

Existem também estudos que explicam os estágios de comportamento de pórticos preenchidos, porém, considerando o contato existente entre o pórtico e parede de alvenaria.

Conforme apresentado por Parsekian, Hamid e Drysdale (2013), no primeiro estágio, onde a ação horizontal é relativamente baixa, existe o contato entre o pórtico e a alvenaria (Figura 2.4a), configurando a máxima contribuição da parede na rigidez lateral da estrutura. Com o aumento da força horizontal, surge a separação entre o pórtico e a parede, exceto nos cantos comprimidos da mesma onde há o contato com o pórtico, conforme apresentado na Figura 2.4b. Nesse estágio, o comportamento da parede pode ser simulado como uma barra de diagonal equivalente. Esse desprendimento aumenta até o ponto de surgir fissuras no painel de alvenaria ou pórtico. Aumentando-se mais a força horizontal no pórtico, a separação entre parede e pórtico bem como as fissuras tornam-se maiores até que a alvenaria atinja a ruptura por cisalhamento, por tração diagonal ou por compressão diagonal (Figura 2.4c, 2.4d e 2.4e) ou até que ocorra a ruptura da seção dos pilares (Figura 2.4f)

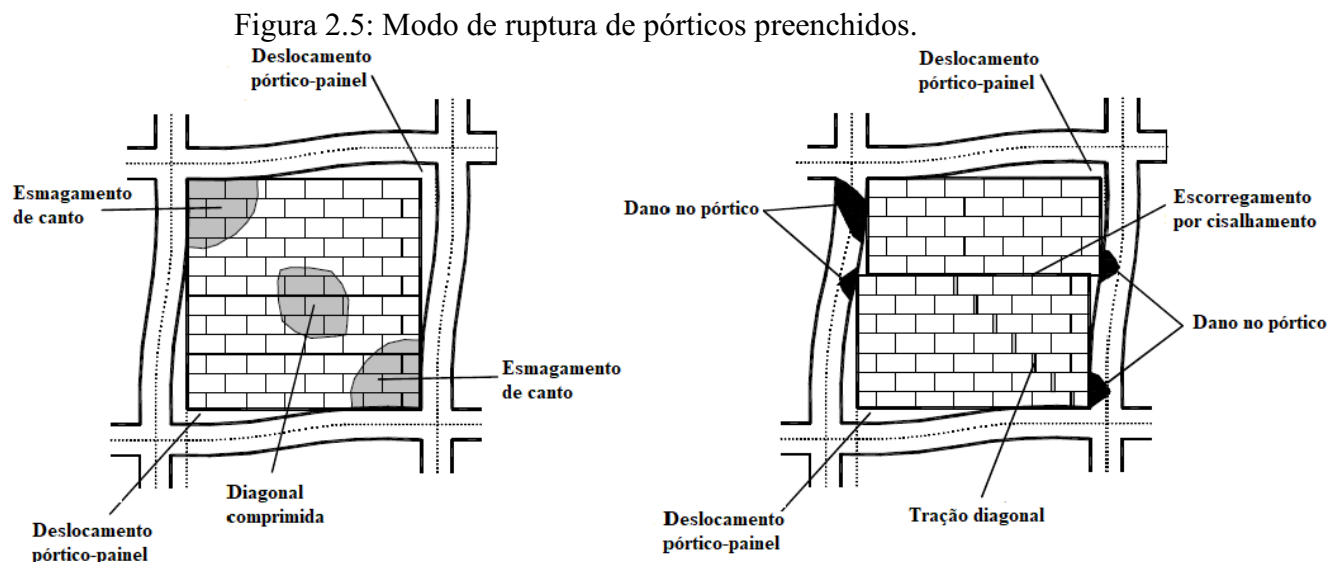
Figura 2.4: Deformações e modos de ruptura de pórticos preenchidos com alvenaria.



Fonte: Parsekian, Hamid e drysdale (2013).

Asteris *et al.* (2011) apresenta em seu trabalho uma classificação geral para os modos de ruptura em pórticos preenchidos com e sem aberturas na alvenaria. Com a aplicação de carregamento cíclico nos pórticos preenchidos, com e sem aberturas na parede, foram obtidos diferentes modos de ruptura nas alvenarias. A literatura traz alguns dos possíveis modos de ruptura, dentre eles a ruptura do canto comprimido da alvenaria

em contato com a viga e o pilar, a ruptura da diagonal comprimida, o deslizamento por cisalhamento e a ruptura de elementos do pórtico. A Figura 2.5 apresenta os modos de ruptura de pórticos preenchidos.



Fonte: Adaptado de Asteris *et. al.* (2011).

A seguir são apresentados, de forma breve, alguns dos inúmeros trabalhos sobre interação pórtico-alvenaria para ações horizontais.

Alvarenga (2002) investigou o comportamento de pórticos de aço enrijecidos com alvenarias com e sem aberturas, através de ensaios experimentais em escala real. A autora propôs métodos analíticos e realizou modelagens numéricas com análise não-linear utilizando o software DIANA, concluindo que as paredes de alvenaria conferem maior rigidez e resistência aos pórticos preenchidos. Alvarenga (2002) também propôs um modelo para obtenção da força de ruptura em paredes de alvenaria e uma expressão empírica para obtenção da largura da diagonal equivalente.

Santos (2007) realizou uma análise numérica de um edifício de 32 pavimentos em concreto armado utilizando o MEF. Em seu trabalho, primeiramente é realizada apenas a modelagem da estrutura em concreto e, em seguida, a modelagem levando em consideração o efeito das paredes de alvenaria de vedação no comportamento estrutural do edifício, através do modelo de barras diagonais equivalentes. Por fim, Santos (2007) realizou uma modelagem mais refinada de alguns desses painéis, submetidos ao carregamento proveniente dos pórticos. O autor concluiu que o uso de alvenaria como estrutura de contraventamento reduz as deformações da estrutura em comparação com o

pórtico sem painéis de alvenaria, mostrando que há um aumento da rigidez global da estrutura. Verificou-se também, que a presença da alvenaria causa uma alteração dos esforços nas vigas, um acréscimo de carga nos pilares de extremidade e uma leve redução nos pilares centrais, indicando que as paredes de alvenaria causam uma redistribuição de esforços em toda a estrutura.

Kose (2009) traz um estudo sobre os parâmetros que afetam o período fundamental em edifícios de concreto armado com paredes de preenchimento. Em seu trabalho o autor analisa a altura dos edifícios, o número de vãos, a razão entre a área de paredes de cisalhamento e a área total do andar, a porcentagem de abertura das paredes e o tipo de pórtico. Todos os modelos tiveram mantidas simetrias nos planos x e y. Kose (2009) dividiu seus modelos em três diferentes grupos: pórticos de concreto armado sem alvenaria, pórticos sem aberturas no primeiro andar e pórticos com aberturas no primeiro andar. O número de andares selecionados foi de 5, 7 e 10 andares e número de vãos adotados de 3, 4 e 5 para porcentagem de abertura das alvenarias variando de 40% a 83% e a porcentagem de área de cisalhamento variando de 0% a 1%, totalizando 189 modelos preparados para análises. Além disso, foi utilizado para confecção do pórtico de concreto uma resistência característica à compressão de 20 MPa e uma tensão de escoamento do aço de 420 MPa. Na parte de modelagem, Kose (2009) gerou e analisou todos os modelos através do programa SAP2000, para tal o autor considerou a alvenaria como diagonal equivalente adicionando sua massa a de toda a estrutura. A diagonal equivalente foi conectada a viga-pilar por meio de uma junta com dobradiça para deixar o momento fletor livre e receber apenas esforços de compressão. As tensões de tração foram desprezadas. O autor ainda opta por posicionar todas as aberturas acima da diagonal equivalente. A partir de todas as análises e resultados, Kose (2009) conclui que: a altura do edifício é o parâmetro primário na variação do período fundamental, indo ao encontro do que é apresentado pela grande maioria dos códigos vigentes; a porcentagem de paredes de cisalhamento foi o segundo parâmetro que mais afetou o período fundamental; e a porcentagem de alvenaria e o número de vãos afetaram o período fundamental de forma bem parecida. O autor ainda observa que alguns códigos desconsideram a alvenaria e paredes de cisalhamento em suas equações numéricas, parâmetros que afetaram o período fundamental, e propõe uma equação para o cálculo do período fundamental.

Madia (2012) realizou um estudo da arte sobre o enrijecimento resultante da alvenaria de preenchimento para análises com ações horizontais. Considerando alguns modelos de cálculo e normas vigentes, o autor buscou verificar a variação da relação largura/comprimento existente entre: aberturas no painel e diminuição da rigidez da estrutura; alteração dos esforços; e variação do material e das características da parede. O autor ainda realizou um estudo através de modelos numéricos de um edifício real, comparando o modelo original, sem diagonal, com o modelo com alvenaria de preenchimento, com a finalidade de comprovar o aumento de rigidez promovido pela parede no pórtico. Madia (2012) concluiu que o preenchimento de pórticos com alvenaria aumenta sua rigidez e a força horizontal máxima que a estrutura pode suportar antes de iniciar os processos de fissuração e perda de rigidez. O trabalho também concluiu que, para o prédio real modelado, a estrutura obteve um ganho de 18% na rigidez global, devido a consideração da alvenaria no contraventamento.

Silva (2014) analisou numericamente pórticos de concreto armado preenchidos com alvenaria (com e sem aberturas) submetidos às ações horizontais, empregando modelos via Método dos Elementos Finitos (MEF) e modelos de diagonal equivalente (MDE). A autora variou diversos parâmetros em seus modelos numéricos, tal como o comprimento do vão, a dimensão dos elementos do pórtico e as propriedades da alvenaria. Os resultados obtidos pela autora foram comparados aos resultados fornecidos pelas diferentes expressões encontradas na literatura para a determinação da largura da diagonal equivalente.

Al-Balhawi e Zhang (2017) apresentam um estudo numérico para obtenção do período fundamental através de modelagem 3D (SAP2000), onde os modelos seriam submetidos a forças do vento e carga de gravidade, tendo como parâmetros analisados: o número de andares (5, 10, 15 e 20 andares), o número de vãos (1 a 7 vãos) e os seus respectivos comprimentos (5 e 6 m), as propriedades mecânicas da alvenaria, e a presença de abertura nas paredes com e sem fissuração. Os autores consideraram em suas simulações edifícios: sem alvenaria; com 100% de alvenaria na parte exterior do edifício; e com aberturas na parte externa. Al-Balhawi e Zhang (2017) concluíram que: para os edifícios sem alvenaria os resultados obtidos coincidem com os obtidos através dos códigos normativos; a alvenaria contribui para o aumento da rigidez lateral do edifício e consequentemente redução do período fundamental; o principal parâmetro que influencia



na variação do período fundamental foi a altura dos edifícios e as propriedades mecânicas da alvenaria; e a porcentagem de abertura nas alvenarias é outro fator que deve ser considerado, pois afeta diretamente na rigidez lateral de toda a estrutura. Ao final os autores propõem uma equação para o cálculo do período fundamental que abranja um maior número de parâmetros.

Montandon (2018) apresenta um estudo a respeito do comportamento de pórticos de edifícios de concreto armado preenchidos com blocos cerâmicos submetidos a ações horizontais. O autor emprega o modelo de diagonal equivalente e um modelo com elementos finitos bidimensionais para o estado plano de tensões, incluindo o problema de contato parede-pórtico. Montandon (2018) constata diferenças relevantes entre valores da largura da diagonal equivalente fornecidas pelas expressões da literatura e os valores obtidos com o auxílio do MEF. Por essa razão, o autor propôs uma nova expressão para o cálculo da largura da diagonal equivalente, resultante de uma modificação na expressão de Mainstone (1974), que trouxe resultados próximos dos obtidos através dos modelos MEF.

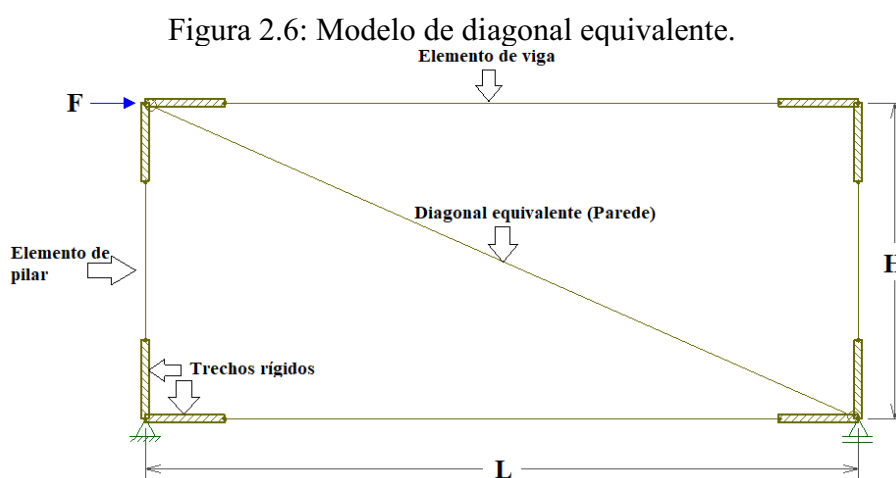
Santos (2019) realizou o desenvolvimento de modelos numéricos (via MEF) que representassem pórticos de aço vazios e preenchidos por alvenaria não armada submetidos a carregamentos cíclicos. O objetivo do autor foi calibrar os modelos numéricos de acordo com resultados experimentais, de modo a obter as envoltórias de força-deslocamento e identificar os modos de colapso que ocorrem na alvenaria. O autor encontrou discordância entre os resultados numéricos do pórtico vazio para o pórtico experimentado em laboratório. Segundo Santos (2019), o resultado experimental apresentou certo grau de plastificação na fase de tração do pórtico e assimetria da curva força-deslocamento, comportando-se diferente das análises numéricas onde o pórtico apresentou comportamento elástico-linear e simétrico. Através dos comparativos de pórticos de aço vazio com os pórticos de aço preenchidos com alvenaria, o autor concluiu que a adição de paredes em pórticos de aço reduz drasticamente o deslocamento da estrutura e melhora seu desempenho, colocando a alvenaria de preenchimento como uma opção extremamente interessante à substituição dos contraventamentos de aço.

Queiroz (2020) realizou simulações numéricas similares às de Montandon (2018), porém com alvenarias de preenchimento com módulos de elasticidade consideravelmente

maiores, uma vez que se tratavam alvenarias participantes. As investigações de Queiroz (2020) incluíram as recomendações da recém atualizada norma de alvenaria estrutural (ABNT NBR 16868 – 1:2020). Nas simulações do autor, a expressão de Mainstone (1974) forneceu resultados mais próximos aos dos modelos MEF com o aumento da resistência dos blocos da alvenaria.

### 2.2.1 Modelo de Diagonal Equivalente

Ao sofrer a ação de uma força horizontal, a alvenaria que preenche o pórtico se comporta como uma biela comprimida diagonalmente. Sendo assim, em simulações numéricas, substitui-se a alvenaria por uma barra diagonal biarticulada equivalente, de tal forma que todas as características mecânicas e geométricas da parede estejam aplicadas na barra diagonal. Esta é uma técnica de macromodelagem introduzida por Polyakov (1956). A Figura 2.6 apresenta um pórtico preenchido e sua forma de representação neste tipo de modelo.



Fonte: Autor (2021).

A partir do estudo de Polyakov (1956), surgiram diversas expressões para a determinação da diagonal equivalente.

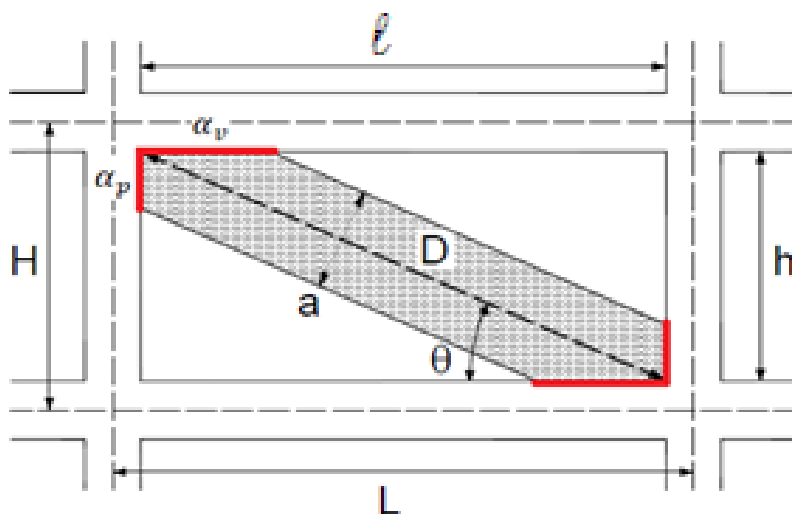
Dessa forma, são encontradas na literatura diversas expressões para o cálculo da largura da diagonal equivalente. A maioria dessas formulações utiliza o parâmetro de rigidez relativa ( $\lambda_r$ ) entre o painel de alvenaria e o pórtico. A Equação 2.1 define o parâmetro de rigidez relativa, onde  $E$ ,  $E_p$  e  $I_p$  representam respectivamente: o módulo de

elasticidade do material da alvenaria, o módulo de elasticidade do material do pilar e o momento de inércia à flexão do pilar, em que  $t$  é a espessura da alvenaria.

$$\lambda_r = \sqrt[4]{\frac{E \cdot t \cdot \sin(2\theta)}{4 \cdot E_p \cdot I_p \cdot h}} \quad (2.1)$$

A Figura 2.7 apresenta alguns dos parâmetros geométricos necessários para a obtenção da largura da diagonal equivalente. O Quadro 2.1 apresenta de forma resumida algumas das expressões encontradas na literatura para o cálculo da largura da diagonal equivalente em painéis preenchidos sem aberturas. A partir das formulações apresentadas no Quadro 2.1 tem-se que: “ $\lambda_H$ ” refere-se ao produto entre a rigidez relativa ( $\lambda_r$ ) e a altura entre eixos de vigas ( $H$ ); “ $a$ ” representa a largura da diagonal equivalente; “ $t$ ” a espessura da parede; “ $D$ ” o comprimento da diagonal da parede; “ $h$ ” a altura da parede; “ $\ell$ ” o comprimento da viga; “ $\theta$ ” o ângulo de inclinação da diagonal da parede em relação à horizontal; “ $H$ ” a distância entre eixos de vigas; “ $L$ ” a distância entre eixos de pilares; “ $\lambda_p$ ” a rigidez relativa entre o pilar e a alvenaria; “ $\lambda_v$ ” a rigidez relativa entre a viga e a alvenaria; “ $\alpha_p$ ” o comprimento de contato entre parede e pilar; “ $\alpha_v$ ” o comprimento de contato entre parede e viga; “ $E_p$ ” o módulo de elasticidade do pilar; “ $I_p$ ” o momento de inércia do pilar; “ $E_v$ ” o módulo de elasticidade da viga; e “ $I_v$ ” o momento de inércia da viga.

Figura 2.7: Parâmetros geométricos para obtenção da largura da diagonal equivalente



Fonte: Adaptado de SILVA (2014).

Quadro 2.1: Expressões para o cálculo da largura da diagonal equivalente (a)

Autores	Expressões
Mainstone (1974)	$a = 0,175. (\lambda_H)^{-0,4}. D$
Hendry (1981)	$a = 0,5. \sqrt{\alpha_p^2 + \alpha_v^2}; \quad \alpha_p = \frac{\pi}{2. \lambda_p} \leq h; \quad \alpha_v = \frac{\pi}{\lambda_v} \leq \ell$ $\lambda_p = \sqrt[4]{\frac{E.t.\sin(2\theta)}{4.E_p.I_p.h}} \quad \lambda_v = \sqrt[4]{\frac{E.t.\sin(2\theta)}{4.E_p.I_v.l}}$
Liau e Kwan (1984)	$a = \frac{0,95. \sin(2\theta)}{2. \sqrt{\lambda_H}}. D$
Decanini e Fantin (1987): painéis não fissurados	$\lambda_H \leq 7,85: \quad a = \left(0,085 + \frac{0,748}{\lambda_H}\right). D$ $\lambda_H > 7,85: \quad a = \left(0,130 + \frac{0,393}{\lambda_H}\right). D$
Decanini e Fantin (1987): painéis fissurados	$\lambda_H \leq 7,85: \quad a = \left(0,010 + \frac{0,707}{\lambda_H}\right). D$ $\lambda_H > 7,85: \quad a = \left(0,04 + \frac{0,47}{\lambda_H}\right). D$
Paulay e Priestley (1992)	$a = \frac{D}{4}$
Durrani e Luo (1994)	$a = \gamma. \sin(2\theta). D$ $\gamma = 0,32. \sqrt{\sin(2\theta)}. \left(\frac{H^4. E. t}{m. E_p. I_p. L}\right)^{-0,1}$ $m = 6. \left(\frac{1 + 6. E_v. I_v. H}{\pi. E_p. I_p. L}\right)$
Chrysostomou e Asteris (2012)	$a = 0,270. (\lambda_H)^{-0,4}. D$
Norma canadense – CSA 304 (2014)	$a = \text{menor valor} \left\{ \begin{array}{l} \text{Hendry (1981)} \\ \frac{D}{4} \end{array} \right\}$

Fonte: Autor (2021).

Cabe ressaltar que a ABNT NBR 16868 – 1:2020 recomenda a mesma expressão da norma canadense CSA S304 (2014).

## 2.2.2 Consideração de aberturas em paredes no Modelo de Diagonal Equivalente

O modelo de diagonal equivalente é bastante atrativo para projetos pela simplicidade. Contudo, em um edifício há paredes que contêm aberturas de janelas e

portas. Estas causam uma redução na rigidez lateral da estrutura. Para tais casos, pode-se multiplicar a largura da diagonal equivalente por um coeficiente redutor denominado fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ).

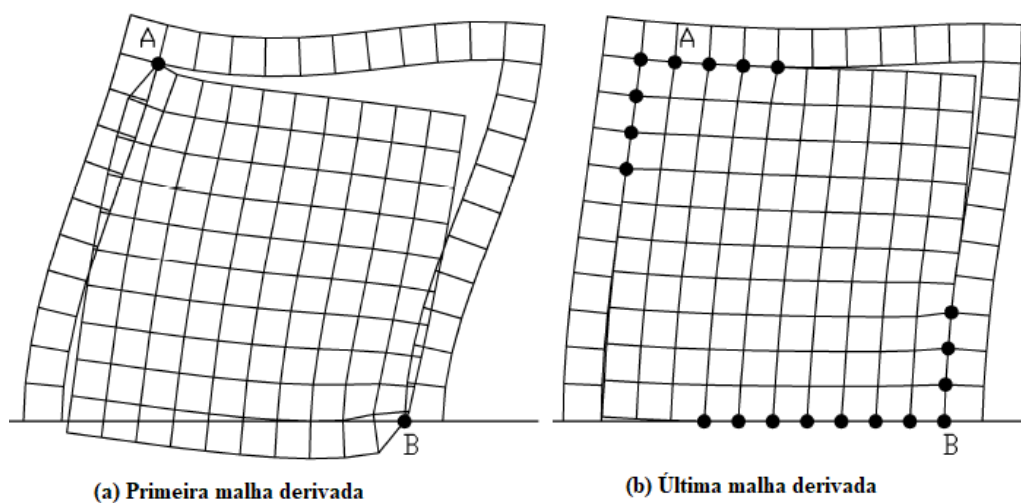
A seguir são apresentadas algumas expressões propostas para os fatores de redução da rigidez, a fim de considerar presença de aberturas em modelos de diagonal equivalente.

#### **2.2.2.1 Expressão proposta por Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012)**

Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012) estudaram a influência das aberturas em paredes de alvenaria na redução da rigidez de pórticos preenchidos sob o efeito de forças laterais e desenvolveram uma equação para o fator de redução da rigidez através de macro modelagem numérica. Os autores utilizaram uma técnica desenvolvida por Asteris (2003) para investigar a influência de aberturas na rigidez lateral das alvenarias. A característica básica desse método consiste em estimar o comprimento de contato pórtico/alvenaria e as tensões de contato como parte integral da solução.

A técnica adotada por Asteris (2003) consiste em considerar os modelos de elementos finitos da alvenaria ligados em torno dos elementos finitos do pórtico, em apenas dois pontos de quina (A e B), no final da diagonal de compressão da alvenaria (Figura 2.8a) e então o deslocamento nodal é gerado através de programa computacional. Para tal, a grande condição dessa técnica é que os pontos da alvenaria não podem se sobrepor aos do pórtico. Se os pontos referentes a alvenaria se sobrepõem aos pontos do pórtico, fixam-se os pontos vizinhos aos pontos anteriormente fixos e repete-se todo o procedimento. Na última etapa é observado se há a presença de tensão em qualquer ponto de contato da malha derivada, se os pontos nodais da parede não se sobrepõem aos pontos do pórtico, encerra-se o processo e a malha final é determinada (Figura 2.8b).

Figura 2.8: Método dos pontos de contato



Fonte: Asteris (2003).

Foram simulados os modelos de pórtico apresentados na Figura 2.9, submetidos a uma força horizontal de 30 kN, posicionada no canto superior esquerdo, com diferentes configurações quanto as dimensões e posições das aberturas. Observa-se que Asteris (2003) dispôs as aberturas em três posições distintas, variando a porcentagem de abertura em 0, 4, 9, 16 e 25 (%) e em seguida extrapolando os resultados para porcentagens de abertura de até 100% como mostra a Figura 2.10.

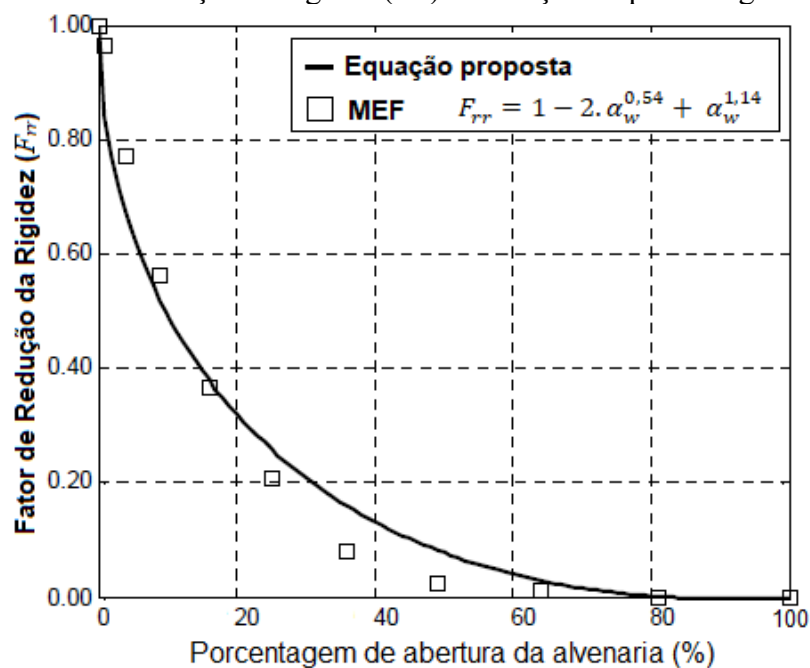
O comportamento do fator de redução da rigidez quando a abertura se encontra acima da diagonal equivalente é apresentado pelo gráfico da Figura 2.10, mostrando a variação do fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ) em função da porcentagem de abertura das paredes. Segundo Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012), como esperado, um aumento da porcentagem de abertura resulta em uma diminuição da rigidez, especialmente para porcentagem de abertura na alvenaria acima de 50% em que o  $F_{rr}$  tende a zero. A Figura 2.11 indica os diferentes fatores de redução da rigidez em função da porcentagem de abertura e da posição de cada abertura na parede de alvenaria.

Figura 2.9: Posição e porcentagem de aberturas nas alvenarias de preenchimento.

Porcentagem de abertura (%)	Posição das aberturas no painel de preenchimento		
	A Canto inferior esquerdo	B Centralizado	C Canto superior direito
0.00			
4.00			
9.00			
16.00			
25.00			

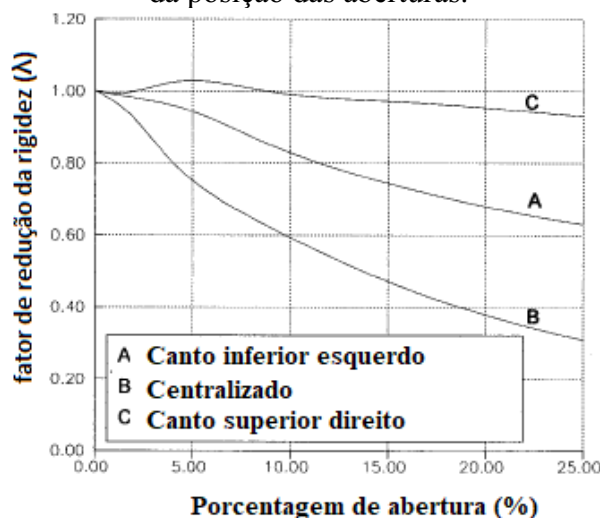
Fonte: Adaptado de Asteris (2003).

Figura 2.10: Fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ) em função da porcentagem de abertura.



Fonte: Adaptado de Asteris (2003).

Figura 2.11: Fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ) em função da porcentagem de abertura e da posição das aberturas.



Fonte: Adaptado de Asteris (2003).

A partir das conclusões do estudo paramétrico obtido por Asteris (2003) para o caso B (centralizado), Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012) propuseram a Equação 2.2 para a obtenção do fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ):

$$F_{rr} = 1 - 2 \cdot \alpha_w^{0,54} + \alpha_w^{1,14} \quad (2.2)$$

onde  $\alpha_w$  é a razão entre a área de abertura e a área da parede sem abertura na alvenaria.

#### 2.2.2.2 Expressão proposta por Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003)

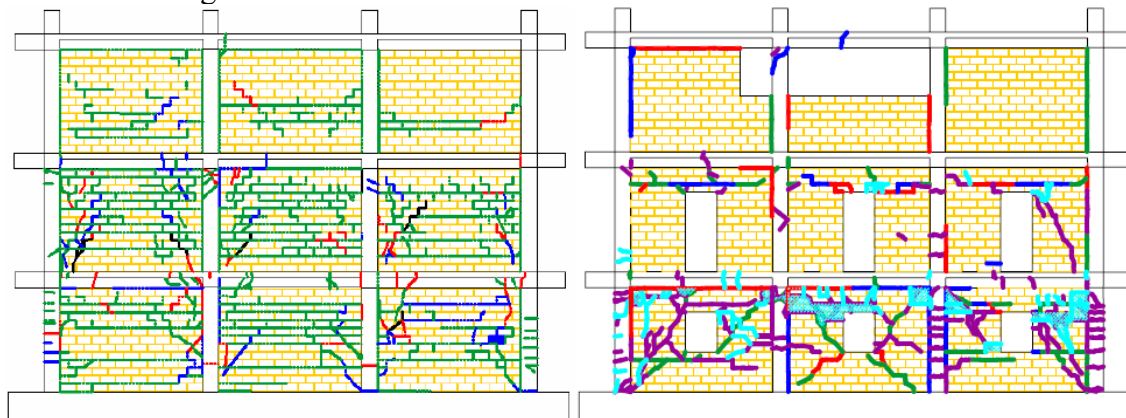
Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003) estudaram os efeitos das aberturas em paredes, relacionando-os com o aumento da rigidez lateral em pórticos preenchidos com alvenarias e desenvolveram um modelo de diagonal equivalente que leva em consideração tais aberturas. Para esse fim, os autores realizaram ensaios experimentais em escala reduzida de dois edifícios de três andares e três vãos, sendo um dos modelos sem aberturas e o outro com algumas aberturas. Os experimentos foram realizados a fim de replicar edifícios típicos da década de 50. Os testes foram realizados com a aplicação de carregamento cíclicos horizontais no edifício para estudar sua rigidez e deformação frente a uma ação sísmica.

Os dois edifícios ensaiados foram bastante danificados após terem sido submetidos a diversos carregamentos cíclicos, apresentando diversas fissuras com diferentes padrões de ruptura, como apresentado na Figura 2.12. Os autores ainda



observaram que as aberturas de portas e janelas agiram como agentes iniciadores das fissuras, reduzindo muito a rigidez global do pórtico.

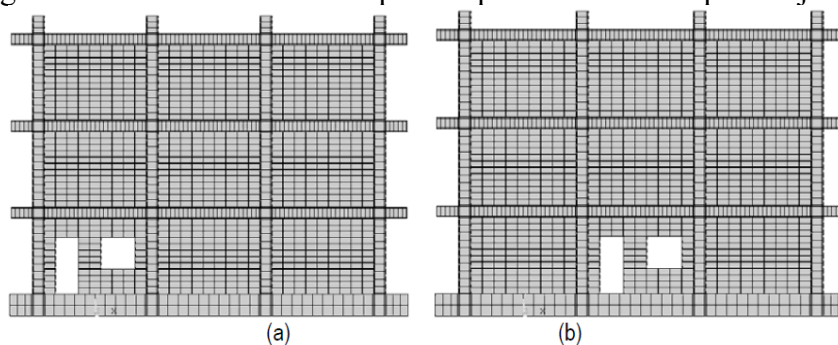
Figura 2.12: Fissuras observadas nos dois edifícios ensaiados.



Fonte: Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003).

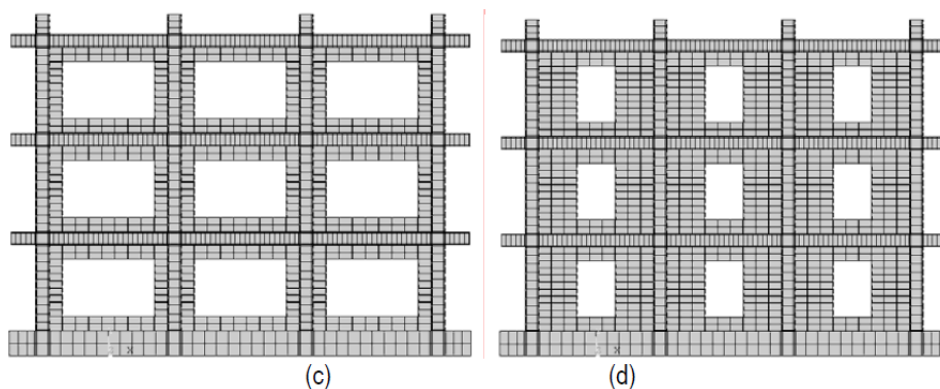
Para se determinar o melhor modelo de diagonal equivalente, os autores buscaram desenvolver um coeficiente de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ), que irá multiplicar o valor da largura da diagonal equivalente dos painéis totalmente preenchidos por alvenaria. Através de modelagens numéricas no programa ANSYS, Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003) desenvolveram os seguintes modelos apresentados na Figura 2.13 e Figura 2.14, tendo os modelos A e B apenas a abertura de uma porta e uma janela em diferentes posições do primeiro andar e os modelos C e D apresentando 60% e 22% de aberturas em todas as alvenarias, respectivamente. As várias configurações de pórticos vazios e preenchidos com alvenaria foram submetidas a carregamentos “*in plane*” até a falha estrutural. As análises levaram em consideração o comportamento: não linear dos materiais; e elastoplástico das barras de aço. Além disso, o cisalhamento transferido para o material fissurado também está incluso no comportamento do material.

Figura 2.13: Modelos A e B de pórtico preenchidos com porta e janela.



Fonte: Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003).

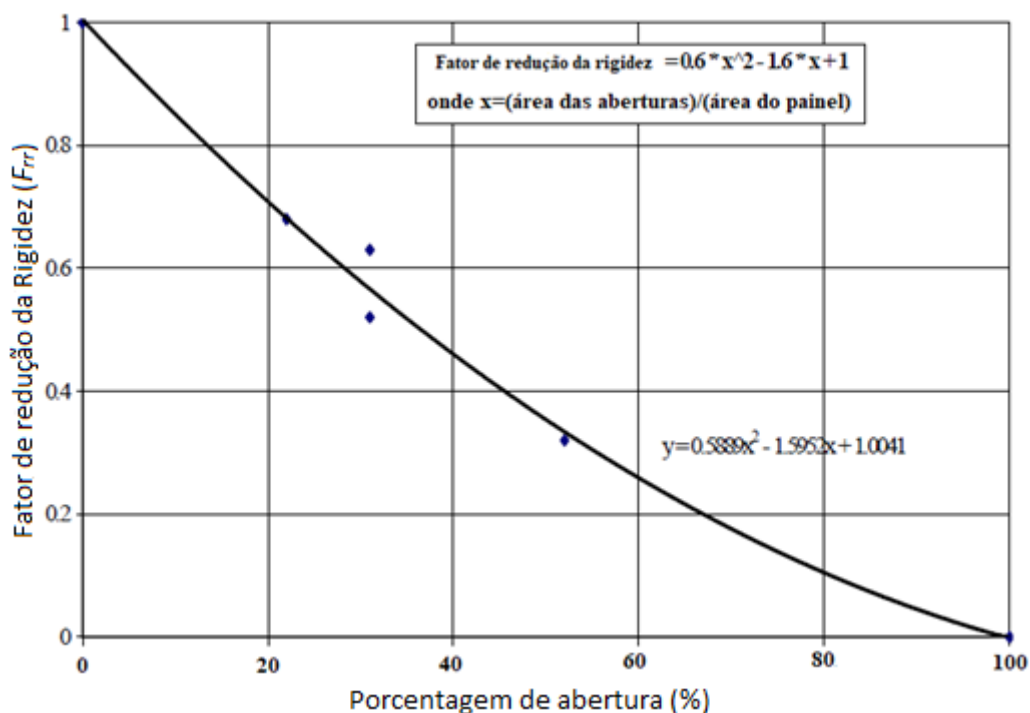
Figura 2.14: Modelos C e D de pórtico preenchidos com 60% e 22% de abertura.



Fonte: Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003).

A fim de determinar uma correlação entre a porcentagem de abertura e a largura da diagonal equivalente para o pórtico totalmente preenchido, os autores plotaram 6 pontos como apresentado na Figura 2.15. Ainda segundo Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003), apenas os pórticos uniformes e com aberturas de portas e janelas no primeiro andar foram considerados para o desenvolvimento da Equação 2.3. Os autores entenderam que estes teriam sido os únicos pórticos que demonstraram mudanças significativas de sua resistência máxima.

Figura 2.15: Fator de redução da rigidez.



Fonte: Adaptado de Al-chaar, Lamb e Abrams (2003).

Segundo Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003) a interpretação numérica da Figura 2.15 se dá pela Equação 2.3:

$$F_{rr} = 0,6. \alpha_w^2 - 1,6. \alpha_w + 1 \quad (2.3)$$

onde  $\alpha_w$  é a razão entre a área de abertura e a área da parede sem abertura na alvenaria.

Ainda segundo os autores, para porcentagem de aberturas que excedam os 60% é recomendado que o efeito das alvenarias seja desprezado e o  $F_{rr}$  seja igual a zero.

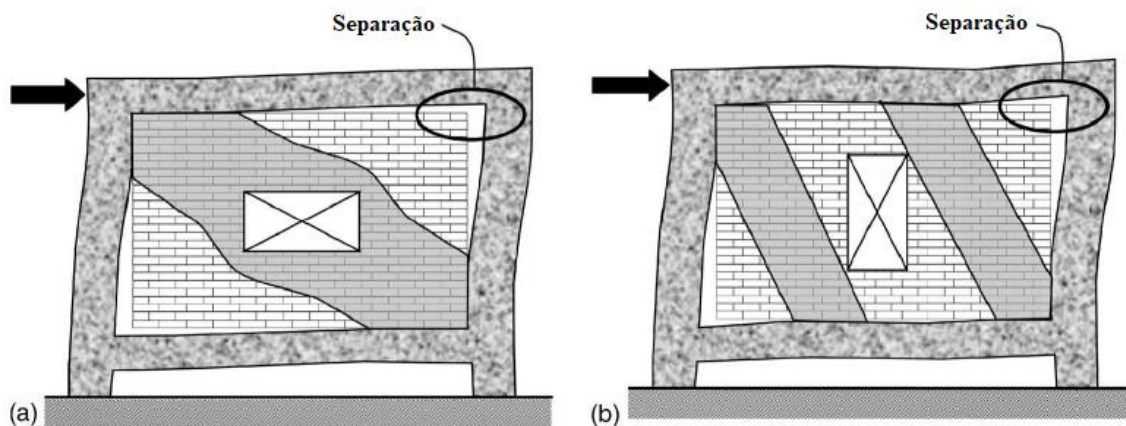
### 2.2.2.3 Expressão proposta por Mondal e Jain (2008)

Mondal e Jain (2008) investigaram o efeito de aberturas centrais de diferentes tamanhos na rigidez global do pórtico preenchido. Os autores realizaram simulações numéricas de pórticos preenchidos de 1, 2 e 3 andares e um vão. Segundo Mondal e Jain (2008), a curva de deflexão da alvenaria pode ser dividida em três partes: a primeira é uma falta de encaixe entre a alvenaria e o pórtico; a segunda é aproximadamente linear e reflete as interações entre a parede e o pórtico; e a terceira é o fator de redução da rigidez, que aparece devido ao aumento das tensões e conseqüentemente a progressiva degradação da alvenaria. A partir dos resultados obtidos, Mondal e Jain (2008) desenvolveram uma equação simples para a obtenção da redução da rigidez.

Os autores realizaram um estudo paramétrico para obtenção da rigidez lateral do pórtico preenchido por meio de modelos MDE, que foi estimado para se obter a mesma rigidez lateral usada no MEF, e calibrado utilizando resultados da literatura. O modelo MDE foi adotado para se obter a rigidez lateral dos pórticos preenchidos com alvenaria que apresentavam aberturas. Como carregamento, os autores utilizaram a aplicação de uma força lateral, aplicada no eixo da viga superior. Esta força foi sendo aumentada até que os elementos de contato fossem submetidos a compressão e os comprimentos de contato fossem estabilizados, como mostra a Figura 2.16. Pode-se observar na Figura 2.16 a formação da diagonal equivalente e a separação entre alvenaria e pórtico de concreto.

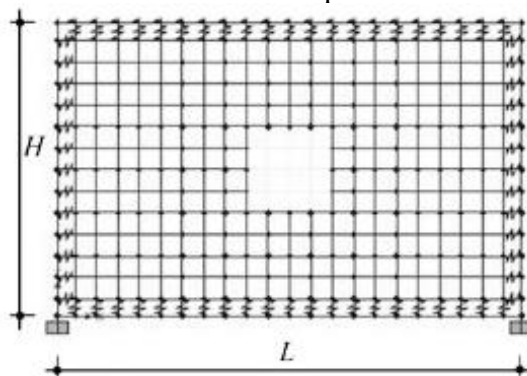
Dois parâmetros foram considerados: o tamanho das aberturas e o número de andares, obtendo um total 96 modelos que sofreram análise elasto-linear. A Figura 2.17, ilustra a modelagem de uma parede com abertura central para um edifício de um andar.

Figura 2.16: Formação da diagonal equivalente simples (a) e dupla (b)



Fonte: Mondal e Jain (2008).

Figura 2.17: Modelo de uma parede com abertura.



Fonte: Mondal e Jain (2008).

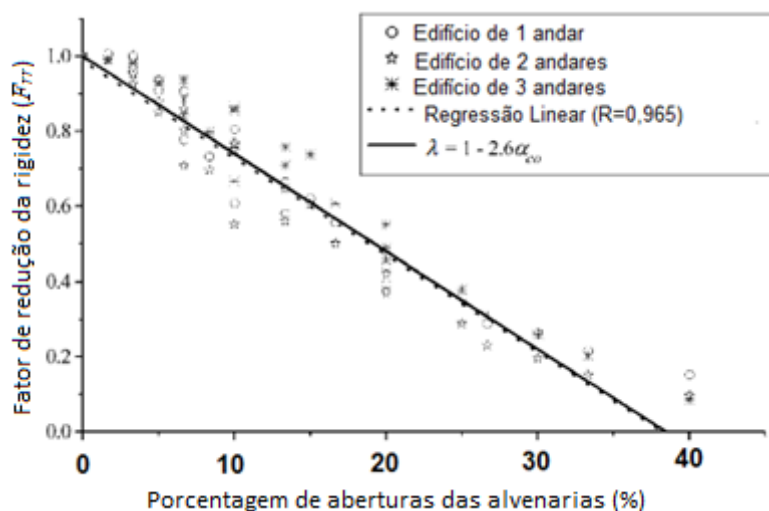
A resistência característica do concreto adotado foi de 25 MPa. Empregando uma regressão linear, Mondal e Jain (2008) obtiveram a Equação 2.4 para o fator de redução da rigidez:

$$F_{rr} = 1 - 2,6 \cdot \alpha_w \quad (2.4)$$

onde  $\alpha_w$  é a razão entre a área de abertura e a área da parede sem abertura na alvenaria.

A Figura 2.27 contém os resultados obtidos para o fator de redução da rigidez em função da porcentagem de aberturas nas alvenarias.

Figura 2.27: Fator de redução da rigidez.



Fonte: Adaptado de Mondal e Jain (2008).

Mondal e Jain (2008) concluíram que se a área de abertura nas alvenarias for menor que 5% da superfície da parede de preenchimento (sem abertura), o efeito da abertura na rigidez lateral de pórticos preenchidos pode ser desprezado. Os autores também afirmam que a contribuição da parede de alvenaria na rigidez lateral de pórticos preenchidos pode ser ignorada se a área de aberturas for superior a 40% da área da parede de alvenaria (sem aberturas), o que significa que a estrutura pode ser analisada como um pórtico vazio (sem alvenaria).

## 2.3 Período Fundamental

O período fundamental de vibração é um parâmetro importante para o projeto de estruturas de edifícios submetidas a ações sísmicas ou para a avaliação dos efeitos dinâmicos do vento em edifícios esbeltos. Conceitualmente, o período fundamental é o intervalo de tempo de uma oscilação completa (normalmente expressa em segundos) referente ao primeiro modo de vibração, referido como *modo fundamental*. Este parâmetro pode ser obtido por meio de uma análise modal ou estimado por expressões analíticas da literatura.

Na literatura encontram-se diversas fórmulas para a estimativa do período fundamental. Contudo, tais formulações fornecem normalmente resultados bem diferentes entre si, trazendo incertezas quanto ao seu uso. Segundo Asteris (2016), a maioria das equações desconsidera a presença de alvenarias (com ou sem aberturas) e, conseqüentemente, a rigidez das mesmas, o que resulta em mudanças significantes no

período fundamental da estrutura. A presença de alvenaria regularmente distribuída também contribui para uma melhora da resposta do edifício frente às ações sísmicas.

Algumas normas também apresentam fórmulas empíricas para estimativa do período fundamental. Segundo Amanat e Hoque (2006), as formulações são desenvolvidas a partir do monitoramento de edifícios reais durante grandes vibrações (sismos). Na maioria dessas formulações, o período geralmente é expresso em função da altura total do edifício, tal como indicado na Equação 2.5, presente na norma europeia Eurocode 8 (2004):

$$T = C_T \cdot H^{3/4} \quad (2.5)$$

onde  $C_T$  é um coeficiente numérico que depende da tipologia estrutural e  $H$  a altura total do edifício (em metros).

A seguir são apresentadas algumas disposições normativas acerca da determinação do período fundamental, bem como alguns trabalhos que estimam o período fundamental através de dados experimentais e numéricos.

### 2.3.1 ABNT NBR 15421 (2006)

A norma brasileira de projeto de estruturas resistentes a sismos apresenta uma expressão para estimativa do período fundamental da estrutura, conforme a Equação 2.6.

$$T_a = C_T \cdot h_n^x \quad (2.6)$$

onde:

$T_a$  – Período fundamental aproximado (s);

$C_T$  – Coeficiente de período da tipologia estrutural;

$h_n$  – Altura do edifício dada em metros;

$x$  – Expoente da lei potencial do período fundamental aproximado.

O Quadro 2.2 apresenta os coeficientes necessários à determinação do período fundamental aproximado  $T_a$ .

Quadro 2.2: Coeficientes  $C_T$  e  $x$  para a determinação do período fundamental  $T_a$ 

Tipologia Estrutural	Coeficiente ( $C_T$ )	Coeficiente $x$
Estruturas em que as forças sísmicas horizontais são 100% resistidas por pórticos de aço momento-resistentes, não sendo estes ligados a sistemas mais rígidos que impeçam a sua livre deformação quando submetidos à ação sísmica.	0,0724	0,8
Estruturas em que as forças sísmicas horizontais são 100% resistidas por pórticos de concreto, não sendo estes ligados a sistemas mais rígidos que impeçam a sua livre deformação quando submetidos à ação sísmica.	0,0466	0,9
Estruturas em que as forças sísmicas horizontais são resistidas em parte por pórticos de aço contraventados com treliças.	0,0731	0,75
Todas as outras estruturas	0,0488	0,75

Fonte: ABNT NBR 15421 (2006).

Contudo, em caso de determinação do parâmetro por extração modal, que leva em consideração as características mecânicas e de massa da estrutura, o período fundamental da estrutura ( $T$ ) não deve ser superior ao valor do período aproximado  $T_a$  multiplicado pelo coeficiente de limitação de período  $C_{up}$  (que varia entre 1,5 e 1,7, dependendo da zona sísmica). Observa-se que, para estruturas onde as forças sísmicas são resistidas por pórticos de concreto, os coeficientes  $C_T$  e  $x$  são os mesmos encontrados nas recomendações da FEMA-450 (2003).

### 2.3.2 Eurocode 8 (2004)

O período fundamental é também mencionado no Eurocode 8 (2004), que trata do projeto de estruturas resistentes a sismos. Para fins de estimativa do período fundamental, a referida norma europeia apresenta a Equação 2.7, que apareceu pela primeira vez no relatório ATC3-06 e foi desenvolvida pelo método de Rayleigh para o cálculo do período fundamental para edifícios de até 40 metros. Tal método assume que: as forças laterais equivalentes são distribuídas linearmente sobre a altura do edifício; a máxima força lateral

na base da estrutura devido a ações sísmicas é proporcional à  $\frac{1}{T^{2/3}}$ ; e os deslocamentos do edifício são controlados por limites de movimentação lateral. O Eurocode 8 (2004) adota o coeficiente  $C_T$  igual a 0,075 para pórticos de concreto e em aço com contraventamento excêntrico. Contudo, a norma permite o cálculo mais preciso do coeficiente  $C_T$  através das Equações 2.8 e 2.9 para o caso de edifícios de concreto preenchidos com paredes de alvenaria ou com paredes de concreto. Alternativamente pode-se usar a Equação 2.10 para o cálculo estimado do período fundamental.

$$T = C_T \cdot H^{3/4} \quad (2.7)$$

$$C_T = \frac{0,075}{\sqrt{A_c}} \quad (2.8)$$

$$A_c = \sum A_i \cdot \left(0,2 + \frac{l_{wi}}{H}\right)^2 \quad (2.9)$$

$$T = 2 \cdot \sqrt{d} \quad (2.10)$$

Onde:

$A_c$  – Área total efetiva de paredes (*shear walls*) no primeiro andar do edifício (em m<sup>2</sup>);

$A_i$  – Área efetiva da seção transversal da parede  $i$  (*shear wall*) na direção considerada no primeiro andar do edifício (em m<sup>2</sup>);

$l_{wi}$  – Comprimento da parede  $i$  (*shear wall*) no primeiro andar (em m), na direção paralela às forças aplicadas, com a restrição de que  $l_{wi}/H$  não exceda 0,9;

$H$  – Altura do edifício (em m);

$d$  – Deslocamento elástico lateral do topo do edifício (em m), devido aos carregamentos horizontais aplicados.

### 2.3.3 NBCC (1995)

Alguns códigos fornecem uma expressão bastante simples para o cálculo do período fundamental, utilizando apenas o número de andares do edifício ( $N$ ), ao invés da altura total do mesmo. É o caso do código canadense NBCC (1995) conforme mostra a Equação 2.11. Tal expressão restringe o número de andares a 12 e a altura máxima do andar em 3 metros, não podendo ser ultrapassado tais valores.

$$T = 0,1 \cdot N \quad (2.11)$$



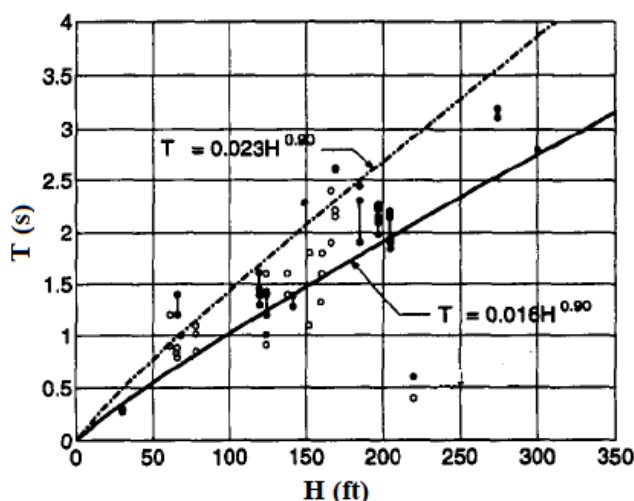
### 2.3.4 Goel e Chopra (1997)

Goel e Chopra (1997) desenvolveram fórmulas empíricas para estimar o período fundamental de vibração para estruturas de concreto e aço. Os autores utilizaram um banco de dados de períodos fundamentais coletados de 27 edifícios de concreto armado e 42 edifícios em aço provenientes do terremoto de Northridge em 1994 e do terremoto de San Fernando em 1971. Segundo os autores, fórmulas desenvolvidas para normas tendem a subestimar o período fundamental de 10% a 20% aproximadamente, e permitem o cálculo do período fundamental através de uma análise racional, como o método de Rayleigh. Através de regressões numéricas e com base no método de Rayleigh, os autores encontraram as Equações 2.12 e 2.13 para edifícios de concreto armado. Essas duas expressões representam o limite inferior e superior para o período fundamental como apresentado na Figura 2.28, onde  $H$  é dado em *pés*.

$$T = 0,016.H^{0,9} \quad (2.12)$$

$$T = 0,023.H^{0,9} \quad (2.13)$$

Figura 2.28: Fórmula para o Período recomendado e limite superior para o período fundamental de construções de pórtico resistente ao momento de concreto armado.



Fonte: Adaptado de Goel e Chopra (1997).

Segundo Goel e Chopra (1997) apenas poucos dados referentes ao período fundamental ultrapassam o limite superior descrito na Equação 2.13 ou o limite inferior descrito pela Equação 2.12, indicando assim, que a Equação 2.12 pode ser utilizada para uma estimativa mais conservadora do período fundamental, e a Equação 2.13 um limitador do período obtido através de análises modais. Os autores ainda afirmam que

esse período fundamental (obtido através de análise modal) não pode ser superior a 1,4 multiplicado pelo limite inferior (Equação 2.12). O coeficiente 1,4 é determinado através da divisão entre 0,023 e 0,016. Essa recomendação se deve ao fato dos autores se basearem em dados obtidos em edifícios da Califórnia, onde os sismos são mais intensos, e ao fato de haver diferença entre os materiais adotados para construção dos edifícios em diferentes partes dos Estado Unidos da América e do mundo.

### 2.3.5 Crowley e Pinho (2004)

Crowley e Pinho (2004) tiveram como objetivo encontrar uma relação empírica entre a altura ( $H$ ) e o período fundamental ( $T$ ) ao invés de períodos fundamentais medidos *in loco* durante terremotos. Para tal, os autores realizaram estudos numéricos através da modelagem de 17 edificações de concreto armado por meio de um programa de análise não linear de elementos finitos, sem a consideração de aberturas. Para a obtenção da estimativa do período fundamental, estudos analíticos foram realizados por meio de 8 diferentes procedimentos que incluem: análise de autovalor, análise “*pushover*” e análises dinâmicas não lineares. Ao final do seu trabalho, Crowley e Pinho (2004) discutem a recomendação de uma equação para o período fundamental em função da altura do edifício.

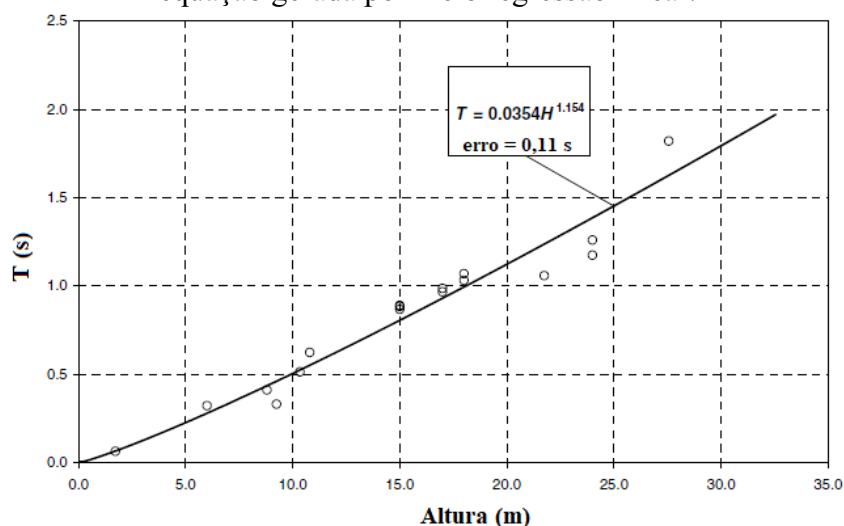
As edificações estudadas por Crowley e Pinho (2004) são de 5 diferentes países europeus que sofreram sismos e foram construídos entre 1930 e 1980. A altura dos edifícios variou de 2 e 28 metros, correspondendo a edifícios de 1 e 8 andares. As propriedades dos materiais se mostraram distintas, variando de 15 a 29 MPa para resistência à compressão do concreto, usado em vigas e pilares, e de 200 a 380 MPa para tensão de escoamento do aço, com exceção de um edifício de 1 andar que tinha uma tensão de escoamento do aço de 460 MPa.

Os resultados obtidos para cada uma das 8 diferentes metodologias aplicadas aos edifícios de concreto armado são apresentados na Figura 2.29. Crowley e Pinho (2004) realizaram análises regressivas a fim de determinar a curva que melhor se adequasse a todos os valores obtidos. Ainda para quantificar a precisão da curva, foi também estimado o desvio padrão da curva obtida. Este parâmetro fornece uma medida de erro introduzido pelas equações de regressão quando usadas para prever o período fundamental para

qualquer possibilidade de valor da altura de edifícios. Os valores do erro variaram entre 0,11s e 0,22s.

A Figura 2.30 apresenta os resultados de análise de autovalor em que se é considerado a fissuração das estruturas de concreto em comparação com a não consideração da fissuração. Segundo os autores, para considerar a fissuração dos pilares, aplicou-se um coeficiente redutor multiplicador de inércia à flexão igual a 0,5. Para as vigas, esses coeficientes redutores foram de 0,35 e 0,40. Como esperado, a curva do período fundamental para estrutura fissurada se encontra acima da curva que corresponde as estruturas sem fissuração.

Figura 2.29: Períodos fundamentais obtidos por meio de análise de autovalor e a equação gerada por meio regressão linear.



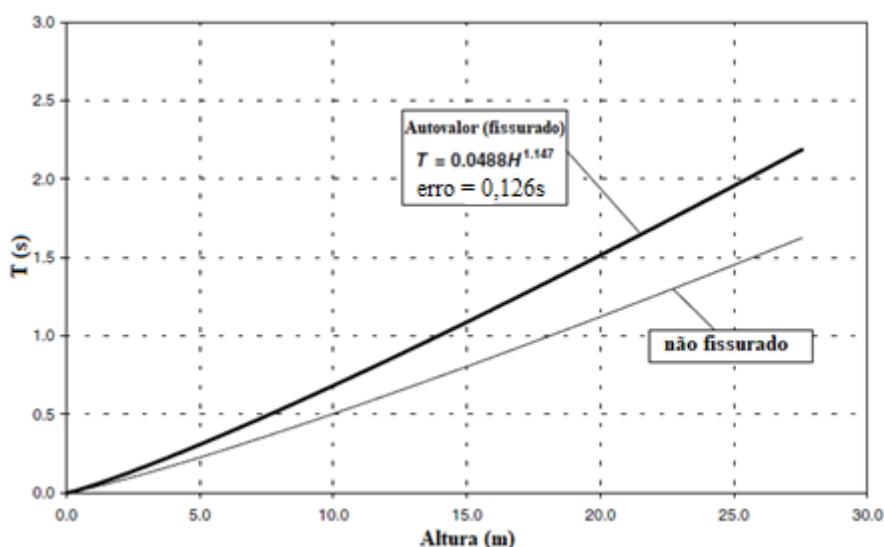
Fonte: Adaptado de Crowley e Pinho (2004).

Uma outra metodologia utilizada por Crowley e Pinho (2004) foi o uso de análises dinâmicas não-lineares que iriam avaliar de forma mais realística o comportamento dos edifícios de concreto, levando em consideração os efeitos dos maiores modos de vibração e a fissuração dos elementos estruturais. A Figura 2.31 contém os resultados da análise dinâmica.

Segundo os autores, o erro padrão aqui obtido pelas análises dinâmicas foi maior que todos os erros das diversas metodologias abordadas no trabalho. Observa-se na Figura 2.31 que a curva que melhor representa os dados do trabalho (análise dinâmica não-linear) é análoga a curva obtida por autovalor, obtida sem a redução da rigidez de vigas, pilares e alvenaria, mostrando que, mesmo a análise por autovalor não ser realista, uma vez que

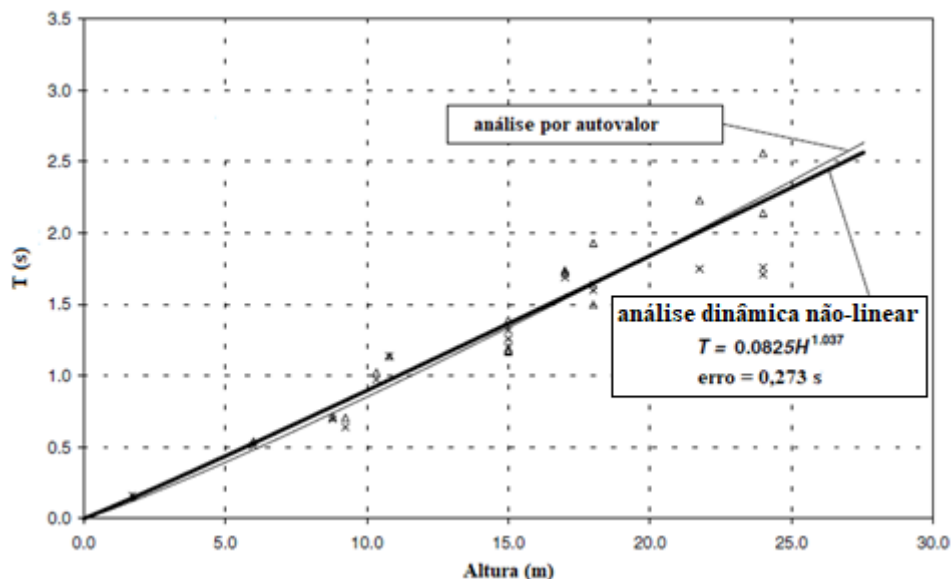
não reduz a rigidez da estrutura, ela ainda pode trazer uma boa estimativa para o cálculo do período fundamental.

Figura 2.30: Período Fundamental considerando fissuração com análise por autovalor



Fonte: Adaptado de Crowley e Pinho (2004).

Figura 2.31: Período fundamental obtido por meio de análises dinâmicas.

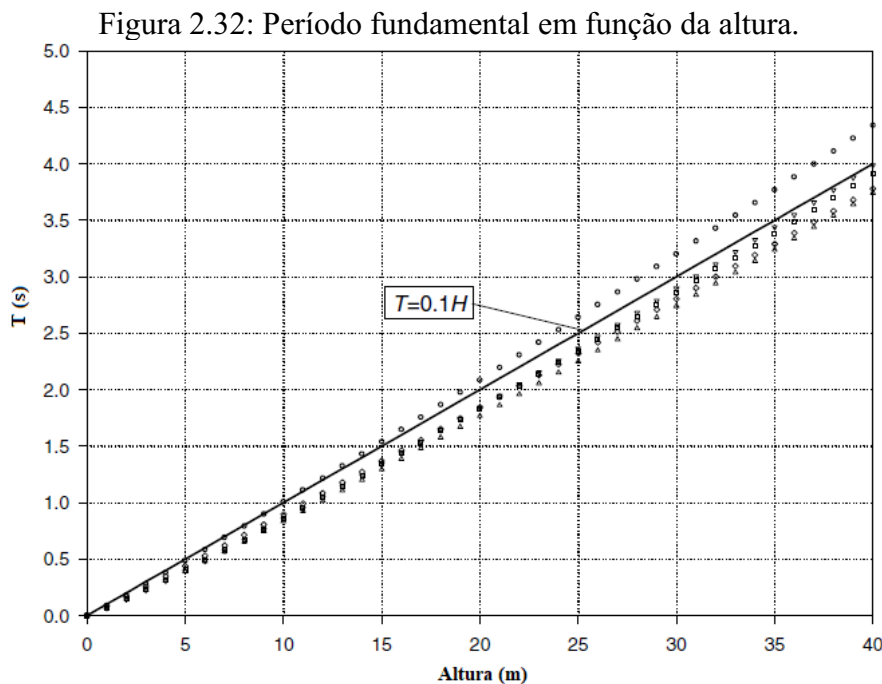


Fonte: Adaptado de Crowley e Pinho (2004).

Os autores concluem que os resultados apontam para uma relação linear entre o período fundamental e a altura dos edifícios, conforme a Equação 2.16. A Figura 2.32 contém todos os valores das análises e a reta que representa a equação adotada pelos autores.

$$T = 0,1.H \quad (2.16)$$

Onde  $H$  é a altura do edifício dado em metros.



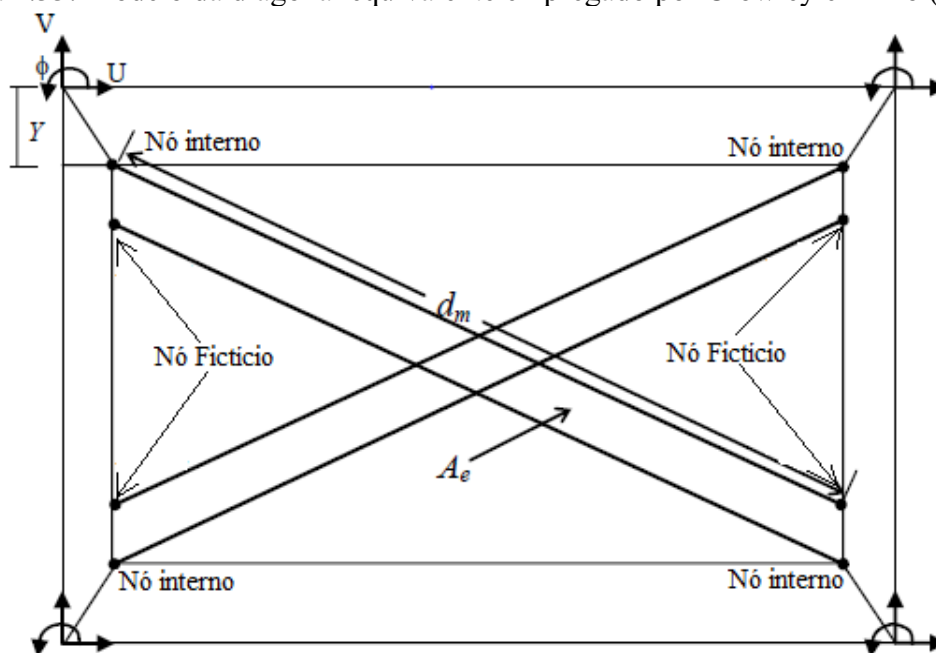
Fonte: Adaptado de Crowley e Pinho (2004).

### 2.3.6 Crowley e Pinho (2006)

Crowley e Pinho (2006), por meio dos dados obtidos em Crowley e Pinho (2004) e com a realização de análises numéricas de pórticos planos, propuseram uma nova equação para estimar o período fundamental de edifícios de concreto armado. Entretanto, os edifícios analisados por Crowley e Pinho (2006) possuíam paredes com aberturas ou até mesmo vãos sem paredes. Crowley e Pinho (2006) realizam a macromodelagem das paredes aplicando o conceito de diagonal equivalente (Figura 2.33) e obtiveram os fatores de redução de rigidez para a consideração das aberturas. A diagonal equivalente consiste em duas diagonais de compressão, sendo que o modelo possui 4 nós externos, 4 internos (conectados junto ao encontro da viga e pilar) e 4 nós fictícios. Os nós fictícios são usados para representar o efeito local entre a parede e a estrutura de concreto do pórtico. Os nós internos representam o contato pórtico-alvenaria da parte interior das vigas e pilares. Na Figura 2.33 tem-se que:  $Y$  é a espessura da viga;  $A_e$  é a distância entre as duas bielas posicionadas em um sentido da diagonal equivalente; e  $d_m$  o comprimento dessas bielas.

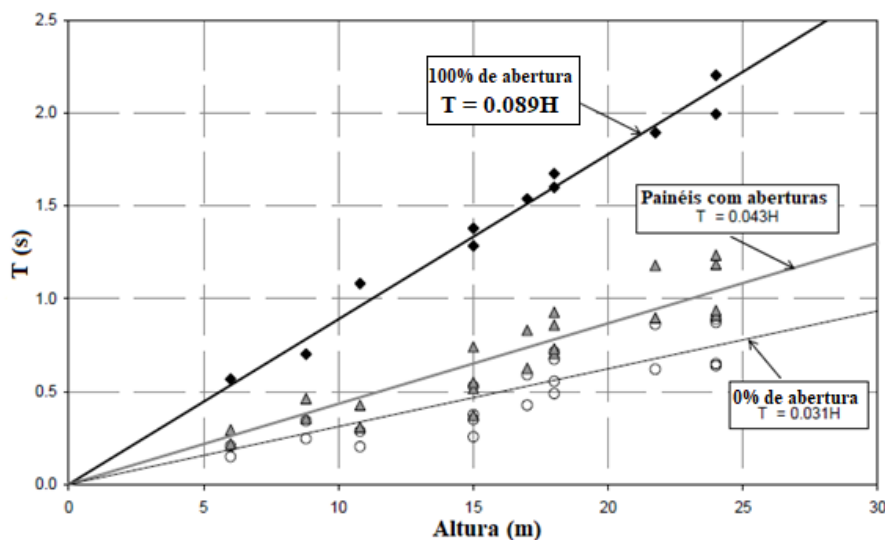
Uma análise de autovalor considerando a fissuração da alvenaria foi realizada para: pórtico de concreto sem paredes de alvenaria; com a parede ocupando 100% do espaço; e para pórticos preenchidos por alvenaria com aberturas. Por meio das regressões lineares aplicadas aos resultados, os autores observaram a influência da alvenaria no aumento da rigidez do pórtico, bem como na redução do período fundamental, como mostra a Figura 2.34.

Figura 2.33: Modelo da diagonal equivalente empregado por Crowley e Pinho (2006)



Fonte: Adaptado de Crowley e Pinho (2006).

Figura 2.34: Período fundamental para edificações de concreto armado com fissuração obtidos por análise de autovalor.



Fonte: Adaptado de Crowley e Pinho (2006).

Segundo Crowley e Pinho (2006), para os pórticos analisados totalmente preenchidos por alvenaria (sem aberturas) e os que possuíam alvenaria com certa porcentagem de abertura, há uma maior dispersão dos dados em comparação aos pórticos sem alvenarias. Isso se deve a variação da espessura da alvenaria adotada pelos autores (10 e 25 cm). Ainda segundo Crowley e Pinho (2006), o uso adicional de modelos com variações do módulo de elasticidade da alvenaria traria uma dispersão ainda maior dos resultados, para os pórticos preenchidos com alvenaria.

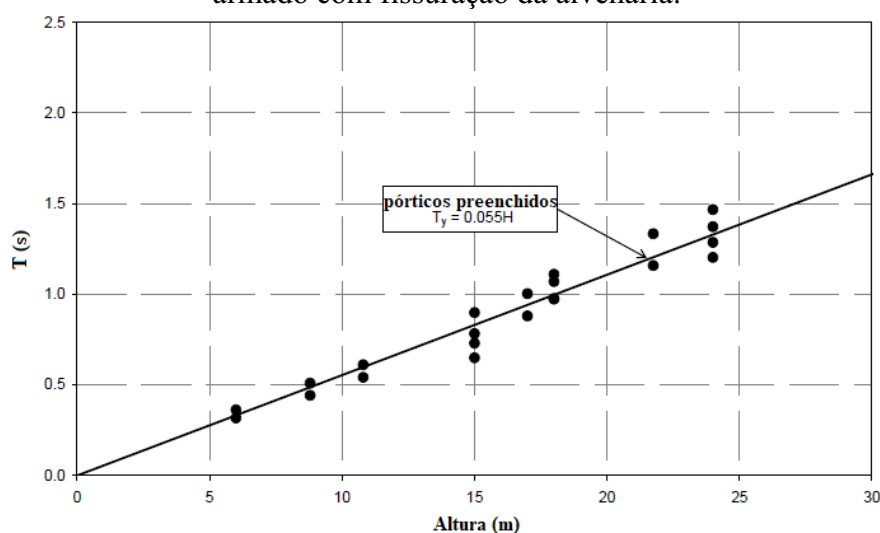
A partir dos valores apresentados na Figura 2.34, Crowley e Pinho (2006) realizaram uma média dos valores para pórticos totalmente preenchidos, pórticos preenchidos com alvenaria com aberturas e pórticos vazios, obtendo a Equação 2.17.

$$T = 0,055.H \quad (2.17)$$

Onde,  $H$  é a altura do edifício dada em metros.

A Figura 2.34 mostra a regressão linear a partir dos pontos médios usados para se determinar a nova equação.

Figura 2.34: Estimativa proposta para o período fundamental para edifícios de concreto armado com fissuração da alvenaria.



Fonte: Adaptado de Crowley e Pinho (2006).

### 2.3.7 ABNT NBR 6123 (1988)

Para a determinação dos efeitos dinâmicos do vento, a ABNT NBR 6123 (1988) apresenta expressões para a estimativa do período fundamental ( $T_I$ ) em função da altura

total da edificação, dependendo da tipologia estrutural. Para as edificações em concreto, os valores são os indicados no Quadro 2.3, onde  $h$  é a altura total do edifício (em metros).

Quadro 2.3: Estimativa do período fundamental em edifícios com estrutura de concreto

Tipo de edificação	$T_1$ (em s)
Edifícios com estrutura aporticada de concreto, sem cortinas.	$T_1 = 0,05 + 0,015 \cdot h$
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais.	$T_1 = 0,05 + 0,012 \cdot h$

Fonte: Compilado da ABNT NBR 6123 (1988).

### 2.3.8 Asteris *et al.* (2016)

Asteris *et al.* (2016) apresentam uma investigação analítica acerca dos parâmetros que afetam o período fundamental em edifícios de concreto armado. Os parâmetros analisados pelos autores foram a influência da altura dos edifícios, o número de vãos, os comprimentos dos vãos (distância entre eixos de pilares), o módulo de elasticidade da alvenaria e a porcentagem de abertura das paredes. Baseado em seus resultados e através da aplicação de análises regressivas, os autores propuseram uma equação empírica para estimar o período fundamental.

Asteris *et al.* (2016) investigaram edifícios de 2 a 14 andares, adotando um pé direito estrutural de 3 metros (distância entre andares), número de vãos variando de 2 a 4 e comprimento dos vãos de 3 a 7,5 metros. As aberturas dos edifícios, consideradas pelos autores, variaram de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% (pórtico sem alvenaria). Foram adotadas alvenarias com 5 diferentes módulos de elasticidade (1,5 GPa; 3,0 GPa; 4,5 GPa; 8,0 GPa; 10,0 GPa) resultando em um total de 705 diferentes modelos. Todos os modelos foram dimensionados com os critérios do Eurocode 8 (2004), tendo como carga permanente adicional de 1,5 kN/m<sup>2</sup> e mais um acréscimo de 0,9 kN/m<sup>2</sup> para a consideração de divisórias no interior do edifício. A carga variável adotada foi de 3,5 kN/m<sup>2</sup>. O gráfico da Figura 2.35 apresenta a influência das aberturas na alvenaria na determinação do período fundamental, para um edifício de 8 andares (Figura 2.35a) e para outro de 14 andares (Figura 2.35b). Observa-se que a partir de 80%, aproximadamente, a porcentagem de aberturas na alvenaria não influencia de forma significativa no aumento

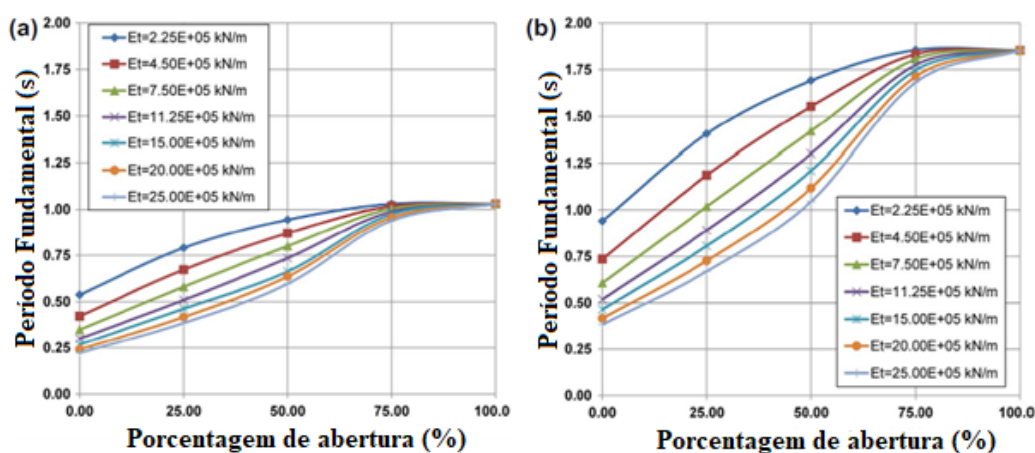


do período fundamental e que este é maior para alvenarias com menores módulos de elasticidade.

A partir de análises estatísticas sobre seus resultados, Asteris *et al.* (2016) propuseram a Equação 2.18, a qual melhor descreveu a relação entre o período fundamental ( $T$ ), a altura dos edifícios ( $H$ ), o comprimento dos vãos ( $L$ ), a razão ( $\alpha_w$ ) entre a área de abertura e a área da parede sem abertura, a espessura da alvenaria ( $t$ ) e os diferentes módulos de elasticidade da alvenaria ( $E$ ).

$$T = \left( 0,55407 + 0,05679 \cdot \sqrt{H} - 0,00048 \cdot L - 0,00027 \cdot \alpha_w - 0,00425 \cdot Et + 0,00202 \cdot \sqrt{H} \cdot L + 0,00016 \cdot \sqrt{H} \cdot \alpha_w - 0,00032 \cdot \sqrt{H} \cdot Et + 0,00013 \cdot L \cdot \alpha_w - 0,00017 \cdot L \cdot Et + 0,0001 \cdot \alpha_w \cdot Et \right)^5 \quad (2.18)$$

Figura 2.35: Influência das aberturas na alvenaria no período fundamental. (a) edifício de 8 andares, (b) edifício de 14 andares.



Fonte: Adaptado de Asteris *et al.* (2016).

### 2.3.9 Amanat e Hoque (2006)

Amanat e Hoque (2006), por meio da análise modal de diversos pórticos de edifícios de concreto armado preenchidos com alvenaria, propuseram uma adaptação na equação proposta pelo Eurocode 8 (2004), a fim de considerar a influência do comprimento dos vãos (distância entre pilares), do número de vãos e da quantidade de paredes de preenchimento existentes (em percentagem) em relação ao número total de painéis formados pelos pórticos. Os autores analisaram vãos de 4,0m a 8,0m de comprimento, com número de vãos entre 2 a 6. A percentagem de paredes de preenchimento foi variada entre 20% a 80%. Os autores empregaram o modelo de

diagonal equivalente para simular a alvenaria sob ações horizontais. A equação proposta é dada conforme a Equação 2.19:

$$T = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot C_T \cdot H^{3/4} \quad (2.19)$$

Onde:  $\alpha_1$  é um fator de modificação que considera a influência do comprimento do vão (vide Quadro 2.4);  $\alpha_2$  é um fator de modificação que considera a influência do número de vãos (vide Quadro 2.5); e  $\alpha_3$  é um fator de modificação que considera a quantidade de paredes de preenchimento (vide Quadro 2.6).

Quadro 2.4: Fator  $\alpha_1$ : influência do comprimento do vão

Comprimento do vão (m)	$\alpha_1$
4,0	0,87
5,0	0,93
6,0	1,00
7,0	1,07
8,0	1,16

Fonte: Amanat e Hoque (2006).

Quadro 2.5: Fator  $\alpha_2$ : influência do número de vãos

Número de vãos	$\alpha_2$
2	1,2
3	1,1
$\geq 4$	1,0

Fonte: Amanat e Hoque (2006).

Quadro 2.6: Fator  $\alpha_3$ : influência da quantidade de paredes de preenchimento

Quantidade de paredes de preenchimento (%)	$\alpha_3$
20	1,20
40	1,08
50	1,00
60	0,91
80	0,82

Fonte: Amanat e Hoque (2006).

# Capítulo 3

## Metodologia

---

### 3.1 Modelagem numérica

Neste trabalho, o programa computacional ANSYS (plataforma *Mechanical* APDL versão 18.0) foi utilizado nas análises estáticas que empregam elementos finitos bidimensionais com elementos de contato (alvenaria-pórtico) e nas análises modais com o modelo de diagonal equivalente. Para análises estáticas de pórticos planos sob ações horizontais, incluindo os que utilizaram o modelo MDE (modelo de diagonal equivalente), foi utilizado o programa FTOOL.

Em todas as simulações numéricas de pórticos com alvenarias de preenchimento foi empregado o modelo de diagonal equivalente na determinação do período fundamental da estrutura (via análise modal).

Neste trabalho foi utilizada a expressão de Mainstone (1974) para a obtenção da largura da diagonal equivalente, por ser a mais conhecida e utilizada em pesquisas sobre o tema.

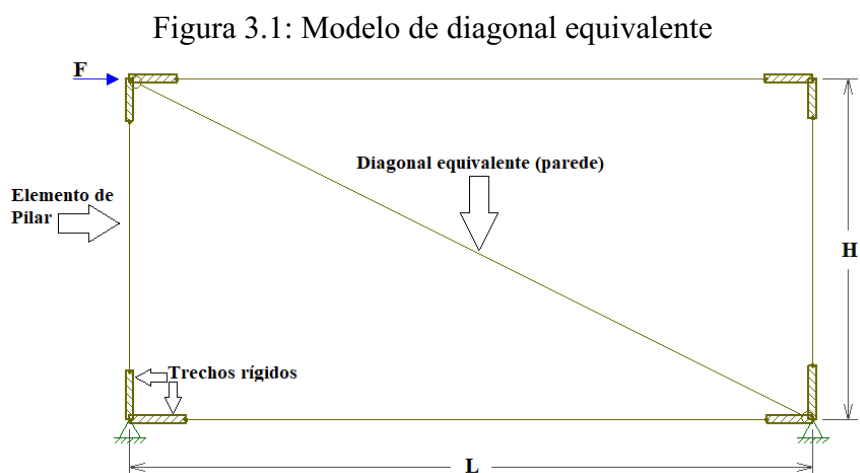
Inicialmente, para a escolha da expressão do fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ) devido à presença de aberturas (vide item 2.2.2), foram realizadas simulações numéricas com análise estática de pórticos preenchidos isolados, de um vão e um andar. Foram gerados via programa ANSYS *modelos de referência* – denominados aqui de modelos MEF – utilizando-se elementos finitos 2D de estado plano de tensões na modelagem dos pilares, das vigas e da parede, com inclusão do problema de contato entre alvenaria e pórtico. Com base no critério de mesmo deslocamento horizontal entre os modelos de pórticos preenchidos isolados (MEF e MDE), encontrou-se a largura da diagonal equivalente reduzida devido à presença das aberturas nas paredes (via programa FTOOL).

Após a escolha da expressão mais apropriada para simular a perda de rigidez decorrentes das aberturas nas paredes, foram realizadas simulações numéricas de pórticos de edifícios de 3, 6, 9, 12 e 15 andares. Para esses pórticos, foram determinadas as cargas permanentes, as cargas variáveis e as ações horizontais (vento e sismo) e realizadas as

principais verificações de Estado Limite Último e de Serviço. O objetivo dessas verificações foi a de escolher adequadamente as dimensões das seções transversais de vigas e pilares, para a posterior obtenção do período fundamental do edifício.

### 3.2 Determinação do Fator de Redução da Rigidez ( $F_{rr}$ )

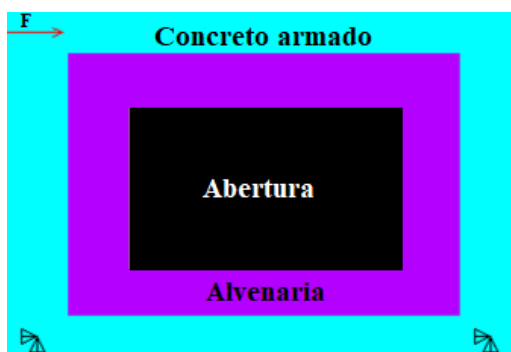
Na Figura 3.1, tem-se um exemplo de pórtico preenchido que foi simulado com o MDE. Para uma análise mais precisa, foram modelados os trechos rígidos de pilares e vigas como mostrado na Figura 3.1.



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 3.2, é apresentado um exemplo de modelo MEF que foi simulado no programa ANSYS com a presença de abertura na alvenaria. Foram adotados pórticos preenchidos com a alvenaria apresentando aberturas de 100% (sem parede), 80%, 60%, 40%, 20% e 0% (sem abertura).

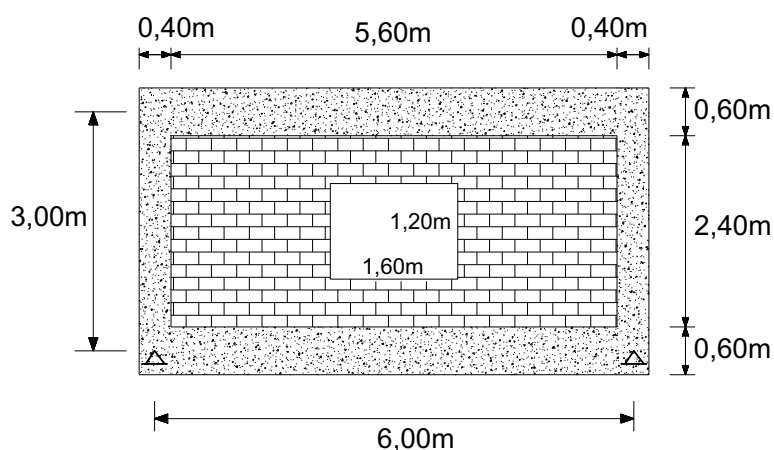
Figura 3.2: Modelo de pórtico preenchido isolado simulado pelo MEF



Fonte: Autor (2021).

Nesta análise dos efeitos das aberturas das paredes, todos os elementos do pórtico preenchido isolado possuem as mesmas dimensões para seções transversais, sendo escolhidos pilares retangulares de 19 cm x 40 cm e vigas retangulares de 19 cm x 60 cm. Para a parede, definiu-se uma espessura de 19 cm para todos os modelos. A Figura 3.3 apresenta um dos modelos adotados neste trabalho, com as dimensões do pórtico preenchido.

Figura 3.3: Dimensões do pórtico preenchido isolado com abertura



Fonte: Autor (2021).

Para os materiais, foi adotado para vigas e pilares de concreto um módulo de elasticidade ( $E$ ) de 25000 MPa, bem como um coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,2. Para a alvenaria, foram escolhidos dois tipos para os blocos: i) cerâmicos de parede vazada, com resistência característica à compressão de 4,0 MPa; ii) vazado de concreto, com resistência característica à compressão de 12,0 MPa. A partir dessas escolhas, aplicou-se as recomendações da ABNT NBR 16868 – 1:2020 para a definição das demais propriedades mecânicas da alvenaria, chegando-se a dois módulos de elasticidade distintos: 1200 MPa e 6720 MPa, totalizando 11 modelos de pórticos isolados. O coeficiente de Poisson para a alvenaria de blocos cerâmicos foi de 0,15 e para a alvenaria de blocos de concreto, 0,20. O Quadro 3.1 apresenta um resumo das propriedades dos materiais.

Quadro 3.1: Propriedades dos materiais

	Vigas e Pilares	Alvenaria	
$E$ (MPa)	25000	1200	6720
$\nu$	0,2	0,15	

Fonte: Autor (2021).

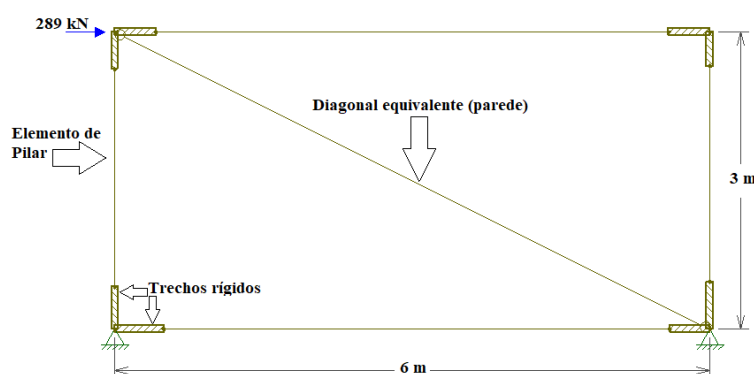
Para o contato concreto-alvenaria, foi utilizado a ABNT NBR 16868-1:2020 para determinação do coeficiente de atrito igual a 0,5, e da coesão de 0,10 MPa, em conjunto com os elementos de contato CONTA171/TARGE169.

Tanto o pórtico (vigas e pilares) quanto a parede de alvenaria foram simulados com o elemento finito PLANE182. Sobre a discretização, com base no estudo de refinamento de malha realizado no trabalho de Montandon (2018), foram escolhidos elementos finitos de 5cm x 5cm (pórtico de concreto e parede de alvenaria).

Para aplicar uma força horizontal nos modelos com ordem de grandeza compatível com simulações de Estado Limite Último, utilizou-se a seguinte metodologia: aplicou-se no modelo sem alvenaria de preenchimento uma força horizontal que causasse um deslocamento relativo entre andares igual a  $\left(\frac{1,4}{0,3}\right) \times \frac{h}{850}$ , onde:  $h$  é a distância entre andares consecutivos (eixos de vigas); 1,4 é o coeficiente de ponderação de ações variáveis aplicável para forças de vento em combinações normais do Estado Limite Último (supondo vento como ação variável principal); 0,3 é o coeficiente de ponderação para forças de vento em combinações frequentes do Estado Limite de Serviço; e  $h/850$  é o deslocamento relativo limite recomendado pela ABNT NBR 6118:2014 para verificações do Estado Limite de Serviço sob ações horizontais do vento (em modelagens convencionais: sem a contribuição da rigidez de alvenarias). Os comprimentos dos trechos rígidos das vigas e pilares foram calculados de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

Com a metodologia mencionada, foi obtida a força horizontal de 289 kN, como mostra a Figura 3.4. Esta força foi aplicada nos modelos MDE.

Figura 3.4: Modelo MDE para análise dos efeitos da presença de aberturas nas paredes



Fonte: Autor (2021).

Após a definição de todas as propriedades e carregamentos, todos os 11 modelos de pórticos preenchidos isolados foram processados no programa ANSYS e FTOOL. Com base no critério de mesmo deslocamento horizontal no ponto de aplicação da força em ambos os modelos (MEF e MDE), foram encontrados os valores da largura da diagonal equivalente. O fator de redução da rigidez foi obtido através da Equação 3.1.

$$F_{rr} = \frac{\alpha_f}{\alpha_p} \quad (3.1)$$

Onde:

$\alpha_f$  = Largura da diagonal equivalente para o caso de parede com abertura;

$\alpha_p$  = Largura da diagonal equivalente para o caso de parede sem abertura;

Os valores de fator de redução da rigidez obtidos com a Equação 3.1 foram comparados com formulações da literatura indicadas no Quadro 3.3 e já apresentadas no Capítulo 2. Cabe destacar que o objetivo desta comparação foi a de escolher a equação que melhor representasse os resultados dos modelos MEF com aberturas simulados no programa ANSYS.

Quadro 3.3: Equações para obtenção do  $F_{rr}$

Autores	Expressão
Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012)	$F_{rr} = 1 - 2. \alpha_w^{0,54} + \alpha_w^{1,14}$
Al-Chaar, Lamb e Abrams (2003)	$F_{rr} = 0,6. \alpha_w^2 - 1,6. \alpha_w + 1$
Mondal e Jain (2008)	$F_{rr} = 1 - 2,6. \alpha_w$

Fonte: Autor (2021).

Onde:

$F_{rr}$  = Fator de redução da rigidez;

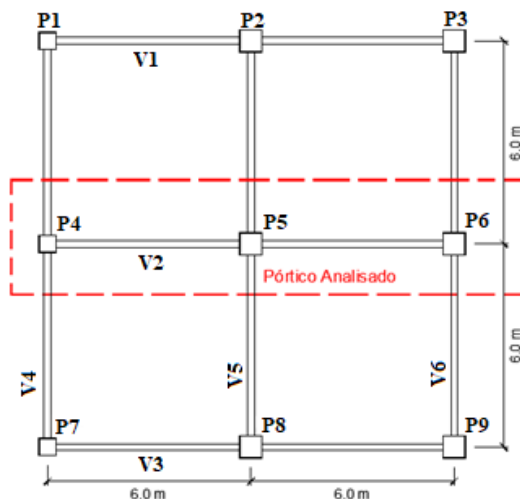
$\alpha_w$  = Razão de abertura na alvenaria.

### 3.3 Simulações numéricas: pórticos de edifícios de múltiplos andares

Foram definidos pórticos planos de edifícios de 3, 6, 9, 12 e 15 andares, variando-se a percentagem de aberturas nas paredes e o módulo de elasticidade das alvenarias, com a finalidade de avaliar a influência desses parâmetros na obtenção do período fundamental. Foram escolhidos pórticos de 2 e de 4 vãos. Segundo indicaram as investigações de Amanat e Hoque (2006), o período fundamental não é mais afetado

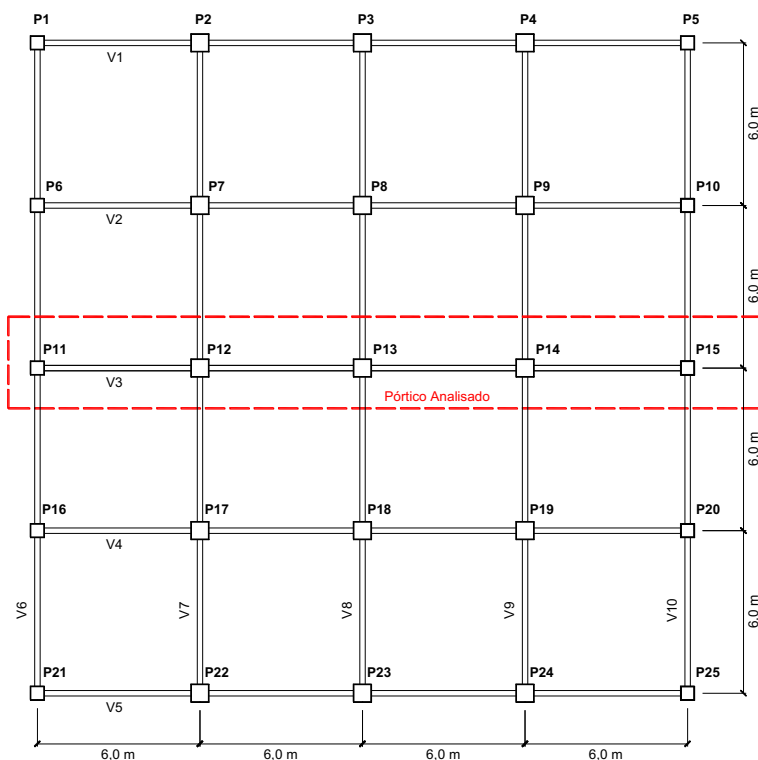
quando o número de vãos de vigas for igual ou maior que 4 vãos (vide Quadro 2.5). As Figuras 3.5 e 3.6 contêm um esquema em planta dos elementos estruturais de concreto e os pórticos (2 e 4 vãos) escolhidos para as simulações numéricas deste trabalho.

Figura 3.5: Esquema da planta estrutural do pórtico escolhido (2 vãos)



Fonte: Autor (2021).

Figura 3.6: Esquema da planta estrutural do pórtico escolhido (4 vãos)



Fonte: Autor (2021).

Foi adotado um concreto da classe de resistência C25 para vigas e pilares com módulo de elasticidade de 28000 MPa. Para alvenaria foram adotados dois módulos de

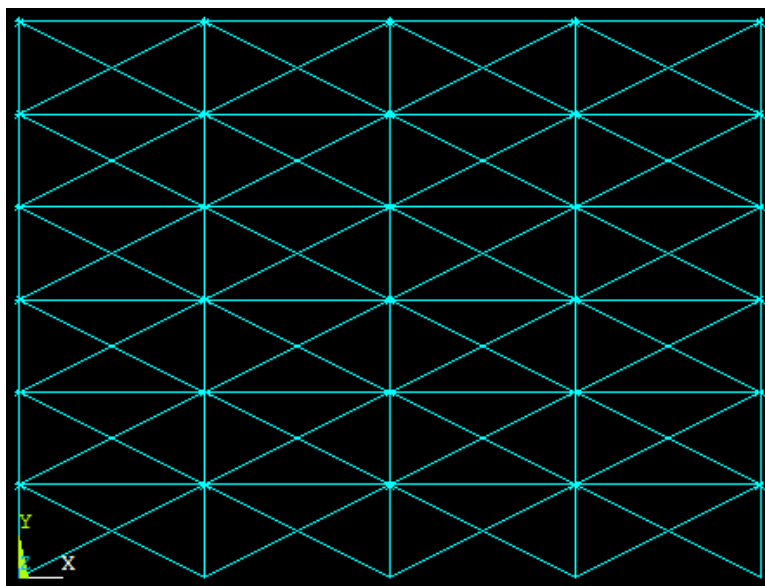


elasticidade distintos: 1200 MPa e 6720 MPa, admitindo-se assim as mesmas propriedades mecânicas das simulações do item 3.2.

Para a simulação dos pórticos preenchidos com alvenaria, modelos MDE foram processados com o programa ANSYS. Assumiu-se que todos os vãos dos pórticos continham alvenarias de preenchimento, exceto no caso com 100% de aberturas.

Para vigas e pilares, foram utilizados elementos finitos BEAM3 (elemento de pórtico plano). Para a diagonal equivalente, empregou-se o elemento finito LINK10 (transmite apenas esforços ou de tração axial ou de compressão axial). Neste caso, apenas a compressão foi ativada. A Figura 3.7 ilustra um dos modelos processados no programa ANSYS.

Figura 3.7: Pórtico de edifício de seis andares modelado via ANSYS – 4 vãos



Fonte: Autor (2021).

Foi realizado um pré-dimensionamento das dimensões de vigas e pilares. Para as vigas foi adotada uma seção transversal de 25 cm x 60 cm, sendo esta altura estimada em 10% do vão. Os pilares foram admitidos de seção quadrada, com dimensões estimadas inicialmente a partir do processo das áreas de influência.

Os pórticos foram analisados quanto aos efeitos de ações horizontais (vento e sismo) e ações verticais (carga permanente e carga variável). Para os pórticos com 2 vãos, adotou-se um valor único de carga permanente associada à uma massa de 1000 kg/m<sup>2</sup>, independente do número de andares do pórtico. Para os pórticos de 4 vãos, as cargas

permanentes foram calculadas levando-se em consideração: o número de andares; a porcentagem de abertura da alvenaria; o número total de pilares e vigas; e a espessura da laje (13 cm). Os quadros 3.4 e 3.5 apresentam as cargas permanentes do pavimento por unidade de área, para alvenarias com módulo de elasticidade de 1200 MPa e 6720 MPa.

Quadro 3.4: Cargas permanentes do pavimento: 4 vãos ( $Ea=1200$  MPa)

Carga por unidade de área (kPa)					
porcentagem de abertura (%)	15	12	9	6	3
0	9,26	9,08	8,76	8,51	8,28
20	8,79	8,60	8,27	8,01	7,73
40	8,31	8,12	7,78	7,51	7,22
60	7,83	7,63	7,29	7,01	6,71
80	7,36	7,15	6,8	6,51	6,19
100	6,88	6,67	6,31	6,01	5,68

Fonte: Autor (2021).

Quadro 3.5: Cargas permanentes do pavimento: 4 vãos ( $Ea=6720$  MPa)

Carga por unidade de área (kPa)					
porcentagem de abertura (%)	15	12	9	6	3
0	9,53	9,35	9,03	8,78	8,53
20	9,00	8,81	8,49	8,23	7,96
40	8,47	8,28	7,94	7,67	7,39
60	7,94	7,74	7,40	7,12	6,82
80	7,41	7,21	6,85	6,56	6,25
100	6,88	6,67	6,31	6,01	5,68

Fonte: Autor (2021).

Para a obtenção das ações horizontais do vento, admitiu-se o edifício localizado na cidade de Rio Branco: velocidade básica  $V_0=30$  m/s, fator topográfico  $S1=1,0$  (terreno plano), fator estatístico  $S3=1,0$  e rugosidade de terreno categoria IV.

As ações sísmicas foram obtidas com o método das forças horizontais equivalentes apresentado na ABNT 15421 (2006), cujos dados requeridos são apresentados a seguir:

- Zona sísmica: 3 (Rio Branco-AC);
- Aceleração sísmica horizontal:  $0,10g$  (sendo  $g$  a aceleração da gravidade);
- Classe do terreno: D (solo rígido);
- Fator de importância de utilização:  $I=1,0$  (categoria de utilização I);
- Coeficiente de modificação de resposta:  $R=3,0$  (pórticos de concreto com detalhamento usual).

Para verificar se as dimensões escolhidas para vigas e pilares são adequadas, criaram-se três combinações do Estado Limite Último, aplicadas ao modelo de pórtico sem alvenaria como mostram as Equações 3.2 a 3.4.

$$\text{Combinação 1:} \quad 1,4 \cdot G + 1,4 \cdot Q + 1,4 \cdot \psi_{0,qv} \cdot V \quad (3.2)$$

$$\text{Combinação 2:} \quad 1,4 \cdot G + 1,4 \cdot \psi_{0,qS} Q + 1,4 \cdot V \quad (3.3)$$

$$\text{Combinação 3:} \quad 1,2 \cdot G + 1,0 \cdot Q + 1,0 \cdot S_{exc} \quad (3.4)$$

onde

$G$  = cargas permanentes;

$Q$  = cargas variáveis (sobrecarga);

$V$  = ações do vento (na direção do pórtico analisado);

$S_{exc}$  = ações excepcionais de sismo (na direção do pórtico analisado);

$\psi_{0,qS} = 0,7$  (fator reduzido de combinação para as cargas variáveis);

$\psi_{0,qv} = 0,6$  (fator reduzido de combinação para as ações do vento).

Com a envoltória de esforços dessas três combinações, identificou-se as seções mais solicitadas dos pilares. A verificação dos pilares foi feita com auxílio do programa PCALC 1.4, cuidando-se que a taxa de armadura longitudinal necessária não ultrapasse a máxima permitida pela ABNT 6118:2014. Procedimento idêntico foi realizado para as vigas mais solicitadas.

Também foi realizada a verificação do Estado Limite de Serviço sob ações do vento. Neste caso, checkou-se que os máximos deslocamentos horizontais - no topo da estrutura e relativos entre andares consecutivos - não ultrapassassem os limites recomendados na ABNT NBR 6118:2014.

O Quadro 3.6 indica as dimensões dos pilares dos modelos, após a verificação dos Estados Limites já mencionados, tanto para o caso de 2 vãos quanto 4 vãos.

Quadro 3.6: Seção transversal dos pilares (2 e 4 vãos)

Nº de andares	3	6	9	12	15
Pilares de Extremidade (cm)	30x30	45x45	55x55	65x65	70x70
Pilares Internos (cm)	30x30	45x45	55x55	65x65	70x70

Fonte: Autor (2021).

Na análise modal foram consideradas apenas as massas associadas às cargas permanentes. Logo, a massa total lançada por andar foi calculada a partir da área de influência dos pórticos escolhidos e dos valores das cargas dos Quadros 3.4 e 3.5 (assumindo  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Em cada andar, a massa específica atribuída às vigas e as massas concentradas lançadas nos nós dos pilares (para considerar as reações das vigas transversais ao pórtico analisado) foram avaliadas por meio de áreas de influência (método das charneiras plásticas). Nas análises modais, os efeitos da não linearidade física dos pilares e das vigas (fissuração/plastificação dos materiais) foram considerados através de coeficientes redutores dos momentos de inércia da seção bruta desses elementos, obtidos a partir da ABNT NBR 6118:2014. Para vigas foi empregado o coeficiente de 0,4 e, para os pilares, o coeficiente de 0,8. Os efeitos da fissuração na alvenaria foram considerados via redução de 50% do seu módulo de elasticidade, conforme a NBR 16868-1:2020.

Após o processamento dos modelos no programa ANSYS, extraiu-se a frequência fundamental  $f$  e foi calculado o período fundamental ( $T$ ) de cada modelo pela equação 3.5.

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.5)$$

Os Períodos Fundamentais obtidos nas análises modais foram comparados com os obtidos de expressões analíticas da literatura. As expressões normativas escolhidas foram as da NBR 15421 (2006) e do Eurocode 8 (2004). Outras duas expressões da literatura foram escolhidas por considerar mais variáveis além da altura total do edifício: a proposta por Asteris *et al.* (2016), indicada na Equação 2.18 e a proposta por Amanat e Hoque (2006), indicada na Equação 2.19.

## Capítulo 4

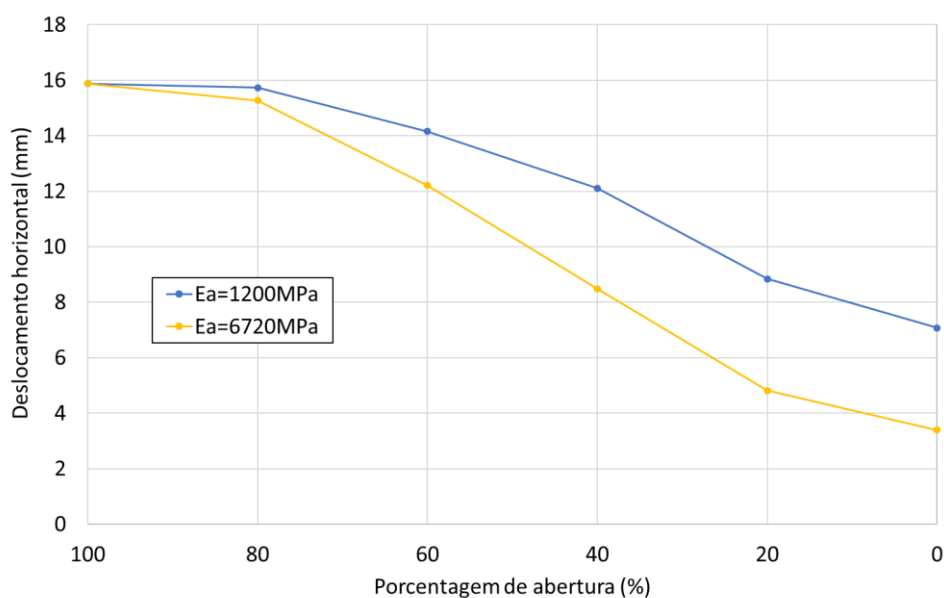
# Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos das simulações numéricas abordadas no Capítulo 3. Os resultados são apresentados em três partes: i) análise do efeito das aberturas na rigidez lateral dos pórticos preenchidos; ii) escolha da expressão para a obtenção do fator de redução da rigidez, conforme o capítulo anterior (item 3.2); iii) determinação do período fundamental, com a utilização de expressões analíticas e via análise modal com auxílio do programa ANSYS.

### 4.1 Efeito das aberturas nas paredes na rigidez lateral dos pórticos

O gráfico da Figura 4.1 apresenta a variação dos deslocamentos horizontais no ponto de aplicação da força em função da porcentagem de aberturas da alvenaria, para pórticos de concreto armado de um andar. Os deslocamentos foram obtidos a partir dos modelos MEF com o uso do programa ANSYS, conforme explicado no item 3.2.

Figura 4.1: Deslocamentos horizontais no ponto de aplicação da força



Fonte: Autor (2021).

No gráfico da Figura 4.1 observa-se que o aumento da porcentagem de abertura da alvenaria conduz ao aumento do deslocamento horizontal. Por outro lado, a presença da alvenaria de preenchimento contribui para a redução dos deslocamentos horizontais,

aumentando a rigidez lateral da estrutura. Notou-se que, para o caso de  $Ea = 1200$  MPa, o pórtico preenchido com alvenaria e sem abertura apresentou deslocamento horizontal 2,24 vezes menor em comparação com o pórtico vazio (sem alvenaria). Para o caso de  $Ea = 6720$  MPa, essa redução foi de 4,68 vezes. Esses valores de redução nos deslocamentos horizontais mostram a grande contribuição das paredes na rigidez de toda a estrutura frente às ações horizontais.

No entanto, observou-se que, a partir de 80% de aberturas nas paredes, os deslocamentos horizontais praticamente permanecem constantes, indicando que a contribuição da alvenaria para porcentagens de aberturas acima de 80% é quase nula.

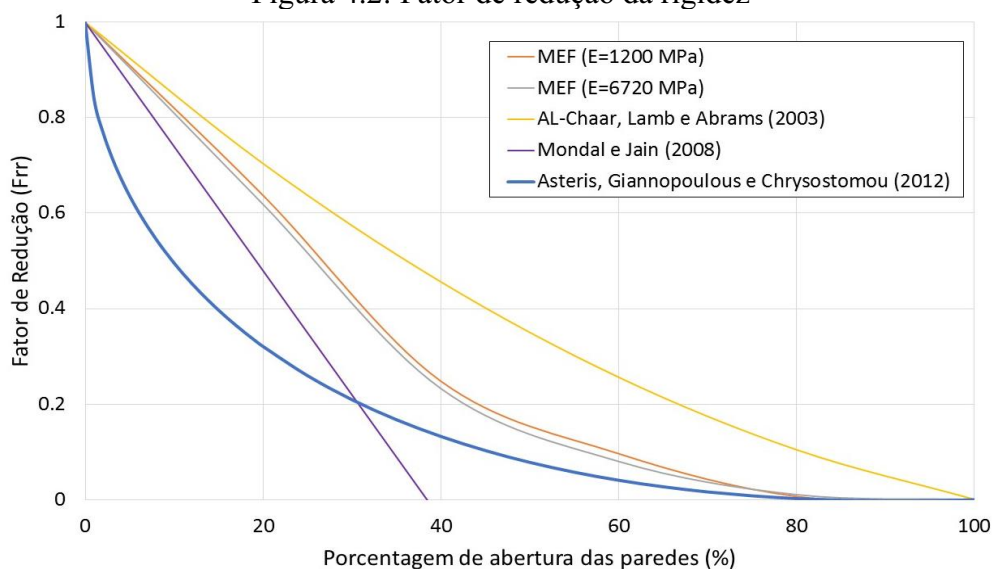
#### **4.2 Escolha da expressão para a determinação do fator de redução da rigidez**

Conforme metodologia apresentada no item 3.2, foram determinados os fatores de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ) para cada porcentagem de abertura, sendo estes comparados com três formulações encontradas na literatura, a fim de determinar qual equação poderia ser usada nas análises numéricas dos pórticos de múltiplos andares. O gráfico da Figura 4.2 apresenta os valores de fator de redução da rigidez em relação à porcentagem de abertura.

Observa-se que as curvas geradas a partir dos resultados MEF possuem tendência semelhante às curvas das expressões apresentadas no Quadro 3.3, onde há queda da rigidez em função do aumento da porcentagem de abertura nas paredes de alvenaria. Ainda é possível inferir pelo gráfico da Figura 4.2 que a variação do módulo de elasticidade da alvenaria ( $Ea$ ) pouco interfere no fator de redução da rigidez.

Ainda com base na Figura 4.2, é possível observar que para 20% de aberturas na alvenaria, a equação de AL-Chaar, Lamb e Abrams (2003) apresenta um valor de fator de redução de rigidez mais próximo dos obtidos pelos modelos MEF em relação às outras duas expressões, porém contra a segurança. Neste sentido, a expressão de Mondal e Jain (2008) é mais apropriada. Desta forma, para os modelos com alvenarias apresentando até 20% de abertura foi escolhida a expressão de Mondal e Jain (2008).

Figura 4.2: Fator de redução da rigidez



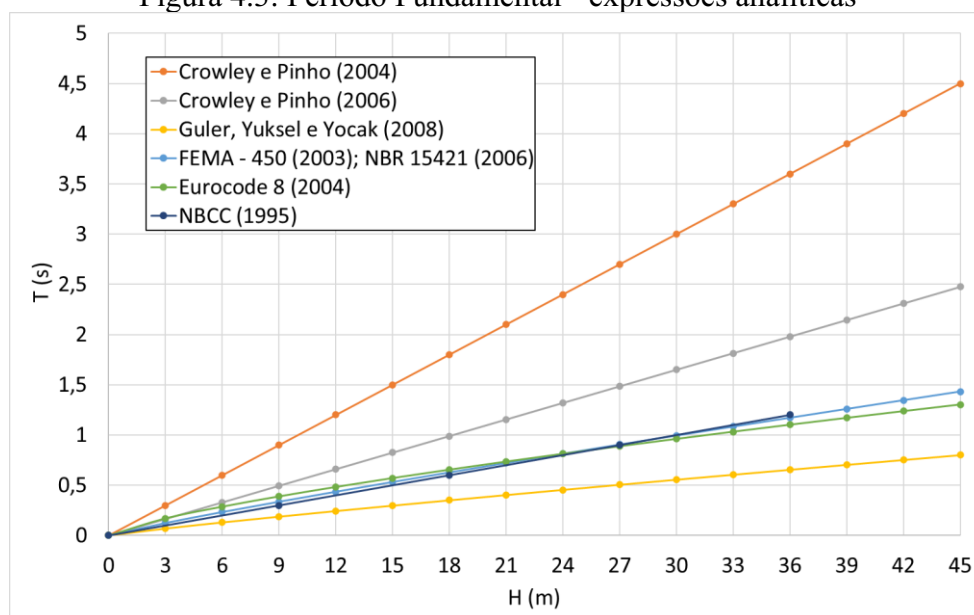
Fonte: Autor (2021).

Para porcentagens de abertura igual ou acima dos 40%, a expressão de Mondal e Jain (2008) não se aplica mais. Por sua vez, a expressão de Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012) é a que apresenta valores mais próximos aos resultados MEF. Observou-se ainda, que para porcentagens de abertura acima de 80% os fatores de redução de rigidez obtidos via modelos MEF são próximo de 0 e praticamente coincidem com os obtidos com a expressão de Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012). Portanto, nas simulações numéricas dos pórticos de múltiplos andares com porcentagens de aberturas da alvenaria de 40%, 60% e 80%, foi escolhida a expressão de Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012).

### 4.3 Determinação do Período Fundamental

Inicialmente foram estudadas algumas das principais expressões encontradas na literatura para a determinação do Período Fundamental. Os resultados para edifícios de concreto estão apresentados no gráfico da Figura 4.3. Nessas expressões, o Período Fundamental é estimado em função da altura total do edifício, com exceção da norma canadense NBCC (1995), a qual utiliza o número de andares do edifício. Para o gráfico da Figura 4.3, admitiu-se que a distância entre andares seja igual a 3,0m.

Figura 4.3: Período Fundamental - expressões analíticas



Fonte: Autor (2021).

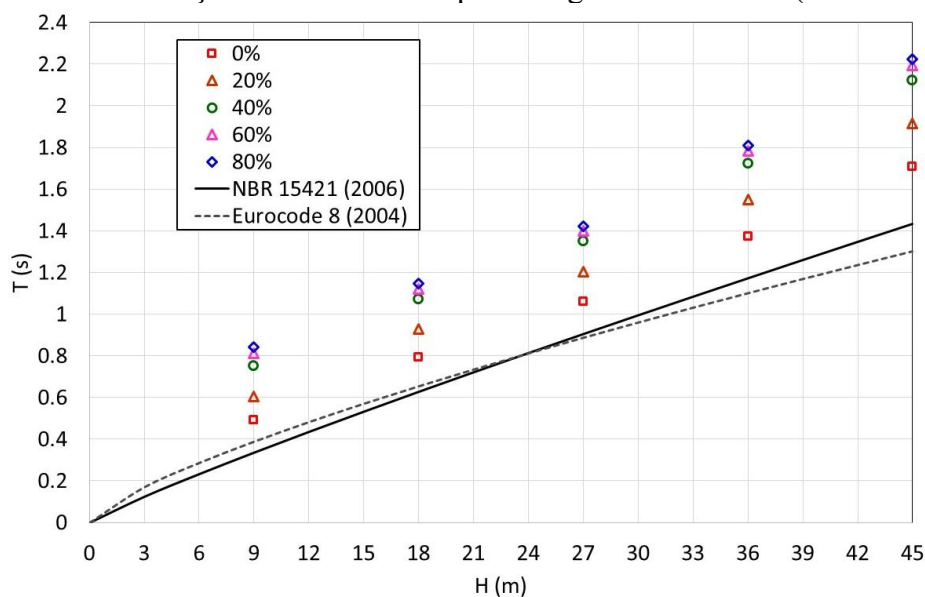
Embora as expressões confirmem a tendência conhecida do aumento do período fundamental com o aumento da altura do edifício, a Figura 4.3 também indica que as expressões conduzem a resultados bastante distintos entre si. Tais diferenças podem motivar o emprego de análise modal que inclua, além das características de massa, as características de rigidez da estrutura com a contribuição das alvenarias de preenchimento.

#### 4.3.1 Período Fundamental para pórtico de 2 vãos

Por meio de análise modal realizada com o programa ANSYS (modelos MDE) foram obtidas as Frequências Fundamentais e, conseqüentemente, calculados os Períodos Fundamentais ( $T$ ) para pórticos de 2 vãos. O gráfico da Figura 4.4 contém os valores obtidos de  $T$  para diferentes porcentagens de aberturas nas paredes e diferentes alturas (de edifícios de 3, 6, 9, 12 e 15 andares), com distância entre andares igual à 3,0 m (conforme explicado no item 3.3) e alvenaria com módulo de elasticidade de 1200 MPa. Gráfico análogo é apresentado na Figura 4.5 no caso de alvenaria com módulo de elasticidade de 6720 MPa.

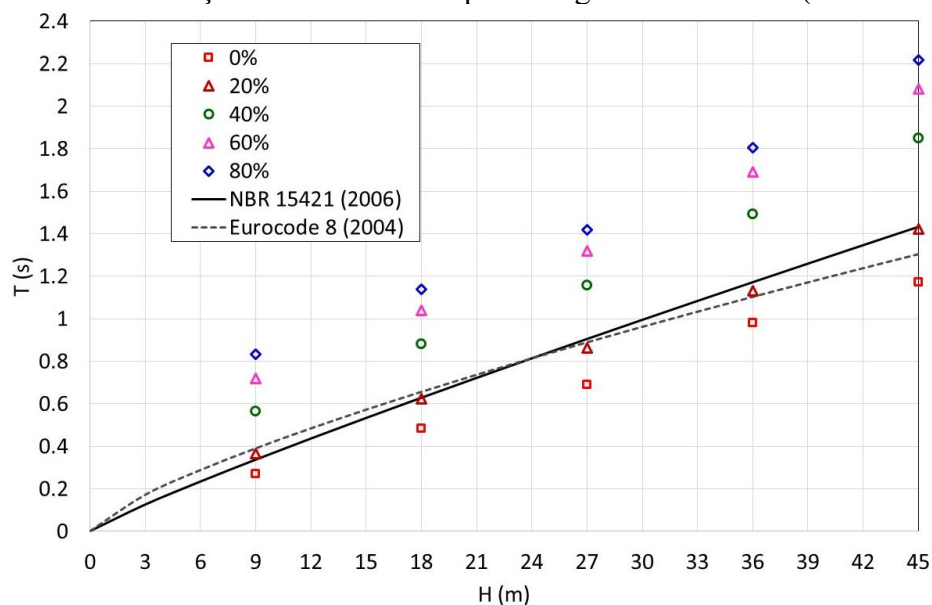


Figura 4.4:  $T$  em função da altura  $H$  e da porcentagem de aberturas ( $Ea=1200$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

Figura 4.5:  $T$  em função da altura  $H$  e da porcentagem de aberturas ( $Ea=6720$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

Observa-se novamente pelas Figuras 4.4 e 4.5 a tendência do aumento do Período Fundamental  $T$  com o aumento da altura total  $H$  dos edifícios, para todos os modelos. Pela Figura 4.4 ( $Ea=1200$  MPa), a consideração de 80% de aberturas nas paredes conduz a um aumento no Período Fundamental de 72% e 30,4% para edifícios de 9 m e 45 m, respectivamente, em relação aos modelos com paredes sem aberturas (0%). Na comparação idêntica, porém para o caso de  $Ea=6720$  MPa (Figura 4.5), tais aumentos no Período Fundamental foram de 212% e 90% nos edifícios de 9 m e 45 m respectivamente.

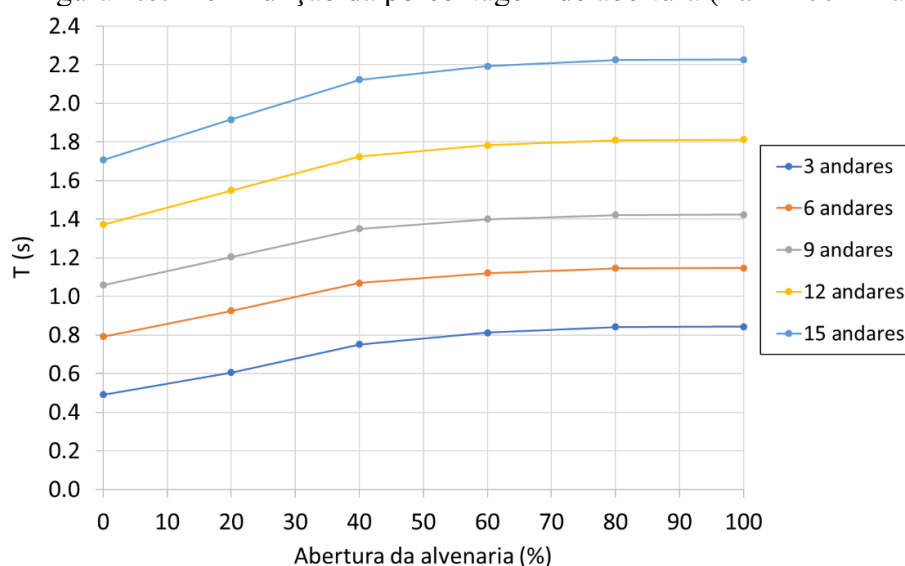
Essas comparações quantitativas comprovam a importante contribuição da alvenaria na rigidez global e, conseqüentemente, nas características dinâmicas da estrutura.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 também são apresentadas as curvas da ABNT NBR 15421: (2006) e do Eurocode 8 (2004) para a estimativa do Período Fundamental em função da altura  $H$ . Percebe-se que, para a massa adotada ( $1000 \text{ kg/m}^2$  por andar), todos os modelos com a alvenaria de menor rigidez ( $Ea=1200 \text{ MPa}$ ) apresentaram valores maiores de Período Fundamental em relação à estimativa das duas normas. Por sua vez, todos modelos com a alvenaria de maior rigidez ( $Ea=6720 \text{ MPa}$ ) e sem aberturas (0%) apresentaram Períodos Fundamentais menores que a estimativa das normas. Para o caso de 20% de abertura, os valores modais de  $T$  foram próximos aos dois códigos normativos.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam a variação do Período Fundamental em função da porcentagem de abertura da alvenaria para os módulos de elasticidade de  $1200 \text{ MPa}$  e  $6720 \text{ MPa}$ .

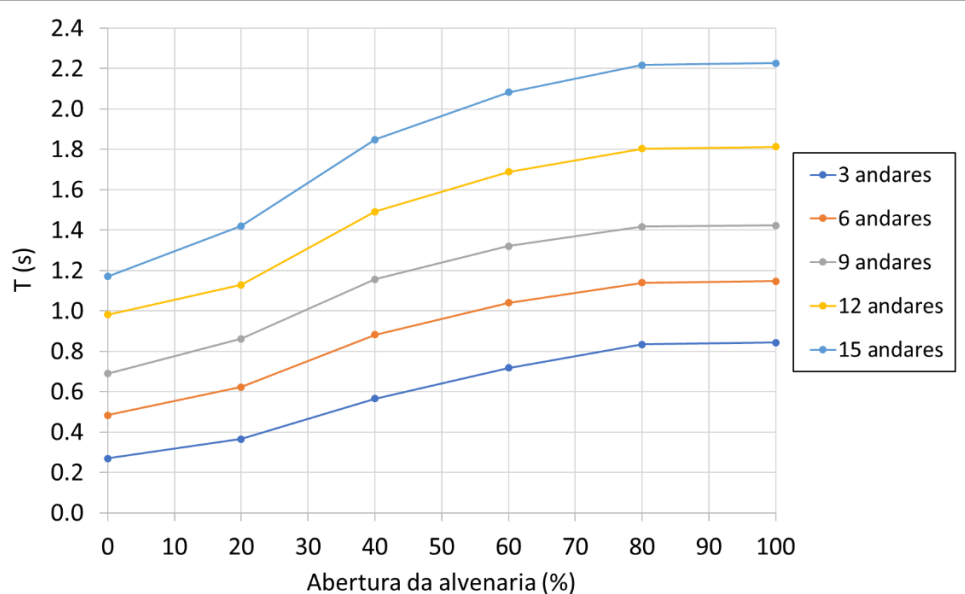
Nos modelos com alvenarias de  $Ea=1200 \text{ MPa}$  (Figura 4.6) para porcentagens de abertura acima de 60%, não há relevante acréscimo de  $T$ , sugerindo que a contribuição da alvenaria pode ser desprezada para porcentagens de abertura acima do referido valor. Nos modelos com alvenarias de  $Ea=6720 \text{ MPa}$  (Figura 4.7), porcentagens de abertura acima de 80% sugerem a desconsideração das paredes.

Figura 4.6:  $T$  em função da porcentagem de abertura ( $Ea=1200 \text{ MPa}$ )



Fonte: Autor (2021).

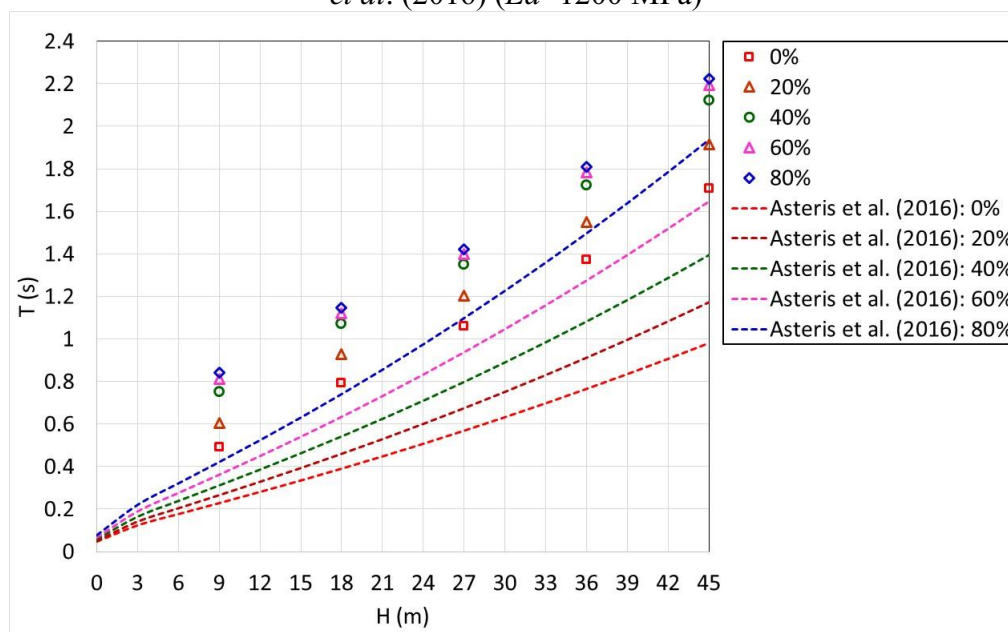
Figura 4.7:  $T$  em função da porcentagem de abertura ( $Ea=6720$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

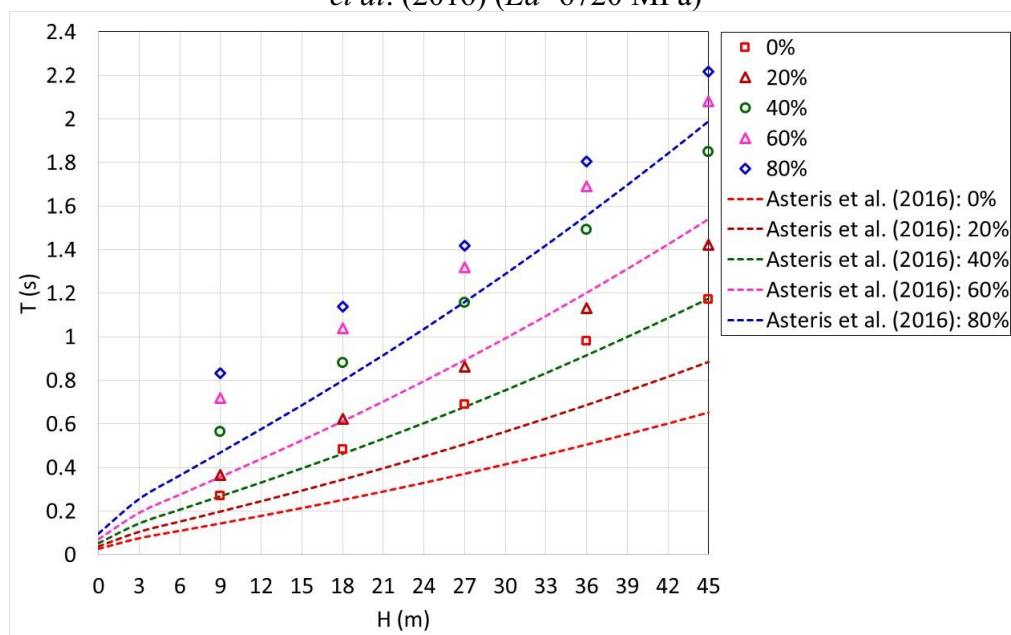
As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam gráficos comparativos entre os valores obtidos com as análises modais e os calculados pela expressão de Asteris *et al.* (2016). Conforme mencionado no item 2.3.8, a referida expressão leva em conta diversos parâmetros na estimativa do período fundamental, entre eles a porcentagem de aberturas nas paredes.

Figura 4.8: Comparativo entre os valores dos períodos modais e a expressão de Asteris *et al.* (2016) ( $Ea=1200$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

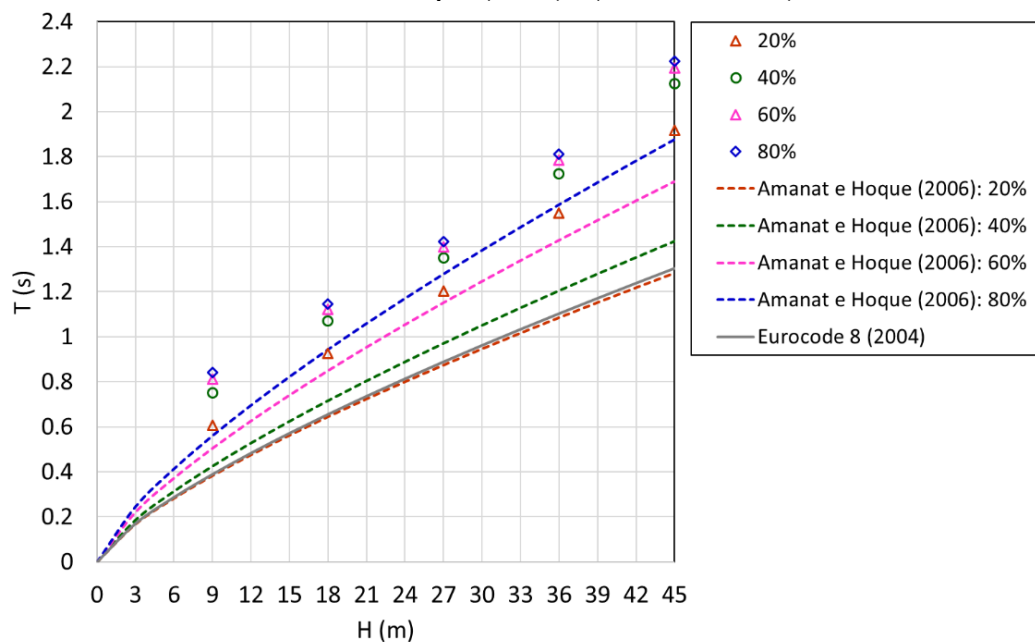
Figura 4.9: Comparativo entre os valores dos períodos modais e a expressão de Asteris *et al.* (2016) ( $Ea=6720$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

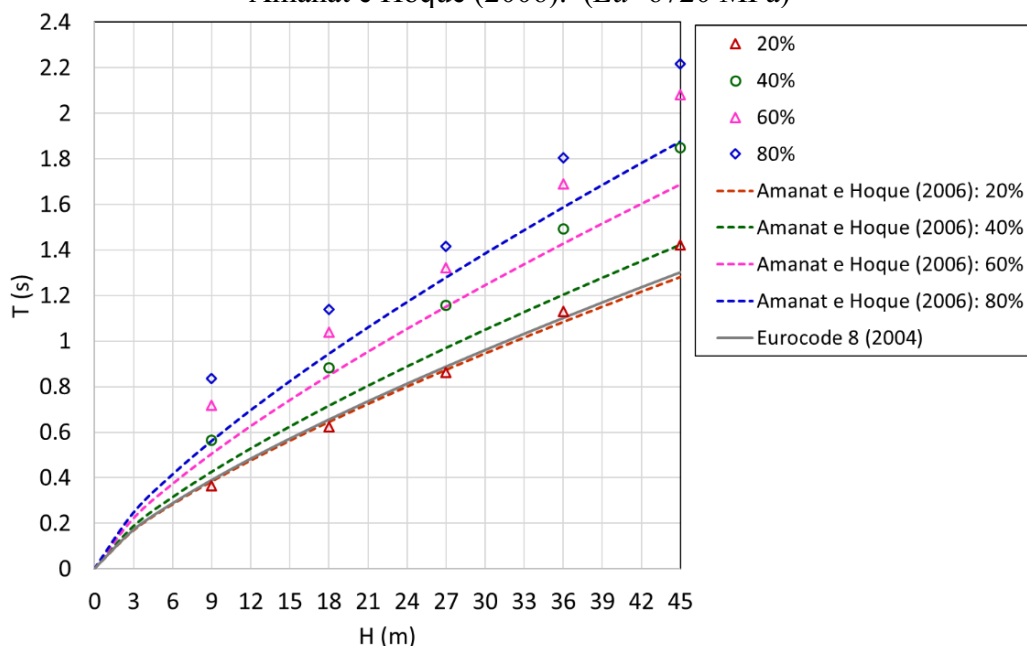
As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam gráficos comparativos entre os valores obtidos com as análises modais e os calculados pela expressão de Amanat e Hoque (2006).

Figura 4.10: Comparativo entre os valores dos períodos modais e a expressão de Amanat e Hoque (2006). ( $Ea=1200$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

Figura 4.11: Comparativo entre os valores dos períodos modais e a expressão de Amanat e Hoque (2006). ( $Ea=6720$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

Observa-se nos gráficos das Figuras 4.8 e 4.9 e das Figuras 4.10 e 4.11 que tanto a expressão de Asteris *et al.* (2016) quanto a expressão de Amanat e Hoque (2006) conduzem a tendências similares as já observadas nos resultados apresentados na Figura 4.4 e na Figura 4.5, sendo o período fundamental crescente de acordo com o aumento da altura do edifício e com percentagem de aberturas nas alvenarias.

Os períodos fundamentais obtidos com a expressão de Amanat e Hoque (2006) foram menores, em geral, do que os obtidos na análise modal. Entretanto, pelo confronto de resultados da Figura 4.8 com a Figura 4.10 ( $Ea=1200$ MPa) e da Figura 4.9 com a Figura 4.11 ( $Ea=6720$ MPa), nota-se que os resultados fornecidos pela expressão de Amanat e Hoque (2006) estão menos distantes dos da análise modal quando comparados aos resultados da expressão de Asteris *et al.* (2016).

Os diferentes tipos de materiais e geometrias adotados por Asteris *et al.* (2016) e Amanat e Hoque (2006) com os escolhidos neste trabalho podem explicar as diferenças nos resultados. Por exemplo, cabe ressaltar que os pórticos de Asteris *et al.* (2016) foram dimensionados de acordo com o Eurocode 8 (2004) para uma aceleração sísmica de 0,16g (nas simulações deste trabalho usou-se aceleração característica de 0,10g). Além disso, o módulo de elasticidade do concreto assumido para os pórticos em Asteris *et al.* (2016) foi

de 31 GPa (neste trabalho adotou-se 28 GPa). Por fim, Asteris *et al.* (2016) e Amanat e Hoque (2006) não mencionam se levaram em conta a redução de rigidez dos elementos de concreto e das alvenarias para considerar os efeitos da fissuração. Neste trabalho, como já mencionado no item 3.3, esses efeitos foram considerados simplificadamente por meio de reduções globais de rigidez.

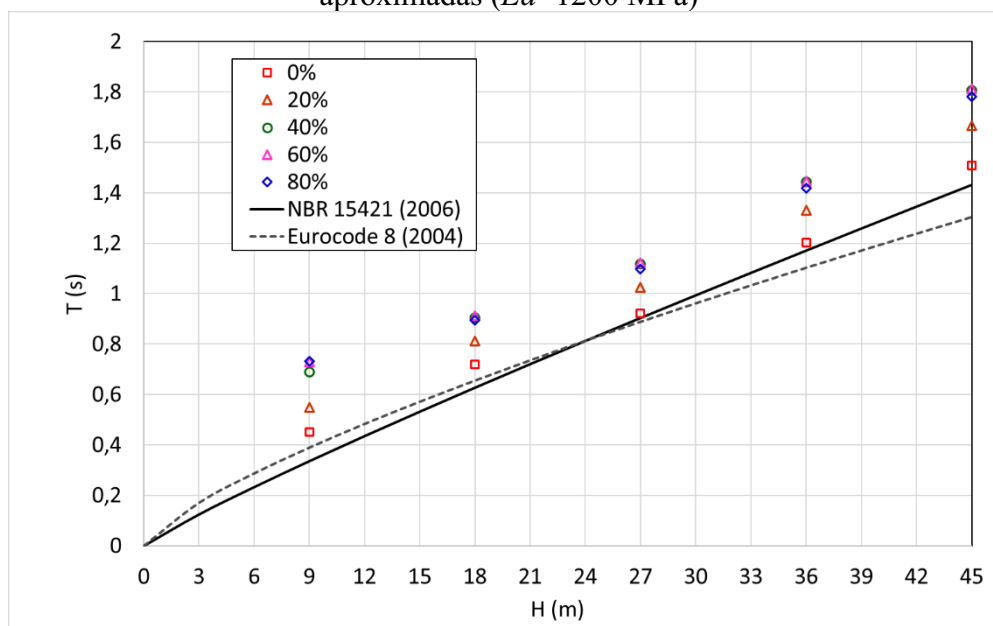
#### **4.3.2 Período Fundamental para pórtico de 4 vãos**

Os gráficos das Figuras 4.12 e 4.13 contêm os valores de  $T$  obtidos com o auxílio do programa ANSYS para diferentes porcentagens de aberturas nas paredes e diferentes alturas de edifícios (3, 6, 9, 12 e 15 andares, com distância entre andares igual à 3,0 m) para o caso de alvenaria com módulo de elasticidade de 1200 MPa e de 6720 MPa.

Observa-se pelas Figuras 4.12 e 4.13 que todos os modelos seguem a mesma tendência de aumento do período fundamental  $T$  com o aumento da altura total  $H$  dos edifícios, fato também observado nas normas ABNT 15421 (2006) e Eurocode 8 (2004). Conforme esperado, os resultados da análise modal indicam que o aumento da porcentagem de aberturas nas paredes conduz ao aumento do período fundamental da estrutura.

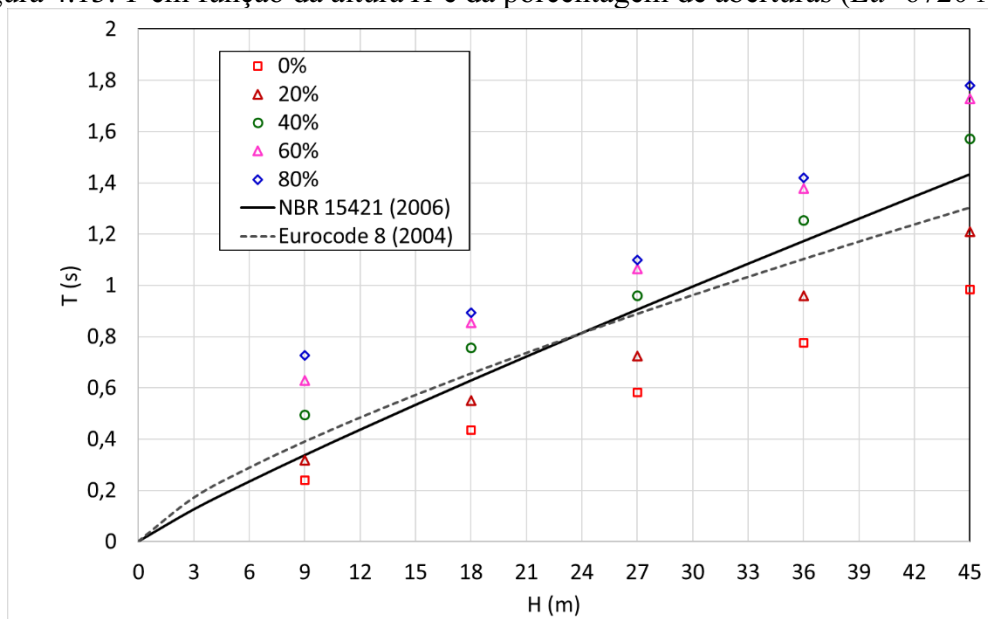
Pela Figura 4.12 ( $Ea=1200$  MPa), as paredes com 80% de abertura conduziram um aumento no período fundamental de 63% e 18% para edifícios de 9 m e 45 m de altura total, respectivamente, em relação aos modelos com paredes sem aberturas (0%). Na comparação idêntica para o caso de  $Ea=6720$  MPa (Figura 4.13), tais aumentos no período fundamental foram de 203% e 80,8% nos edifícios de 9 m e 45 m de altura total, respectivamente.

Figura 4.12: Comparação dos resultados dos períodos via análise modal com expressões aproximadas ( $Ea=1200$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

Figura 4.13:  $T$  em função da altura  $H$  e da percentagem de aberturas ( $Ea=6720$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

De maneira geral, as diferenças observadas entre os resultados fornecidos pelas formulações aproximadas da ABNT 15421 (2006) e do Eurocode 8 (2004) foram significativas em relação aos resultados fornecidos pela análise modal. No gráfico da Figura 4.12 ( $Ea=1200$  MPa), o caso de paredes sem aberturas (0%) é razoavelmente representado pelas formulações aproximadas encontradas nas normas, sendo o único onde

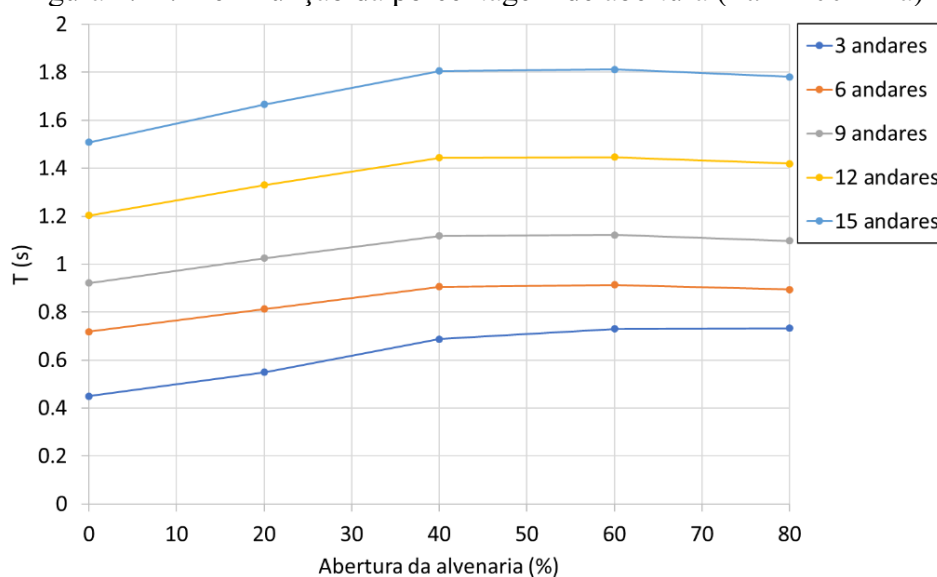
isso acontece. Já para os modelos apresentados no gráfico da Figura 4.13 ( $Ea = 6720$  MPa), as formulações aproximadas conseguiram estimar melhor os períodos fundamentais para percentagens de abertura entre 20% e 40% nas paredes.

Essas comparações quantitativas comprovam a importante contribuição da alvenaria na rigidez global e, conseqüentemente, nas características dinâmicas da estrutura.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam a variação do Período Fundamental em função da porcentagem de abertura da alvenaria para os módulos de elasticidade de 1200 MPa e 6720 MPa.

Conforme esperado, é possível observar nas Figuras 4.14 e 4.15 a tendência de aumento do período fundamental com a percentagem de aberturas nas paredes e com o número de andares, tanto para alvenaria menos rígida quanto para a mais rígida. Nos modelos com alvenarias de  $Ea = 1200$  MPa (Figura 4.14), para percentagens de abertura acima de 40%, não há relevante acréscimo do período fundamental, sugerindo que a contribuição da alvenaria pode ser desprezada para percentagens de abertura acima do referido valor. Nos modelos com alvenarias de  $Ea = 6720$  MPa (Figura 4.15), observa-se que a partir de 60% de percentagem de abertura há o início de uma tendência de estabilização do gráfico, com menor aumento do período fundamental.

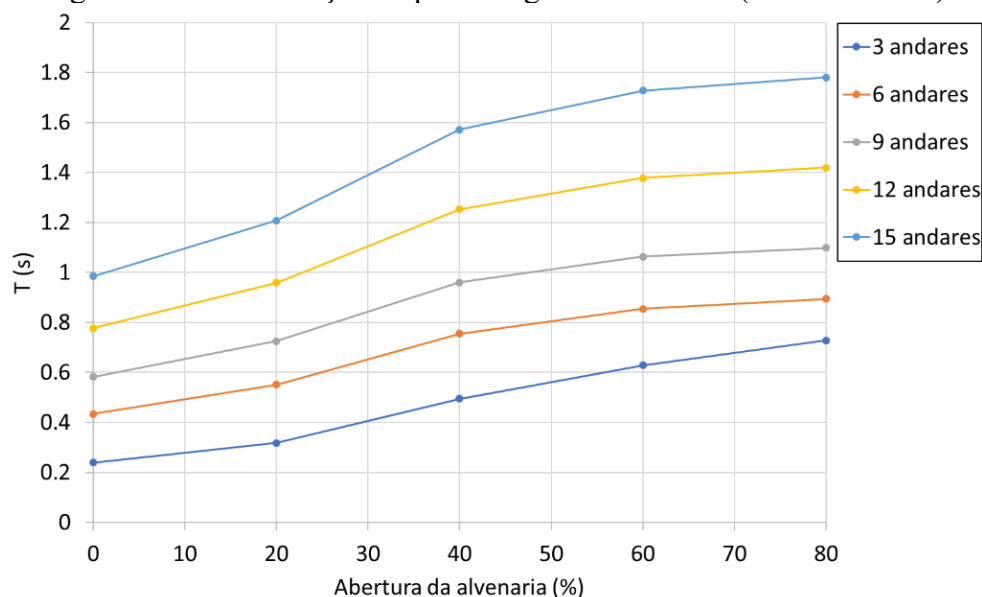
Figura 4.14:  $T$  em função da porcentagem de abertura ( $Ea = 1200$  MPa)



Fonte: Autor (2021).



Figura 4.15:  $T$  em função da porcentagem de abertura ( $Ea=6720$  MPa)



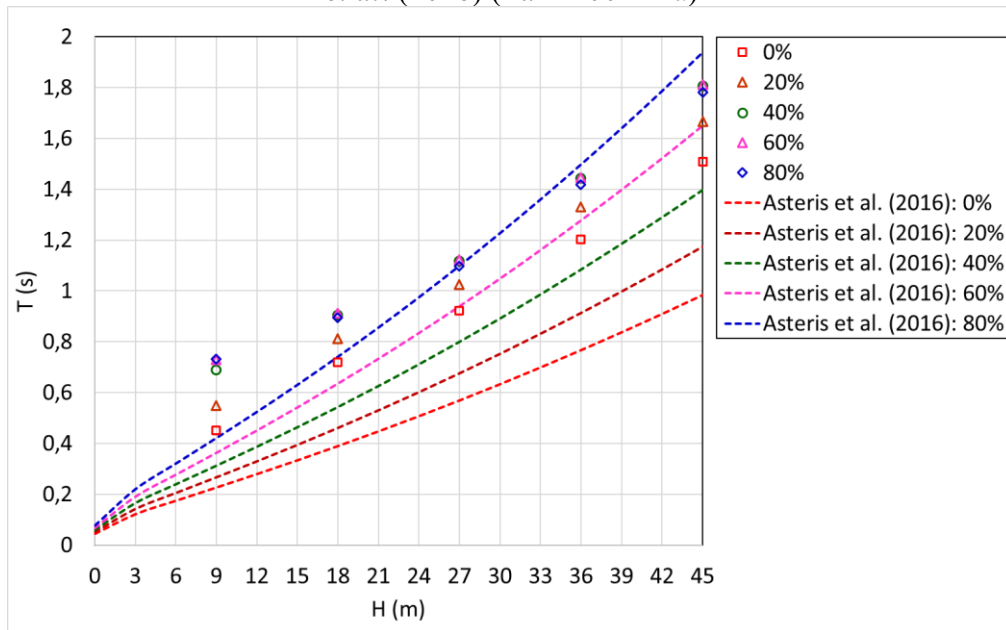
Fonte: Autor (2021).

Portanto, ainda com base nos gráficos das Figuras 4.14 e 4.15, a porcentagem de abertura a partir da qual já seria possível desprezar a alvenaria de preenchimento na obtenção do período fundamental (justificado pelas pequenas diferenças) depende da rigidez da alvenaria. Para o caso de alvenaria menos rígida ( $Ea=1200$  MPa), essa porcentagem é cerca de 40% e, para o caso da alvenaria mais rígida ( $Ea=6720$  MPa), entre 60% a 80% de abertura.

As Figuras 4.16 e 4.17 e Figuras 4.18 e 19 apresentam gráficos comparativos entre os valores obtidos com as análises modais e os calculados pela expressão de Asteris *et al.* (2016) e pela expressão de Amanat e Hoque (2006).

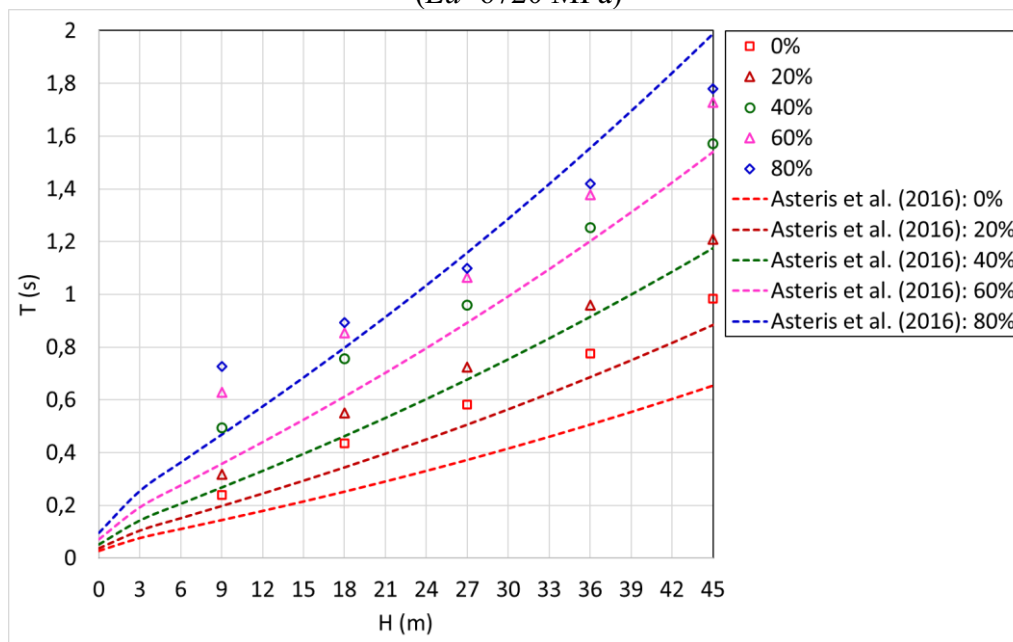
Observa-se nos gráficos das Figuras 4.16 a 4.19 que a expressão de Asteris *et al.* (2016) e a expressão de Amanat e Hoque (2006) conduzem a tendências similares as já observadas nos resultados apresentados na Figura 4.12 e na Figura 4.13, sendo o período fundamental crescente de acordo com o aumento da altura do edifício e com porcentagem de aberturas nas alvenarias.

Figura 4.16: Comparativo entre os valores dos períodos modais e a expressão de Asteris *et al.* (2016) ( $Ea=1200$  MPa)



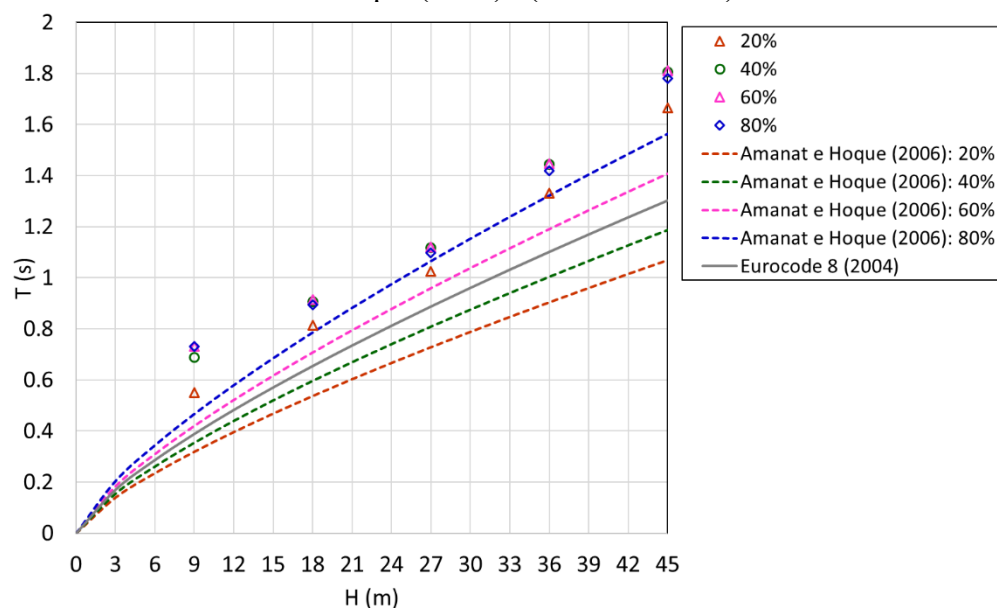
Fonte: Autor (2021).

Figura 4.17: Comparativo entre os valores modais e a expressão de Asteris *et al.* (2016) ( $Ea=6720$  MPa)



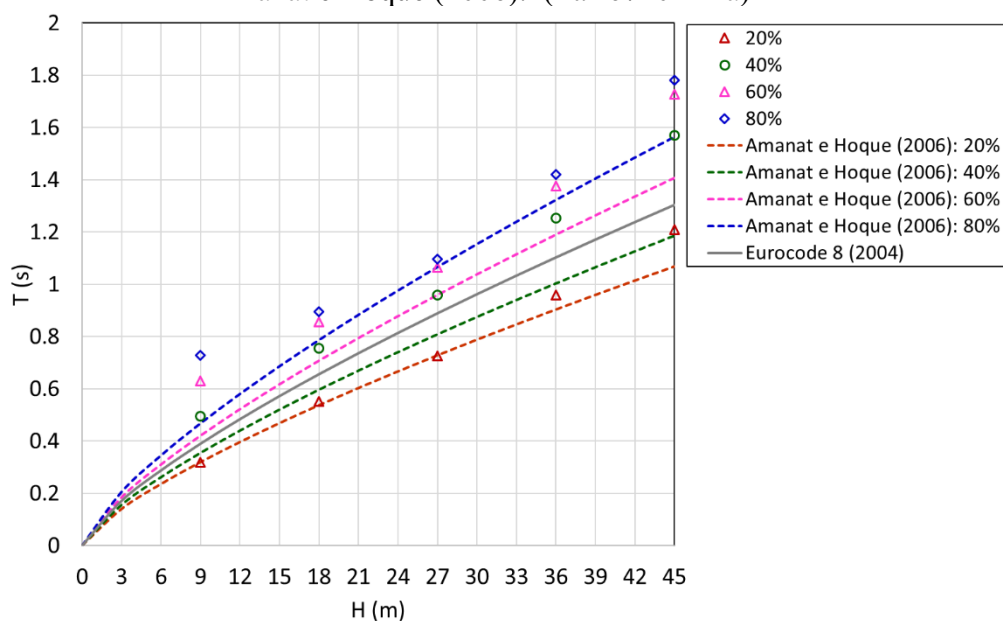
Fonte: Autor (2021).

Figura 4.18: Comparativo entre os valores dos períodos modais e a expressão de Amanat e Hoque (2006). ( $Ea=1200$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

Figura 4.19: Comparativo entre os valores dos períodos modais e a expressão de Amanat e Hoque (2006). ( $Ea=6720$  MPa)



Fonte: Autor (2021).

De uma forma geral, os períodos fundamentais obtidos com a expressão de Asteris *et al.* (2016) foram menores que os obtidos na análise modal, exceto para o caso de aberturas de 80% nos pórticos com 9, 12 e 15 andares conforme a Figura 4.16 e 4.17. Os

casos de abertura melhor representados pela expressão de Asteris *et al.* (2016) foram os de 60% e 80% nos pórticos de 9, 12 e 15 andares.

Com exceção do caso de abertura de 20% para a alvenaria de 6720 MPa, os períodos fundamentais obtidos com a expressão de Amanat e Hoque (2006) também foram menores do que os obtidos na análise modal. Igualmente ao observado no caso de pórticos de 2 vãos, nota-se que os resultados fornecidos pela expressão de Amanat e Hoque (2006) estão menos distantes dos da análise modal quando comparados aos resultados da expressão de Asteris *et al.* (2016). O caso em que a expressão de Amanat e Hoque (2006) apresentou melhor resultado foi o de 20% de abertura para a alvenaria mais rígida ( $E_a=6720\text{MPa}$ ), conforme pode ser percebido pela Figura 4.19.

## Capítulo 5

# Considerações Finais e Conclusões

---

Embora a obtenção do período fundamental seja importante na análise de estruturas submetidas a ações horizontais (sismos e vento), as formulações analíticas disponíveis na literatura e códigos internacionais para a estimativa do período fundamental frequentemente apresentam diferenças relevantes de resultados entre si. Além disso, a maioria dessas formulações aproximadas levam em conta apenas a altura total do edifício, desconsiderando outros parâmetros importantes, como a presença e as características das alvenarias de preenchimento (mecânicas e geométricas). Dessa forma, além da altura total, foram investigados neste trabalho outros parâmetros que afetam o período fundamental em edifícios de concreto armado, como a presença de alvenarias de preenchimento, a rigidez das mesmas e a percentagem de aberturas nas paredes. A partir dos resultados obtidos, as seguintes conclusões foram destacadas:

*Modelos de pórticos preenchidos de um andar e um vão (item 3.2):*

- Comparando-se os casos de pórticos com alvenaria e sem aberturas com os pórticos sem alvenaria, foi observado uma diminuição do deslocamento horizontal de 55% para a alvenaria com  $Ea = 1200$  MPa e de 79% para a alvenaria com  $Ea = 6720$  MPa. Estes números confirmam um relevante ganho de rigidez que se pode conseguir com o uso de alvenarias participantes;
- Conforme esperado, a rigidez lateral da estrutura decresceu com o aumento da porcentagem de aberturas das alvenarias, com consequente aumento dos deslocamentos horizontais;
- Para pórticos preenchidos que possuam porcentagens de abertura acima de 80%, a contribuição da alvenaria frente às ações horizontais foi praticamente nula;
- Para a determinação do fator de redução de rigidez ( $F_{rr}$ ) na consideração do efeito das aberturas nas alvenarias nos modelos de diagonal equivalente (MDE), a expressão de Mondal e Jain (2008) foi a mais apropriada para abertura nas

alvenarias até 20%. Para aberturas iguais ou acima de 40%, a expressão de Asteris, Giannopoulos e Chrysostomou (2012) foi considerada a mais adequada;

- Observou-se que a variação do módulo de elasticidade da alvenaria pouco interfere na obtenção do fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ );

*Modelos de pórticos preenchidos de edifícios de múltiplos andares (item 3.3):*

- O período fundamental ( $T$ ) aumentou: i) com o aumento da altura  $H$  dos edifícios; ii) com a redução do módulo de elasticidade das alvenarias de preenchimento e iii) com o aumento da porcentagem de aberturas nas alvenarias de preenchimento. Tais tendências estão de acordo com o descrito na literatura;
- Para pórticos preenchidos com alvenaria mais rígida ( $Ea=6720$  MPa) e com 2 vãos, a partir de 80% de abertura nas paredes, observou-se uma tendência de estabilização do aumento dos valores de  $T$ . Já para alvenarias menos rígidas ( $Ea=1200$  MPa), isso ocorreu a partir de 60% de abertura na alvenaria;
- Para pórticos preenchidos com alvenaria mais rígida ( $Ea=6720$  MPa) e com 4 vãos, a partir de 60% de abertura nas paredes, notou-se uma tendência de estabilização do aumento dos valores de  $T$ . Já para alvenarias menos rígidas ( $Ea=1200$  MPa), isso ocorreu a partir de 40% de abertura na alvenaria. Dessa forma, nota-se que alvenarias mais rígidas tendem a suportar maiores aberturas e ainda sim contribuir para redução do período fundamental;
- As expressões da ABNT 15421 (2006) e do Eurocode 8 (2004) conduziram a resultados bastantes distintos em comparação aos obtidos neste trabalho via análise modal. Tais normas desconsideram diversas características do sistema estrutural, tais como, porcentagem de abertura nas paredes e módulo de elasticidade das alvenarias de preenchimento. A grande divergência existente entre os resultados apresentados pelas expressões analíticas aponta para a necessidade de maiores investigações em pesquisas futuras sobre a inclusão, nessas expressões, dos diversos parâmetros que podem interferir no período fundamental;

- Por contemplar os principais parâmetros que afetam o Período Fundamental em edifícios, a expressão de Asteris *et al.* (2016) foi a expressão mais completa encontrada na literatura, inclusive para o caso de pórticos preenchidos com aberturas. Apesar da expressão de Asteris *et al.* (2016) considerar todos os parâmetros avaliados neste trabalho na obtenção do Período Fundamental, foram observadas diferenças relevantes com os resultados obtidos via análise modal.
- A expressão de Amanat e Hoque (2006) também foi utilizada nas comparações. Essa expressão considera o efeito do número de vãos, o comprimento dos vãos e a percentagem de paredes existentes em relação à quantidade total de painéis formados pelos pórticos. Também foram observadas diferenças relevantes em relação aos obtidos com as análises modais. No entanto, a expressão de Amanat e Hoque (2006) conduziu a resultados melhores que os fornecidos pela expressão de Asteris *et al.* (2016).

#### **Sugestão para pesquisas futuras:**

- Avaliar se os coeficientes redutores de inércia à flexão para a consideração simplificada da não-linearidade física propostos pela ABNT NBR 6118 (2014) são apropriados ao caso específico de pórtico preenchidos com alvenarias participantes. Esta avaliação é de suma importância, uma vez que a rigidez dos elementos do pórtico (vigas e pilares) afetam diretamente o período fundamental do sistema estrutural. Análises não-lineares podem contribuir para a proposta de novos coeficientes redutores.

# Referências Bibliográficas

---

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte: 1 – Projetos. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. Parte: 1 – Projeto. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1**: Alvenaria estrutural. Parte: 1 – Projeto. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.

AL-BALHAWI, A.; ZHANG, B. Investigations of elastic vibration periods of reinforced concrete moment-resisting frame systems with various infill walls. **Engineering Structures**, v. 151, p. 173-187, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.016>

AL-CHAAR, G.; LAMB, G. E.; ABRAMS, D. P. Effect of openings on structural performance of unreinforced masonry infilled frames. **Ninth North American Masonry Conference**. Canada, 2003.

ALVA, G. M. S.; KAMINSKI JR., J.; MOHAMAD, G.; SILVA, L. R. Estado limite de serviço de deformações horizontais excessivas com a consideração das alvenarias de preenchimento no modelo estrutural. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. v.8, nº 3, p. 390-426, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000300008>

ALVARENGA, R. C. S. S. **Análise teórico-experimental de estruturas compostas de pórticos de aço preenchidos com alvenaria de concreto celular autoclavado**. 2002. 331 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, 2002.

AMANAT, K. M.; HOQUE, E. A rationale for determining the natural period of RC building frames having infill. **Engineering Structures**, v.28, p. 495-502, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.004>

ARAÚJO, J. M. **Projeto de edifícios de concreto armado**. 3ª ed. Rio Grande, RS – Brasil: Editora DUNAS, 2014. 303 p. ISBN 9788586717185.

ASTERIS, P. G. Lateral Stiffness of brick Masonry Infilled Plane Frames. **Journal of the Structural Engineering** – ASCE, v. 129, n. 8, p. 1071-1079, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:8\(1071\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:8(1071))



ASTERIS, P. G.; CAVALERI, L.; REPAPI, E. V.; REPAPIS, C. C. Fundamental period of infilled reinforced concrete frame structures. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 13, n. 7, p. 929-941, 2016. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1227341>

ASTERIS, P. G.; KAKALETSIS, D. J.; CHRYSOSTOMOU, C. Z.; SMYROU, E. E. Failure modes of infilled frames. **Electronic Journal of Structural Engineering**, n° 11, p. 11-20, 2011.

ASTERIS, P. G.; GIANNOPOULOS, I. P.; CHRYSOSTOMOU, C.Z.; Modeling of infilled frames with openings. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v. 6, p. 81-91. 2012. <https://doi.org/10.2174/1874836801206010081>

BRAGUIM, J. R. **Contribuição ao Estudo do Enrijecimento de Estruturas de Aço em Edifícios de Múltiplos Pavimentos**. 1983. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 304: Design of masonry structures**. Mississauga, Canada, 2014.

CEN. EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARLIZATION. **Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings**. EN 1998-1. Brussels; 2004.

CHRYSOSTOMOU, C. Z.; ASTERIS, P. G. On the in-plane properties and capacities of infilled frames. **Engineering Structures**, v.41, p.385-402, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.057>

CROWLEY, H.; PINHO, R. Period-height relationship for existing European reinforced concrete buildings. **Earthquake Spectra**, v. 8, p. 93-119. 2004. <https://doi.org/10.1080/13632460409350522>

CROWLEY, H.; PINHO, R. Simplified equations for estimating the period of vibration of existing buildings. **Proceedings of the first European conference on earthquake engineering and seismology**. Geneva, Suíça, 2006.

DECANINI, L. D.; FANTINI, G. E. Modelos simplificados de la mampostería incluida em porticos. Características de stiffnessy resistencia lateral en estado limite. **Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural**, v.2, Buenos Aires, Argentina, p.817-836, 1987.

DOUDOUMIS, I. N. **Finite element modelling and investigation of the behavior of elastic infilled frames under monotonic loading**. Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.07.011>

DURRANI, A.J.; LUO, Y. H. Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. **Proceedings from the NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills**, National Center for Engineering Earthquake, Buffalo N.Y., 1994.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **FEMA 450: NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures – Part 1: Provisions**. Washington, DC, 2003.

- GOEL, R. K.; CHOPRA, A. K. Period formulas for moment-resisting frame buildings. **Journal of the Structural Engineering** – ASCE, v. 123, p. 1454-1461, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:11\(1454\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:11(1454))
- HENDRY, A. W. Structural brickwork, London: MacMillan, 1981. 209 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-81439-8>
- KOSE, M. M., Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls. **Engineering Structures**, v. 31, pp. 93-102, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.07.017>
- LIAUW, T. C.; KWAN, K. H. Nonlinear behavior of non-integral infilled frames. **Computers and Structures**, v.18, n.3, p.551-560, 1984. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(84\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90070-1)
- MADIA, F. C. A. R. **Estudo de pórticos preenchidos com alvenaria**. 142 f. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- MAINSTONE, R. J. Supplementary note on the stiffness and strengths of infilled frames. **Building Research Station**, Garston, UK, 1974.
- MEDEIROS, J. S.; FRANCO, L. S. **Prevenção de trincas em alvenarias através do emprego de telas soldadas como armadura e ancoragem**. São Paulo: EPUSP, 1999.
- MONDAL, G.; JAIN, S. K. Lateral Stiffness of Masonry Infilled Reinforced Concrete (RC) Frames with Central Opening. **Earthquake Spectra**, v. 24, n.3, p. 701-723, aug. 2008. <https://doi.org/10.1193/1.2942376>
- MONTANDON, A. G. **Modelos estruturais para a análise de pórticos preenchidos com blocos cerâmicos em edifícios de concreto armado**. 90 f. Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. **NBCC: National Research Council**. Canada, 1995.
- PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2ª ed. EdUFSCar – Editora da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2013. 723 p.
- PAULAY, T.; PRIESTLEY, M. J. N. **Seismic design for reinforced concrete and masonry buildings**. Wiley, New York, 1992. 768 p. <https://doi.org/10.1002/9780470172841>
- POLYAKOV, S. V. **Masonry in framed buildings (Godsudarstvenoe Isdatel'stvo Library Po Stroinal stvui Architecture. Moscow)**. Traduzido por G. L. Cairns, 1963. National Lending Library for Science and Technology, Boston, 1956.
- QUEIROZ, L. F. **Alvenarias participantes: Consideração e efeitos em edifícios de concreto sob ações horizontais**. 83 f. Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

SANTOS, E. M. **Influência da alvenaria no comportamento estrutural de edifícios altos de concreto armado**. 132 f. Dissertação – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

SANTOS, R. F. **Avaliação numérica de pórticos de aço preenchidos com painéis de alvenaria estrutural de blocos de concreto submetidos à carregamentos cíclicos**. 98 f. Dissertação – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SILVA, L. R. **Modelagem de pórticos de concreto armado preenchidos com a consideração de aberturas nos painéis de alvenaria**. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.