

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS DE PEQUENO PORTE DE CONCRETO ARMADO COM ALVENARIAS DE PREENCHIMENTO: INFLUÊNCIA DAS ABERTURAS NAS PAREDES

Felipe Caetano Valente (1); Gerson Moacyr Sisniegas Alva (2)

(1) Graduando, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

(2) Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a influência das alvenarias de preenchimento e da quantidade das aberturas (área) existentes nessas alvenarias sobre o período fundamental de estruturas reticuladas de edifícios de múltiplos andares de concreto armado. Para simular a presença das paredes no sistema estrutural, foi utilizado o modelo da diagonal equivalente (MDE), devido à simplicidade. A existência das aberturas nas paredes foi considerada por meio de coeficientes redutores (propostos na bibliografia) aplicáveis à rigidez axial das diagonais equivalentes, as quais simulam as paredes. Foram elaborados exemplos numéricos de edifícios de concreto armado com alvenarias de preenchimento constituídas por blocos cerâmicos e de concreto, sendo as análises modais realizadas com o auxílio do programa ANSYS. Os resultados obtidos a partir das análises modais permitiram avaliar, de forma qualitativa e quantitativa, o efeito da existência das aberturas e das dimensões das mesmas sobre período fundamental de vibração da estrutura. Os resultados das análises modais também foram comparados com as principais expressões disponíveis na literatura para a estimativa do período fundamental.

Palavras-chave: análise modal, alvenaria de preenchimento, alvenarias participantes, edifícios de concreto, sismos.

1. INTRODUÇÃO

Com o avançar da construção civil, edifícios altos são cada vez mais frequentes e comuns. Nos últimos anos, houve uma mudança significativa no modo de se construir, particularmente no Brasil, onde as estruturas são, em sua maioria, em concreto armado. Essas estruturas ficaram mais leves e flexíveis, devido aos concretos com resistência cada vez maior. Junto com essa mudança fatores que antes eram irrelevantes tornaram-se importantes no dimensionamento dessas mega-estruturas, um deles é a rigidez oferecida por alvenarias participantes. Essa rigidez de edifícios é determinada por inúmeros parâmetros, o que vai ser destrinchado nesse artigo será o Período Fundamental de vibração da estrutura, portanto o 1º modo de vibração.

1.1. Justificativa e objetivos

O período fundamental de vibração de uma estrutura é um parâmetro essencial para a análise sísmica (como no uso do Método das Forças Horizontais Equivalentes) e para a análise dos efeitos dinâmicos do vento.

De acordo com Asteris et al. (2016), a previsão do comportamento sísmico de uma estrutura depende muito de suas características dinâmicas. Entre elas, a característica mais significativa é o período fundamental de vibração. Essa característica depende da distribuição da massa e da rigidez da estrutura. Por esse motivo, a presença de elementos considerados não estruturais – como o caso das alvenarias de preenchimento com função de vedação apenas - podem produzir variação nessas propriedades e, conseqüente, no período fundamental da estrutura.

Segundo a ABNT NBR 6123 (1988), nas edificações com período fundamental menor ou igual a 1 segundo, os efeitos dinâmicos (parcela flutuante do vento) são pequenos. Entretanto, para edificações com período fundamental maior que 1 segundo, os efeitos dinâmicos produzidos pela parcela flutuante do vento podem ser importantes.

Em projeto estruturais, as alvenarias de preenchimento com função de vedação apenas são usualmente consideradas como carga linear sobre vigas e lajes, desprezando-se qualquer contribuição de rigidez e resistência. Contudo, dependendo

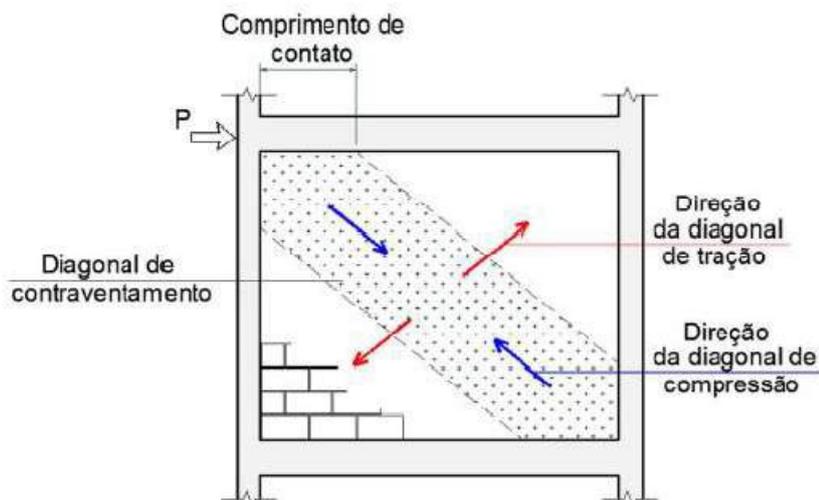
do tipo de fixação do painel de alvenaria com a estrutura principal, tais alvenarias acabam promovendo o enrijecimento da estrutura frente às ações horizontais, funcionando como painéis de contraventamento (DA SILVA, 2021). Evidentemente esse enrijecimento diminui o período fundamental da estrutura.

As alvenarias de preenchimento nos sistemas estruturais de pórticos podem ter função estrutural. Segundo o anexo D da ABNT NBR 16868 (2020), tais alvenarias denominam-se como *alvenarias participantes*. Segundo a definição da referida norma, “a alvenaria participante é a alvenaria estrutural construída dentro de um pórtico, intencionalmente dimensionada e construída como parte do sistema de contraventamento.”

Na literatura especializada, o período fundamental pode ser estimado através de formulações analíticas, sendo a maioria delas expressas basicamente em função da altura do edifício apenas. Ao mesmo tempo, os resultados fornecidos por tais expressões podem apresentar imprecisões relevantes quando comparados a resultados advindo de análises modais - as quais consideram as características mecânicas e de massa da estrutura.

A causa mais provável para a discrepância dos resultados fornecidos pelas expressões existentes na literatura, segundo Asteris et al. (2016), pode ser atribuída à complexa interação que surge entre a estrutura principal (pórtico) e as paredes das alvenarias de preenchimento. Na verdade, é bem sabido que, na presença de ações horizontais, a alvenaria de preenchimento separa-se parcialmente das vigas e dos pilares que a contornam, permanecendo em contato com aqueles elementos apenas nos dois vértices opostos comprimidos. Um efeito de contraventamento significativo pode originar-se a partir deste mecanismo. A Figura 1 ilustra como se distribuem as tensões na alvenaria de preenchimento de um pórtico submetido às ações horizontais.

Figura 1 – Distribuição de tensões na alvenaria de preenchimento de pórtico



Fonte: Madia (2012, apud SILVA, 2021).

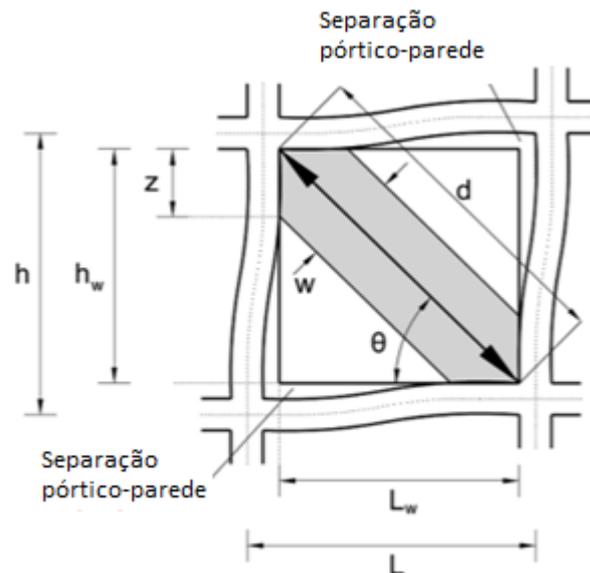
Com base no exposto, foram realizadas análises modais - com o auxílio do programa ANSYS - para avaliar a influência das alvenarias de preenchimento (participante) e da existência de aberturas nas paredes sobre o período fundamental de vibração de edifícios de concreto de múltiplos andares. Os resultados das análises modais, tomados como sendo de referência, foram comparados com algumas expressões analíticas da literatura para a obtenção do período fundamental de forma aproximada.

1.2 Diagonal Equivalente

Polyakov (1960, apud GALVÃO, 2019), descreveu três estágios de comportamento para pórticos preenchidos quando submetidos a ações horizontais. No primeiro estágio, a parede de alvenaria e o pórtico se comportam como uma unidade monolítica, resistindo juntamente às ações horizontais. O segundo estágio ocorre com o aumento da força horizontal e o aparecimento de fissuras nos cantos da diagonal tracionada e nas juntas de argamassa ao longo da diagonal comprimida. No terceiro estágio, mais fissuras surgem à medida que a força horizontal aumenta até o ponto onde o conjunto pórtico-parede perde sua capacidade resistente devido ao esmagamento dos cantos comprimidos. Com base nessas observações, o autor propôs o Modelo de Diagonal Equivalente, a partir do qual o comportamento da parede

de alvenaria pode ser simulado por meio de uma barra diagonal comprimida, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Diagonal comprimida da alvenaria de preenchimento



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

Por meio desse modelo, surgiram expressões analíticas para o cálculo da largura da diagonal equivalente, como, Mainstone (1974), Hendry (1981), Liauw e Kwan (1984), entre outros.

Ao sofrer a ação horizontal, a alvenaria que preenche o pórtico se comporta como uma biela comprimida diagonalmente. Neste trabalho, foi utilizado a expressão de Mainstone (1974) para a obtenção da largura da diagonal equivalente, por ser a mais difundida na literatura. A referida expressão é apresentada na Equação 1.

$$w = 0,175 \cdot (\lambda \cdot H)^{-0,4} \cdot D \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

w é a largura da diagonal equivalente (cm);

λ é o parâmetro de rigidez relativa entre a alvenaria e o pilar (cm^{-1});

H é a distância entre eixos de vigas (cm);

D é o comprimento da diagonal da parede (cm);

O parâmetro λ , é obtido a partir da equação 2.

$$\lambda = \left(E \cdot t \cdot \frac{\text{sen}(2\theta)}{4 \cdot E_p \cdot I_p \cdot h} \right)^{0,25} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade da alvenaria (Mpa);

t é a espessura da parede (cm);

θ é a inclinação da diagonal (rad);

E_p é o módulo de elasticidade do pilar (Mpa);

I_p é o momento de inercia do pilar (cm⁴);

h é a altura da parede (cm).

1.3 Fator de redução da rigidez (Frr)

A maioria das pesquisas recentes investigam o comportamento de pórticos preenchidos com paredes sem aberturas, embora as paredes de preenchimento frequentemente tenham aberturas de dimensões relevantes. Asteris (2003) realizou diversas simulações numéricas com o auxílio do Método dos Elementos Finitos para investigar o efeito das aberturas na rigidez lateral de pórticos preenchidos com alvenarias. Os resultados desse estudo levaram à Equação 3 referente à obtenção ao denominado fator de redução de rigidez (Frr).

$$Frr = 1 - 2 \cdot \alpha_w^{0,54} + \alpha_w^{1,14} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

α_w é a razão entre a área de abertura e a área da parede sem abertura (%).

Dessa forma, para considerar o efeito da perda de rigidez do pórtico preenchido devido à presença de aberturas na alvenaria de preenchimento, multiplica-se a largura da diagonal equivalente (w) obtida na Equação 1 pelo fator de redução de rigidez (Frr) obtido na Equação 3.

1.4 Expressões da literatura para o Período Fundamental

O período fundamental de vibração de uma estrutura 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 análise modal ou estimado por expressões analíticas da literatura.

Segundo Asteris (2011, apud Silva 2021), a maioria das equações desconsidera a presença de alvenarias (com ou sem aberturas) e, conseqüentemente, a rigidez das mesmas no sistema estrutural, 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.

1.4.1 EUROCODE 8 (2004)

Uma das normas que foi utilizada para comparação neste trabalho foi a do Eurocode 8 (2004), na qual o período fundamental é expresso em função da altura total do edifício, conforme na Equação 4.

$$T = Ct \cdot H^{3/4} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

Ct é o coeficiente de período que depende da tipologia estrutural;

H é a altura total do edifício (em metros).

O Eurocode 8 (2004) adota o coeficiente Ct igual a 0,075 para pórticos de concreto com ligações resistente ao momento fletor. A norma permite o cálculo mais preciso do coeficiente considerando-se a presença de paredes de cisalhamento (*shear walls*). No entanto, foi adotado para este trabalho o valor de 0,075 para efeito de comparação com o outro código normativo abordado neste trabalho.

1.4.2 ABNT NBR 15421 (2006)

A norma brasileira de projetos de estruturas resistentes a sismos – ABNT 15421 (2006) – apresenta expressão para estimativa do período fundamental da estrutura, conforme a Equação 5.

$$T = Ct \cdot H_n^x$$

(Equação 5)

Onde:

Ct é o coeficiente de período da tipologia estrutural;

H_n é a altura do edifício em metros;

x é o expoente da lei potencial do período fundamental aproximado.

A Tabela 1 apresenta os coeficientes necessários de acordo com a tipologia da estrutura.

Tabela 1 – Coeficientes Ct e x para a determinação do período fundamental T

Tipologia Estrutural	Coeficiente (Ct)	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 impeça 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)

1.4.3 ASTERIS *et al.* (2016)

Por fim a última expressão da literatura utilizada neste trabalho é a proposta por Asteris *et al.* (2016), no qual se apresenta uma investigação analítica acerca dos parâmetros que afetam o período fundamental em edifícios de concreto armado. Em

Asteris *et al.* (2016) foram analisados vários parâmetros, como o número de vãos, a altura dos edifícios, os comprimentos dos vãos, o módulo de elasticidade da alvenaria e a porcentagem de abertura das paredes. A partir desses resultados e por meio de análise de regressão, foi proposta uma equação empírica para estimar o período fundamental, representada na Equação 6.

$$T = (0,55407 + 0,05679 \cdot \sqrt{H} - 0,0048 \cdot L - 0,00027 \cdot \alpha_w - 0,00425 \cdot E \cdot t + 0,00202 \cdot \sqrt{H} \cdot L + 0,00016 \cdot \sqrt{H} \cdot \alpha_w - 0,00032 \cdot \sqrt{H} \cdot E \cdot t + 0,00013 \cdot L \cdot \alpha_w - 0,00017 \cdot L \cdot E \cdot t + 0,0001 \cdot \alpha_w \cdot E \cdot t)^5 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

T é o período fundamental (s);

H é a altura total do edifício (m);

L é o comprimento dos vãos (m);

α_w é a razão, em porcentagem, entre a área de abertura e a área da parede sem abertura;

E.t – Produto entre o módulo de elasticidade da alvenaria e a espessura da mesma, em 10^5 kN/m.

2. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

2.1 Metodologia para a escolha das seções dos pórticos de concreto.

As seções de vigas e pilares que compõem os pórticos do edifício analisado foram escolhidas a partir de critérios usuais de edifícios: para os pilares, a área da seção foi escolhida a partir do método das áreas de influência e a altura das vigas foi definida em função de seus vãos teóricos. Evidentemente, tais seções não devem conduzir a uma estrutura com baixa rigidez frente às ações horizontais. Por essa razão, o deslocamento horizontal máximo do edifício e os efeitos globais de segunda ordem são verificados e limitados conforme item 2.1.1.

2.1.1 Pré-dimensionamento e análise dos Estados Limites do edifício

Para início do estudo do pórtico foi desenvolvido um pré-dimensionamento da estrutura. O método utilizado para os pilares foi o de áreas de influência (Giongo, 2008).

Foi adotado um carregamento vertical $g+q = 12 \text{ kN/m}^2$ para o pré-dimensionamento, a fim de estimar a força normal característica N_k atuante no pilar, conforme a Equação 7.

$$N_k = (n + 0,7) \cdot (g + q) \cdot A_i \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

n é o número de pavimentos acima do pavimento considerado menos um;

g e q são, respectivamente, as cargas permanentes e variáveis atuantes;

A_i é a área de influência do pilar analisado.

Para efeito de pré-dimensionamento, a força normal característica N_k é multiplicada por α para a consideração dos efeitos da flexão composta, cujo valor depende da posição do pilar na edificação, conforme a Equação 8.

$$N_d = \alpha \cdot N_k \quad (\text{Equação 8})$$

- $\alpha = 2,5$ para pilares intermediários;
- $\alpha = 3,0$ para pilares de extremidade;
- $\alpha = 3,5$ para pilares de canto.

A área da seção do pilar A_c (Equação 9) é calculada pela carga encontrada dividida pela tensão ideal, essa que é em função do fcd de projeto, da taxa de armadura, e da tensão no concreto comprimido, respeitando a seção transversal superior a 360cm^2 .

$$A_c = \frac{N_d}{\sigma_{ideal}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$$\sigma_{ideal} = 0,85 \cdot f_{cd} + \rho_s \cdot (\sigma_{s2} - 0,85 \cdot f_{cd})$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} é a resistência à compressão característica do concreto (neste trabalho: 25 MPa)

$$\gamma_c = 1,4;$$

ρ_s é a taxa de armadura longitudinal do pilar (para pré-dimensionamento: 2,5%);

σ_{s2} é tensão no aço para a deformação 2 por mil (para aço CA 50: 420 MPa).

Para a definição da seção da viga, empregou-se o seguinte critério: largura igual a espessura da parede mais 1 cm para a consideração de revestimentos; altura da ordem de 1/10 de seu vão teórico.

Para o cálculo das forças horizontais de vento foram adotados os seguintes parâmetros: a velocidade básica do vento $V_0 = 30\text{m/s}$ (Rio Branco-AC), fator topográfico $S1=1,0$ (terreno plano) e fator estatístico $S3=1,0$ (edificação residencial). Utilizando o ábaco da ABNT NBR 6123 (1988) para vento não turbulento, foi determinado coeficiente de arrasto $C_a=1,08$ nas duas direções ortogonais em planta (devido à simetria).

Para a obtenção das ações sísmicas, foi adotado aceleração sísmica horizontal de $0,10g$ (Rio Branco-AC), sendo g a aceleração da gravidade, e classe do terreno "D" (Solo Rígido). As forças sísmicas foram obtidas a partir do método das forças horizontais equivalentes, conforme a ABNT 15421 (2006).

Para avaliar a adequabilidade das dimensões escolhidas para as seções transversais que compõem o pórtico (vigas e pilares), foram utilizadas três condições que serem atendidas:

- Referente ao Estado Limite de Serviço (ELS), o deslocamento horizontal total no topo do edifício provocado pelo vento para a combinação frequente ($\psi_1 = 0,3$) não deve superar $H/1700$, conforme a ABNT NBR 6118 (2014). Neste caso, H é a altura total do edifício.
- Referente ao Estado Limite Último (ELU), a deslocabilidade horizontal envolvendo apenas as ações do vento foi controlada com a condição de $\gamma_z < 1,3$ para limitar os efeitos globais de segunda ordem. O cálculo do coeficiente γ_z é apresentado na ABNT NBR 6118 (2014).

- Referente às ações excepcionais de sismos, os deslocamentos horizontais relativos foram limitados a $0,02h_{sx}$, onde h_{sx} é a distância entre dois andares consecutivos, seguindo as recomendações da ABNT 15421 (2006).

Cabe salientar que as três condições citadas foram feitas com modelos de pórtico planos sem alvenaria e análise estática (equivalente), utilizando-se o programa FTOOL.

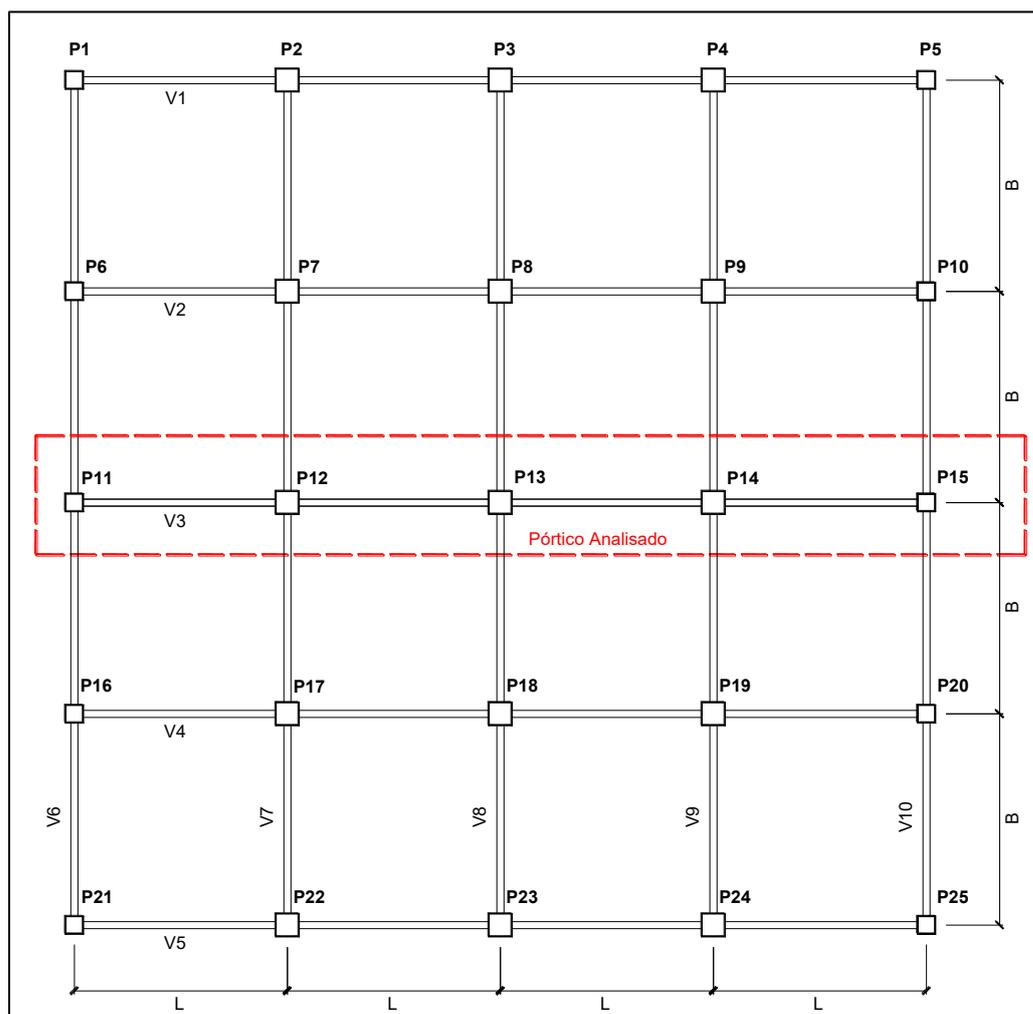
2.1.2. Largura da diagonal equivalente e Fator de redução da rigidez (F_{rr})

Para o cálculo da diagonal equivalente foi empregada a expressão de Mainstone (1974), em função dos parâmetros geométricos e mecânicos do pórtico de concreto armado e da alvenaria de preenchimento (de blocos de concreto e de blocos cerâmicos). O fator de redução de rigidez para considerar a presença de aberturas nas alvenarias foi obtido a partir da expressão de Asteris (2013), conforme a Equação 3.

2.2 Modelos analisados

Neste trabalho foi analisado um edifício de 6 andares (Pequeno porte) com dimensões em planta de 24 x 24m, com vãos $L = 6,0$ m e $B = 6,0$ m (Figura 3), e pé-direito estrutural de 3,0 m. Como resultado do pré-dimensionamento e das três condições de controle dos deslocamentos horizontais apresentadas no item 2.1.1, obtiveram-se as seguintes seções: pilares de canto 35x35 (cm), pilares de extremidade 40x40 (cm), pilares internos 50x50 (cm), vigas de 20x60 (cm). As lajes foram consideradas como maciças de 13cm de espessura. A Figura 3 representa o esquema geral em planta do edifício e o pórtico plano escolhido para as análises.

Figura 3 – Esquema geral em planta e pórtico analisado



Fonte: Autor (2021)

Foi admitido paredes de $3,0 \text{ kN/m}^2$ de alvenaria sobre todas as vigas. Após o levantamento das cargas permanentes, chegou-se a uma carga $g = 8,127 \text{ kN/m}^2$ por andar. Por isso foi adotado na determinação das forças sísmicas e nas análises modais um peso efetivo do pavimento de 8 kN/m^2 , com $g = 10 \text{ m/s}^2$ para fins de arredondamento.

Especificou-se para vigas e pilares concreto de resistência C25; logo foi adotado um módulo de elasticidade do concreto de 28000 MPa para vigas e pilares em todos os andares.

Foram adotados dois valores diferentes para a resistência à compressão dos blocos que compõem a alvenaria de preenchimento (participantes). Esses valores foram escolhidos na tentativa de abranger os casos mais comuns de resistência à compressão de blocos/prismas no Brasil. Desta forma, foi empregado como módulo de elasticidade das alvenarias os seguintes valores: 1200 MPa para as de bloco

cerâmico de parede vazada e 6720 MPa para as de bloco de concreto. Para se chegar a esses valores, foram tomados os valores de referência do Anexo F da ABNT NBR 16868 (2020), a saber:

Para alvenaria de blocos cerâmicos de parede vazada ($t = 19\text{cm}$):

- Resistência característica à compressão do bloco: $f_{bk} = 4,0\text{MPa}$
- Resistência característica à compressão do prisma: $f_{pk} = 2,0\text{MPa}$

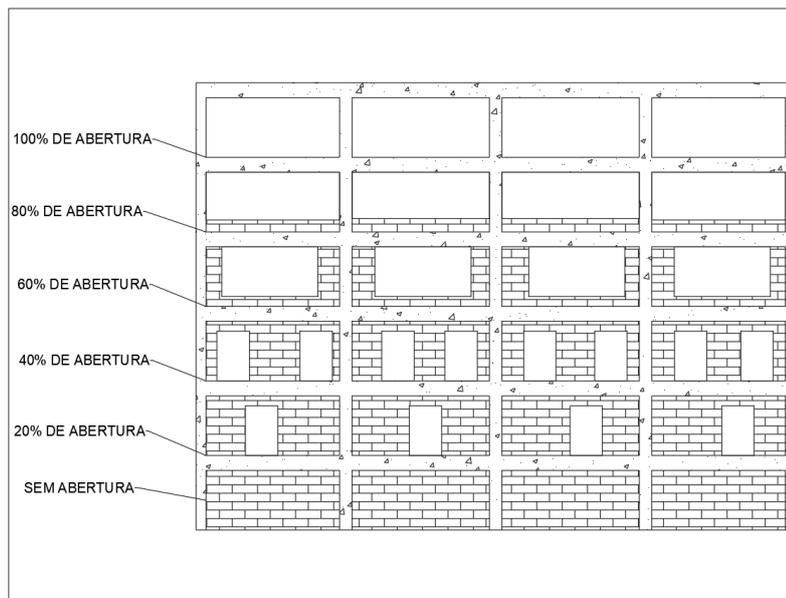
Para alvenaria de blocos de concreto ($t = 19\text{cm}$):

- Resistência característica à compressão do bloco: $f_{bk} = 12,0\text{MPa}$
- Resistência característica à compressão do prisma: $f_{pk} = 8,4\text{MPa}$

Os efeitos da não-linearidade física no pórtico de concreto armado foram considerados por meio da redução da rigidez à flexão de vigas e pilares conforme recomendado pela ABNT NBR 6118 (2014). Para considerar os efeitos de fissuração na alvenaria, empregou-se a recomendação da ABNT NBR 16868 (2020).

Foram simuladas porcentagens de aberturas nas paredes de 100% (sem alvenaria), 80%, 60%, 40%, 20% e 0% (alvenaria sem abertura), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema ilustrativo da porcentagem das aberturas nas paredes



Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores da largura da diagonal equivalente (w) para cada porcentagem de abertura e respectivo fator de redução da rigidez (F_{rr}), para o caso de bloco de concreto e cerâmico, respectivamente.

Tabela 2 – Largura da diagonal equivalente considerando a abertura nas paredes:
(alvenaria de blocos de concreto)

Porcentagem de abertura %	Frr	w (cm)
0	1,000	68,59
20	0,321	22,02
40	0,132	9,09
60	0,041	2,79
80	0,002	0,17

Fonte: Autor (2021)

Tabela 3 – Largura da diagonal equivalente considerando a abertura nas paredes:
(alvenaria de blocos de cerâmicos)

Porcentagem de abertura %	Frr	w (cm)
0	1,000	81,49
0,2	0,321	26,16
0,4	0,132	10,79
0,6	0,041	3,32
0,8	0,002	0,20

Fonte: Autor (2021)

Nas análises modais, os pórticos planos que simulam o comportamento do edifício (pórtico escolhido da Figura 3) foram modelados com o uso do programa ANSYS (plataforma MECHANICAL APDL versão 2021).

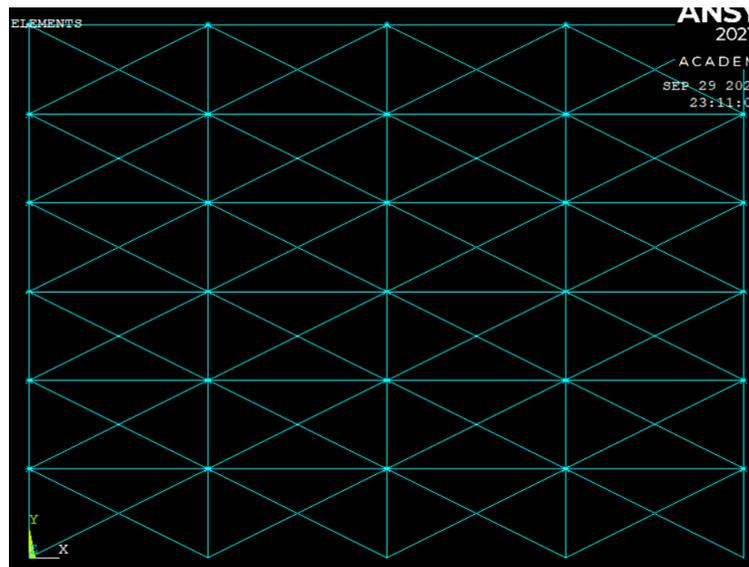
Vigas e pilares foram modelados com o elemento finito de pórtico plano BEAM3. As barras diagonais que simulam a presença das alvenarias foram modeladas com o elemento finito de treliça LINK10. Essas barras diagonais foram dispostas em X, ativando-se apenas a compressão axial, de maneira que a análise modal despreze a contribuição da rigidez da alvenaria quando submetida à tração.

Por meio do método das charneiras plásticas, determinou-se a carga vertical de cada viga no pórtico plano – o que inclui, além das cargas oriundas das lajes, o peso próprio da viga e o peso da parede). A partir dessa carga, obteve-se a massa específica atribuída à cada viga para a análise modal. Além disso, a partir das reações de apoio das vigas perpendiculares ao plano do pórtico analisado, obtiveram-se as correspondentes massas concentradas a serem alocadas nos nós dos pilares (nível

dos andares). Para isso, empregou-se o elemento finito de massa concentrada MASS21.

A Figura 5 ilustra os pórticos planos com barras diagonais que simulam as alvenarias. A condição de vinculação dos pilares junto à base (fundação) é de engaste, ou seja, deslocamento nulo nos eixos X e Y e rotação nula no eixo Z.

Figura 5 – Pórticos planos com as barras diagonais que simulam as alvenarias de preenchimento



Fonte: Autor (2021)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise de resultados

As Tabelas 4 e 5 representam a variação encontrada no período fundamental do edifício em função da porcentagem de aberturas da alvenaria, para blocos de concreto e blocos cerâmicos, respectivamente. Por fim a Figura 6 compara os dois casos (blocos de concreto e blocos cerâmicos).

Tabela 4 – Período fundamental em função da porcentagem de abertura: alvenaria de bloco de concreto

Bloco de concreto		
Período (s)	Porcentagem de aberturas	Frequência (Hz)
0,416389	0%	2,4016
0,624337	20%	1,6017
0,780153	40%	1,2818
0,923446	60%	1,0829
1,013459	80%	0,98672
1,020148	100%	0,98025

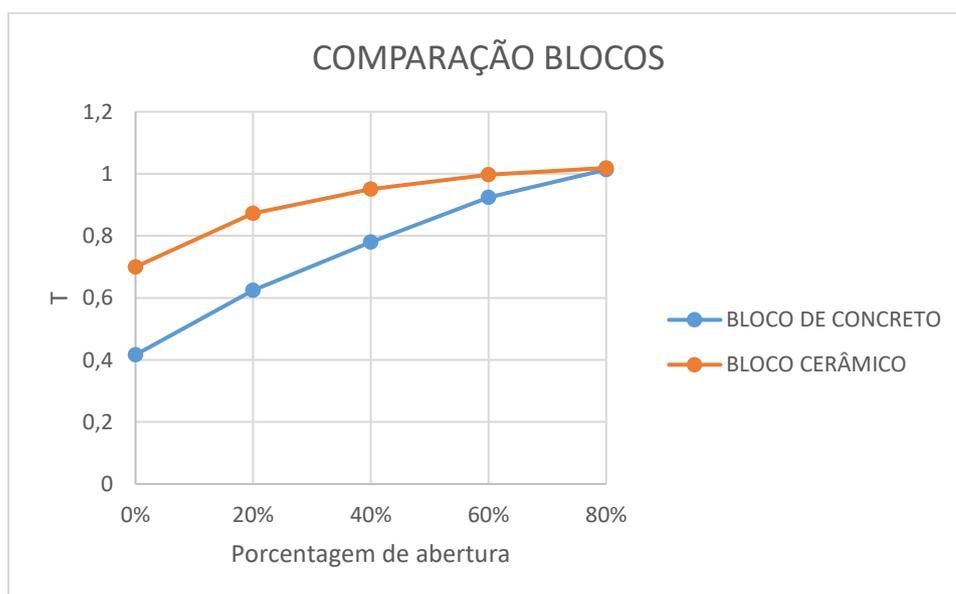
Fonte: Autor (2021)

Tabela 5 – Período fundamental em função da porcentagem de abertura: alvenaria de bloco cerâmico

Bloco cerâmico		
Período (s)	Porcentagem de aberturas	Frequência (Hz)
0,699888	0%	1,4288
0,872524	20%	1,1461
0,950751	40%	1,0518
0,997009	60%	1,003
1,018714	80%	0,98163
1,020148	100%	0,98025

Fonte: Autor (2021)

Figura 6 – Comparação dos resultados para as duas alvenarias analisadas



Fonte: Autor (2021)

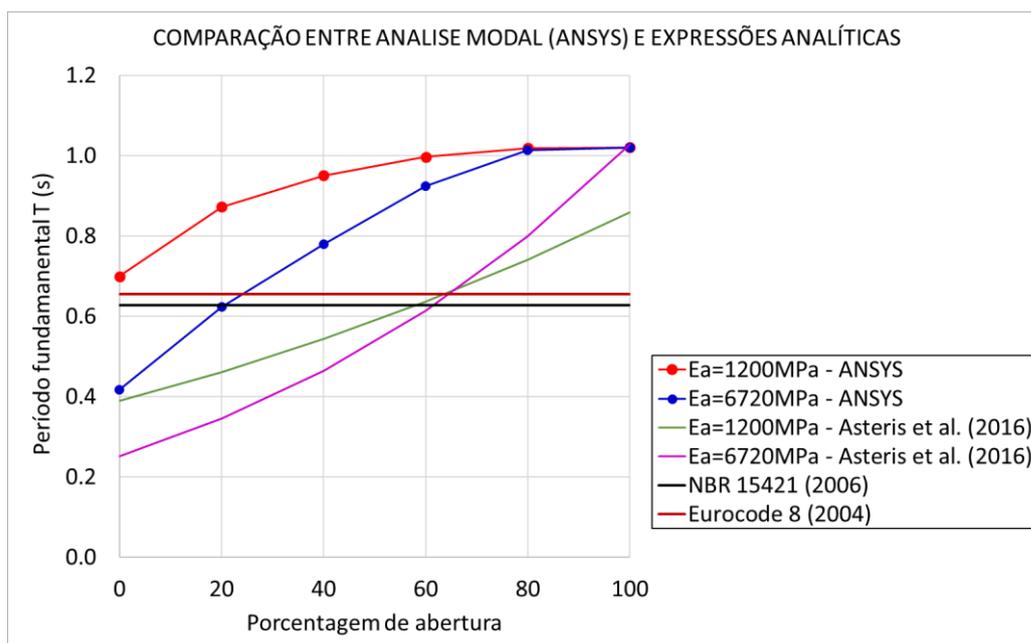
Notou-se que com o aumento da porcentagem de abertura da alvenaria o período fundamental tende a crescer até se estabilizar com a situação que a alvenaria não interfere na rigidez do edifício e, conseqüentemente, no período fundamental. Considerando bloco cerâmico, o pórtico preenchido com alvenaria sem aberturas (0%) apresentou período fundamental 1,46 vezes menor que o caso de pórtico sem alvenaria alguma (100% abertura). Para bloco de concreto, o caso alvenaria sem aberturas (0%) apresentou período fundamental 2,45 vezes menor que o caso sem alvenaria nenhuma (100% abertura). Tais comparações relevam que a influência das aberturas é mais significativa em alvenarias mais rígidas, ou seja, o aumento do período fundamental decorrente das aberturas é maior a medida em que se aumenta a rigidez da alvenaria.

Outra análise importante a partir dos resultados obtidos foi a influência das aberturas a partir de certa porcentagem de aberturas. No caso de alvenaria de blocos cerâmicos, a partir de 60% de aberturas na alvenaria a influência na rigidez do edifício é quase nula, enquanto que caso de alvenaria de bloco de concreto, essa influência é menor a partir de 80% de aberturas. Por fim quantitativamente, notou-se que o pórtico preenchido com alvenaria de bloco de concreto sem aberturas apresentou período 1,68 vezes menor que o correspondente com bloco cerâmico.

3.2 Comparação resultados com expressões analíticas da literatura

Os resultados das expressões da literatura para a obtenção aproximada do período fundamental estão apresentados na Figura 7 e são comparados com os resultados das análises modais via ANSYS. Essas expressões estimam o período fundamental em função da altura total do edifício apenas, com exceção da expressão proposta por Asteris *et al.* (2016), a qual considera informações sobre a alvenaria de preenchimento, como a porcentagem de aberturas, o módulo de elasticidade e a espessura e informações sobre o comprimento dos vãos (distância de eixo a eixo de pilares / vão teórico das vigas).

Figura 7 – Resultados das análises modais ANSYS vs. expressões da literatura



Fonte: Autor (2021)

Com base na Figura 7, notou-se que as expressões do Eurocode 8 (2004) e da ABNT NBR 15421 (2006) - as quais consideram apenas da altura do edifício – fornecem períodos fundamentais próximos aos casos de nenhuma abertura para pórticos preenchidos com alvenarias de blocos cerâmicos, e ao caso de 20% de abertura para pórticos preenchidos com alvenaria de bloco de concreto. Para valores de porcentagem de aberturas mais significativas (acima de 40%), as expressões normativas abordadas apresentaram valores notavelmente menores que os obtidos na análise modal.

Qualitativamente, a expressão proposta por Asteris *et al.* (2016), também conduz ao crescimento do período fundamental conforme o aumento da porcentagem de aberturas nas alvenarias. Além disso, assim como observado nas análises modais, a expressão de Asteris *et al.* (2016) também indicou que a influência das aberturas é mais significativa em alvenarias mais rígidas: para bloco cerâmico, o pórtico preenchido com alvenaria sem aberturas (0%) apresentou período fundamental 2,20 vezes menor que no caso do pórtico sem alvenaria alguma (100% abertura). Já considerando bloco de concreto, o caso de alvenaria sem aberturas (0%) apresentou período fundamental 4,08 vezes menor que o caso sem alvenaria nenhuma (100% abertura).

Contudo, conforme observado na Figura 7, os valores obtidos com a expressão de Asteris *et al.* (2016) são sistematicamente inferiores aos encontrados nas análises modais via ANSYS. Cabe salientar que, nas simulações numéricas que resultaram na formulação proposta de Asteris *et al.* (2016), os pórticos preenchidos foram dimensionados de acordo com as normas específicas dos Eurocódigos, considerando-se aceleração sísmica de 0,16g e diferentes classes de terreno. Além disso, não foi encontrado em Asteris *et al.* (2016) quais os valores de redução de rigidez à flexão e de rigidez axial da diagonal equivalente a serem utilizados para a consideração da não-linearidade física do concreto armado e da alvenaria.

Por fim, pela Figura 7, percebe-se que a expressão de Asteris *et al.* (2016) conduziu a resultados próximos aos obtidos com a expressões normativas abordadas para percentagem de aberturas na alvenaria em torno de 60%.

4. CONCLUSÕES

Apesar de o período fundamental ser um parâmetro de importância na análise de estruturas submetidas a efeitos de ações dinâmicas (vento e sismo), as formulações analíticas disponíveis na literatura para a sua estimativa não consideram parâmetros cruciais e muitas vezes fornecem resultados pouco precisos, podendo tornar a sua utilização pouco confiável. Neste estudo, que teve enfoque em estruturas de edifícios submetidos a sismos, alguns dos parâmetros que influenciam o período fundamental das estruturas foram investigados, tais como a porcentagem de aberturas nas alvenarias de preenchimento e a influência da rigidez das mesmas. As seguintes conclusões puderam ser tiradas:

- O período fundamental cresce com o aumento da porcentagem de aberturas nas alvenarias de preenchimento e com a diminuição do módulo de elasticidade das alvenarias de preenchimento.
- Para pórticos preenchidos com a mesma porcentagem de abertura nas alvenarias, quanto maior for a rigidez da alvenaria, menor será o período fundamental. Nas simulações deste trabalho, constatou-se que um aumento no módulo de elasticidade da alvenaria de 1200 MPa para 6720 MPa reduz o período fundamental em aproximadamente 40%.

- Existe uma percentagem de abertura nas alvenarias a partir da qual o período fundamental da estrutura quase não mais é afetado. Este fato foi identificado a partir de aberturas de 80% no caso de blocos de concreto e de 60% no caso dos blocos cerâmicos, segundo os resultados deste trabalho.
- As expressões normativas do Eurocode 8 (2004) e da ABNT 15421 (2006) conduziram a resultados bem diferentes dos obtidos na análise modal desenvolvida no trabalho. Isso ocorreu devido à quantidade de parâmetros que tais normas ignoram na estimativa do período fundamental, já que levam em conta apenas a altura total do edifício.
- A expressão de Asteris *et al.* (2016), apesar de considerar mais parâmetros e conduzir qualitativamente ao crescimento do período fundamental em função do aumento da percentagem de aberturas nas alvenarias, apresentou valores sistematicamente menores que os obtidos pela análise modal. Recomenda-se assim que essa expressão somente seja aplicada a casos semelhantes aos das hipóteses admitidas em Asteris *et al.* (2016).

5. REFERÊNCIAS

- 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 6123**: Forças devidas ao vento em edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.
- 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.
- 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.
- CEN. EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1**: General rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1. Brussels; 2004.
- GIONGO, J.S. **Concreto armado: projeto estrutural de edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- LIAUW, T. C.; KWAN, K. H. Nonlinear behavior of non-integral infilled frames. **Computers and Structures**, v.18, n.3, p.551-560, 1984.
- MAINSTONE, R. J. Supplementary note on the stiffness and strengths of infilled frames. **Building Research Station**, Garston, UK, 1974.
- POLYAKOV, S. V. **Masonry in framed buildings (Godsudarstvenoe Isdatel'stvo Library Po Stroital stvui Architecture. Moscow)**. Traduzido por G. L. Cairns, 1963. National Lending Library for Science and Technology, Boston, 1956.
- SILVA, E. R. **Influência das alvenarias de preenchimento na determinação do Período Fundamental de edifícios de concreto armado**. 83 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2021.