

INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DOS VÃOS NO PERÍODO FUNDAMENTAL DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO COM ALVENARIAS DE PREENCHIMENTO: ÊNFASE EM ANÁLISE SÍSMICA

João Paulo Pedroso Mendonça (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 do comprimento dos vãos (distância entre eixos de pilares) sobre o período fundamental de estruturas reticuladas de edifícios de múltiplos andares de concreto armado. Para modelagem das alvenarias de preenchimento no sistema estrutural, foi utilizado o modelo da diagonal equivalente (MDE), em virtude da simplicidade. Foram elaborados exemplos numéricos de edifícios de concreto armado com alvenarias de preenchimento com quatro valores de comprimentos de vãos diferentes. As análises modais foram realizadas com o emprego do programa ANSYS. Os resultados obtidos da análise modal permitiram avaliar, de forma qualitativa e quantitativa, a variação do período fundamental de vibração em função do aumento do comprimento do vão. Os valores da análise modal também foram comparados com as principais expressões disponíveis na literatura para a estimativa do período fundamental. Ao final do estudo, chegou-se a conclusão de que o aumento do comprimento dos vãos exerce uma considerável influência na estimativa do período fundamental.

Palavras-chave: Análise modal, Alvenarias Participantes, Edifícios de Concreto, Sismos.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, muitas cidades brasileiras tiveram bom desenvolvimento econômico, o que conseqüentemente gera também certo desenvolvimento urbano. Dessa forma, existe a tendência a se construir edifícios de múltiplos pavimentos nos grandes centros urbanos. Conseqüentemente, é visível a importância de se avaliar o dimensionamento de edifícios, especialmente os de maior esbeltez.

O cálculo do período fundamental de vibração de uma estrutura de edifício de múltiplos andares é uma das principais variáveis a se observar na análise sísmica - como no Método das Forças Horizontais - e nos efeitos dinâmicos produzidos pela ação do vento. Assim, existem duas situações nas quais este cálculo é exigido, na obtenção das forças sísmicas com o Método das Forças Horizontais Equivalentes e também para avaliar os efeitos dinâmicos gerados pela ação do vento, e que segundo a NBR 6123, deve ser considerado caso o período fundamental do edifício seja maior que 1,0 segundos. Algumas características das estruturas do edifício influenciam diretamente no seu período fundamental de vibração, como massa e a rigidez das mesmas. Desta forma, devem ser considerados todos os elementos da estrutura, até mesmo os que são considerados elementos não estruturais, pois podem ter influência nessas propriedades. Um destes elementos são as alvenarias de preenchimento, que usualmente não são consideradas no cálculo estrutural, mas contribuem na rigidez horizontal do edifício, e conseqüentemente influenciam no período fundamental.

Na literatura, especialmente nos códigos normativos, são encontradas diversas expressões analíticas com o objetivo de estimar o período fundamental, sendo que a maioria leva em consideração somente a altura total do edifício. No entanto, existem algumas pesquisas que consideram outros parâmetros na obtenção do período fundamental. Como exemplo, cita-se a formulação de Asteris et al. (2016), na qual se leva em conta também o comprimento dos vãos entre pilares para um mesmo pé-direito estrutural. Cabe destacar que o comprimento dos vãos influencia diretamente no ângulo das diagonais comprimidas, causando aumento ou redução na rigidez axial das mesmas, quando é utilizado o modelo de diagonal equivalente para simular o comportamento das alvenarias frente às ações horizontais. A partir disso, percebe-se que existe a necessidade da realização de análises modais na obtenção mais precisa do período fundamental em edifícios de concreto armado considerando-se a presença

de alvenarias de preenchimento e os diferentes valores de vãos observados nesses edifícios.

2. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

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

Para o cálculo do período fundamental, primeiramente foi necessário pré-dimensionar a estrutura a ser analisada, a qual consiste em um edifício de 6 pavimentos e outro de 12 pavimentos.

Para o pré-dimensionamento dos pilares, foi considerada uma carga vertical característica de $g+q = 12 \text{ kN/m}^2$ e utilizada a expressão de Bastos (2017), mostrada na Equação 1.1 para pilares internos e na Equação 1.2 para pilares de extremidade e de canto.

$$A_c = \frac{N_d}{0,5 \cdot f_{ck} + 0,4} \quad (1.1)$$

$$A_c = \frac{1,5 \cdot N_d}{0,5 \cdot f_{ck} + 0,4} \quad (1.2)$$

Nas Equações 1.1 e 1.2:

N_d é a força normal de cálculo do pilar (em kN);

f_{ck} é a resistência à compressão característica do concreto (em kN/cm^2);

A_c é a área da seção bruta do pilar estimada no pré-dimensionamento (em cm^2).

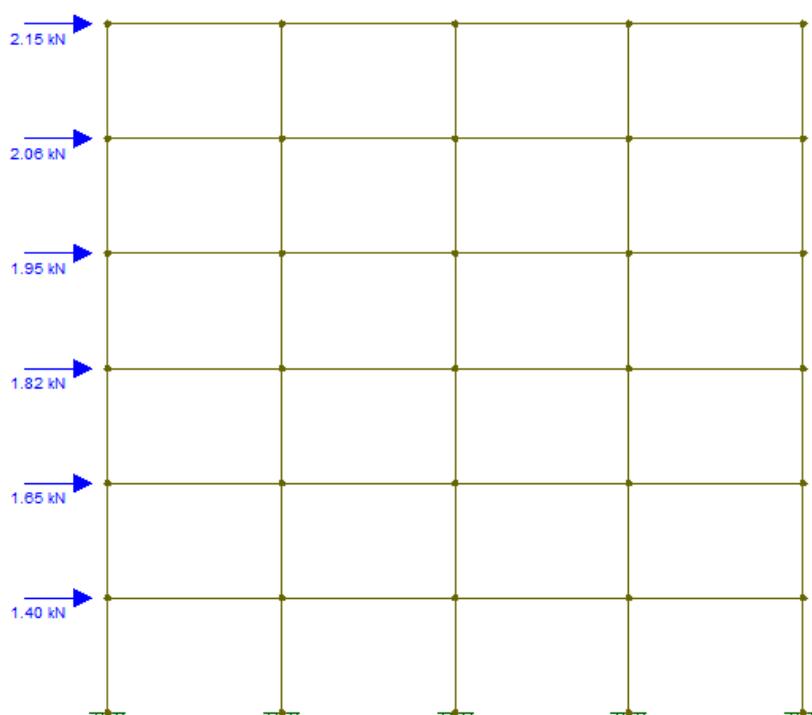
Já para as seções das vigas, foi considerado uma largura padrão de 20cm e a altura foi calculada como um décimo do comprimento do vão teórico das mesmas. Todas as lajes do edifício são maciças.

Realizado o pré-dimensionamento dos pilares e vigas, foram realizadas algumas verificações do Estado Limite de Serviço (ELS) e do Estado Limite Último (ELU) considerando as ações do vento na estrutura. Adotou-se velocidade básica do vento $V_0 = 30 \text{ m/s}$ (cidade: Rio Branco-AC considerando que é a região do Brasil em que se tem alguma influência de sismos) aplicada em edifício residencial situado em terreno plano. A partir disso, foi possível obter a força horizontal em cada pavimento da estrutura em questão.

2.1.1 Estado Limite de Serviço (ELS)

Segundo a NBR 6118, o valor limite para deslocamento horizontal total no topo da estrutura não deve superar $H/1700$ considerando os efeitos dinâmicos produzidos pelas ações do vento frequente ($\Psi_1=0,3$), onde H é a altura total do edifício. Utilizou-se o programa computacional FTOOL na obtenção deste deslocamento para os dois edifícios analisados. A Figura 1 expressa um dos exemplos dos pórticos modelados no software, a fim de se obter os deslocamentos horizontais gerados pela ação do vento em cada pavimento.

Figura 1 – Modelagem do pórtico do edifício no FTOOL



Fonte: Autor (2021)

2.1.2 Estado Limite Último (ELU)

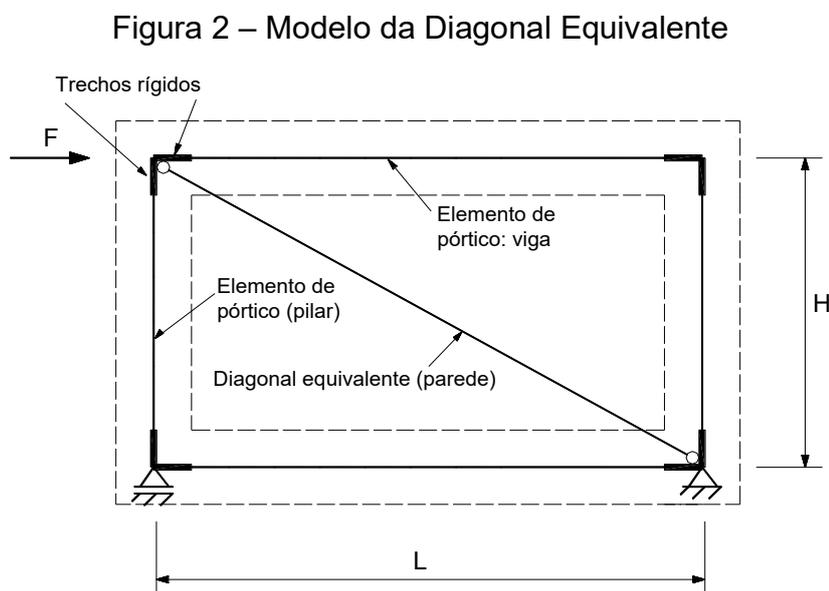
A verificação escolhida para o ELU abrange a avaliação a estabilidade global do edifício por meio do coeficiente γ_z , a fim de estimar os efeitos globais de segunda ordem da estrutura. Para que a rigidez da estrutura estivesse adequada, tomou-se como critério que esse parâmetro deveria ser menor que 1,3, conforme descrito na NBR 6118:2014, pois valores acima deste indicam que a estrutura possui elevado grau de instabilidade. Dessa forma, este cálculo foi realizado com o auxílio do

programa FTOOL – do qual foram extraídos os deslocamentos horizontais. Considerou-se no cálculo do coeficiente γ_z uma carga vertical característica de 12 kN/m² por pavimento e coeficiente de majoração das cargas verticais igual a 1,4.

2.2 Modelos analisados

2.2.1 Modelo das Diagonais Equivalentes

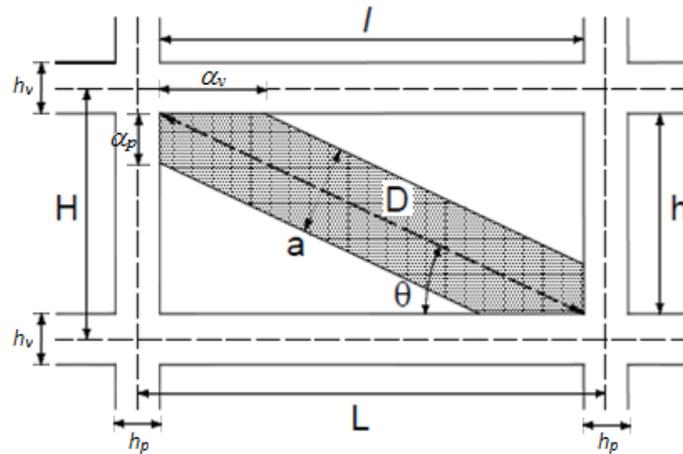
A partir de simulações e observações registradas na literatura especializada, percebe-se que as alvenarias de preenchimento, quando submetidas aos efeitos dinâmicos produzidos pela ação do vento ou de sismos, possuem comportamento similar ao de uma biela comprimida diagonalmente. Dentre os trabalhos pioneiros sobre o tema, destaca-se o de Polyakov (1956), o qual propôs que a alvenaria fosse como uma barra biarticulada alocada na diagonal de um vão na modelagem do pórtico, considerando-se as propriedades geométricas e mecânicas da parede. A Figura 2 é um exemplo de pórtico preenchido com alvenaria sob força horizontal usando o modelo de diagonal equivalente.



Fonte: Silva (2014)

Dessa maneira, na bibliografia são encontradas algumas equações que foram desenvolvidas com o objetivo de calcular as propriedades geométricas intrínsecas à diagonal equivalente que são mostradas na Figura 3. Um destes parâmetros é a largura (a) desta diagonal equivalente, que no caso deste estudo, foi utilizada a expressão de Mainstone (1974), demonstrada na Equação 1.3.

Figura 3 – Parâmetros geométricos da diagonal equivalente



Fonte: Adaptado de SILVA (2014)

$$a = 0,175 \cdot (\lambda_H)^{-0,4} \cdot D \quad (1.3)$$

Onde:

a – Largura da diagonal equivalente;

D – Comprimento da diagonal da parede;

λ_H – Produto entre a rigidez relativa do pilar e da viga em contato com a alvenaria, obtido por:

$$\lambda_H = \lambda_p \cdot H$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{E \cdot t \cdot \text{sen}(2\theta)}{4 \cdot E_p \cdot I_p \cdot h}}$$

E – Módulo de elasticidade da parede (alvenaria em blocos de concreto);

t – Espessura da parede;

θ – Ângulo de inclinação do eixo da diagonal da parede em relação à horizontal;

E_p – Módulo de elasticidade do pórtico (pilar);

I_p – Momento de inércia à flexão da seção do pilar;

h – Altura da parede.

2.2.2 Propriedade dos materiais

Para efeito de cálculo, alguns parâmetros foram mantidos constantes para que se obtenha um resultado mais conciso no que é realmente o foco deste trabalho: a

influência do comprimento dos vãos. Dessa forma, admitiu-se o pé-direito da estrutura em todos os exemplos igual a 3,0 metros.

Outros fatores que se mantiveram constantes foram as propriedades mecânicas dos materiais, como o concreto e os blocos componentes da alvenaria. O bloco de concreto possui medida de 19x19x39 cm. As paredes com as alvenarias de preenchimento não apresentam aberturas.

- Blocos de concreto:

$$E_a = 6720MPa \text{ (Módulo de Elasticidade)}$$

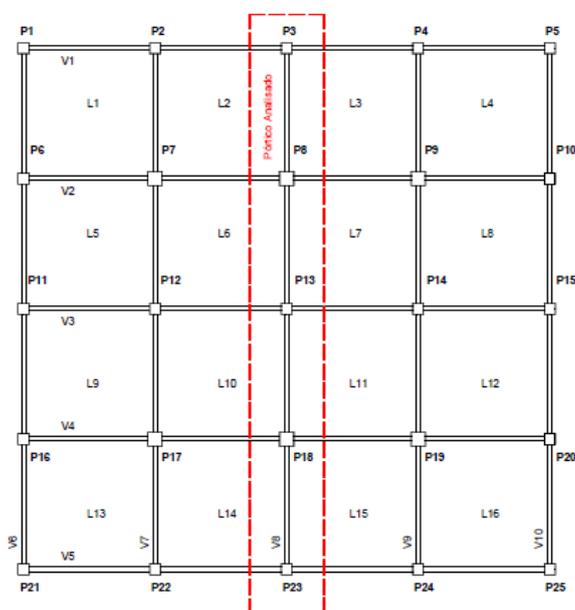
- Concreto:

$$E_c = 28000MPa \text{ (Módulo de Elasticidade para vigas e pilares)}$$

2.2.3 Planta estrutural do edifício

Por meio de diversas simulações realizadas em edifícios de 2 a 14 pavimentos, Asteris *et al.* (2016) propuseram uma formulação para o período fundamental. Dessa forma, a fim de avaliar os resultados conduzidos pela expressão de Asteris *et al.* (2016), foram simuladas neste trabalho estruturas de edifícios 6 e 12 pavimentos. A Figura 4 é um esquema simplificado da planta estrutural do edifício, além do pórtico isolado que foi escolhido para as simulações.

Figura 4 – Planta do edifício e pórtico a ser analisado



Fonte: Autor (2021)

Foram definidos quatro diferentes vãos para cada edifício, a fim de se estudar o efeito da variação do comprimento dos vãos. As Tabelas 1 e 2 contêm todos os edifícios simulados. É importante ressaltar também que, para cada caso, todos os vãos possuem o mesmo comprimento, ou seja, possuem a mesma distância de eixo a eixo de pilares nas duas orientações ortogonais em planta.

Tabela 1 – Características geométricas: edifícios com 6 pavimentos

6 Pavimentos	Comprimento do vão (m)	Seção Vigas (cm)	Seção Pilares (cm)	Espessura Lajes (cm)
	3,0	20x30	25x25	8,0
4,5	20x45	35x35	10,0	
6,0	20x60	45x45	13,0	
7,5	20x75	55x55	16,0	

Fonte: Autor (2021)

Tabela 2 – Características geométricas: edifícios com 12 pavimentos

12 Pavimentos	Comprimento do vão (m)	Seção Vigas (cm)	Seção Pilares (cm)	Espessura Lajes (cm)
	3,0	20x30	35x35	8,0
4,5	20x45	50x50	10,0	
6,0	20x60	60x60	13,0	
7,5	20x75	80x80	16,0	

Fonte: Autor (2021)

2.2.4 Modelagem

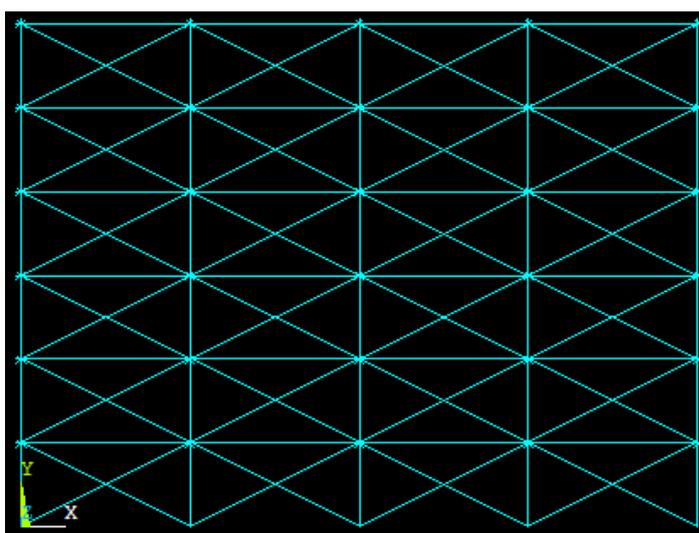
Para realizar as análises modais, foi utilizado o programa computacional ANSYS (plataforma Mechanical APDL versão 2021 R1). Conforme descrito no Modelo da Diagonal Equivalente, a presença da alvenaria no pórtico pode ser representada como uma barra diagonal articulada. Entretanto, para a inversão da direção da ação horizontal ou quando se realiza uma análise modal, é conveniente o lançamento de duas diagonais (em “X”) para simular a parede, informando ao programa que realiza a análise a ativação apenas da compressão axial. Esse procedimento foi feito com o

uso do elemento finito LINK10. As massas das paredes foram acrescentadas às massas das vigas, de forma a modelar a barra diagonal e ainda considerar a carga gerada pela presença da alvenaria.

Para as vigas e os pilares foram empregados os elementos finitos BEAM3 (pórtico plano). As reações das vigas perpendiculares ao pórtico analisado foram simuladas por meio de massas concentradas nos nós dos pilares, com a utilização do elemento finito MASS21.

Na Figura 5 é demonstrada a modelagem de um dos pórticos no ANSYS.

Figura 5 – Análise modal feita pelo ANSYS



Fonte: Autor (2021)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizada a modelagem no ANSYS, foi possível obter o período fundamental para cada um dos casos analisados, conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Período fundamental para os modelos de 6 pavimentos

	Comprimento do vão (m)	Período Fundamental (s)
6 pavimentos	3,0	0,35448
	4,5	0,40371
	6,0	0,46533
	7,5	0,52826

Fonte: Autor (2021)

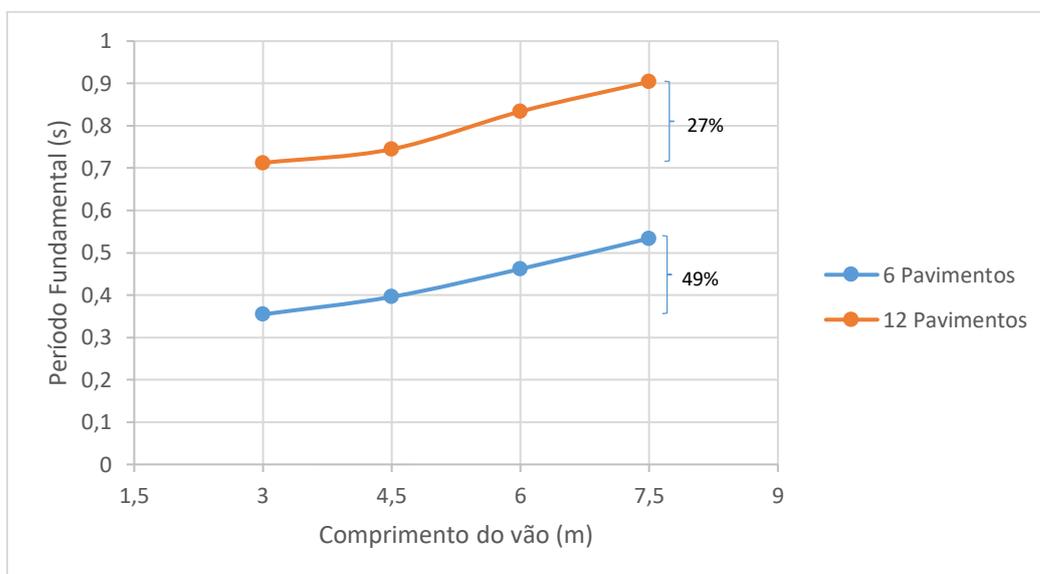
Tabela 4 - Período fundamental para os modelos de 12 pavimentos

12 pavimentos	Comprimento do vão (m)	Período Fundamental (s)
	3,0	0,71240
	4,5	0,74466
	6,0	0,83368
	7,5	0,90391

Fonte: Autor (2021)

A Figura 6 contém um gráfico comparativo da influência do comprimento do vão nos valores do período fundamental, para os modelos de 6 e 12 pavimentos.

Figura 6 – Influência do comprimento dos vãos



Fonte: Autor (2021)

Analisando as Tabelas 3 e 4, e a Figura 6, fica claro que o período fundamental aumenta de acordo com o acréscimo de pavimentos no edifício, e também com o aumento do comprimento dos vãos.

Percebe-se que para o edifício de 6 pavimentos, há uma variação de 49% para o valor do período fundamental da estrutura de menor vão para a de maior vão. No entanto, esse percentual já possui menor índice para o edifício de 12 pavimentos, o qual consta igual a aproximadamente 27%.

Muitas das equações da bibliografia internacional que calculam o período fundamental consideram apenas a altura total do edifício; desconsiderando a

presença das alvenarias de preenchimento e a influência do comprimento dos vãos. Portanto, foram comparados os resultados obtidos via análise modal com os resultados de expressões da literatura que levam em consideração outros parâmetros além da altura total do edifício.

3.1 Eurocode 8 (2004)

Na União Europeia, existem pesquisas e normas acerca das ações sísmicas sobre estruturas, contidas na EN 1998-1. Nesta norma, o Eurocode 8 (2004) é o que menciona este tópico. Para edifícios de até 40 metros de altura, o período fundamental pode ser obtido de forma aproximada pela Equação 1.4.

$$T = C_T \cdot H^{3/4} \quad (1.4)$$

Nesta Equação, C_T é um fator de correção para edifícios com alvenarias participantes, e pode variar de acordo com o tipo de estrutura. Para sistemas de pórticos de concreto com ligações resistentes ao momento fletor, o valor de C_T é igual a 0,075.

Para efeito de comparação, a expressão do Eurocode 8 (2004) é uma boa alternativa para se entender a influência do comprimento dos vãos, já que considera apenas a altura total da estrutura. A Tabela 5 contém a comparação dos valores obtidos pela expressão proposta no Eurocode 8 (2004) e os valores obtidos pela análise modal com o programa ANSYS, variando-se o comprimento dos vãos, no caso de 6 pavimentos. Na Tabela 6, de forma análoga, apresentam-se os resultados para o caso de 12 pavimentos.

Tabela 5 – Comparação de resultados: expressão do Eurocode 8 vs análise modal ANSYS – caso de 6 pavimentos

Comprimento do vão (m)	Eurocode 8	ANSYS
	Período fundamental (s)	
3,0	0,6554	0,35448
4,5		0,40371
6,0		0,46533

7,5		0,52826
------------	--	---------

Fonte: Autor (2021)

Percebe-se pelos resultados da Tabela 5 que a expressão do Eurocode 8 (2004) fornece resultados menos realistas quando se trata de estruturas com pequenos vãos. Portanto, comparando os valores obtidos, fica evidente o grau de influência do comprimento dos vãos para a estrutura.

Tabela 6 – Comparação de resultados: expressão do Eurocode 8 vs análise modal ANSYS – caso de 12 pavimentos

Comprimento do vão (m)	Eurocode 8	ANSYS
	Período fundamental (s)	
3,0	1,1023	0,7124
4,5		0,7447
6,0		0,8337
7,5		0,9039

Fonte: Autor (2021)

A partir dos resultados da Tabela 6, percebe-se também que, independentemente da altura total do edifício, a expressão do Eurocode 8 (2004) ainda fornece resultados não tão próximos à realidade para estruturas de pequenos vãos.

3.2 NBR 15421 (2006)

Na norma brasileira de projeto de estruturas resistentes a encontra-se uma expressão aproximada para o período fundamental, conforme a Equação 1.5.

$$T = C_T \cdot H_n^x \quad (1.5)$$

Os termos T, e H já são conhecidos. Já a variável x é um expoente da lei potencial do período fundamental aproximado, cujo valor é relacionado à tipologia da estrutura e do coeficiente C_T . No Quadro 1 é apresentado esta correlação.

Quadro 1 - Coeficientes C_T e x para a determinação do período fundamental

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 impeça a sua livre deformação quando submetidos à ação sísmica.	0,0724	0,80
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	0,90
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).

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pela análise modal com a expressão da NBR 15421, primeiro foi considerado que, para efeito de estudo, todas as forças sísmicas são resistidas pelos pórticos de concreto, sem considerar a presença de alvenarias de preenchimento. Esta comparação é apresentada nas Tabelas 7 e 8 para os casos de 6 e 12 pavimentos, respectivamente.

Tabela 7 – Expressão da NBR 15421 vs análise modal ANSYS – caso de 6 pavimentos (forças sísmicas resistidas apenas por pórticos)

Comprimento do vão (m)	NBR 15421	ANSYS
	Período fundamental (s)	
3,0	0,62825	0,35448
4,5		0,40371
6,0		0,46533
7,5		0,52826

Fonte: Autor (2021)

Tabela 8 – Comparação de resultados: expressão da NBR 15421 vs análise modal ANSYS – caso de 12 pavimentos (forças sísmicas resistidas apenas por pórticos)

Comprimento do vão (m)	NBR 15421	ANSYS
	Período fundamental (s)	
3,0	1,17235	0,71240
4,5		0,74466
6,0		0,83368
7,5		0,90391

Fonte: Autor (2021)

Após análise dos resultados obtidos, observou-se que para este caso, os valores fornecidos pela NBR 15421 não condizem com os valores coletados na análise modal. Observa-se grande divergência no período fundamental quando comparado à expressão aproximada da norma para os edifícios com baixos comprimentos de vão.

Dessa forma, julgou-se necessário avaliar o caso em que os pórticos de concreto não resistam totalmente às ações sísmicas, de forma a distribuir este esforço a outros elementos (neste caso, as alvenarias de preenchimento), e por isso foi utilizado os valores da última linha do Quadro 1. As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores de período fundamental para os casos de edifícios de 6 e 12 pavimentos, respectivamente.

Tabela 9 – Comparação de resultados: expressão da NBR 15421 vs análise modal ANSYS – caso de 6 pavimentos (forças sísmicas resistidas por pórticos e paredes)

Comprimento do vão (m)	NBR 15421	ANSYS
	Período fundamental (s)	
3,0	0,42646	0,35448
4,5		0,40371
6,0		0,46533
7,5		0,52826

Fonte: Autor (2021)

Tabela 10 – Comparação de resultados: expressão da NBR 15421 vs análise modal ANSYS – caso de 12 pavimentos (forças sísmicas resistidas por pórticos e paredes)

Comprimento do vão (m)	NBR 15421	ANSYS
	Período fundamental (s)	
3,0	0,71721	0,71240
4,5		0,74466
6,0		0,83368
7,5		0,90391

Fonte: Autor (2021)

Para este caso, percebe-se que a expressão da NBR 15421 fornece resultados próximos aos obtidos pela análise modal para estruturas de pequenos vãos. Dessa forma, é possível concluir que, apesar de certa restrição, é possível estimar um valor aproximado para o período fundamental de estruturas de até 4,5 metros de comprimento dos vãos.

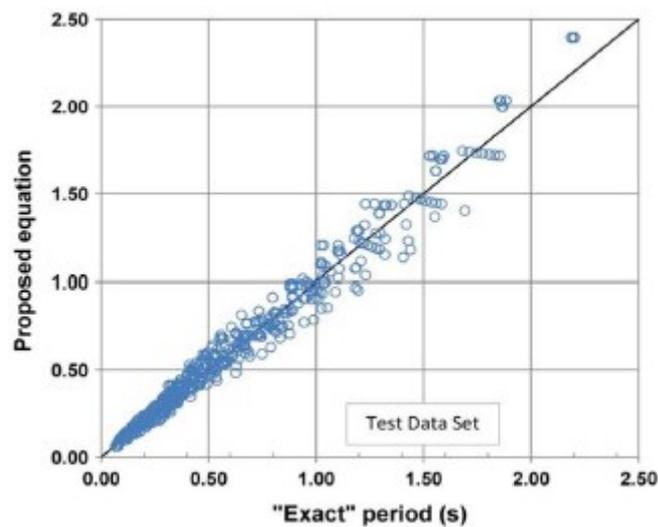
3.3 Asteris *et al.* (2016)

Asteris *et al.* (2016) propõem uma análise acerca do período fundamental que engloba outros parâmetros além da altura total do edifício.

O estudo de Asteris *et al.* (2016) contempla a variação do número de vãos de cada pórtico, considerando 2, 4 e 6 vãos de comprimentos iguais. Além disso, a distância entre os pilares pode variar de 3,0 m, 4,5 m, 6,0 m e também de 7,5 m. Foi investigado também diferentes percentagens de aberturas na parede, a saber: 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (sem alvenaria). Foram analisadas alvenarias com diferentes propriedades mecânicas, variando-se o módulo de elasticidade de 1,5 MPa, 3,0 MPa, 4,5 MPa, 8,0 MPa e 10,0 MPa. A altura total do edifício foi variada de forma a se considerar estruturas de 2 a 14 pavimentos, mantendo-se o pé direito constante e igual a 3,0 metros.

Assim, a partir dos resultados obtidos, foi formulada uma equação baseada em análises estatísticas e por regressão linear conforme a Figura 7, a qual propõe uma melhor correlação do período fundamental com as características do edifício como um todo. A expressão final é apresentada pela Equação 1.6.

Figura 7 – Análise estatística e regressão linear



Fonte: Asteris *et al.* (2016)

$$T = (0,55407 + 0,05679 \cdot \sqrt{H} - 0,00048 \cdot L - 0,00027 \cdot a_w - 0,00425 \cdot E_t + 0,00202 \cdot \sqrt{H} \cdot L + 0,0016 \cdot \sqrt{H} \cdot a_w - 0,00032 \cdot \sqrt{H} \cdot E_t + 0,00013 \cdot L \cdot a_w - 0,00017 \cdot L \cdot E_t + 0,00010 \cdot a_w \cdot E_t)^5 \quad (1.6)$$

Onde:

T – Período fundamental, em segundos;

H – Altura total do edifício, em metros;

L – Comprimento dos vãos da estrutura, em metros;

a_w – Razão de abertura nas alvenarias de preenchimento;

E_t – Rigidez da parede (produto do módulo de elasticidade da alvenaria e a espessura da parede), em 10^5 kN/m.

Para avaliar os resultados fornecidos pela Equação 1.6, foi realizada uma comparação com os resultados fornecidos pela modelagem no ANSYS (análise modal), de forma a considerar as mesmas propriedades dos materiais e geometria do edifício. Os resultados obtidos são apresentados pelas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Análise da expressão proposta por Asteris *et al.* (2016)

6 Pavimentos		
Comprimento do vão (m)	Período fundamental (s)	
	Asteris <i>et al.</i> (2016)	Análise Modal
3,0	0,22366	0,35448
4,5	0,23738	0,40371
6,0	0,25177	0,46533
7,5	0,26685	0,52826

Fonte: Autor (2021)

Tabela 12 - Análise da expressão proposta por Asteris *et al.* (2016)

12 Pavimentos		
Comprimento do vão (m)	Período fundamental (s)	
	Asteris <i>et al.</i> (2016)	Análise Modal
3,0	0,42938	0,71240
4,5	0,46673	0,74466
6,0	0,50663	0,83368
7,5	0,54922	0,90391

Fonte: Autor (2021)

Apesar da divergência de resultados entre a expressão proposta por Asteris *et al.* (2016) com os obtidos pela análise modal, percebe-se que o aumento do vão conduziu a um aumento do período fundamental. No edifício de 6 andares, aumentando-se o vão de 3,0m para 7,5m, observou-se aumento de 19,3% e 49,0% no período fundamental empregando-se a expressão de Asteris *et al.* (2016) e a análise modal, respectivamente. Em comparação análoga para o edifício de 12 andares, o aumento foi de 27,9% e 26,9% para a expressão de Asteris *et al.* (2016) e a análise modal, respectivamente.

3.4 Amanat e Hoque (2006)

A partir da expressão do Eurocode 8 (2004) apresentada pela expressão 1.4, Amanat e Hoque (2006) propuseram a reformulação dessa expressão, com o objetivo de considerar alguns outros parâmetros essenciais das estruturas de concreto, como o

comprimento dos vãos, número de vãos e a percentagem das aberturas dos pórticos que são preenchidos por alvenaria. Os referidos autores realizaram diversas modelagens de elementos finitos, quantificando a influência dos parâmetros citados anteriormente na obtenção do período fundamental.

O estudo foi realizado para estruturas de concreto armado que possuem de 2 a 6 vãos, os quais também variam de 4,0m a 8,0m em seu comprimento. Também foram variadas a percentagem de alvenarias de preenchimento, de 20% a 80%. Assim, após realizar todas as modelagens, foi proposta a Equação 1.7.

$$T = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot C_T \cdot H^{3/4} \quad (1.7)$$

Em que:

α_1 – Fator de correção para a influência do comprimento dos vãos;

α_2 – Fator de correção para a influência do número de vãos;

α_3 – Fator de correção para a influência da percentagem de paredes preenchidas com alvenaria.

Neste trabalho, feita uma comparação de resultados considerando somente a influência do aumento do comprimento dos vãos, empregando-se a expressão proposta por Amanat e Hoque (2006) e a modelagem no programa ANSYS (análise modal). Como o número de vãos, a percentagem da presença paredes e a altura total do edifício se mantêm constantes, apenas varia-se o fator α_1 em função do vão, o que tornou possível estudar a influência do comprimento dos vãos isoladamente. Os valores propostos por Amanat e Hoque (2006) para o fator α_1 são dados no Quadro 2.

Quadro 2 – Fator α_1

Comprimento do vão (m)	α_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)

Na Tabela 13 foi comparado o aumento percentual do período fundamental obtido pela análise modal com a proposta de Amanat e Hoque (2006). Nesta tabela foi analisado o aumento percentual do período fundamental do edifício com o aumento do comprimento dos vãos de 3,0 m para 4,5 m, de 4,5m para 6,0 m e de 6,0 m para 7,5 m. A Tabela 14 contém comparação análoga à Tabela 13, porém para o caso de 12 pavimentos.

Tabela 13 – Aumento percentual do período fundamental para edifício de 6 pavimentos: análise modal vs expressão de Amanat e Hoque (2006)

Comprimento dos vãos (m)	Análise Modal	Amanat e Hoque (2006)
3,0 – 4,5	13,89%	11,11%
4,5 – 6,0	15,26%	11,11%
6,0 – 7,5	13,52%	11,50%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 14 – Aumento percentual do período fundamental para edifício de 12 pavimentos: análise modal vs expressão de Amanat e Hoque (2006)

Comprimento dos vãos (m)	Análise Modal	Amanat e Hoque (2006)
3,0 – 4,5	4,53%	11,11%
4,5 – 6,0	11,96%	11,11%
6,0 – 7,5	8,42%	11,50%

Fonte: Autor (2021)

Analisando as Tabelas 13 e 14, percebe-se que a expressão de Amanat e Hoque (2006) forneceu resultados satisfatórios na avaliação do aumento do período fundamental com o aumento do comprimento dos vãos. No edifício de 6 pavimentos, aumentando-se o vão de 3,0m para 7,5m, observou-se aumento de 37,4% e 49,0% no período fundamental empregando-se a expressão de Amanat e Hoque (2006) e a análise modal, respectivamente. Em comparação análoga para o edifício de 12 pavimentos, o aumento foi de 37,4% e 26,9% para a expressão de Amanat e Hoque (2006) e a análise modal, respectivamente.

4. CONCLUSÕES

O estudo das ações sísmicas é parte vital no dimensionamento de estruturas de concreto armado, o que justifica a necessidade de se obter maneiras para se realizar o cálculo do período fundamental com precisão. Nas últimas décadas, a bibliografia internacional e nacional desenvolveu e aprimorou expressões que fornecessem este parâmetro de forma aproximada. No entanto, essas expressões - em especial as contidas em códigos normativos - são limitadas, pois consideram apenas a altura total do edifício e a tipologia estrutural.

Pela comparação das expressões da bibliografia com os resultados obtidos pela análise modal neste trabalho, ficou claro que a consideração do comprimento dos vãos também é relevante para a obtenção do período fundamental, o qual sofreu aumento com o aumento da distância entre pilares (vãos).

Tomando como base os resultados obtidos pela análise modal, concluiu-se que a expressão da NBR 15421 forneceu valores de período fundamental próximos ao da análise modal para comprimentos de vão em torno de 5,0 metros. Amanat e Hoque (2006) também apresentam uma expressão que se propõe a levar em conta a influência do comprimento dos vãos através do fator de ajuste α_1 .

Apesar das diferenças entre os valores de período fundamental fornecidos pelas expressões de Asteris et al. (2016) e Amanat e Hoque (2006), ambas indicaram que, com o aumento do comprimento dos vãos, o período fundamental também aumenta.

5. REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421:2006**: Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimentos. 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.

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.

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.

BASTOS, P. S. **Flexão Composta e pilares de concreto armado**. Parte II – Pilares de concreto armado. 2020. Disciplina Estruturas de Concreto II. – Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2020.

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

MONTADON, 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, 2018.

POLYAKOV, S. V. **Masonry in framed buildings (Godsudarstvenoe Indatel'stvo Library Po Stroidal 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**. Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia, 2014.