

## Modelagem numérica de pórticos preenchidos com alvenaria para determinação do fator de redução da rigidez

### Numerical modeling of portics filled with masonry to determine the rigidity reduction factor

*Emerson Rodrigues da Silva*<sup>1</sup>

*Gerson Moacyr Sisniegas Alva*<sup>2</sup>

---

#### Resumo

O presente trabalho apresenta os resultados de larguras da diagonal equivalente das alvenarias em pórticos de concreto armado obtidos a partir do método da diagonal equivalente (MDE) e modelagem numérica via ANSYS. Os principais objetivos do trabalho foram a obtenção do fator de redução da rigidez das alvenarias e a análise do comportamento da alvenaria de preenchimento em pórticos de concreto armado através de modelagem numérica via ANSYS *Mechanical* APDL (considerando elementos planos). Embora seja considerada apenas como elemento de vedação, a alvenaria contribui diretamente para o aumento da rigidez global da estrutura e conseqüentemente para redução dos deslocamentos horizontais. Os resultados das larguras da diagonal equivalente, obtidos para diferentes módulos de elasticidade da alvenaria, foram distintos, onde a alvenaria mais rígida apresentou menores valores de largura da diagonal. Os resultados referentes ao fator de redução da rigidez na comparação com expressões numéricas de três autores da literatura, embora tenham tido uma tendência gráfica semelhante, se mostraram bastante divergentes entre si. Os resultados confirmam que alvenarias promovem a redução do deslocamento horizontal sendo, entretanto, pouco influentes para aberturas de parede maiores que 80%.

**Palavras-chave:** alvenaria, deslocamento horizontal, diagonal equivalente, modelagem numérica, concreto armado.

#### Abstract

The present paper presents the results of equivalent diagonal widths of masonry in reinforced concrete frames obtained from the equivalent diagonal method (EDM) and numerical modeling via ANSYS. The main objectives of the work were to obtain the masonry stiffness reduction factor and the behavior analysis of the masonry infill in reinforced concrete frames through numerical modeling via ANSYS *Mechanical* APDL (considering plane elements). Although it is considered only as a sealing element, the masonry contributes directly to the increase of the global rigidity of the structure and, consequently, the reduction of horizontal displacements. The results of the equivalent diagonal widths, obtained for different modulus of elasticity of the masonry, were different, where the more rigid masonry presented values of diagonal width. The results referring to the stiffness reduction factor in the comparison with numerical expressions from three authors in the literature, although they had a similar graphic trend, were quite different from each other. The results confirm that masonry promotes the reduction of horizontal displacement, being, however, not very influential for wall openings greater than 80%.

**Keywords:** masonry, horizontal displacement, equivalent diagonal, numerical modeling, reinforced concrete.

---

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, emersonrodrigues.72@gmail.com

<sup>2</sup> Professor da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, alva\_gerson@yahoo.com.br

## **INTRODUÇÃO**

Paredes de alvenaria são uma técnica de construção muito antiga, sendo encontrada em diversas edificações históricas. A forma como as paredes de alvenaria se fixa às estruturas reticuladas determinará se essas absorverão esforços decorrentes das ações horizontais. Segundo Silva (2014), as alvenarias de vedação não são responsáveis por suportar cargas, pois são compostas por blocos com menor resistência à compressão e, conseqüentemente, possuem menor módulo de elasticidade se comparado à alvenaria estrutural. 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.

Segundo Medeiros e Franco (1999), as paredes de vedação têm como função a proteção dos ambientes e do 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, e têm o seu papel como elemento estrutural desprezado. 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.

O sistema de pórticos preenchidos consiste na consideração das paredes de alvenaria na estrutura reticulada dos edifícios. Tais paredes são chamadas de participantes por contribuírem com o aumento da resistência e da rigidez do edifício frente às ações horizontais. Desta forma, sendo 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 distintos na comparação entre a consideração ou não das paredes de alvenaria frente a ações horizontais como vento e sismos.

Segundo Alvarenga (2002), por apresentar uma alta rigidez, as paredes de alvenaria evitam distorções no pórtico de aço. Em seu trabalho, a autora mostra que a partir do momento que os painéis de aço 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 à interação entre pórtico-alvenaria, o conjunto continuou a resistir fortemente às ações laterais, mesmo na presença de fissuras no painel.

Santos (2007) afirma ser 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 de concreto ou de aço transmite esforços à alvenaria, que agora enrijece a estrutura apórticada e contribui para a redução dos deslocamentos horizontais de todo o sistema estrutural.

Embora seja conhecido que as alvenarias contribuem com aumentos de 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.

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.

O modelo de diagonal equivalente (MDE) é o principal modelo empregado para consideração da alvenaria na rigidez da estrutura em projetos, em virtude da simplicidade. Nesse 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. Essa 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).

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 ( $F_{rr}$ ). Algumas das expressões propostas para determinação do fator de redução da rigidez são apresentadas no Quadro 1, onde  $\alpha_w$  é a porcentagem de abertura da alvenaria. Os respectivos autores estudaram a influência das aberturas em paredes de alvenaria na redução da rigidez de pórticos preenchidos sob o efeito de forças laterais e, a partir disso, desenvolveram diferentes equações para o cálculo do fator de redução da rigidez através de experimentos em escala reduzida de edifícios e simulações numéricas.

Quadro 1 – Principais expressões para o cálculo da largura diagonal equivalente

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

## METODOLOGIA

A plataforma computacional *Mechanical APDL* versão 18.0 foi usada nas análises estáticas que empregam elementos finitos bidimensionais de estado plano e elementos de contato (alvenaria-pórtico) para determinação dos deslocamentos horizontais. Nas análises estáticas de pórticos planos, incluindo os que utilizam o modelo de diagonal equivalente (MDE) sob ações horizontais, foi utilizado o programa FTOOL.

Para a determinação e escolha da expressão do fator de redução da rigidez ( $F_{rr}$ ) devido à presença de aberturas, foram gerados 11 modelos – denominados aqui de modelos MEF – utilizando-se elementos finitos 2D de estado plano, incluindo o problema de contato (programa ANSYS). Com base no critério de mesmo deslocamento horizontal entre modelos (MEF e MDE) para algumas simulações numéricas com análise estática, encontrou-se a largura da diagonal equivalente (programa FTOOL).

## Determinação dos deslocamentos horizontais e largura da diagonal equivalente

Um exemplo de pórtico preenchido simulado com o MDE é apresentado na Figura 1. Nota-se que, para uma análise mais precisa, foram modelados trechos rígidos de pilares e vigas, onde  $H$  é a altura do pavimento,  $L$  o comprimento entre eixos dos pilares e  $F$  a força aplicada no topo do pórtico.

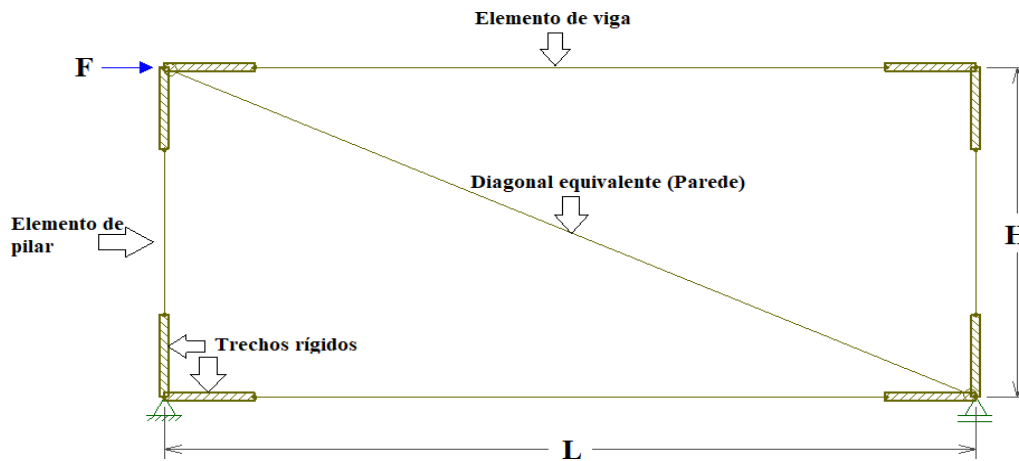


Figura 1 - Modelo de diagonal equivalente

Um exemplo de modelo MEF simulado no programa *Mechanical APDL* com a presença de abertura em parede é apresentado na Figura 2. Foram adotados pórticos preenchidos com alvenaria apresentando aberturas de 100% (sem parede), 80%, 60%, 40%, 20% e 0% (sem abertura) e dois distintos módulos de elasticidade 1200 MPa e 6720 MPa, totalizando 11 modelos. A disposição dos apoios fixos, colocados nos 2 nós de intercessão da viga inferior e os dois pilares, bem como a posição de aplicação da força no topo do pórtico também estão ilustrados na Figura 2.



Figura 2 - Modelo de pórtico preenchido isolado simulado pelo MEF

Nesta análise dos efeitos das aberturas das paredes, todos os elementos do pórtico preenchido possuíam as mesmas dimensões para seções transversais, sendo escolhidos pilares retangulares de 19x40 cm e vigas retangulares de 19x60 cm. Para a parede, definiu-se uma espessura de 19 cm para todos os modelos. Para os materiais, foi adotado nas vigas e pilares de concreto um módulo de elasticidade ( $E$ ) de 25000 MPa bem com um coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

de 0,2. Para a alvenaria, foram escolhidos dois tipos para o bloco: 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, aplicaram-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. O coeficiente de Poisson para a alvenaria de blocos cerâmicos foi de 0,15 e para a alvenaria de blocos de concreto, 0,20.

Para o contato concreto-alvenaria, foi utilizado um coeficiente de atrito igual a 0,5 e uma 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 simuladas com o elemento finito PLANE182 (definido por 4 nós com 2 graus de liberdade por nó). Sobre a discretização, com base no estudo de refinamento de malha realizado no trabalho de Montandon (2018), adotaram-se elementos finitos de 5 cm x 5 cm (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 (ELU), foi utilizada a seguinte metodologia: aplicou-se no modelo sem alvenaria de preenchimento uma força horizontal que causasse um deslocamento relativo entre andares que não superasse o permitido pela ABNT NBR 6118 (2014). Com a metodologia mencionada, obteve-se a força horizontal de 289 kN. Esta força foi aplicada em ambos os modelos MEF e MDE.

Após a definição de todas as propriedades e carregamento, todos os 11 modelos de pórticos preenchidos foram processados nos programas *Mechanical* APDL e FTOOL. Dessa forma, foram obtidos todos os deslocamentos horizontais para cada um dos modelos e 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. A partir dos valores de diagonal equivalente foram calculados os fatores de redução da rigidez através da Equação 1, onde:  $\alpha_f$  é a largura da diagonal equivalente para o caso de parede com abertura e  $\alpha_p$  é a largura da diagonal equivalente para o caso de parede sem abertura.

$$F_{rr} = \frac{\alpha_f}{\alpha_p} \quad (1)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Efeito das aberturas na rigidez lateral dos pórticos

A variação dos deslocamentos horizontais no ponto de aplicação da força em função da porcentagem de aberturas da alvenaria é apresentada no gráfico da Figura 3. Os deslocamentos foram obtidos a partir dos 11 modelos MEF com o uso do programa *Mechanical* APDL.

Observa-se que o aumento da porcentagem de abertura da alvenaria conduz ao aumento do deslocamento horizontal, como mostrado no gráfico da Figura 3. Por outro lado, a presença da alvenaria de preenchimento contribui para a redução dos deslocamentos horizontais, aumentando a rigidez lateral da estrutura. Nota-se que, ao comparar o caso de  $E_a = 1200$  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  $E_a = 6720$  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.

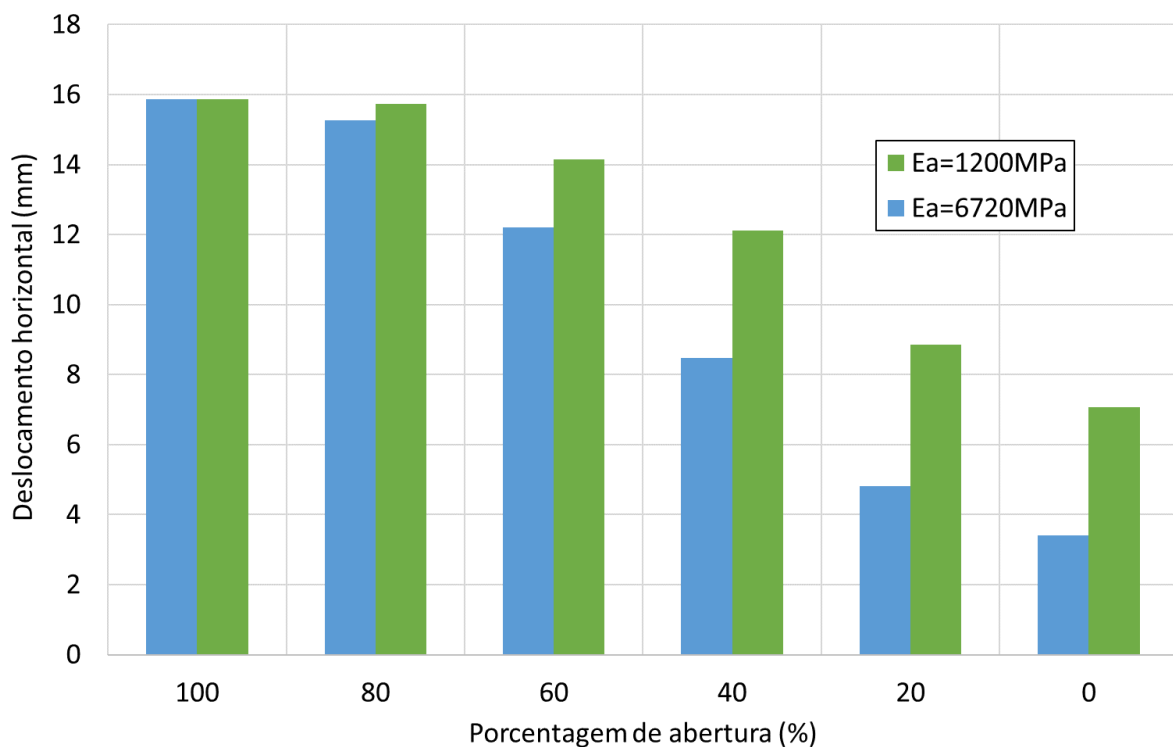


Figura 3 - Deslocamentos horizontais no ponto de aplicação da força

A alvenaria com módulo de elasticidade maior (6720 MPa) apresentou um deslocamento horizontal menor em relação a alvenaria menos rígida, como é apresentado no gráfico da Figura 3. Tal resultado já era esperado, uma vez que a alvenaria mais rígida irá contribuir mais para o aumento da rigidez de toda a estrutura.

No entanto, observou-se que para os dois tipos de alvenaria estudadas via ANSYS *Mechanical* APDL, 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, indicando que a partir desta pode-se desconsiderar a sua contribuição na rigidez da estrutura.

### Determinação das larguras da diagonal equivalente e determinação do fator de redução da rigidez

Conforme a metodologia apresentada anteriormente, foram determinadas as larguras da diagonal equivalente para os 11 modelos estudados, como mostrado no Quadro 2.

É observada uma tendência de que alvenarias mais rígidas ( $E=6720$  MPa) tenham uma largura da diagonal menor do que alvenarias menos rígidas ( $E=1200$  MPa), isso para mesma porcentagem de abertura, o que já era esperado uma vez que, por ser mais rígida, a alvenaria não iria precisar de blocos com grande largura como apresenta o Quadro 2.

Quadro 2 - Largura da diagonal equivalente

Porcentagem de abertura (%)	Diagonal equivalente via ANSYS Mechanical APDL (mm)	
	1200 MPa	6720 MPa
0	843,68	452,44
20	537,9	279,855
40	209,88	105,5
60	81,5	36,194
80	5,77	4,67
100	0	0

A partir dos valores obtidos das larguras diagonais, foi possível determinar, através da Equação (1), o fator de redução da rigidez para cada uma das porcentagens de abertura da alvenaria, como mostra o gráfico da Figura 4, onde também são plotados os valores obtidos pelas principais equações para a determinação da largura da diagonal equivalente.

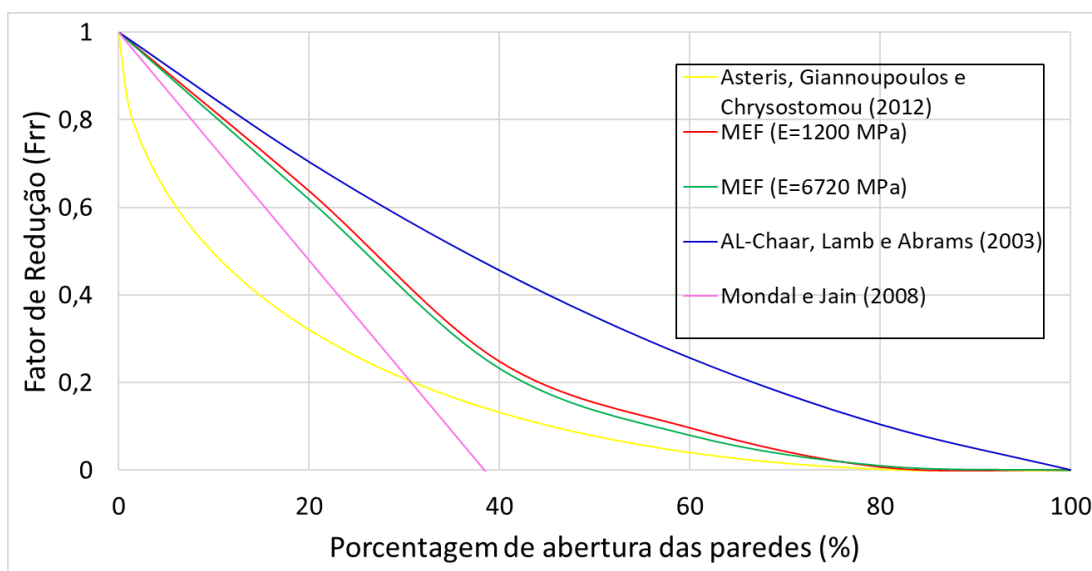


Figura 4 - Fator de redução da rigidez

As curvas geradas a partir dos resultados MEF possuem tendência semelhante às curvas das expressões apresentadas no Quadro 1 como é observado no gráfico da Figura 4, que é a queda da rigidez em função da porcentagem de abertura nas paredes de alvenaria. Ainda é possível inferir pelo gráfico da Figura 4 que a variação do módulo de elasticidade da alvenaria pouco interfere no fator de redução da rigidez, já que as duas curvas praticamente coincidem.

Foram plotadas também as curvas das principais equações para a determinação do fator de redução da rigidez e com base na Figura 4, para análises via ANSYS APDL, 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, porém contra a segurança. Nesse sentido, a expressão de Mondal e Jain (2008) é a mais apropriada.

Para porcentagens de abertura igual ou acima de 40%, a expressão de Mondal e Jain (2008) não mais se aplica. 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).

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos de forma numérica neste artigo, foi possível encontrar evidências que constataam a contribuição da alvenaria na rigidez global da estrutura. Comparando os casos de pórticos com alvenaria e sem aberturas com os pórticos sem alvenaria, para análises via ANSYS *Mechanical* APDL, foi observada diminuição do deslocamento horizontal de 55% para a alvenaria com  $E = 1200$  MPa e de 79% para a alvenaria com  $E = 6720$  MPa. Estes números confirmam um relevante ganho de rigidez obtido com o uso de alvenarias participantes. Para pórticos preenchidos que possuam porcentagens de abertura acima de 80%, a contribuição da alvenaria frente às ações horizontais é praticamente nula, evidenciando que a partir desta porcentagem de abertura a participação da alvenaria pode ser desprezada. A rigidez lateral da estrutura decresce com o aumento da porcentagem de aberturas das alvenarias, com consequente aumento dos deslocamentos horizontais.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro pela bolsa de produtividade em pesquisa ao segundo autor, referente ao processo 308720/2018-0.

## REFERÊNCIAS

- 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 16868-1: Alvenaria estrutural. Parte: 1 – Projeto. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- 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.
- 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.



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>

MADIA, F. C. A. R. Estudo de pórticos preenchidos com alvenaria. 142 f. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

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.

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

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.