

ALVENARIA PARTICIPANTE EM PÓRTICO DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

INFILL SHEAR WALLS IN PRECAST CONCRETE FRAMES

Wallison Angelim Medeiros¹

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, wamedeiros@hotmail.com

Guilherme Aris Parsekian²

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, parsekian.ufscar@gmail.com

Resumo

O presente trabalho apresenta estudo sobre alvenaria estrutural construída dentro de pórticos em concreto pré-moldado dimensionada como parte do sistema de contraventamento das edificações, definindo esse tipo de elemento como Alvenaria Participante. São identificados os principais detalhes construtivos das paredes de alvenaria participante que influenciam o comportamento do pórtico pré-moldado frente às ações horizontais. No Brasil, a contribuição dessas paredes não é considerada no dimensionamento da estrutura devido à falta de informações e à sua complexidade, o que leva a projetos mais conservadores. Neste estudo, identifica-se os principais detalhes construtivos das paredes de alvenaria participante que influenciam no contraventamento das edificações. Também, são consideradas as variáveis e mecanismos que algumas das principais normas internacionais utilizam na análise de alvenaria participante em pórticos para a estabilidade das estruturas. Além de, realizar a comparação entre esses mecanismos normatizados e o modelo realizado a partir do uso de ferramenta computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF). Mesmo existindo unanimidade quanto aos efeitos de enrijecimento no pórtico pela alvenaria participante, percebe-se que a formalização de sua consideração no contraventamento de edifícios de estruturas pré-moldadas requer um maior conhecimento do meio técnico. Este trabalho visa, portanto, contribuir para divulgar e analisar criticamente os detalhes construtivos e os métodos usuais para consideração da alvenaria participante no projeto de edifícios.

Palavras-chave: Pórtico pré-moldado. Alvenaria participante. Detalhes construtivos. MEF.

Abstract

The present work presents a study on structural masonry built inside precast concrete frames dimensioned as part of the system of bracing of buildings, defining this type of element as Infill Shear Wall. Identified the main constructive details of the masonry infill walls that influence the behavior of the precast frame against the horizontal actions. In Brazil, the contribution of these walls is not considered in the design of the structure due to the lack of information and its complexity, which leads to a more conservative design. In this study, identified the main constructive details of the infilled masonry walls that influence the bracing of the buildings. Also, considered the variables and mechanisms that some of the leading international standards used in the analysis of masonry infill walls in frames for the stability of structures. Also, were used the comparison between these standard mechanisms and the model made from the use of a computational tool using the Finite Element Method (FEM). Although there is unanimity regarding the effects of stiffening in the portico by the participant masonry, it is perceived that the formalization of its consideration in the bracing of buildings of precast structures requires a greater knowledge of the technical environment. This work aims, therefore, to contribute to disseminate and critically analyze the constructive details and the usual methods to consider the infill shear wall in the design of buildings.

Keywords: Precast frame. Infill shear wall. Constructive details. FEM.

How to cite this article:

MEDEIROS, Wallison Angelim; PARSEKIAN, Guilherme Aris. Alvenaria participante em pórtico de concreto pré-moldado. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 3, p. 234-245, set. 2018. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650860>>. Acesso em: 16 set. 2018. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v9i3.8650860>.

Introdução

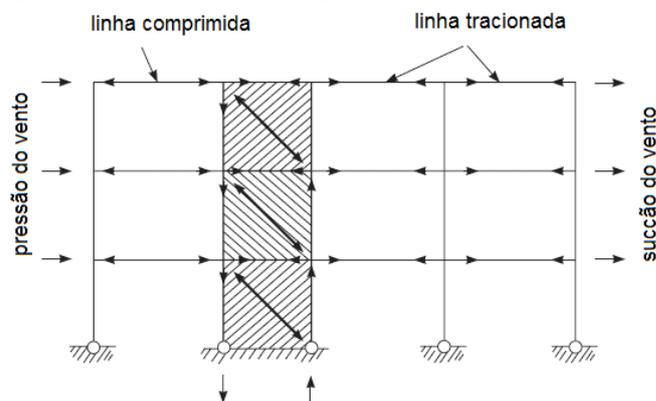
A escassez de espaço para a construção nos grandes centros urbanos, o avanço científico na engenharia civil e no desenvolvimento e uso racional de materiais, juntamente com a constante busca pela melhoria no desempenho, construtibilidade e sustentabilidade das obras civis, trouxe ao mercado métodos construtivos como o concreto pré-moldado e a alvenaria estrutural. O sistema construtivo em concreto pré-moldado possibilita que a obra seja realizada com mais rapidez e menor valor de mão de obra, permitindo ainda, uma redução na perda de materiais, o que significa uma obra mais prática, eficiente e de qualidade. A alvenaria estrutural é um sistema construtivo onde os elementos que desempenham a função estrutural são os mesmos que fazem a vedação da edificação, admitindo assim uma maior racionalização. Este sistema tem sido cada vez mais utilizado na construção civil por apresentar vantagens como custo competitivo, menor prazo de execução e bom desempenho térmico e acústico. A construção mista é, por definição, rentável, porque maximiza as vantagens estruturais e arquitetônicas na utilização de componentes de diferentes materiais. A técnica requer a cooperação de arquitetos, engenheiros consultores, fabricantes, fornecedores e empreiteiros. É possível que algumas demandas de clientes e de arquitetura possam ser satisfeitas apenas usando construção mista.

Quando a altura de uma estrutura pré-moldada porticada e articulada atinge certos limites, normalmente cerca de três andares, o sistema estrutural para resistir às ações verticais e horizontais por meio de pilares isolados usualmente torna-se antieconômico. Os momentos de flexão resultantes dessas ações em construções com esse sistema estrutural são consideravelmente elevados, conduzindo a um projeto não econômico – os pilares são elementos capazes de resistir melhor a cargas de compressão, não a momentos fletores. Para minimizar os momentos nos pilares pode-se utilizar o sistema com alvenaria participante no plano do pórtico, a alvenaria participante é a alvenaria estrutural construída dentro de um pórtico e dimensionada como parte do sistema de contraventamento. As forças horizontais são transferidas através de uma diagonal comprimida no plano da parede participante, conforme demonstrado na Figura 1. A ação composta do pórtico flexível juntamente com a parede de alvenaria participante aumenta consideravelmente sua rigidez, minimizando a flexão dos pilares.

O uso das paredes de alvenaria participante em estruturas pré-moldadas já é previsto em disposições de normas e em recomendações técnicas de organizações e associações internacionais, porém, não são comumente usadas e geralmente limitadas a edifícios de baixa altura, conforme (ACKER, 2013; ELLIOTT, 2017). Além disso, são

poucos e raros os estudos que tratam sobre o preenchimento de alvenaria para contraventamento em pórticos pré-moldados, havendo diversos parâmetros que carecem de pesquisa mais aprofundada. No Brasil, estes estudos são ainda mais incomuns, visto a falta de especificações em normas brasileiras.

Figura 1 – Pórtico preenchido com carga lateral



Fonte: Adaptado de Elliot (2017).

A alvenaria comumente já está presente nessas obras, cumprindo a função de separar espaços como divisórias, bem como elemento de vedação das fachadas do edifício. Embora tenham grande rigidez e resistência, as paredes de preenchimento de alvenaria são frequentemente tratadas como elementos não-estruturais, não sendo consideradas para resistir às ações laterais de vento, sísmicas e outras. As ações laterais e de gravidade são projetadas para serem suportadas apenas pelo quadro delimitador. O presente trabalho apresenta uma investigação exploratória, onde inicialmente se explica o que é, e como funciona o painel de alvenaria participante, e em seguida analisa a evolução dos modelos para paredes participantes ao longo do tempo. Na sequência descreve-se os detalhes construtivos mais significativos que devem ser observados e considerados para permitir levar em conta a influência das alvenarias participantes na estabilidade da edificação. Por fim, demonstra-se como as contribuições das paredes de alvenaria participante são tratadas pelas normas internacionais canadense e americana. Objetiva-se com isso, contribuir para a divulgação dos detalhes construtivos, métodos usuais e vantagens da consideração da alvenaria participante nos projetos estruturais.

Alvenaria Participante

Na construção moderna, paredes de alvenaria são usadas extensivamente para preencher pórticos de aço, concreto armado e pré-moldado devido à facilidade executiva, ótimo desempenho térmico e acústico, resistência ao impacto e outras características. Devido à falta de informação de normas brasileiras, em projetos, a prática tem sido a de ignorar a interação entre a parede de

alvenaria de preenchimento e o quadro circundante. Entretanto, os profissionais da construção civil usualmente têm ciência que a alvenaria participante contribui para a rigidez lateral das estruturas. Todavia não é senso comum perceber que a interação entre as paredes de preenchimento e o quadro circundante pode levar a esforços em determinados pontos superiores aos previstos no modelo simplificado (KOUTROMANOS *et al.*, 2011).

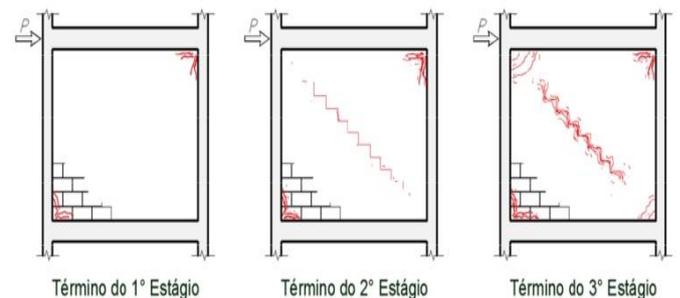
Sempre que as paredes são destinadas para vedação, não são projetadas para contribuir com a transmissão de cargas, tanto horizontal quanto vertical. Contudo, para esta suposição ser válida, deve haver um espaço vazio entre pórtico e painel. Ao inserir as paredes de preenchimento, que alteram a distribuição das forças, pode induzir situações estruturais não regulares, uma vez que a distribuição assimétrica das paredes pode levar a regiões com maior rigidez, ocasionando torções do corpo principal da estrutura. Portanto, a não consideração das paredes de preenchimento podem conduzir a uma concepção insegura além de antieconômica (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2013).

A participação da alvenaria de preenchimento em resistir a ação lateral foi observada pela primeira vez, quando Rathbun (1938) *apud* Alvarenga (2002), publicou pesquisa sobre a força do vento em edifícios altos. O autor constatou, no Edifício Empire State, situado em Nova Iorque, que durante uma tempestade com rajadas de vento excedendo a 145 km/h, a deformação no edifício era muito menor que a prevista. Isso foi explicado pela alta rigidez dos painéis de alvenaria, que dessa forma impediu distorções no pórtico de aço. Quando os painéis foram solicitados além de sua capacidade de fissuração, houve uma diminuição acentuada de sua rigidez. Consequentemente, ocorreram deformações indicando que o pórtico de aço havia iniciado sua participação na resistência à ação do vento. Devida à interação entre pórtico-painel, o conjunto continuou a resistir fortemente as ações laterais, mesmo na presença de fissuras no painel.

Conforme Seah (1998) a primeira pesquisa publicada sobre pórticos preenchidos submetidos a elevadas forças horizontais foi a realizada por Polyakov (1956), que descreveu os três estágios de comportamento de pórticos preenchidos submetido a ação lateral. No primeiro estágio, o painel de alvenaria e os membros do pórtico estrutural se comportam como uma unidade monolítica. Essa fase termina quando começam a desenvolver fendas de separação nas interfaces do painel-pórtico, com exceção de pequenas regiões onde as tensões de compressão são transmitidas do pórtico para o painel, nos dois cantos diagonalmente opostos. O segundo estágio é caracterizado por um encurtamento da diagonal comprimida e alongamento da diagonal tracionada. Essa fase termina com a fissuração da alvenaria de preenchimento ao longo

da diagonal comprimida, que ocorre, geralmente, de forma escalonada nas juntas horizontais e verticais. No terceiro estágio, o conjunto estrutural continua a resistir a uma ação crescente, apesar da presença das fissuras na diagonal comprimida que continuam a ampliar e novas começam a surgir. Essa é considerada como sendo a fase final, uma vez que o sistema não tem condição de atender ao estado limite de serviço, visto o aparecimento de grandes fissuras. Na Figura 2, a seguir, observa-se o comportamento dos três estágios descritos por Polyakov (1956).

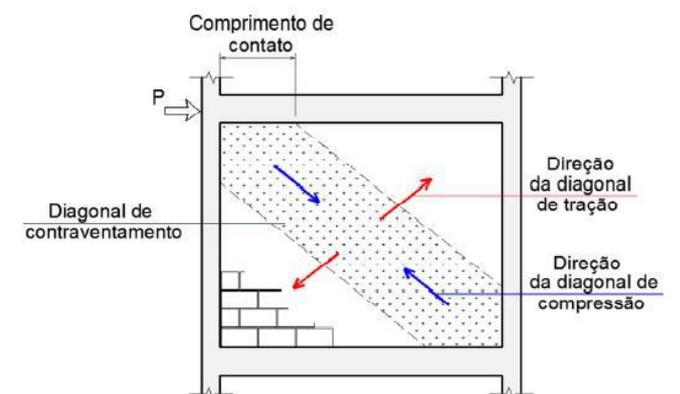
Figura 2 – Estágios de comportamento de pórticos preenchidos submetidos a carregamento



Fonte: Adaptado de Polyakov (1956).

O comportamento das paredes de alvenaria de preenchimento foi estudado experimentalmente e analiticamente. Smith (1966) investigou o comportamento utilizando modelos de elementos finitos. Smith e Carter (1969), Smith e Coull (1991) e Mainstone (1971) utilizaram a abordagem de uma única diagonal comprimida para simular o comportamento de paredes de preenchimento sob carga monotônica, conforme apresentado na Figura 3. Asteris (2008) relatou que representar a parede por uma única diagonal comprimida é ineficaz na modelagem do comportamento complexo de painéis de preenchimento. Em testes experimentais, Nazief e Korany (2013) comparou os resultados de diferentes prescrições de projeto de alguns códigos e normas em relação a largura da diagonal comprimida e rigidez inicial da parede de preenchimento.

Figura 3 – Abordagem de diagonal comprimida



Fonte: Madia (2012).

Macleod e Liauw (1974) adotaram um método para analisar o pórtico preenchido por intermédio de uma estrutura equivalente que representasse todo o sistema composto. Kwan e Liauw (1983) desenvolveram uma teoria do colapso plástico para o preenchimento de alvenaria com base em testes de preenchimento de micro concreto. Todos os autores comprovaram que a presença dos painéis de preenchimento provoca um considerável aumento da rigidez global e do momento de inércia no plano do quadro composto, bem como um aumento de energia dissipada, além de redução considerável da probabilidade de colapso, mesmo em casos de quadros preenchidos defeituosos, quando adequadamente projetados.

De acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2013) os principais modos de ruptura de pórticos preenchidos com alvenaria são: dupla diagonal comprimida, ruptura por tração diagonal, ruptura por esmagamento dos cantos ou ruptura dos elementos do pórtico. Essas paredes também devem ser concebidas para resistir a ações fora do plano, que possam ser exercidas sobre elas. Os investigadores indicaram que as paredes são capazes de suportar acréscimos de carregamento, embora fissuras diagonais tenham se formado na parede; portanto, a fissura diagonal não deve ser considerada como sendo o modo de falha estrutural (EL-DAKHAKHNI; ELGAALY; HAMID, 2003; FLANAGAN; BENNETT, 2001).

No Brasil, Braguim (1989) realizou análises experimentais caracterizando as ligações semirrígidas de pórticos de aço e, posteriormente, verificou a influência das ligações no comportamento de pórticos preenchidos. Alvarenga (2002) apresenta um estudo envolvendo uma série de ensaios experimentais com protótipos de aço em escala real, utilizando-se blocos de concreto celular autoclavados. Em seu trabalho, confirmou-se mais uma vez a contribuição dos painéis na rigidez e resistência de pórticos preenchidos, sob os aspectos teórico, experimental e numérico; e foi proposta, uma recomendação para cálculo da carga de ruptura em painéis de pórticos preenchidos, baseando-se no método das bielas e tirantes. Madia (2012) realizou estudos sobre o comportamento de estruturas porticadas preenchidas com painéis de alvenaria, para fins de contraventamento de edificações, averiguando o modelo de diagonais comprimidas e indicando critérios para projetos, com o exemplo de um edifício de 22 pavimentos. Silva (2014) apresenta estudo sobre pórticos de concreto armado preenchidos com alvenaria submetidos a ações horizontais de Estado Limite de Serviço (ELS). Em seu trabalho, foi considerado a contribuição do painel de preenchimento com e sem aberturas, empregando modelos em diagonal equivalente e elementos finitos.

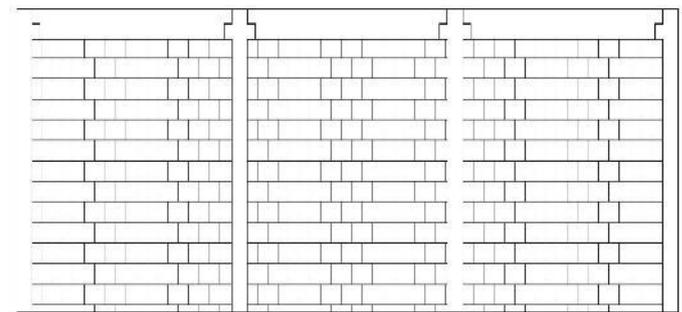
Nenhum dos pesquisadores investigaram os pórticos de concreto pré-moldado e as variáveis que poderiam influenciar seu comportamento.

Detalhes construtivos que afetam o comportamento da alvenaria participante

Rigidez do painel de alvenaria participante

Mehrabi *et al.* (1996) estudaram a consequência de se utilizar um preenchimento mais rígido com a finalidade de realçar o comportamento da parede participante. Foi realizada uma comparação entre dois tipos de preenchimento: o “forte”, construído a partir de tijolos de concreto maciços com argamassa em toda a face de assentamento e o “fraco” construído a partir de blocos vazados de concreto com argamassa de assentamento apenas nas laterais. Foi relatado que o uso de preenchimento forte levou ao aumento da rigidez da parede participante 35 vezes maior do que o fraco. Al-Chaar (1998) e Al-Chaar e Abrams (2001) além de concordarem com o estudo de Mehrabi *et al.* (1996), observaram que a rigidez aumenta com o aumento da quantidade de painéis preenchidos de pórtico de múltiplos tramos (Figura 4); porém, este aumento não segue um padrão linear. Também foi relatado que o preenchimento de alvenaria era capaz de sustentar a carga mesmo após o dano ter ocorrido (em comparação com o pórtico vazio). O mesmo comportamento foi relatado por Dawe, Liu e Seah (2001) em sua investigação numérica. Moghaddam (2004) realizou uma investigação semelhante usando armaduras de aço em blocos grauteados. Todos concordaram que o aumento da rigidez da parede de alvenaria participante traz aumento da capacidade lateral do sistema global.

Figura 4 – Pórtico com múltiplos tramos



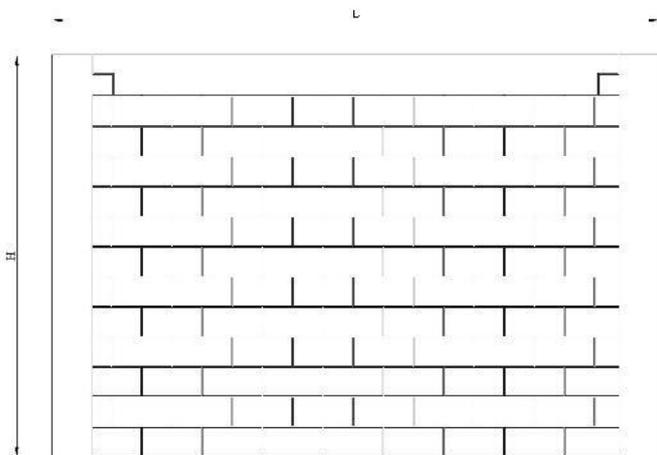
Fonte: Os autores.

Relação das dimensões do painel

A relação das dimensões da parede alvenaria participante é definida como a relação entre altura/comprimento (Figura 5). Mehrabi *et al.* (1996) estudaram o efeito da relação de dimensões do painel de alvenaria no desempenho dos pórticos preenchidos de alvenaria participante. Eles relataram que os painéis de

preenchimento com relações menores mantiveram um carregamento lateral maior que aqueles de relação de dimensões maiores. Para h/ℓ igual a 1/2, a resistência lateral é 17% maior do que h/ℓ igual a 2/3. Flanagan e Bennett (1999) e Dawe, Liu e Seah (2001), conduziram uma investigação semelhante e chegaram à mesma conclusão que Mehrabi *et al.* (1996). Portanto, pode-se observar que para uma mesma altura, o acréscimo do comprimento da parede participante significa aumento de sua rigidez e de sua capacidade de suportar as ações laterais.

Figura 5 – Relação h/l



Fonte: Os autores.

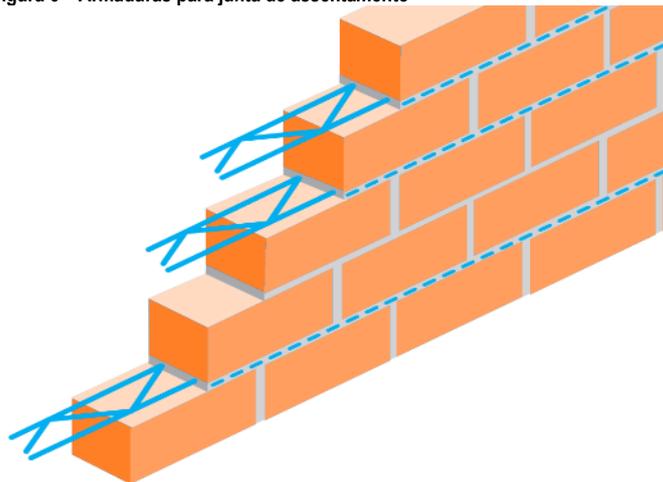
Armaduras para junta de assentamento

Dawe e Seah (1989) estudaram o efeito da presença de armaduras para junta de assentamento (Figura 6) sobre a capacidade das paredes de alvenaria participante. Eles relatam que a presença da armadura na junta de assentamento teve um efeito menor sobre a capacidade de carga final. No entanto, a ausência delas levou ao aumento da fissuração no painel de preenchimento; consequentemente, uma diminuição na rigidez inicial da parede.

Aberturas nas paredes de alvenaria participante

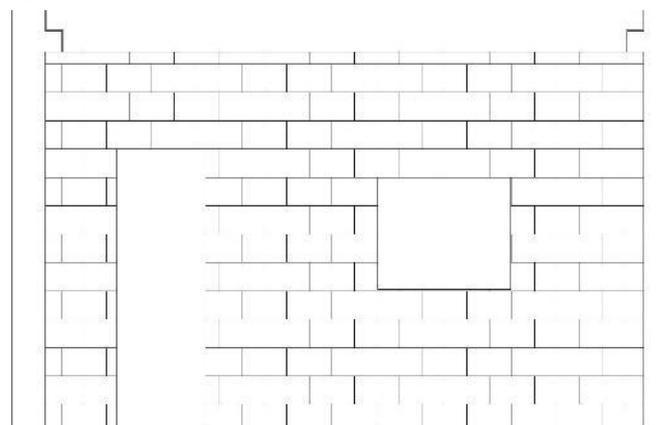
A presença de aberturas de portas e janelas (Figura 7) foi estudada experimentalmente e numericamente por vários pesquisadores em todo o mundo. Dawe e Seah (1989), Chiou, Tzeng e Liou (1999), Flanagan e Bennett (1999), Alvarenga (2002) e Silva (2014) entre outros, investigaram o comportamento de paredes de preenchimento com aberturas de portas e/ou janelas em vários locais. Todos concordaram que a presença de abertura reduz a rigidez inicial, bem como a capacidade final das paredes de alvenaria participante. A redução foi maior para aberturas maiores e mais próximas ao ponto de carregamento.

Figura 6 – Armaduras para junta de assentamento



Fonte: Os autores.

Figura 7 – Presença de aberturas nas paredes participantes



Fonte: Os autores.

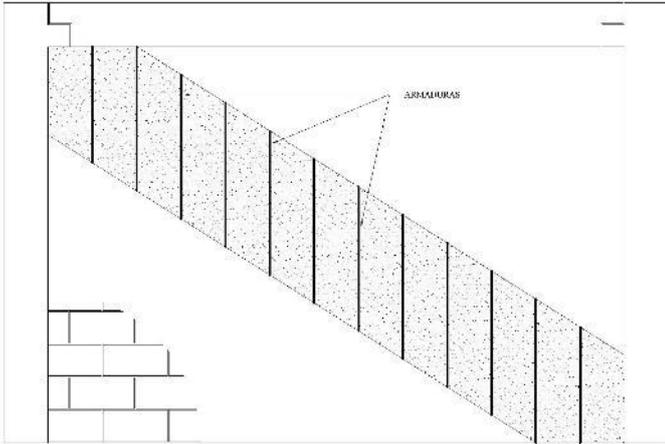
Armadura na diagonal comprimida

Apesar de não ser um procedimento prático, Dawe e Seah (1989) estudaram o efeito da presença de barras verticais de aço de comprimento igual à largura esperada da diagonal comprimida, conforme demonstrado na Figura 8, sobre a capacidade de carga das paredes de alvenaria participantes. Foi relatado que essa técnica levou ao aumento da rigidez inicial e da capacidade final em 76% e 31%, respectivamente, do painel.

Presença de cinta intermediária

Dawe e Seah (1989) relataram que o uso de cinta intermediária (Figura 9) teve um efeito menor sobre a capacidade de carga máxima de paredes de preenchimento (aumento de apenas 3%). Observou-se que a primeira grande fissura coincidiu com a obtenção da carga final. Além disso, verificou-se que a rigidez pré-pico era 38% maior do que a da parede de alvenaria participante padrão que não possuía cinta intermediária.

Figura 8 – Armadura na diagonal comprimida



Fonte: Os autores.

Figura 9 – Cinta intermediária em alvenaria



Fonte: Os autores.

Carregamento vertical

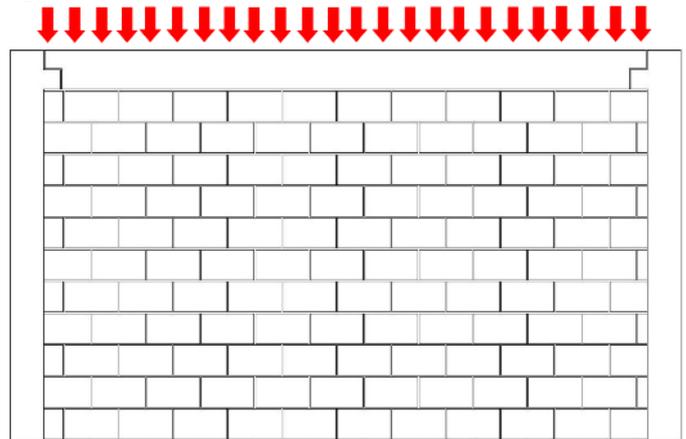
Mehrabi *et al.* (1996) observaram que o aumento do valor da carga vertical, conforme esquematizado na Figura 10, levou ao aumento da rigidez e da resistência máxima da amostra. A presença dessa carga aumenta o confinamento do preenchimento de alvenaria; portanto, aumenta sua capacidade. Esta afirmação é verdade até certo limite. Se a carga vertical aplicada exceder um valor ótimo, a fissuração no preenchimento ocorreria, reduzindo a capacidade do sistema (DAWE; LIU; SEAH, 2001). Chen e Liu (2016) através de seu estudo com elementos finitos obtiveram a mesma conclusão.

Contato entre painel e pórtico

Dawe e Seah (1989) observaram que não houve mudança significativa na rigidez inicial da parede de alvenaria participante quando nenhuma argamassa era colocada entre as abas dos pilares metálicos e o preenchimento de alvenaria, assim como apresentado na Figura 11. Somente a carga final foi reduzida em 16% devido à diminuição da

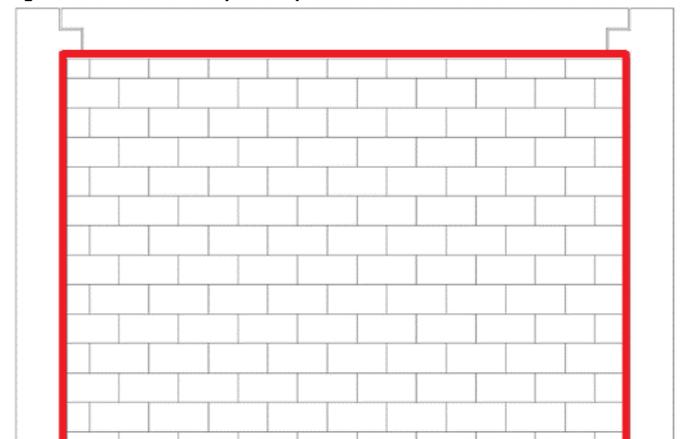
resistência à compressão do painel de alvenaria utilizado. Eles também analisaram o desempenho das paredes de preenchimento quando elas foram ligadas com os pilares adjacentes com chapas em forma de “L”. A presença das chapas de ligação não afetou a rigidez inicial do painel de alvenaria participante em comparação com aqueles sem ligação; no entanto, a carga final foi reduzida em 20%. Além disso, o padrão de fissuração da parede de preenchimento não era o mesmo que o espécime padrão; isto foi atribuído à restrição proporcionada pela presença de ligação entre as colunas e a parede de preenchimento. O suporte de compressão diagonal não foi completamente desenvolvido devido a estas extensas fissuras. Uma conclusão semelhante foi relatada por Flanagan e Bennett (1999) e Dawe, Liu e Seah (2001). Dawe e Seah (1989) também analisou a presença de folgas entre a viga superior e o painel de preenchimento de alvenaria, concluindo que a existência desse espaço reduz o início da ruptura e a capacidade de carga máxima em 50%.

Figura 10 – Parede participante com carregamento vertical



Fonte: Os autores.

Figura 11 – Contato entre painel e pórtico



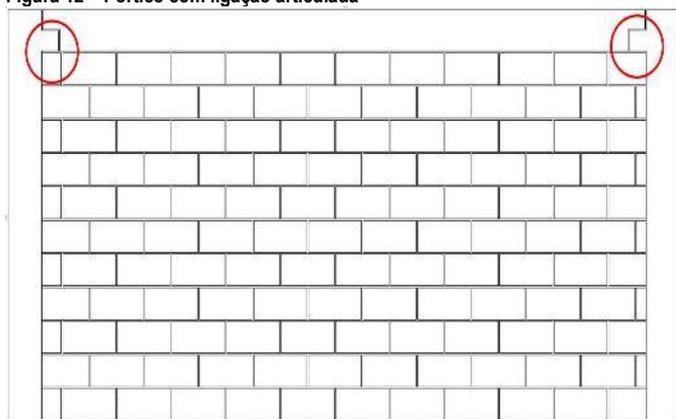
Fonte: Os autores.

Rigidez do pórtico

Alguns pesquisadores estudaram o efeito da rigidez do pórtico em parede de alvenaria participante. Dawe e Seah

(1989) e Dawe, Liu e Seah, (2001) estudaram esse comportamento experimentalmente e numericamente. O uso de um pórtico completamente articulado, comumente utilizado em estruturas pré-moldadas e indicado na Figura 12, levou a redução na carga final, bem como da fissuração principal inicial em 50% e 25%, respectivamente. Uma observação interessante foi a maneira pela qual os quadros articulados deformaram levando à separação entre o preenchimento de alvenaria e o pórtico, parecido como o que ocorreu no corpo-de-prova com folgas entre preenchimento e pórtico. Flanagan e Bennett (1999) analisaram o efeito da rigidez da estrutura sobre o desempenho das paredes de alvenaria participante. Os pórticos com a seção transversal maior dos pilares, obtiveram aumento da rigidez levando a um acréscimo da capacidade final da estrutura, isso se deve ao aumento do contato entre pórtico e a parede de alvenaria participante, que eleva o confinamento exercido sobre a parede de preenchimento, conduzindo ao acréscimo da capacidade final, uma vez que na condição anteriormente estudada por Flanagan e Bennett (1999), as paredes eram mais largas que o pórtico.

Figura 12 – Pórtico com ligação articulada

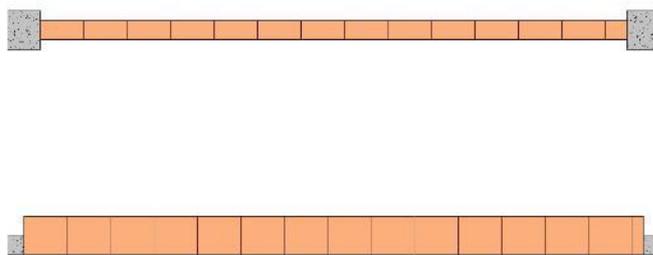


Fonte: Os autores.

Posição da parede participante em relação ao pórtico

Flanagan e Bennett (1999) estudaram o comportamento de pórticos preenchido de alvenaria quando a posição da parede não estava na linha central do pórtico, apenas 65% da espessura do painel estava dentro do quadro. Na Figura 13, observa-se painel de alvenaria na posição central do pórtico e outro com espessura maior que a do pórtico. Quando o carregamento foi aplicado na linha central do pórtico, a parede foi sujeita a uma combinação de efeitos de curvatura no-plano e fora-do-plano. Foi observado que ocorreu um desprendimento considerável da argamassa devido ao efeito fora-do-plano. A rigidez inicial da parede participante e carga máxima de sua contribuição foram reduzidas em 30% e 25%, respectivamente, em comparação com o ensaio onde a parede estava no centro do pórtico.

Figura 13 – Posição da parede em relação ao pórtico (vista ortogonal superior)



Fonte: Os autores.

Recomendações de projeto conforme diferentes códigos e normas

Assim como a norma brasileira, a maioria dos códigos e normas de projeto atuais ignoram a contribuição da parede de alvenaria participante em resistir à ação lateral aplicada na estrutura, entretanto, algumas normas e recomendações já contemplam. A seguir será apresentado um pequeno resumo sobre a consideração das paredes de alvenaria participante. Podendo-se perceber que, apesar de todas as normas/códigos apresentados considerarem o aumento da rigidez, a norma americana demonstra um posicionamento mais conservador que restringe em algumas situações o seu uso.

Norma canadense CSA 304 (CSA, 2014)

O enfoque da norma canadense é baseado no modelo de diagonal comprimida, e originalmente foi incluído na edição de 2004 abordando paredes participantes armadas e não armadas. De acordo com essa norma, a força lateral que atua no pórtico é transmitida para os painéis de alvenaria participante através das interfaces nas extremidades da diagonal comprimida, desenvolvendo assim uma escora de compressão diagonal como mostrado na Figura 3. A escora se desenvolve após ocorrer a fissura ao longo da interface entre pilar e parede. Neste sistema tipo treliça, as vigas atuam como os banzos superiores e inferiores, os pilares como montantes e a porção parede participante sob compressão atua como um membro diagonal (diagonal comprimida). Percebe-se que esta abordagem não deve ser usada para o dimensionamento de paredes participantes com aberturas, uma vez que a ação da diagonal comprimida não pode ser desenvolvida devido à interrupção por aberturas. Também não se deve utilizar essa abordagem quando houver folgas entre o painel de alvenaria e o pórtico, a menos que o projetista seja capaz de mostrar, através de testes ou investigações experimentais, que a ação da diagonal comprimida pode ser formada e todos os outros requisitos estruturais da parede de preenchimento para o contraventamento possam ser desenvolvidos.

O primeiro passo para dimensionamento da parede de alvenaria participante é determinar a geometria da diagonal comprimida, isto é, a sua largura, espessura e comprimento são determinados com base na geometria do pórtico. A largura da diagonal comprimida efetiva, w_{eff} , para o cálculo da capacidade de compressão da diagonal comprimida deve ser tomado como $w/2$ e não pode exceder um quarto do comprimento da diagonal. Para cálculo de deslocamento, a rigidez (K_{eff}) é reduzida em 50%. As equações a seguir indicam as especificações da norma canadense.

$$w = \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_L^2}$$

$$\alpha_h = \frac{\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4E_f I_c h}{E_m t_e \sin 2\theta}}$$

$$\alpha_L = \pi \sqrt[4]{\frac{4E_f I_b \ell}{E_m t_e \sin 2\theta}}$$

$$K_{eff} = \phi_{st} w_{eff} t_e E_m / \ell_s$$

sendo,

α_h : comprimento de contato vertical entre o pórtico e a diagonal comprimida, mm

α_L : comprimento de contato horizontal entre o pórtico e a diagonal comprimida, mm

E_m, E_r : módulos de elasticidade do material da parede de alvenaria e pórtico, respectivamente, em MPa

h, ℓ : altura e comprimento da parede de preenchimento para contraventamento, respectivamente, mm

t_e : soma da espessura das duas faces por bloco oco não totalmente rebocada e a espessura da parede para o bloco sólido ou bloco oco totalmente grauteado, mm

I_c, I_b : momentos de inércia da coluna e a viga do pórtico, respectivamente, mm⁴

θ : $\tan^{-1}(h/\ell)$, graus

ℓ_s : o comprimento da diagonal comprimida menos $w/2$, mm

ϕ_{st} : fator a levar em consideração a redução de rigidez, tomado como 0,5.

A parede de alvenaria participante pode falhar por três modos: cisalhamento por escorregamento da junta horizontal, tração da diagonal com falha por cisalhamento ou falha por compressão da diagonal comprimida. A resistência à força lateral de uma parede de alvenaria participante, V_r , será a menor entre esses três possíveis modos de ruptura.

A norma canadense considera o cisalhamento por escorregamento da junta horizontal como o mecanismo de

falha mais crítico, pois ele pode impor aumento considerável das forças de cisalhamento nos pilares do pórtico e reduzir substancialmente a altura efetiva do pilar, podendo levar a uma falha prematura do pilar, comprometendo assim a resistência lateral do painel de alvenaria participante.

Código Americano (TMS 402/602-2016)

O código americano também segue a abordagem da diagonal comprimida e não permite paredes de altura parcial ou paredes com aberturas compartilhem a resistência lateral. Pequenas folgas entre a parede de preenchimento e o pórtico, que são fechadas quando a ação lateral é aplicada, podem existir desde que seja considerada redução de 50% na resistência e rigidez. Uma restrição da relação altura/espessura de 30 é dada pelo código para assegurar a estabilidade da construção da parede. De acordo com o TMS 402/602 (2016) as paredes de preenchimento falham devido a ruptura da diagonal comprimida (esmagamento dos cantos), cisalhamento por tração diagonal ou cisalhamento por escorregamento da junta horizontal.

A capacidade da parede de preenchimento é definida como sendo o menor valor das equações seguintes:

$V_{n\ inf}$ = menor entre

- $150 t_{net\ inf} f_{m'}$
- Componente horizontal da força na diagonal comprimida para um deslocamento de 25 mm

V_n = menor entre

- $0,33 A_n \sqrt{f_{m'}}$
- $0,83 A_n$
- $0,26 A_n + N_u$

onde,

A_n : Área de seção transversal líquida da alvenaria

$f_{m'}$: Resistência à compressão de alvenaria

N_u : fator da força de compressão atuando normal à superfície de cisalhamento que está associada à ação horizontal final

$t_{net\ inf}$: Espessura líquida da parede de preenchimento

$V_{n\ inf}$: Resistência ao cisalhamento horizontal no plano da parede de preenchimento

V_n : Resistência ao cisalhamento

A largura da parede de preenchimento é especificada conforme equacionamento abaixo.

$$w_{inf} = \frac{0,3}{\lambda_{strut} \cdot \cos \theta_{strut}}$$

$$\lambda_{strut} = \sqrt[4]{\frac{E_m t_{net\ inf} \sin 2\theta_{strut}}{4 \cdot E_{bc} I_{bc} h_{inf}}}$$

sendo,

E_{bc} : Módulo de elasticidade para pórtico

E_m : Módulo de elasticidade para alvenaria

h_{inf} : Altura da parede de preenchimento
 I_{bc} : Momento de inércia do pórtico
 λ_{strut} : Parâmetro característico de rigidez

Modelo desenvolvido

Para demonstrar a influência da alvenaria participante no contraventamento de edificações, analisou-se um edifício em concreto pré-moldado de três pavimentos, localizado na Universidade Federal de São Carlos - UFSCar (Figura 14). A estrutura do pórtico analisada apresenta altura total de 12m e largura de 12m, com vigas de seção igual a 40x80cm e pilares de seção igual a 40x60cm. A resistência característica considerada para o concreto foi de 40MPa, com módulo igual a 35400MPa. Para o painel, considerou-se que era composto por blocos de concreto de 6,0MPa, com espessura de 14cm, tendo módulo de elasticidade igual a 3600MPa e resistência à compressão de projeto de 1,68MPa. A força do vento foi calculada conforme a ABNT NBR 6123 e os deslocamentos horizontais foram obtidos considerando-se os efeitos de 2ª ordem da estrutura utilizando o método $P\Delta$ e o parâmetro γ_z . Foi analisado o deslocamento máximo do edifício, para cada pavimento. Em um primeiro modelo considerou-se apenas os elementos estruturais, sem a contribuição da alvenaria participante. Nos demais modelos, considerou-se o preenchimento em uma única parede, através do método da diagonal equivalente, segundo CSA e TMS citadas anteriormente. Para cada um desses métodos, foi considerado painel composto por blocos de concreto e por blocos cerâmicos. Finalmente, se utilizou do Método dos Elementos Finitos, para modelagem numérica considerando-se três diferentes detalhes: a parede totalmente encunhada com a estrutura (sem juntas entre o painel e a estrutura), a existência de um “gap”, ou seja, uma pequena abertura de 3cm entre o topo do painel e o fundo da viga; e um último modelo com o “gap” preenchido com uma argamassa forte presente apenas nas regiões dos consolos e preenchido com argamassa fraca no restante da junta (Figura 15). Para se limitar o número de modelos em Elementos Finitos utilizou-se o painel composto por bloco de concreto.

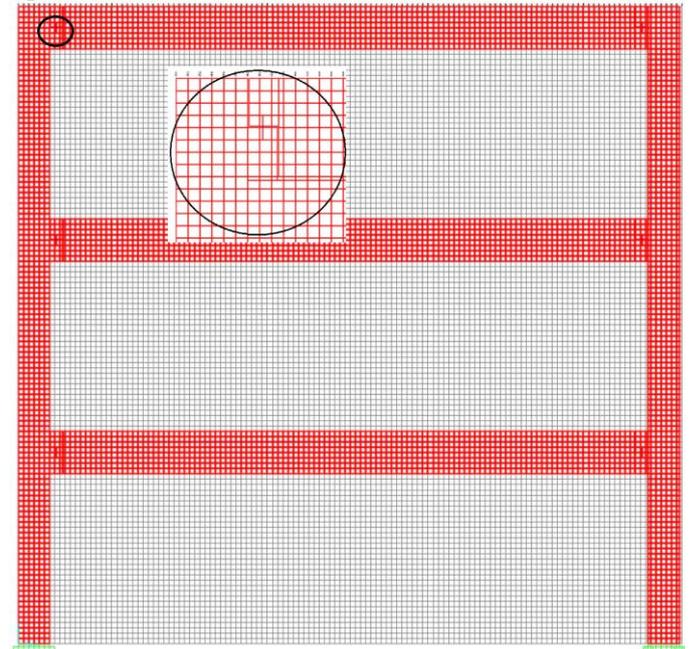
Foram realizados diferentes modelos no software e para cada modelo atentou-se apenas para o valor de deslocamento horizontal do edifício. Estima-se que a análise desse parâmetro apenas foi satisfatória para conhecer os efeitos na rigidez da estrutura com a consideração do painel de alvenaria participante. Assim, fez-se um gráfico em que são apresentados os valores de deslocamento horizontal em cada pavimento para cada modelo (Figura 16). Cada um desses resultados foi comparado com o deslocamento da estrutura sem preenchimento, obtendo, assim, o aumento de rigidez percentual para cada método.

Figura 14 – Edifício AT-7 (UFSCar)



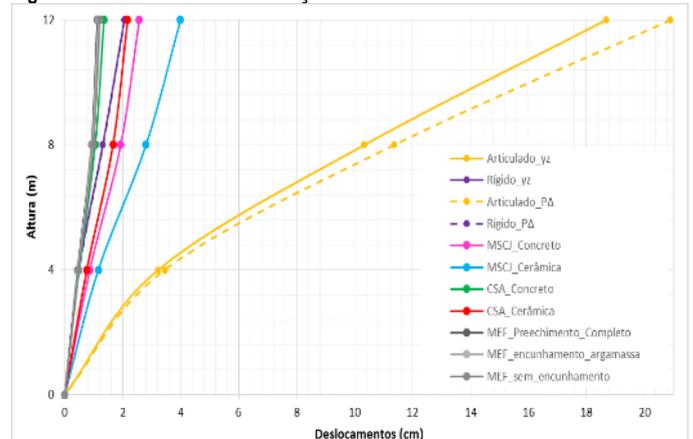
Fonte: Os autores.

Figura 15 – Malha utilizada no modelo EF e detalhe dente consolo



Fonte: Os autores

Figura 16 – Resultados das simulações com cada modelo e detalhe construtivo



Fonte: Os autores.

Resultados e discussão

Após a análise dos resultados foi possível perceber que os métodos normativos: TMS (código americano) e CSA

(norma canadense), que se baseiam no modelo de diagonal equivalente, são mais conservadores, ou seja, são os métodos que apresentam a menor contribuição na rigidez da estrutura quando comparados ao Método de Elementos Finitos. Considerando tal fato, pode-se dizer que isso se deve, em parte, por serem métodos normativos e terem, embutidos, alguns coeficientes de segurança e até mesmo cálculos mais conservadores. O MEF, demonstrou resultados com menor deslocabilidade, o que representa uma estrutura mais rígida. Isso pode ser explicado, de certo modo, pois esse método leva em conta todo o painel, contando com toda a sua área, diferentemente do método da diagonal comprimida que considera apenas parte dessa parede.

Percebe-se que a existência de uma argamassa mais forte abaixo dos consolos e argamassa mais fraca abaixo da viga fica bastante próximo ao completamente preenchido. Nota-se uma pequena redução de rigidez no edifício quando se deixa a abertura entre o topo do painel e o fundo da viga, comparado com a situação totalmente preenchida. Essa redução foi bem pequena, da ordem de 4,3% para os modelos estudados. A situação mais indicada seria justamente a de deixar essa abertura horizontal entre o painel e a viga, isso porque, apesar do pequeno aumento da deslocabilidade lateral, não se tem transmissão vertical de esforços (fato que pode comprometer a integridade do painel). Apesar do aumento da deslocabilidade, a situação com abertura leva a uma estrutura muito mais rígida que a sem preenchimento: entre 20 e 25%, para os casos estudados. Ou seja, com o “gap” superior não se tem o risco de supercarregar a alvenaria, devido a transmissões verticais, continuando a ter boa rigidez lateral.

Comparando a mudança do material de preenchimento, percebe-se que, para todos os métodos, o painel composto por blocos de concreto levou a um modelo mais rígido. Nos métodos por diagonal equivalente, as larguras equivalentes, para painel com bloco cerâmico, eram sempre maiores que para painel com bloco de concreto; porém, mesmo assim, devido à diferença no módulo de elasticidade do painel, a deslocabilidade foi menor para blocos de concreto (material mais rígido que o cerâmico). Os aumentos de rigidez lateral variaram de 9% (caso mais conservador) a 26%, dependendo do método escolhido. Lembra-se que esse aumento de rigidez reflete um aumento global de rigidez, de toda a estrutura, ou seja, a

redução é referente ao deslocamento do edifício como um todo e não de uma estrutura isolada. Dessa forma, mostra-se que é possível obter expressivos aumentos na rigidez de um edifício. Ressalta-se ainda que esse ganho foi obtido apenas pela consideração de uma parede. Tal constatação poderia, caso aplicada, levar a interessantes ganhos econômicos, já que seria possível reduzir as dimensões do pórtico e obter assim uma estrutura mais eficiente.

Conclusão

A alvenaria participante pode ser representada de diferentes maneiras na análise estrutural, como através da diagonal equivalente (segundo diferentes recomendações) e através do MEF. Os métodos variaram bastante entre si quanto aos resultados obtidos para o deslocamento da estrutura. Apesar dessas diferenças, todos os métodos foram unânimes em apontar que painéis de alvenaria participantes contribuem de modo considerável para aumentar a rigidez lateral da estrutura.

Os métodos normativos baseados na diagonal equivalente se mostraram mais conservadores quanto ao aumento da rigidez lateral. Isso se deve pelo conceito da diagonal representar um estágio mais avançado do processo de transmissão de cargas (onde já houve a perda de contato do painel com o pórtico). A diagonal equivalente se mostrou um método mais simples de aplicação, com análises numéricas mais rápidas, o que facilita para o emprego de análises estruturais.

A influência das paredes de alvenaria participantes nas estruturas pré-moldadas é de extrema importância, e devem ser levadas em considerações para se ter edificações mais eficientes e seguras. Os detalhes construtivos para as alvenarias participantes são de grande relevância visto que influenciam diretamente a sua contribuição.

O assunto apesar de já ser aceito e utilizado em várias partes do mundo, ainda é carente de pesquisa pelo meio técnico brasileiro. Portanto, ampliar o conhecimento a respeito das técnicas construtivas, dos detalhes construtivos que as influenciam e a forma como são analisadas e tratadas pelo resto do mundo é de grande valor para o bom e correto uso do sistema na construção civil nacional.

Referências

ACKER, A. V. **Planning and Design Handbook on Precast Build Structures**. fib, 2013.

AL-CHAAR, G. **Non-ductile behavior of reinforced concrete frames with masonry infill panels subjected to in-plane loading**. Illinois: University of Illinois, 1998.

- AL-CHAAR, G.; ABRAMS, D. Parametric studies on seismic behavior of frame infill systems. In: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 9., 2001, Fredericton. **Proceedings** Fredericton: CMDC, jun. 2001.
- ALVARENGA, R. C. S. S. **Análise Teórico-Experimental de Estruturas Compostas de Pórticos de Aço Preenchidos com Alvenaria de Concreto Celular Autoclavado**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- ASTERIS, P. G. Finite element micro-modeling of infilled frames. **Electronic Journal of Structural Engineering**. v. 8, p. 11, 2008.
- BRAGUIM, J. R. **Contribuições ao Estudo do Enrijecimento de Estruturas de Aço em Edifícios de Múltiplos Pavimentos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- CHEN, X.; LIU, Y. A finite element study of the effect of vertical loading on the in-plane behavior of concrete masonry infills bounded by steel frames. **Engineering Structures**. v. 117, p. 118-129, jun 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.010>
- CHIOU, Y.; TZENG, J.; LIOU, Y. Experimental and analytical study of masonry infilled frames. **Journal of Structural Engineering**. New York, v. 125, p. 1109-1117, out 1999.
- CSA, C. S. A. **CSA Standards S304-14**. 2014.
- DAWE, J. L.; LIU, Y.; SEAH, C. K. A parametric study of masonry infilled steel frames. **Canadian Journal of Civil Engineering**. New York, v. 28, p. 149-157, fev 2001. <https://doi.org/10.1139/100-084>
- DAWE, J. L.; SEAH, C. K. Behavior of masonry infilled steel frames. **Canadian Journal of Civil Engineering**. Ottawa, v. 16, p. 865-876, 1989.
- EL-DAKHAKHNI, W. W.; ELGAALY, M.; HAMID, A. A. Three-strut model for concrete masonry-infilled frames. **Journal of Structural Engineering**. v. 129, p. 177-185, fev 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:2\(177\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(177))
- ELLIOTT, K. S. **Precast Concrete Structures**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2017.
- FLANAGAN, R. D.; BENNETT, R. M. In-plane behavior of structural clay tile infilled frames. **Journal of Structural Engineering**. New York, v. 125, p. 590-599, jun 1999.
- KOUTROMANOS, I. *et al.* Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads. **Computers and Structures**. v. 89, p. 1026-1037, fev 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.01.006>
- KWAN, K. H.; LIAUW, T. C. Plastic Theory of Infilled Frames with Finite Interface Shear Strength. **Proceedings of the Institute of Civil Engineers**. v. 75, n. 4, p. 379-396, dez 1983. <https://doi.org/10.1680/iicep.1983.1384>
- MACLEOD, I. A.; LIAUW, T. C. Analysis of shear wall buildings by frame method. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**. v. 57, n. 1, p. 179-182, mar 1974. <https://doi.org/10.1680/iicep.1974.4108>
- MADIA, F. C. A. R. **Estudo de pórticos preenchidos com alvenaria**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Pós-Graduação em Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- MAINSTONE, R. J. On the Stiffness and Strengths of Infilled Frames. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Supplement (iv), p. 57-90, 1971.
- MEHRABI, A. B. *et al.* Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. **Journal of Structural Engineering**. New York, v. 122, p. 228-237, mar 1996.
- MOGHADDAM, H. A. Lateral load behavior os masonry infilled steel frames with repais and retrofit. **Journal of Structural Engineering**. New York, v. 130, p. 56-63, jan 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:1\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:1(56))
- NAZIEF, M. A.; KORANY, Y. Diagonal strut model for masonry infill shear walls in various standards and codes. In: Canadian Masonry Symposium, 12th, 2013, Vancouver. **Proceedings ...** Vancouver: CMDC, jun 2013.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2a. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013.

POLYAKOV, S. V. **Masonry in framed buildings**. Moscow, 1956.

RATHBUN, J. C. Wind forces on a tall building. **Proceedings American Society of Civil Engineers**. v. 64, p. 1335-1375, 1938 *apud* ALVARENGA, R. C. S. S. **Análise Teórico-Experimental de Estruturas Compostas de Pórticos de Aço Preenchidos com Alvenaria de Concreto Celular Autoclavado**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SEAH, C. K. **A Universal approach for analysis and design of masonry infilled frame structures**. Thesis (PhD in Civil Engineering) – University of New Brunswick, New Brunswick, 1998.

SILVA, L. R. **Modelagem de Pórticos de Concreto Armado Preenchidos com a Consideração de Aberturas nos Painéis de Alvenaria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SMITH, B. S. Behaviour of square infilled frames. **Journal of the Structural Division**. ASCE, New York, v. 92, p. 381-403, 1966.

SMITH, B. S.; CARTER, C. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**. v. 44, n. 1, p. 31-48, set 1969.
<https://doi.org/10.1680/iicep.1969.7290>

SMITH, B. S.; COULL, A. Infilled-Frame Structures. In: SMITH, B. S.; COULL, A. **Tall Building Structures: Analysis and Design**. New York: Wiley, 1991. Cap. 8, p. 168-183.

THE MASONRY SOCIETY, TMS 402/602 - **Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures**. 2016.

¹ **Wallison Angelim Medeiros**

Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia de Estruturas e Construção Civil (PPGECiv-UFSCar). Endereço postal: Rod. Washington Luis, km 235, São Carlos, SP, Brasil, 13565-905

² **Guilherme Aris Parsekian**

Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia de Estruturas (EESC-USP). Doutor em Engenharia de Construção Civil (Poli-USP). Professor Associado na Universidade Federal de São Carlos. Endereço postal: Rod. Washington Luis, km 235, São Carlos, SP, Brasil, 13565-905