

ASPECTOS RELATIVOS À CONTRIBUIÇÃO DOS PAINÉIS DE ALVENARIA EM EDIFÍCIOS ALTOS

Giselle Moraes da Fonseca¹

Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Paulo B. Lourenço²

Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal

Roberto Márcio da Silva³

Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

RESUMO

O presente trabalho consiste na análise de painéis de alvenaria confinados em estruturas reticuladas, submetidos a cargas laterais. Seu objetivo passa pelo estudo do comportamento da alvenaria nesta situação e sua contribuição na rigidez da estrutura como um todo. A alvenaria é considerada homogênea e se estabelece uma relação entre deformações médias e tensões médias da alvenaria. Se adota esta modelação para prever o colapso de painéis que irão ser testados na Universidade Federal de Minas Gerais durante o corrente ano. Para ilustrar a aplicação prática e a potencialidade da alvenaria é apresentado também um exemplo de pórtico de edifício alto, que comprova o enrijecimento que este material produz.

1. INTRODUÇÃO

Dos materiais com utilização generalizada existentes na construção de edificações, presentes ainda nos dias atuais, a alvenaria é o mais antigo. Segundo referências, Viollet-Le-Duc (1945), surge possivelmente à 15.000 anos com os nômades, que justapunham pedras sem qualquer material ligante, pela simples necessidade de criar refúgios contra os intempéries e animais predadores. A passos lentos, com o aumento das necessidades e exigências das civilizações, passou-se a fazer uso de barro como material ligante, que permitia melhor acomodação das pedras, construção de edificações mais altas, proteção contra ventos e chuvas, além de conferir resistência e estabilidade à moradia. A civilização romana foi a

¹ Mestranda

² Professor Auxiliar

³ Professor Adjunto

responsável pelos maiores avanços no que diz respeito ao desenvolvimento de técnicas construtivas e materiais utilizados. Marco Vitruvius Pollio, arquiteto-engenheiro romano, por volta de 25AC escreve Os Dez Livros de Arquitetura, Guerra (1995), o mais famoso tratado de arquitetura, que traz entre as técnicas de construção romana, métodos de construção de paredes mais econômicas e de execução mais simples, e ainda o emprego de pozolana, um novo material de propriedades até então desconhecidas, mas que revolucionaria os sistemas construtivos. Este material se tratava de uma cinza vulcânica que endurecia em contato com a água e produzia grandes resistências às construções, e que mais tarde comporia o indispensável aglomerante cimento.

Com uma sucessão de grandes invenções, os processos manufaturados dão lugar ao maquinário, surgem as máquinas a vapor, e em 1858 a introdução do forno Hoffman vem otimizar a fabricação dos blocos para alvenaria. Desde então, intensas pesquisas e trabalhos são realizados com o fim de tornarem eficientes os processos de industrialização. Atualmente, são vários os tipos de unidades de alvenaria, com diferentes materiais e formas. Pode-se encontrar desde tijolos cerâmicos maciços, com técnica de fabricação rudimentar, até blocos industrializados de concreto, concreto celular auto-clavados, sílico-calcáreos, solo-cimento, ou mesmo cerâmicos, cujas técnicas de fabricação proporcionam aos blocos características tais como leveza, capacidade termo-acústica, altas resistências físicas e mecânicas, além de tornarem cada vez mais práticos os métodos construtivos. Estes métodos, em paralelo, acompanharam esta evolução e hoje pode-se encontrar alvenarias apropriadas tanto para simples função de vedação, como para funções estruturais. Alvenarias grauteadas, alvenarias armadas, alvenarias protendidas, painéis pré-fabricados de alvenaria, são alguns dos exemplos deste vasto leque de opções. Essas facilidades associadas a outras vantagens econômicas, fatores de segurança, estética, durabilidade, funcionalidade, que a alvenaria proporciona viabilizam sua utilização na construção. No Brasil é vasta a aplicação da alvenaria como vedação, porém menos freqüente com função estrutural. Entretanto, as crescentes pesquisas teóricas e experimentais em torno deste amplo assunto, têm tornado o uso da alvenaria cada vez menos empírico, e com isso ganhando a fiabilidade dos profissionais da área.

No projeto convencional de edificações porticadas, dimensionado através de cálculos baseados na Teoria da Resistência dos Materiais, não é habitual considerar a contribuição conferida pelos elementos que compõem a estrutura, como lajes e paredes, apesar de ser ciente o apreciável aumento à resistência das edificações que estas proporcionam. Particularmente, as lajes e paredes fornecem considerável rigidez ao contraventamento dessas estruturas, quando sujeitas a carregamento lateral, provindo de ações de vento ou ações sísmicas. Sobre tudo as paredes trazem substanciais economias, visto que substituem as barras de travamento dispostas na diagonal dos pórticos, além de poderem ser conjugadas com pórticos mais flexíveis (menos robustos). Sendo as paredes elementos indispensáveis à construção dos edifícios, é de grande conveniência utilizá-las como parte integrante da estrutura.

O presente trabalho consiste na análise de painéis de alvenaria confinados em estruturas reticuladas, submetidos a cargas laterais. Seu objetivo passa pelo estudo do comportamento da alvenaria nesta situação e sua contribuição na rigidez da estrutura como um todo.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

As primeiras investigações realizadas em direção à avaliação da influência de painéis de preenchimento em estruturas reticuladas foram feitas nos Estados Unidos da América, no

período de 1949 a 1956. Trataram-se de testes realizados com pórticos de concreto armado preenchidos com painéis de concreto e painéis de alvenaria, cujo objetivo era avaliar a resistência destes painéis sujeitos a esforços oriundos de explosões atômicas, Whitney *et al* (1955).

A partir de 1957 alguns pesquisadores analisaram estes resultados experimentais, assim como outros realizados com pórticos de aço também preenchidos com painéis de concreto ou alvenaria, sujeitos a cargas laterais que simulassem ações de vento e sismo, ver Benjamim e Williams (1957,1958), e Wood (1958). Houve muitas conclusões em torno do aumento de rigidez que estes painéis forneciam à estrutura, e conseqüente redução dos deslocamentos horizontais dos pórticos. Entretanto, as tentativas de obtenção de procedimentos de cálculo que estimassem o comportamento do conjunto pórtico-painel não chegaram a resultados satisfatórios. No início dos anos 60, surgem as primeiras propostas de cálculo na área, e Holmes (1961) introduz o conceito da barra equivalente, que consiste em atribuir a presença de uma barra diagonal fictícia contraventando o pórtico, e que fornece rigidez equivalente à rigidez que o painel proporciona à estrutura. Com isso, propõe expressões de cálculo que estimam a força horizontal de ruptura e o deslocamento horizontal do pórtico. Em seu trabalho, confere aumento de rigidez da estrutura na ordem de 300% a 400% para preenchimentos com painéis de concreto de $f_c = 16$ MPa, e de 75% a 105% para painéis de alvenaria de $f_c = 3$ MPa. Seus resultados teóricos são comparados com resultados experimentais realizados por ele e por outros pesquisadores e chegam a uma média de 90% de precisão para os valores de cargas de colapso. Contudo, o próprio autor recomenda a realização de outros testes e o refinamento do método de cálculo por ele sugerido.

A partir de então, os processos de análise evoluíram em grande escala, e após 1962, Smith (1962,1966), dão grandes contribuições neste sentido. Em suas pesquisas, propõem um método de análise utilizando o conceito da barra diagonal equivalente, e estabelecem uma relação entre o comprimento de contato, entre o pórtico e o painel, e um parâmetro de rigidez relativa. Esta relação permite determinar a largura da barra diagonal equivalente, considerando a mesma espessura e o mesmo material do painel em estudo. Desta maneira, observam dois modos de ruptura: por fissuração repentina da diagonal, onde as fissuras partem do centro da diagonal estendendo-se em direção aos cantos carregados; e por esmagamento dos cantos sujeitos à compressão. Para ambos modos de ruptura, chega a expressões que estimam a resistência do painel. Com isso, consegue representar um ábaco destas resistências em função do parâmetro de rigidez relativa dos pórticos, onde se pode avaliar previamente sob que condições ocorrerá o colapso da estrutura. Mais tarde, Mainstone (1979) substitui as equações teóricas por relações empíricas.

Nesta altura, os estudos se limitaram a ensaios experimentais e tentativas de procedimentos de cálculo que se aproximassem destes resultados experimentais. Com o aprimoramento dos meios informáticos e uso de relações constitutivas mais elaboradas, novas técnicas de cálculo como o Método dos Elementos Finitos tornaram-se possíveis e contribuíram para o progresso das pesquisas de maneira geral. Desta maneira, a partir de 1977, na tentativa de obter soluções mais refinadas, alguns pesquisadores implementaram na análise de pórticos preenchidos por alvenaria, o uso deste método. Dentre estes, Smith e Riddington (1977,1978), avançaram no tema adotando no procedimento de cálculo a existência de atrito na interface pórtico painel, e ainda a simulação de fendas nestas interfaces, que aparecem com o carregamento gradual da estrutura, e portanto levando em consideração seu caráter iterativo. Com estes procedimentos puderam observar três modos de ruptura, sendo: por cisalhamento; por tração na diagonal; e por compressão com esmagamento nos cantos carregados do painel. Pela primeira vez, é introduzido nos procedimentos de cálculo, conceitos relacionados com o

método dos estados limites para o dimensionamento deste tipo de estrutura. Pode-se considerar que estas foram as primeiras análises que levam em conta a não-linearidade geométrica do conjunto pórtico-painel, apesar de se manterem elásticas as propriedades dos materiais.

Contudo, em virtude desses métodos de análise elástica não poderem representar completamente o comportamento estrutural dos pórticos enrijecidos pelos painéis, surgem propostas de análise com base na teoria da plasticidade. Wood (1978) adotou em seus modelos a plasticidade perfeita e impôs uma variável empírica, para reduzir a resistência do painel de preenchimento. Liaum e Kwan (1984), por outro lado, reduzem o resultado superestimado da carga de colapso negligenciando as forças cisalhantes na interface pórtico-painel. Entretanto, outros investigadores, viriam mostrar a importância desta resistência na interface e seu efeito significativo na obtenção da carga de colapso.

Pesquisas mais recentes trazem uma preocupação em modelar de forma mais real as propriedades físicas dos materiais. Dhanasekar e Page (1986), Liauw e Lo (1988) e Schmidt (1989) realizaram análises de pórticos preenchidos por painéis usando modelos ortotrópicos não-lineares ou modelos de fissuração considerando a alvenaria como um material homogêneo. Saneinejad e Hobbs (1995) propõe um método de análise, para projetos em pórticos de aço, baseado em resultados experimentais e em análises não-lineares previamente efetuadas por outros autores, e que leva em conta o comportamento elástico e plástico dos painéis de preenchimento, considerando seus limites de ductilidade. Por sua vez, Mehrabi e Shing (1997) utilizam modelos de fissuração em elementos finitos, para representar os pórticos e unidades de alvenaria e modelos de interface com coesão e dilatância. Deste modo, conseguem simular os efeitos da estrutura e seus mecanismos de falha, exibindo a ruptura dos painéis de alvenaria confinados nos pórticos, e o deslizamento das juntas de argamassa.

Na evolução do tema, pode-se notar o grande número de parâmetros que as análises de pórticos preenchidos por painéis de alvenaria envolvem. O Método dos Elementos Finitos tem se mostrado eficiente no desenvolvimento de investigações que envolvem as mais diferentes situações, Lourenço (1996). A tendência das pesquisas atuais, tem sido aprofundar-se cada vez mais nas minúcias que as análises envolvem, com o fim de tornar cada vez mais fiáveis as previsões teóricas do comportamento dos painéis de alvenaria em estruturas reticuladas.

3. ANÁLISE DE UM PAINEL ISOLADO

O protótipo em estudo, submetido a análise não-linear via método dos elementos finitos, é constituído de um pórtico metálico de um vão e uma altura, preenchido por painel de alvenaria. O pórtico é composto por perfis metálicos de seção I, perfazendo as dimensões reais 3,0 metros de largura por 2,7 metros de altura. O painel de alvenaria é composto por blocos de concreto celular autoclavados, Figura 1. As propriedades dos materiais foram obtidas a partir de ensaios experimentais e podem ser encontradas em Giselle (1997).

No dimensionamento do pórtico, preocupou-se em manter uma flexibilidade compatível como um deslocamento da ordem $h/350$, onde h é a altura do pórtico, de maneira a permitir que a alvenaria absorva maiores esforços, e assim ser possível avaliar seu comportamento. As ligações entre as vigas superior e inferior e os pilares é feita pela ligação de nós, com cotas correspondentes às cotas das ligações semi-rígidas previstas. As bases dos pilares são consideradas perfeitamente engastadas. O modelo foi submetido a carregamento lateral, sendo a aplicação da carga feita gradualmente, para que fosse possível acompanhar a evolução do comportamento e mudança de estado de tensão da estrutura.

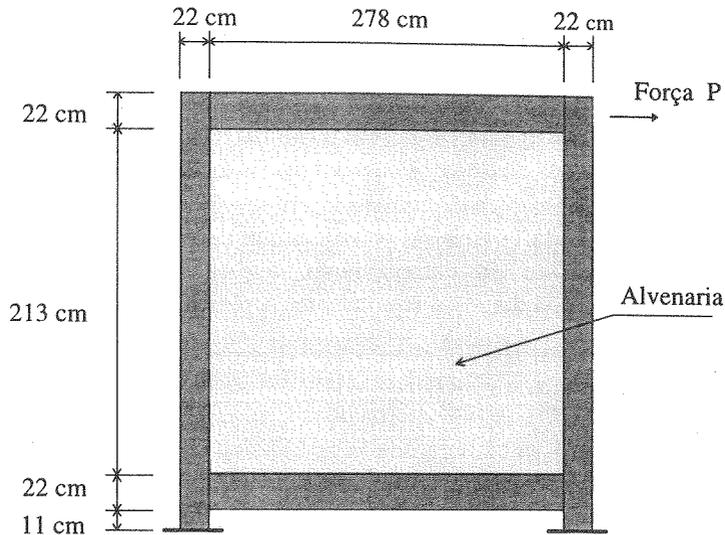


Figura 1 - Representação esquemática do modelo analisado.

Na análise foram utilizados elementos finitos planos de oito nós, com 3×3 pontos de integração de Gauss, tanto para a discretização do pórtico como para a alvenaria, sendo a interface entre estes dois materiais, representadas por elementos de juntas de seis nós com três pontos de integração de Lobatto. A estrutura foi submetida a uma análise não-linear completa, passando pelas alterações oriundas do carregamento lateral a que foi submetida, que abrangem desde os primeiros sinais de plastificação nas interfaces pórtico-painel, até a ruptura por fissuração da diagonal equivalente ao painel.

Como resposta à análise efetuada, obteve-se a curva força-deslocamento que é ilustrada na Figura 2, além das tensões principais, os deslocamentos e as fendas, para cada mudança de estado relevante que a estrutura apresentou, que são ilustradas na Figura 3.

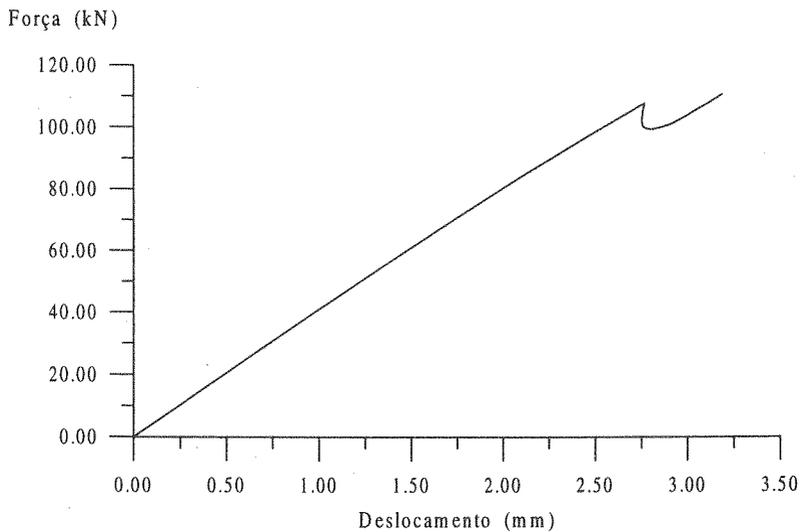


Figura 2 - Gráfico Força \times Deslocamento para pórtico com ligação semi-rígida

A carga de ruptura por fissuração da diagonal equivalente deu-se em torno de 110 kN, com um deslocamento equivalente no ponto de aplicação da carga em torno de 2,75 mm, como ilustra a Figura 2. Logo no início do carregamento, aparecem fissuras na interface pórtico-painel, que se justificam pela aderência nula entre estes materiais, considerada na análise. As fendas iniciam-se para cargas em torno de 10 kN, ou seja, cerca de 10% da carga de ruptura por fissuração da diagonal. Pode-se notar a separação nos cantos não comprimidos do painel, tendo os comprimentos de contato α_n em torno de um terço da altura do painel, e α_l pouco mais de um terço da largura do painel, o que condiz com as predições teóricas, ver Figura 3. Desde esta fase do carregamento, tem-se as tensões principais do painel configuradas sob a forma da diagonal equivalente. A plastificação dos cantos comprimidos do

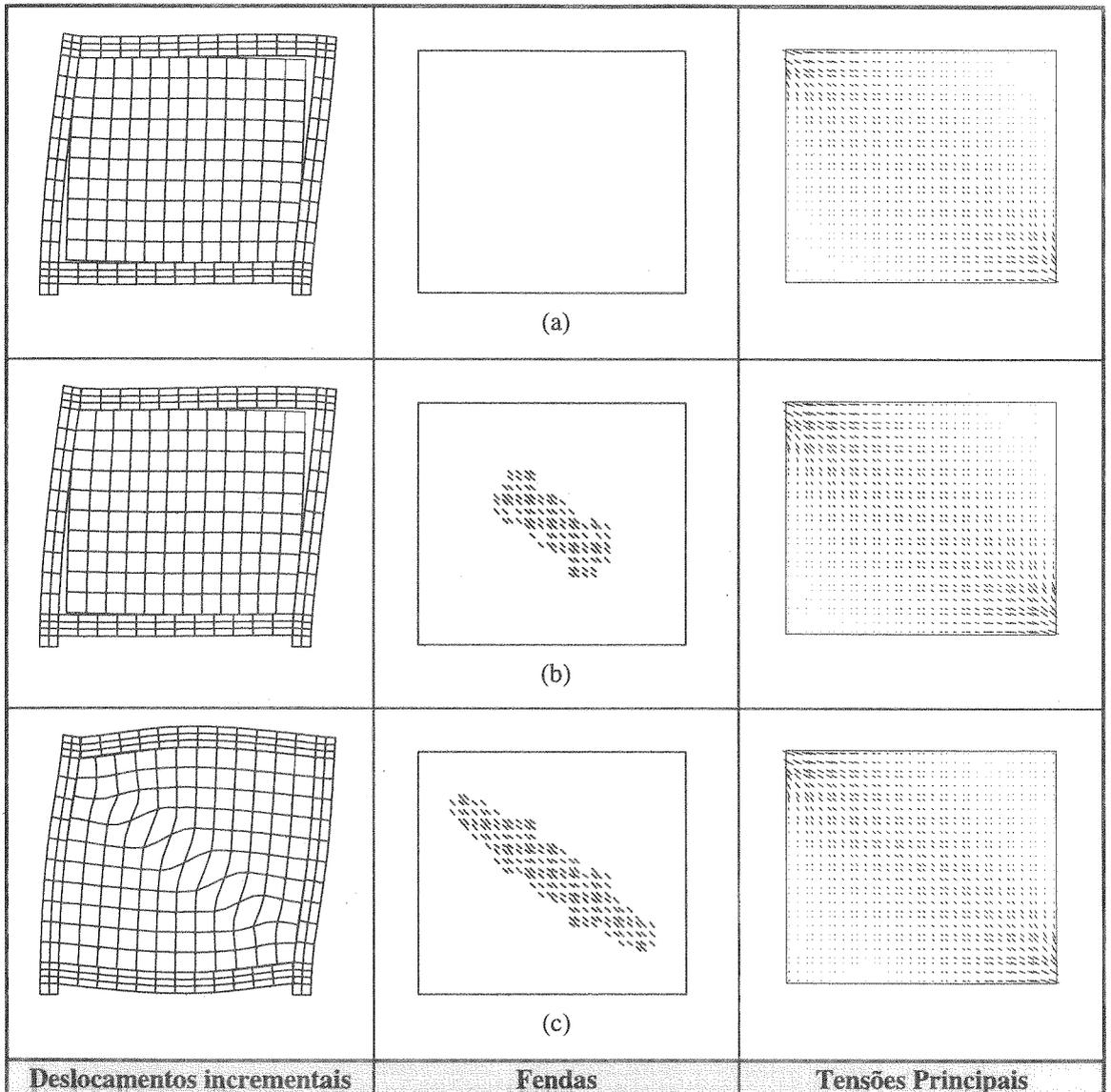


Figura 3 - Resultados da análise:(a) início do carregamento; (b) antes fissuração completa da diagonal; (c) após fissuração completa da diagonal

painel ocorre para cargas em torno de 40 kN, começando com o esmagamento do canto superior esquerdo e avança nos dois cantos comprimidos com o aumento da carga. Quando a carga atinge cerca de 100 kN, iniciam-se as fendas no centro do painel, prolongando-se para os cantos comprimidos com o avanço da carga. Nesta fase nota-se a grande concentração de tensões nestes cantos do painel e a configuração da diagonal equivalente é mais nítida. Com a carga 110 kN ocorre a ruptura por fissuração da diagonal equivalente do painel, com o surgimento de alguns pontos plásticos e a abertura de fendas no centro do painel, que alastram-se em direção aos cantos comprimidos. Logo após esta fase, a estrutura mostra perda de rigidez, como mostra a curva força-deslocamento e ocorre a fissuração completa do painel de alvenaria.

Com o propósito de comparar a influência das ligações entre os pilares e vigas do pórtico no comportamento global desta estrutura, realizou-se o processamento de mais dois modelos variando-se os tipos de ligação. Sendo assim, utilizou-se os mesmos elementos e parâmetros de entrada, tendo apenas que alterar a configuração da malha de elementos finitos por questão de conveniência na ligação dos nós. No primeiro modelo, simulou-se ligações articuladas perfeitas e, no segundo modelo, ligações rígidas perfeitas. As curvas força-deslocamento representadas na Figura 4, mostram que apesar de haver diferenças na rigidez entre os três modelos, estas não são significativas, visto que pouco alteram as cargas de ruptura. Sendo assim, pode-se concluir que é a alvenaria responsável pelo aumento da rigidez global da estrutura.

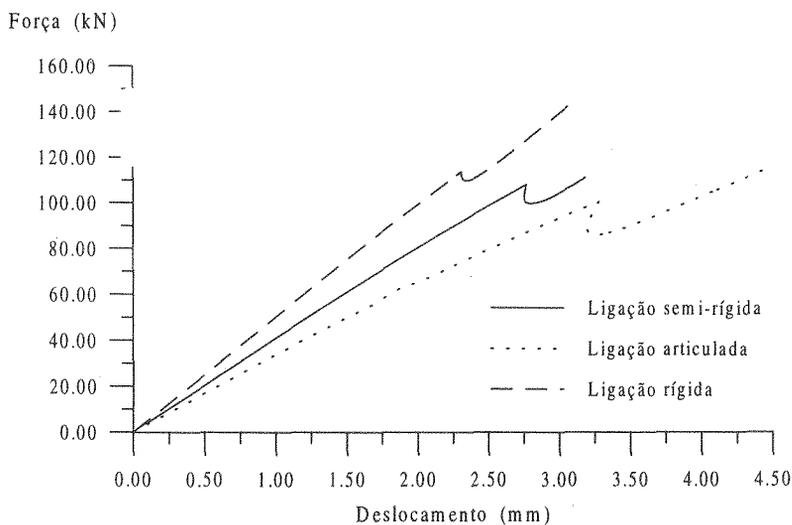


Figura 4 - Comparação das curvas Força × Deslocamento.

4. ANÁLISE DE UM EDIFÍCIO ALTO

Não há dúvidas sobre o enrijecimento que os painéis de alvenaria proporcionam às estruturas reticuladas, e a conveniência de seu uso como função estrutural e de vedação. Muitos foram os trabalhos que procuraram testar e quantificar a contribuição da alvenaria no enrijecimento de pórticos, sejam em pequena escala, sejam em escala real, porém de pequeno

porte. Como visto anteriormente, alguns dos trabalhos geraram procedimentos de cálculo que estimam com razoável precisão, visto os numerosos parâmetros envolvidos, o comportamento da alvenaria como contraventamento.

Contudo, na bibliografia consultada, que abrange pesquisas desenvolvidas desde 1957 a 1997, pouco se encontrou sobre testes dos modelos em edifícios altos. Wood (1958), confere a redução do deslocamento horizontal dos pórticos preenchidos por painéis de alvenaria, no entanto não faz qualquer associação ao cálculo teórico do comportamento dos painéis.

Neste item do trabalho, procurou-se testar o comportamento da alvenaria ao preencher pórticos de edifícios de grande porte, e mensurar sua contribuição na rigidez dessas estruturas. Assim, processou-se o exemplo de um edifício com pórticos metálicos de 20 pavimentos.

4.1 Descrição do Modelo

O exemplo aqui analisado foi extraído de um trabalho, cujo objetivo na altura foi testar um programa de análise não-linear levando em consideração os efeitos de segunda-ordem. O exemplo trata-se de uma estrutura tridimensional de um edifício em aço de vinte andares e com 3 (três) metros de altura cada um dos andares, ver Lavall (1995). Como as análises se limitaram a duas dimensões, algumas simplificações foram feitas com o fim de reduzir o problema a um caso plano. No sentido longitudinal do edifício, a estrutura é contraventada. Porém, no sentido transversal do edifício, admite-se como hipótese de projeto, que os pórticos centrais não participam da contenção lateral do edifício, e que apenas os pórticos de extremidade resistem às cargas laterais. Considera-se também, as lajes como diafragmas

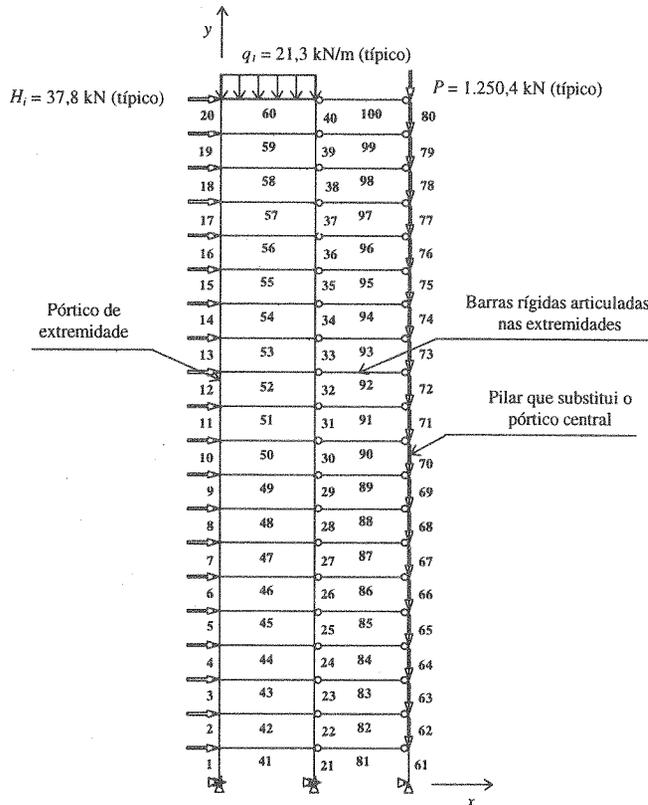


Figura 5 - Esquema estrutural simplificado do edifício para ações horizontais

horizontais rígidos no seu plano e sem rigidez transversal, e assim cada andar tem deslocamentos de corpo rígido.

Aproveitando-se das simetrias geométrica e de carregamento da estrutura, e do fato de que os deslocamentos laterais em cada andar devem ser os mesmos em todos os pórticos, uma vez que são compatibilizados pelas lajes, o arranjo espacial pode ser transformado em um arranjo plano, onde há dois pórticos, um representando os pórticos laterais e o outro representando os pórticos centrais, ligados entre si por barras rígidas articuladas nas extremidades. Considerando, como visto anteriormente, que os pórticos centrais não participam da resistência lateral do conjunto, pode-se simplificar ainda mais a estrutura plana. Para isso, retira-se o pórtico que representa estes outros dois, e transfere-se o seu carregamento à estrutura analisada, além de adaptar alguns dos dados geométricos de seus perfis, ver Figura 5.

O exemplo foi submetido a diferentes análises. Primeiro, processou-se em análise linear o pórtico sem qualquer contraventamento. Desta maneira obteve-se a deformada da estrutura, bem como os deslocamentos e esforços atuantes. Posteriormente, o pórtico foi preenchido por alvenaria, e submetido a análises conservando as propriedades elásticas da alvenaria, porém inserindo ou não juntas de interface pórtico-alvenaria. Por último, analisou-se o pórtico substituindo os painéis de alvenaria pelas diagonais equivalentes previamente calculadas através dos modelos teóricos de análise, onde pode-se comparar os resultados.

4.2 Análise do Pórtico

Para a análise do pórtico foram utilizados elementos de viga planos de três nós, que incluem a deformação por corte. Como resultados da análise, apresentam-se as deformadas da estrutura, ilustradas na Figura 6.

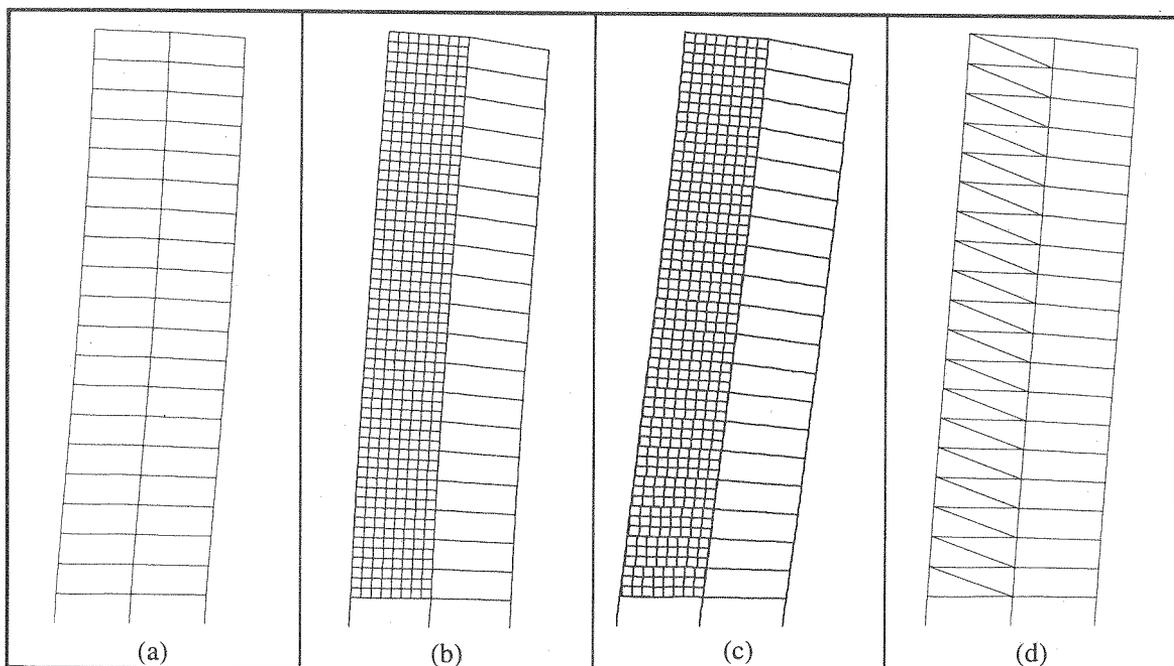
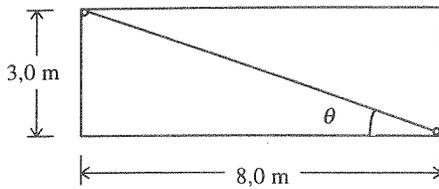


Figura 6 - Deformada da estrutura: (a) pórtico isolado; (b) pórtico com alvenaria e sem juntas; (c) pórtico com alvenaria e com juntas; (d) pórtico com diagonal equivalente

O procedimento adotado para o cálculo da diagonal equivalente, é uma compilação dos estudos desenvolvidos em torno do tema. Para um quadro típico do pórtico, tem-se



$$\begin{aligned}
 h' &= 3,0 \text{ m} \\
 l' &= 8,0 \text{ m} \\
 e &= 0,15 \text{ m} \\
 I_p &= 219.671,0 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \\
 I_v &= 186.545,0 \times 10^{-8} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Figura 7 - Diagonal equivalente

Nesta figura, h' é a altura do quadro do pórtico, l' o comprimento do quadro do pórtico, e a espessura do painel, θ o ângulo que a diagonal equivalente faz com o eixo horizontal, e I_p e I_v são respectivamente os momentos de inércia do pilar e da viga. O valor de $\theta = \tan^{-1}(h'/l') = 20,6^\circ$. Os comprimentos de contato entre o painel e o pilar α_h , e entre o painel e a viga α_l valem

$$\alpha_h = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_a \cdot I_p \cdot h'}{E_{alv} \cdot t \cdot \sin 2\theta}} = 3,59 \text{ m} \quad \text{e} \quad \alpha_l = \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_a \cdot I_v \cdot l'}{E_{alv} \cdot t \cdot \sin 2\theta}} = 8,82 \text{ m} \quad (1)$$

onde E_a é o módulo de elasticidade do aço, E_{alv} o módulo de elasticidade da alvenaria, e para a largura equivalente da diagonal w

$$w = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\alpha_h)^2 + (\alpha_l)^2} \quad (2)$$

Como os comprimentos de contato α , superaram os valores do próprio comprimento e largura efetiva do quadro, processou-se as análises em dois aspectos. O primeiro com os valores de comprimentos de contato encontrados nas estimativas teóricas, obtendo $w = 4,76$ m, e o outro limitando os comprimentos de contato aos valores dos comprimentos efetivos, obtendo $w = 4,27$ m. Pelo fato das diferenças apresentadas serem muito pequenas, na ordem de 2%, apresenta-se aqui apenas os resultados encontrados para a largura de diagonal equivalente $w = 4,27$ m, por parecer mais coerente com o contexto.

Reunindo os valores encontrados nas análises aqui desenvolvidas, ver Tabela 1, podemos concluir que, como comprovado anteriormente, a alvenaria oferece significativo aumento na rigidez, visto a considerável aumento fornecido à rigidez da estrutura. Constata-se a necessidade de introduzir a interface pórtico-alvenaria na análise. Verifica-se ainda que os resultados com a largura da diagonal equivalente prevista teoricamente, se aproximam com razoável precisão dos valores numéricos da análise mais correta com juntas (4% de desvio), o que é um excelente resultado.

Tabela 1 - Quadro resumo dos resultados das análises

Descrição	Δx (mm)	k (kN/mm)	Enrijecimento
Pórtico s/ contraventamento	235,4	3,21	-
Pórtico c/ alvenaria interface linear	96,7	7,82	58,9 %
Pórtico c/ alvenaria interface não-linear	134,3	5,63	42,9 %
Pórtico c/ diagonal equivalente	128,8	5,87	45,3 %

4.3 Análise do Estado de Tensão do Painel de Alvenaria

Os métodos teóricos de cálculo que procuram estimar a largura da diagonal de resistência equivalente ao painel de alvenaria, em sua maioria, foram formulados a partir da imposição de hipóteses básicas relativas aos comprimentos de contato e distribuição de tensões nesses contatos, seguido da aplicação de processos numéricos que conduzem à obtenção dos parâmetros pré-definidos.

Pretende-se neste item, a partir das análises realizadas com o Método dos Elementos Finitos, verificar a área efetiva de trabalho do painel de alvenaria, ou seja, a área que resiste aos esforços oriundos de cargas horizontais, quando confinado em estruturas reticuladas.

Sendo assim, tomou-se para a análise os resultados dos esforços nas interfaces entre o pórtico e o painel, em duas situações: (1) quadro na base do edifício (primeiro piso), (2) um quadro no topo do edifício (vigésimo piso). A partir das tensões dadas nos nós, desenhou-se os diagramas de força normal à interface e definiu-se a área que estas tensões abrangem no painel. A Figura 8 apresenta as deformadas dos respectivos pisos, bem como os referidos diagramas.

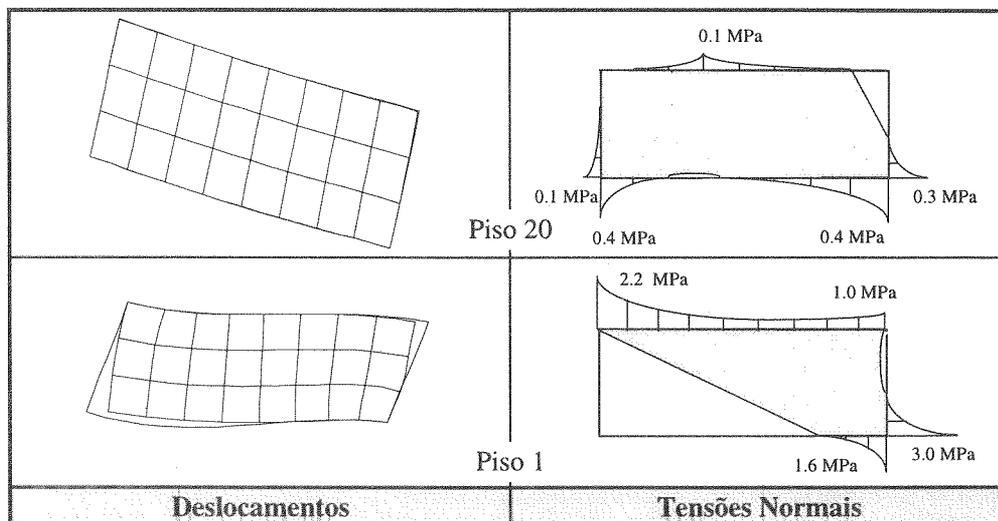


Figura 8 - Resultado da análise do pórtico com alvenaria e juntas

Neste exemplo, a largura da diagonal equivalente tem valor elevado, $w = 4,27$ m, o que corresponde praticamente à área total do painel. Este valor é consequência das dimensões dos quadros apresentarem pequena altura e grande largura, aproximando-se da forma retangular. Desta maneira, pode-se verificar que o cálculo teórico estima, com razoável aproximação, a configuração numérica apresentada. As variações obtidas são dadas pela distribuição do carregamento e consequente mudança do estado de tensão do painel.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho discute o efeito de painéis de alvenaria em estruturas porticadas. A modelação numérica é adotada para prever testes experimentais que irão ser realizados

brevemente na Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. O modelação numérica é capaz de prever o enrijecimento dos pórticos com painéis de alvenaria tal como observado em inúmeros testes.

Efetua-se ainda uma comparação entre a modelação de um edifício completo com painéis de alvenaria e uma modelação simplificada recorrendo a diagonais equivalentes. Conclui-se que, para o caso em estudo, o método simplificado reproduz com precisão o enrijecimento da estrutura.

BIBLIOGRAFIA

- Benjamim, J.R., Williams, H.A., The Behavior of One-Storey Brick Shear Walls, *Proc. Soc. Civ. Eng.*, pp. 1-30 (1958).
- Dhanasekar, M., Page, A. W., The Influence of Brick Masonry Infill Properties on the Behavior of Infilled Frames, *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, part 2, 81, pp. 593-605 (1986).
- Fonseca, G. M., Modelação numérica de painéis de alvenaria em estruturas reticuladas, Relatório, Universidade do Minho, Guimarães, Dezembro (1997).
- Guerra, F., *História da Engenharia em Portugal*, Porto, Portugal, 1995
- Holmes, M., Steel Frames with Brickwork and Concrete Infilling, *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, **19**, pp. 473-478 (1961).
- Lavall, R., Análise de efeitos de 2ª ordem em edifícios altos, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil (1995)
- Liaum, T. C., Kwan, K. H., Nonlinear Analysis of Integral Infilled Frames, *Engrg. Struct.*, **6(3)**, pp. 223-231 (1984).
- Lourenço, P.B., Computational Strategies for Masonry Structures. Tese de Doutorado, Delft University of Technology, Delft University Press, Delft, Países Baixos (1996).
- Mainstone, R. J., On the Stiffness and Strength of Infilled Frames. Proc. Supplement (IV), paper 7360S, *Instn. of Civ. Engrg.* (1979).
- Mehrabani, A. B.; Shing, P. B., Finite Element Modeling of Masonry-Infilled RC Frames, *J. Struc. Engrg.*, **123(5)**, pp. 604-613 (1997).
- Saneinejad, A., Hobbs, B., Inelastic Design of Infilled Frames, *J. Struc. Engrg.*, **121(4)**, pp. 634-649 (1995).
- Smith, B.S., Lateral Stiffness of Infilled Frames, *J. Struc. Div.*, ASCE, **6**, pp. 183-199 (1962).
- Smith, B.S., Behavior of Square Infilled Frames, *J. Struc. Div.*, ASCE, **1**, pp. 381-403 (1966).
- Smith, B.S., Riddington, J.R., Analysis of Infilled Frames Subject to Racking with Design Recommendations, *Struc. Eng.*, **55(6)**, pp. 263-268 (1977).
- Smith, B.S., Riddington, J.R. The Design of Masonry Infilled Steel Frames for Bracing Structure, *Struc. Eng.*, **56(1)**, pp.13-21 (1978).
- Violet-Le-Duc, E. M., *Historia de la Habitación*, Buenos Aires (1945).
- Whitney, C.S., Anderson, B.G., Cohen, E., Design of Blast Resistant Construction for Atomic Explosions, *J. ACI*, pp 655-673 (1955).
- Wood, R. H., Studies in Composite Construction. Part 1: The Composite Action of Brick Panel Walls Supported on Reinforced Concrete Beams. Her Majesty's Stationery Office, National Building Studies, Research Paper n.13. London (1952).
- Wood, R.H., The Stability of Tall Buildings, *Proc. Soc. Civ. Engrg.*, **11**, pp. 60-101 (1958).