

Análise de paredes de tabique: estudo numérico

Analysis of “tabique” walls: numerical study

André Pires

João Miranda Guedes

Tiago Ilharco

Resumo

O edificado antigo em Portugal, anterior à utilização maciça do betão armado, é maioritariamente constituído por paredes portantes em alvenaria e pisos, coberturas e paredes interiores (e algumas exteriores) em madeira. Apesar de a madeira ser um material com forte presença nestas construções, existe em Portugal um grande desinteresse em relação ao seu estudo como material estrutural. Este trabalho pretende estudar paredes de tabique de modo a promover a sua reabilitação e a evitar ações de intervenção que consideram a sua substituição arbitrária por novos elementos. Neste âmbito é feita uma descrição da técnica construtiva e efetuada a análise do comportamento estrutural de um conjunto de paredes, estimando-se, de forma numérica, cargas críticas e modos de encurvadura para cargas verticais, assim como valores da rigidez horizontal das paredes de tabique no seu plano, avaliando a capacidade para funcionarem como elementos portantes e de contraventamento das construções.

Abstract

The stock of old buildings in Portugal, built before the extensive use of reinforced concrete, is mainly made of masonry bearing walls and timber floors, roofs and partition walls. In spite of the strong presence of timber in these constructions, in Portugal there is a great lack of interest about on the part of structural engineering. This work aims studying “tabique” walls to promote its rehabilitation, avoiding interventions that consider its full and arbitrary substitution by new elements. It presents a brief description of the constructive technique and analyses the structural behaviour of a set of walls, estimating, numerically, critical loads and buckling modes, as well as its horizontal in-plane stiffness of “tabique” walls, evaluating their capacity to act as bearing and bracing elements.

Palavras-chave: Reabilitação / Construção de tabique / Encurvadura / Simulação numérica

Keywords: Rehabilitation / “Tabique” technique / Buckling / Numerical simulation

André Pires

Engenheiro Civil
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
andre.manuel.cheu.pires@gmail.com

João Miranda Guedes

Professor Auxiliar
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
jguedes@fe.up.pt

Tiago Ilharco

Engenheiro Civil
NCREP, Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda.
Porto, Portugal
tiago.ilharco@ncrep.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

PIRES, A. [et al.] – Análise de paredes de tabique: estudo numérico. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 1. ISSN 2183-8488 (julho 2016) 55-66.

1 Introdução

Grande parte das construções antigas em Portugal, anteriores à utilização maciça do betão armado, apresenta uma forte degradação, resultado, em larga medida, da não existência de processos de manutenção sistemáticos que promovam a preservação e adaptação progressiva dessas construções às exigências, ponderadas, da sociedade atual. A conservação e reabilitação deste edificado são tarefas essenciais promotoras, através de medidas apropriadas, da preservação de um património de valor histórico, material e cultural inegável.

Este edificado é maioritariamente construído por paredes portantes em alvenaria dispostas no contorno dos edifícios, e pisos, coberturas e paredes interiores em madeira. No caso de construções de maior dimensão que exigiam elementos portantes verticais intermédios, ou que apresentavam paredes divisórias em pisos térreos em contacto direto, ou próximo com o terreno, aparecem também paredes interiores em alvenaria. Noutros casos, aparecem por vezes paredes de madeira exteriores e (ou) com funções portantes. Os pavimentos são construídos por um vigamento principal ao qual por vezes se sobrepõe, ou justapõe um vigamento secundário que serve de apoio ao soalho. As coberturas são compostas por sistemas mais ou menos complexos de barras, constituindo vulgarmente asnas onde, para além dos elementos principais, pernas e linhas, podem existir elementos intermédios: escoras, diagonais e tirantes. Embora este seja um dos sistemas construtivos antigos mais comuns no país, existem diversas variantes, em particular no tipo de paredes, quer portantes quer divisórias, que integram estas construções.

Em Portugal as paredes portantes destas construções antigas são normalmente em alvenaria, embora também possam ser de madeira. Neste último caso, eram geralmente construídas em frontal, definindo células que eram preenchidas com terra, tijolos, ou outros materiais menos nobres envolvidos, ou não, em argamassa de saibro com, ou sem, cal. Dada a sua constituição, estas paredes eram colocadas (com exceções) acima da cota do terreno, apoiadas em fundações de alvenaria, ou poisadas sobre paredes de alvenaria. Em Portugal, as alvenarias são normalmente de pedra ou terra, existindo poucas construções com paredes portantes em alvenaria de tijolo maciço; este material aparece mais vulgarmente em abóbadas e abobadilhas de teto e (ou) piso. Tradicionalmente, na construção das alvenarias são utilizadas pedras de granito e xisto no Norte, de calcário no Centro e Sul, e terra, sob a forma de adobe ou taipa, no Centro e Sul do País.

Para além das paredes referidas, existem ainda as paredes divisórias em tabique. Trata-se de paredes constituídas por elementos de madeira e que, tradicionalmente, são consideradas não portantes, ou seja, sem funções estruturais claras. No entanto, em muitos casos desempenham um papel estrutural, podendo essa situação resultar de um ato planeado, ou da ocorrência de deformações da estrutura dos pisos superiores (por fluência dos materiais, por exemplo) que por esse motivo passam a usar a parede de tabique como estrutura secundária de apoio.

A existência de poucos estudos relativamente ao comportamento das paredes de tabique justifica, em parte, a pouca atenção e importância que em geral é dada a estes elementos. Sendo

normalmente utilizados como paredes divisórias, são considerados como não estruturais, pouco resistentes, ou sem capacidade para contribuir para a melhoria do comportamento global das construções. Este facto tem implicado que em obras de reabilitação seja frequentemente preconizada a sua substituição, frequentemente arbitrária, por novos elementos, ignorando-se o seu potencial como elemento de suporte e (ou) contraventamento dos edifícios, assim como o seu valor intrínseco como técnica construtiva. Neste trabalho, de carácter numérico, pretende-se colmatar esta lacuna, procurando-se contribuir para uma maior valorização e preservação destas estruturas.

Neste âmbito, será analisado um conjunto de paredes de tabique representativas de tipologias construtivas encontradas em construções antigas na região da cidade do Porto, mas que podem ser encontradas em construções antigas presentes noutras regiões do país. Neste contexto, o trabalho de investigação responde aos seguintes objetivos:

- Descrever a parede de tabique e o tipo de edifício que lhe está associado, realçando, em particular, as duas tipologias mais comuns destas paredes em construções antigas da cidade do Porto: tabique simples e tabique duplo;
- Apresentar as principais características geométricas e materiais das tipologias referidas no ponto anterior;
- Estimar para um conjunto de paredes de tabique tipificadas e selecionadas no âmbito deste trabalho, a capacidade resistente a ações verticais e a rigidez horizontal no plano através de modelação numérica;
- Promover a preservação da construção de tabique através das conclusões deste trabalho.

2 Caracterização histórica, material e construtiva do tabique

2.1 Introdução

A técnica do tabique é utilizada principalmente na construção de paredes. A aplicação desta técnica consiste, fundamentalmente, na justaposição de tábuas ao alto com folgas variáveis preenchidas por um material que pode ser terra (saibro, por vezes misturado com fibras naturais, nomeadamente palha) ou por argamassa. Embora resultem de processos construtivos idênticos, a diferença no material de preenchimento estabelece uma distinção entre os dois tipos de tabique. Em particular, o tabique de terra que se tem encontrado é constituído por tábuas verticais dispostas com maiores folgas e ligadas por um vigeamento horizontal mais robusto. Ao contrário, o tabique de argamassa apresenta menores vazios entre tábuas e um ripado de menor secção, por vezes menos espaçado, reduzindo a quantidade de argamassa utilizada. Na maioria das situações encontradas o tabique é construído sob o soalho, encostando inferiormente no piso e superiormente no vigeamento do teto com ligações (pregagens) mais ou menos eficazes. Na faixa inferior, as peças de madeira dos rodapés funcionam muitas vezes como frechal e (ou) elemento de ligação do tabique ao soalho. Existem situações em que o tabique não poisa diretamente no soalho, mas num frechal que apoia sobre o soalho em tocos de madeira.

Complementarmente, podem existir tábuas ou prumos, verticais e (ou) inclinados, sobrepostos, ou justapostos com as tábuas ao alto, como se ilustra na Figura 1; em particular, frequentemente existem prumos verticais que delimitam painéis de menores dimensões, podendo existir prumos diagonais que cortam as tábuas verticais que por isso encostam aos prumos. O material de preenchimento das folgas entre as tábuas e (ou) prumos pode funcionar como material de acabamento final, ou existir sobre as tábuas um fasquio horizontal, usualmente de secção transversal trapezoidal, com a função principal de melhorar a aderência do material de enchimento e do material de acabamento da superfície da parede, este último normalmente uma argamassa/reboco à base de cal. Excepcionalmente, em zonas com grandes aberturas longitudinais existem tabiques com tábuas dispostas na horizontal, neste caso encostadas sem folgas, sobre as quais pode ser aplicado um ripado para assentamento do reboco.



Figura 1 Paredes de tabique: exterior (Penajoia, Lamego [1]) e interior (Porto)

A caracterização apresentada neste trabalho é geral. A sua adaptação às diferentes regiões onde é utilizada, condicionada em larga medida pelos materiais e condições atmosféricas existentes, assim como pela competência e experiência dos técnicos que a executavam, tornam-na uma técnica versátil e dinâmica, apresentando variantes construtivas em diferentes zonas do país que a valorizam como técnica construtiva. Assim, as descrições efetuadas nas secções seguintes apresentam algumas das características do tabique, alertando-se para que não são únicas. Em particular, o estudo apresentado dirige-se ao sistema construtivo do tabique mais comum aplicado em paredes de construções correntes antigas da região da cidade do Porto. Os dados que estão na base da informação aqui reunida provêm de fontes bibliográficas específicas da construção tradicional, em particular de [1].

2.2 Enquadramento

Ao nível de todo o território português observam-se muitos exemplos de construções que incluem elementos de tabique [1], quer utilizando terra quer argamassa de cal como material de enchimento. No Norte, em especial na região Nordeste de Trás-os-Montes e Alto Douro, existe uma herança particularmente preciosa de construções de tabique de terra, como mostram os trabalhos de [2], [3] e [4]. Estes trabalhos referem que este tipo de tabique surge de forma mais marcada nas regiões interiores por apresentarem menor humidade relativa e precipitação, condições consideradas favoráveis à preservação destes elementos construtivos. Para além disso, o uso deste elemento construtivo está também relacionado com questões económicas e que resultam, em particular, da fácil acessibilidade e baixo custo dos materiais que o constituem e que existem na região [5].

A forma de construir revela um aperfeiçoamento de técnicas que subsistiram durante vários séculos, utilizando um leque variado de materiais, de entre os quais se destaca a madeira que perdurou na construção da estrutura de pavimentos e coberturas, mas também de paredes, nomeadamente de frontal e tabique, esta última utilizada também como técnica na construção de tetos. A partir da primeira metade do século XX, período do início da generalização do uso do betão armado, estas técnicas construtivas foram progressivamente abandonadas e, nalguns casos, esquecidas.

2.3 Paredes de tabique da casa antiga do Porto

2.3.1 A casa antiga do Porto [6]

Ao contrário do que aconteceu na cidade de Lisboa, onde a ocorrência do terramoto de 1755 deu origem a um novo sistema construtivo que foi largamente aplicado na reconstrução da hoje designada por baixa Pombalina, a cidade do Porto não sofreu nenhum acontecimento que resultasse numa rotura que pusesse fim à tradição construtiva nesta cidade. Ao manter um esquema tradicional de construção, com evoluções, mas progressivas no tempo, a casa antiga do Porto, em particular a casa burguesa, transporta um espírito de intemporalidade, permanência e uma universalidade dos materiais e das técnicas de construção do passado; a tipologia construtiva desta habitação é detentora

de grande regularidade, existindo uma grande sistematização e estandardização dos elementos construtivos, e o seu estilo faz com que seja uma marca da cidade. Caracteriza-se por uma volumetria estreita e alta com um número variável de pisos, vulgarmente 2 ou 3, embora possam apresentar 5 e 6 pisos. Personifica a casa popular e burguesa e é pensada de modo a ser funcional, sendo utilizada como residência urbana e estabelecimento comercial. É usualmente constituída por um piso de rés do chão amplo que era utilizado como local de trabalho, sendo os restantes pisos utilizados como habitação. Com exceção das paredes do contorno da habitação e, eventualmente, de alguma parede interior transversal ao nível do rés do chão que são em alvenaria de pedra, as restantes paredes são normalmente de tabique. Também são normalmente de tabique as paredes exteriores do último piso, em particular quando se posiciona de forma recuada em relação ao alinhamento das fachadas dos pisos inferiores.

2.3.2 Características principais das paredes de tabique

Embora o pinho nacional (*Pinus pinaster* Ait.) seja a espécie de madeira tipicamente utilizada nas paredes de tabique da casa antiga do Porto, por vezes também se encontra o castanho (*Castanea sativa* Mill.) e o carvalho (*Quercus faginea* Lam.), em particular em casas com características mais nobres; sendo um material que abundava em todo o país, a utilização da madeira como material construtivo era, por isso, evidente. Para além disso, a madeira apresenta uma série de características que a tornavam, e ainda tornam, um material bastante apelativo para a construção, destacando-se, entre elas, a boa relação entre capacidade mecânica e massa volúmica, tornando-o, relativamente a outros materiais estruturais, um material mais leve, fácil de transportar e de trabalhar. Por outro lado, o facto de utilizar materiais naturais e não exigir mão de obra particularmente especializada, torna o tabique uma técnica construtiva versátil, sendo utilizado em diferentes tipologias, desde as mais correntes, até às mais nobres, aparecendo na construção de tetos e claraboias (aplicação de fasquio sobre ripado criando superfícies planas e curvas: troncocónicas, abobadadas...) e de paredes exteriores, interiores e de caixa de escadas. Na casa antiga do Porto, o tabique está presente nos diferentes elementos construtivos referidos, embora predomine nas paredes interiores e de caixa de escadas. As paredes interiores de tabique são normalmente consideradas não estruturais, sendo utilizadas apenas como elementos de compartimentação. Só em casos pontuais assumem um papel claramente estrutural. Nesse caso, normalmente integram prumos que as dotam de um melhor desempenho e uma maior capacidade portante, encaixando-as no grupo dos elementos ditos estruturais, sendo exemplo disso as paredes das caixas de escadas.

2.3.3 Tipologias construtivas das paredes de tabique

Os tabiques que se encontram nas paredes das construções antigas da cidade do Porto apresentam, em geral, duas tipologias reconhecidas: tabique simples e tabique duplo (Figura 2). Estes dois tipos de paredes, que serão analisados neste trabalho em detalhe, são construtivamente análogos, variando na forma como



Figura 2 Parede de tabique simples e tabique duplo (sem o fasquio e pormenor de uma zona em rotura onde se percebe a existência do duplo tabuado)

são posicionadas e distribuídas as tábuas principais, designadas habitualmente por costaneiras: o tabique simples apresenta apenas tábuas costaneiras verticais e o tabique duplo apresenta, sobrepostas às anteriores, um conjunto de tábuas diagonais que podem apresentar diferentes disposições, ou formar diferentes padrões geométricos. Em qualquer um dos casos, as tábuas são posicionadas lado a lado criando intervalos que são preenchidos por argamassa de cal. Este sistema de tábuas é enquadrado por prumos verticais localizados nas zonas das aberturas (portas e janelas), ou em zonas centrais das paredes, delimitando painéis de menores dimensões.

Estas paredes são normalmente executadas numa fase em que a habitação já está assoalhada, ou seja, na fase de acabamentos [7], apoiando-se sobre o soalho, com, ou sem, a interposição de um frechal que, caso exista, melhora o desempenho da parede; neste caso as tábuas são pregadas ao frechal que por sua vez é pregado ao soalho. No entanto, existem situações em que as tábuas do tabique e (ou) os frechais tocam ou ligam às vigas do pavimento. Em qualquer um dos casos, a base das paredes é vulgarmente rematada por um rodapé duplo (um em cada face da parede), por vezes bastante alto, que acaba por assumir as funções de um frechal. Na faixa superior das paredes, os topos das tábuas, quando tocam nas vigas dos pisos superiores, são pregados nesses elementos assumindo as vigas a função de frechais; noutros casos, é criado um novo frechal no topo, ou o topo das tábuas remata simplesmente sem qualquer frechal, tal como já foi referido no caso da ligação das tábuas das paredes de tabique aos soalhos. Sobre este conjunto de tábuas ao alto, delimitado pelos prumos e (ou) frechais, existem ripas de secção transversal trapezoidal pregadas na horizontal (vulgarmente designadas por fasquio) sobre as quais é aplicada a argamassa/reboco de acabamento.

Relativamente à ligação entre paredes transversais de tabique, ou entre paredes de tabique e paredes de alvenaria, é comum não existir qualquer ligação efetiva, ou seja, encontram-se frequentemente desligadas entre si. Nos casos em que existem ligadores, estes elementos consistem normalmente em peças metálicas em L pregadas no tabique, mas nem sempre chumbadas na alvenaria;

existem situações onde o ferrolho é literalmente pregado à alvenaria, ou melhor à junta da alvenaria utilizando pregos de madeira. Pregagens idênticas foram encontradas nalgumas ligações de paredes de tabique a paredes de alvenaria de pedra sobre a qual assentam, quer diretamente quer através de um frechal.

2.3.4 Dimensões dos elementos constituintes

Verifica-se que as paredes de tabique interiores não têm dimensões standardizadas; os valores do comprimento, largura e espessura das paredes de tabique, ou das tábuas que a constituem, apresentam uma grande variabilidade de edifício para edifício. Na realidade, trata-se de uma técnica artesanal, de base empírica, que não pressupõe a utilização de qualquer material ou medida standard. As dimensões a seguir indicadas devem ser tomadas como valores ou intervalos de valores médios estimados.

Em particular, e de acordo com informação recolhida em obra pelos autores e fornecida pelo arquiteto Joaquim Teixeira, a largura das tábuas costaneiras é a grandeza da parede que maior variabilidade apresenta, estimando-se, para as paredes de tabique simples, uma largura média $L = 15$ cm e uma espessura entre 3 e 5 cm com um valor médio $e = 4$ cm. A folga entre tábuas também não é constante, assumindo um valor médio $f = 2$ cm. No caso do tabique duplo, a largura média das tábuas costaneiras verticais mantém-se, sendo as tábuas costaneiras diagonais ligeiramente mais largas, apresentando usualmente valores entre 15 e 20 cm. Neste caso a espessura das tábuas é normalmente menor quando comparada com as dos tabiques simples, mas idêntica para as tábuas verticais e diagonais, apresentando valores médios $e_1 = e_2 = 2$ cm. Os frechais e os prumos apresentam uma geometria normalmente quadrangular, com dimensão média dos lados entre 7 e 8 cm. O fasquio apresenta uma secção transversal trapezoidal com dimensões médias tais que a face maior do trapézio apresenta um valor $a = 2,5$ cm, a face menor um valor de $b = 2,0$ cm e a espessura um valor de $c = 1,5$ cm; a folga entre o fasquio (d) varia em média entre 3 e 4 cm. Na Figura 3 são apresentados esquemas explicativos da estrutura de madeira típica de paredes de tabique de tábuas simples e duplas, respetivamente.

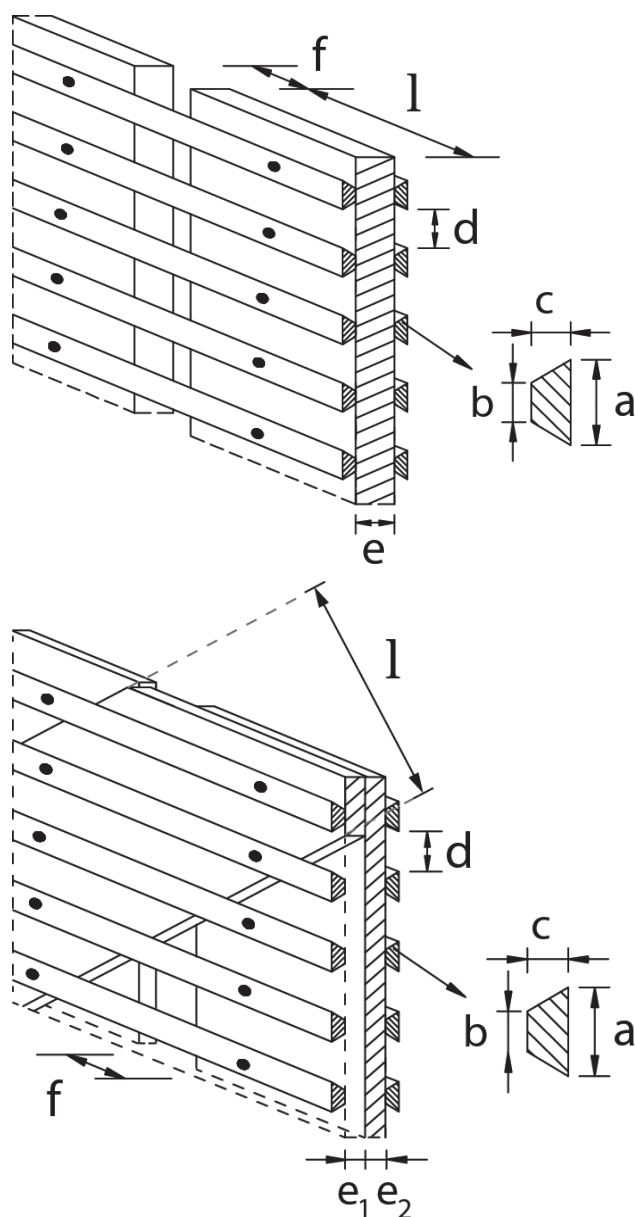


Figura 3 Tábuas e ripas – Tabique de tábuas simples e de tábuas duplas

3 Modelos numéricos

3.1 Tipologias estudadas

Com base na informação que foi apresentada anteriormente, nesta secção são descritos os modelos utilizados na simulação das paredes de tabique simples e duplo, as duas soluções de tabique mais comuns da construção da casa típica do Porto e que são estudadas no âmbito deste trabalho. Resumidamente, a construção do tabique é realizada através da colocação de tábuas costaneiras verticais desencostadas

ao longo de toda a altura, no caso simples, às quais são pregadas tábuas diagonais dispostas segundo um padrão selecionado, no caso duplo; as tábuas podem ser pregadas a frechais, no topo e na base, recebendo em ambas as faces um fasquio horizontal com secção transversal trapezoidal sobre o qual é aplicada uma argamassa que preenche as folgas e um reboco final de acabamento. Em geral, constata-se que o conjunto das duas tábuas do tabique duplo totaliza a mesma espessura das tábuas verticais do tabique simples. Por opção, as análises numéricas que são efetuadas no âmbito deste trabalho consideram apenas a contribuição do esqueleto de madeira das paredes (tábuas e fasquio), não sendo simulado o material de enchimento. Todos os cálculos foram realizados com recurso ao programa de cálculo SAP2000 [8].

3.2 Descrição dos modelos definidos

Partindo das duas tipologias de paredes selecionadas, foram definidos três modelos físicos de paredes de tabique. A estes modelos foi atribuída a designação de S, SP e D. O modelo S representa uma parede de tabique simples sem aberturas, ou seja, enquadrado na primeira tipologia apresentada; representa o protótipo adotado como referência. É composto por 23 tábuas verticais de 3 m de altura com uma secção transversal retangular de $15 \times 4 \text{ cm}^2$. As tábuas são dispostas com uma folga de 2 cm entre elas, conferindo à parede uma extensão de 3,89 m e uma altura de 3 m, à qual se adiciona a altura dos frechais superior e inferior. O fasquio foi simulado em ambas as faces da parede (excêntrico em relação ao eixo das tábuas), sendo constituído, em cada face, por 52 alinhamentos de ripas contínuas com uma secção transversal típica trapezoidal, com uma folga de 3 cm entre elas e ligadas a cada uma das tábuas por intermédio de pregos (um por tábua). A dimensão da secção transversal das ripas (trapezoidal) é de 2,5 cm para o lado maior, 2,0 cm para o menor e 1,5 cm para a espessura. Por fim, existem dois elementos de madeira dispostos horizontalmente, os frechais superior e inferior com secção quadrada de $8 \times 8 \text{ cm}^2$ que fecham a parede na base e no topo. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática deste modelo.

De maneira a estudar os casos de paredes com aberturas, foi criado o modelo SP que é em tudo semelhante ao modelo S, tendo a particularidade de apresentar a abertura de uma porta. A delimitação desta abertura é feita por meio de prumos que apenas encostam nos elementos adjacentes, representando a situação real. Os prumos têm secção quadrada de $7 \times 7 \text{ cm}^2$ e a porta está localizada na zona central da parede com 1,03 m de largura por 2,39 m de altura. As dimensões das tábuas, frechais, ripas e folgas, assim como outras características do modelo são iguais às da parede S. O fasquio interrompe na zona da abertura delimitada pelos prumos. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática deste modelo.

Finalmente, o modelo D corresponde a uma tipologia de tabique duplo com as tábuas diagonais dispostas segundo um dos padrões vulgarmente encontrados na casa do Porto: tábuas convergentes no centro da parede. Este modelo é constituído por alinhamentos de tábuas verticais sobrepostas a alinhamentos de tábua diagonais. Como a espessura total do tabuado duplo é idêntica à espessura das tábuas do tabique simples, considerou-se uma espessura de

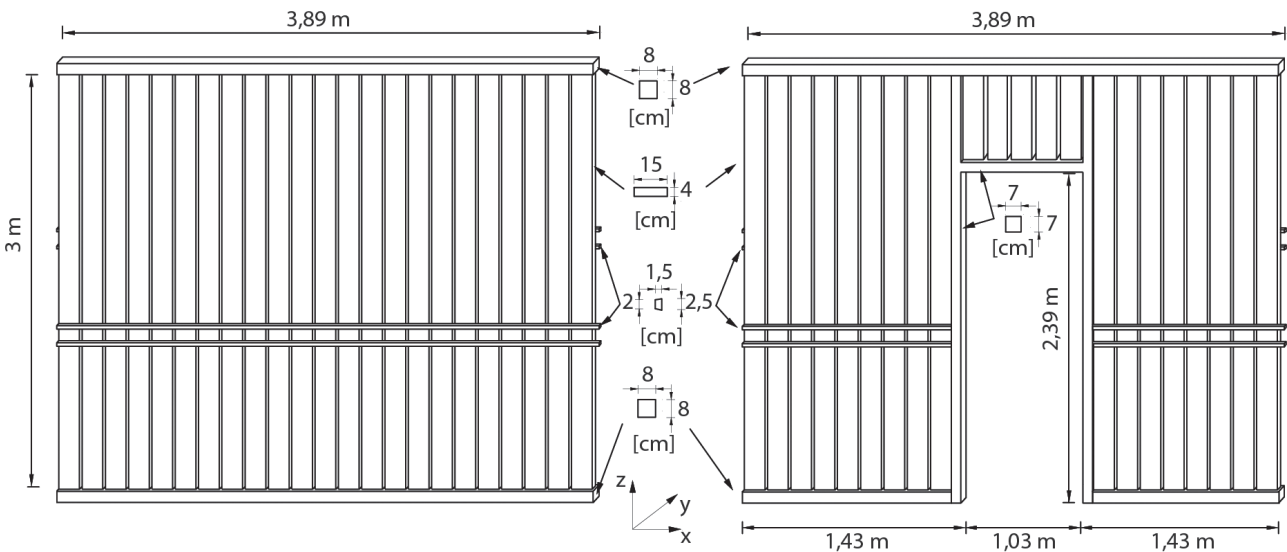


Figura 4 Modelo S e SP

2 cm para cada uma das tábuas, ou seja, adotou-se para secção transversal das tábuas verticais 15 x 2 cm² e das tábuas diagonais 20 x 2 cm². As dimensões das tábuas, frechais, ripas e folgas, assim como outras características do modelo são iguais às da parede S. A Figura 5 apresenta uma representação esquemática deste modelo.

Note-se que todas as medidas adotadas nos elementos que constituem os tabiques modelados se apoiaram nos valores apresentados na secção 2 e correspondem a valores estimados médios usualmente encontrados neste tipo de paredes.

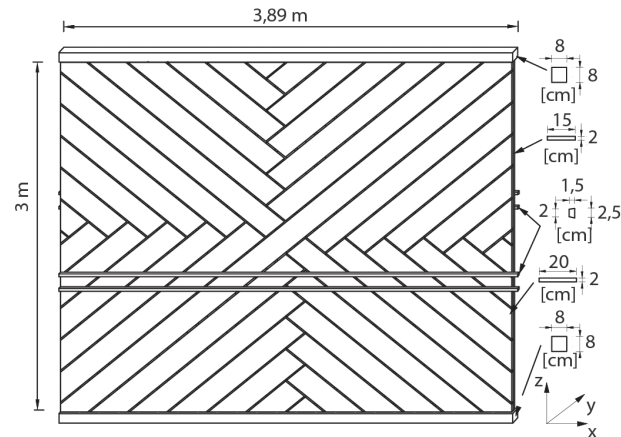


Figura 5 Modelo D

3.3 Descrição do modelo de cálculo

O material que se considerou nos protótipos foi a madeira de pinho (*Pinus pinaster* Ait.), a espécie que se destaca na construção das paredes deste tipo. No Quadro 1 apresentam-se as propriedades mecânicas principais, em particular os valores médios dos módulos elásticos longitudinais (E_{mean}) e transversais (G_{mean}) e da massa

volúmica (ρ_{mean}), e os valores característicos da resistência à compressão e à tração paralela às fibras, $f_{c,0,k}$ e $f_{t,0,k}$, respetivamente, para esta espécie: madeira de pinho nacional da classe de qualidade 'E' de acordo com a norma NP 4305 (1995), [9], e que correspondem à classe de resistência das madeiras resinosas C18 definidas na norma EN 338 (2009) [10]. As tábuas, os prumos e os fasquios e os pregos foram discretizados em elementos lineares do tipo viga tridimensional ("Frame" da biblioteca do SAP2000), ou seja, com seis graus de liberdade por nó.

Quadro 1 Propriedades da madeira de pinho nacional – classe de resistência C18

E_{mean} (GPa)	G_{mean} (GPa)	ρ_{mean} (kg/m ³)	$f_{c,0,k}$ (MPa)	$f_{t,0,k}$ (MPa)
9	0,56	380	18	11

O modelo numérico S foi o primeiro a ser modelado e analisado. Este modelo é constituído por 23 tábuas verticais, simuladas por 53 de elementos de viga, e 52 ripas de madeira em cada face, cada uma simulada por 24 elementos de viga, e pelos frechais, superior e inferior, simulados por 24 elementos de viga cada. O modelo é composto por 6155 elementos de viga e 3846 nós, dos quais 50 são nós extremos sujeitos a condições de apoio. As ripas de madeira foram posicionadas em cada uma das faces de forma excêntrica em relação ao eixo da parede. Na ligação das ripas às tábuas verticais, e em ambas as faces, foram introduzidos elementos de viga na direção horizontal perpendicular à parede, a simular pregos; esses elementos foram modelados com uma rigidez axial e à flexão muito alta, e uma rigidez à torção muito baixa. A folga entre ripas é de 3 cm, à qual corresponde um afastamento entre eixos longitudinais de 5,5 cm. Todos os elementos de madeira foram simulados com a sua secção transversal. Em todos os nós extremos das tábuas ligados ao frechal superior restringiram-se os deslocamentos nas direções horizontais x e y (x no plano da tábua), ficando livre o deslocamento na direção

Quadro II Secções transversais e propriedades geométricas dos elementos de viga (A – área; I_x e I_y – momentos de inércia segundo x e y)

Secção	Tabique simples; Tábuas	Tabique duplo		Ripas	Frechais	Prumos
		Tábuas verticais	Tábuas diagonais			
A (cm ²)	60	30	40	3,4	64	49
I_x (cm ⁴)	80	10	13,3	0,63	341,3	200,1
I_y (cm ⁴)	1125	562,5	1333,3	1,4	341,3	200,1

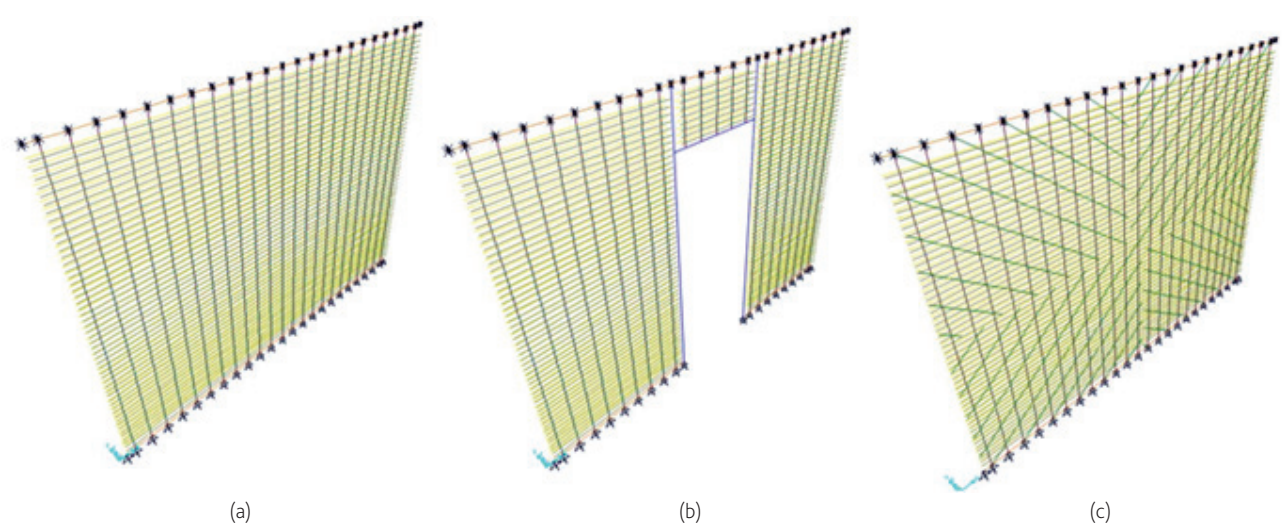


Figura 6 Modelos numéricos: (a) S; (b) SP e (c) D

vertical z ; nos nós extremos ligados ao frechal inferior restringiram-se os deslocamentos x , y e z e a rotação em torno do eixo z .

O modelo numérico SP é em tudo semelhante ao modelo S, mas com a particularidade de incluir uma abertura delimitada por prumos. Neste modelo as ripas são interrompidas na zona da abertura, encontrando-se desligadas dos prumos. Este modelo tem um total de 4927 elementos de viga e 3281 nós, dos quais 47 são nós extremos sujeitos a condições de apoio.

O modelo D é constituído por tábuas verticais e diagonais rigidamente ligados entre si nos pontos em que os seus eixos se intersectam. Este modelo é constituído por 7189 elementos de viga e por 4668 nós, dos quais 50 são nós extremos sujeitos a condições de apoio. As restantes ligações e as condições de fronteira deste modelo e do modelo SP são idênticas às descritas para o modelo S.

No Quadro 2 apresentam-se as propriedades geométricas relativas à secção transversal de todos os elementos de viga que constituem os diferentes tabiques simulados. Na Figura 6 são apresentadas

imagens 3D de cada um dos modelos numéricos estudados, retiradas do programa de cálculo automático.

4 Análise à encurvadura

4.1 Pressupostos de cálculo

Nesta secção é apresentada a simulação do comportamento estrutural das paredes de tabique a cargas verticais, avaliando cargas críticas e modos de encurvadura. Note-se que, embora, por simplicidade, não se tenha modelado o material de enchimento e de reboco das paredes, este material existe e contribui positivamente para a resistência das paredes, impedindo, simultaneamente, que ocorram modos de encurvadura localizados que não serão considerados. Será avaliada a capacidade resistente das paredes simuladas e, entre outros aspetos, estimada a contribuição estrutural do fasquio e a sua contribuição para a capacidade resistente deste

elemento construtivo. Nas análises foi considerada como ação uma carga uniformemente distribuída vertical, aplicada ao longo do frechal superior.

4.2 Validação dos modelos

Antes de se analisar o comportamento dos protótipos, foi simulado o cálculo à encurvadura de uma tábua vertical de uma parede de tabique simples rotulada nas extremidades utilizando elemento do tipo viga através do programa SAP2000. Este modelo serviu para avaliar a capacidade resistente de uma tábua isolada e para validar os procedimentos utilizados pelo programa através da comparação com os valores da expressão analítica da carga crítica de Euler:

$$P_{cr} = \frac{n\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

sendo E o módulo de elasticidade longitudinal, I o momento de inércia da seção em relação ao eixo principal central de inércia que mobiliza a direção de menor inércia, L o comprimento da peça linear biarticulada e n um número inteiro associado a cada modo de encurvadura.

No Quadro 3 são apresentados os valores analíticos (equação (1)) relativos aos três primeiros modos de encurvadura e os correspondentes valores numéricos das cargas críticas obtidos para diferentes discretizações da peça linear. Os resultados permitem concluir que na análise de problemas de encurvadura através do programa SAP2000 os elementos lineares devem ser discretizados em pelo menos 5 elementos de modo a obter-se o rigor necessário.

Note-se que se a tábua não instabilizasse teria uma capacidade resistente à compressão: $f_{c,0,k} \times Area = 18 \times 10^3 \text{ kPa} \times (0,15 \times 0,04) \text{ m}^2 = 108 \text{ kN}$, ou seja, resistiria a uma carga bastante superior à sua carga crítica de encurvadura que é apenas de 7,89 kN e que resulta da sua elevada esbeltez. Este resultado mostra de forma clara que as paredes de tabique submetidas a forças de compressão rompem por instabilidade e não por atingirem a capacidade resistente da madeira.

Quadro 3 Verificação dos resultados obtidos através do programa SAP2000

Teoria de Euler	Carga de encurvadura					
	SAP2000					
Discretização (n.º de elementos)	–	1	2	5	10	20
1.º Modo	7,893	9,632	7,979	7,921	7,919	7,919
2.º Modo	31,583	48,181	38,528	31,750	31,652	31,645
3.º Modo	71,061	135,451	103,333	72,184	71,163	71,082

4.3 Análise do comportamento da estrutura

Efetua-se agora a análise de cada um dos protótipos representativos das paredes em estudo, avaliando a configuração dos modos de encurvadura bem como os respetivos valores das cargas críticas associados. Os protótipos encontram-se livres de qualquer constrangimento nos topos laterais, como aliás acontece em muitas situações reais.

A Figura 7 mostra as configurações da deformada da estrutura das paredes correspondente ao primeiro modo de encurvadura global para o cenário de carga definido, ou seja, carga vertical uniformemente distribuída aplicada no topo da parede. Realça-se que não foram considerados modos de encurvadura associados a instabilidade de elementos localizados, já que esses movimentos se encontram impedidos pela argamassa existente nas paredes reais.

O modelo S, de tabique simples e fasquio excêntrico, é o primeiro modelo a ser analisado. Verifica-se que a instabilidade da parede S acontece no plano perpendicular ao plano da parede por corresponder à direção de menor inércia da secção transversal, não só das tábuas, como do conjunto da parede; as tábuas, por terem a mesma geometria e condições de fronteira, encurvam em

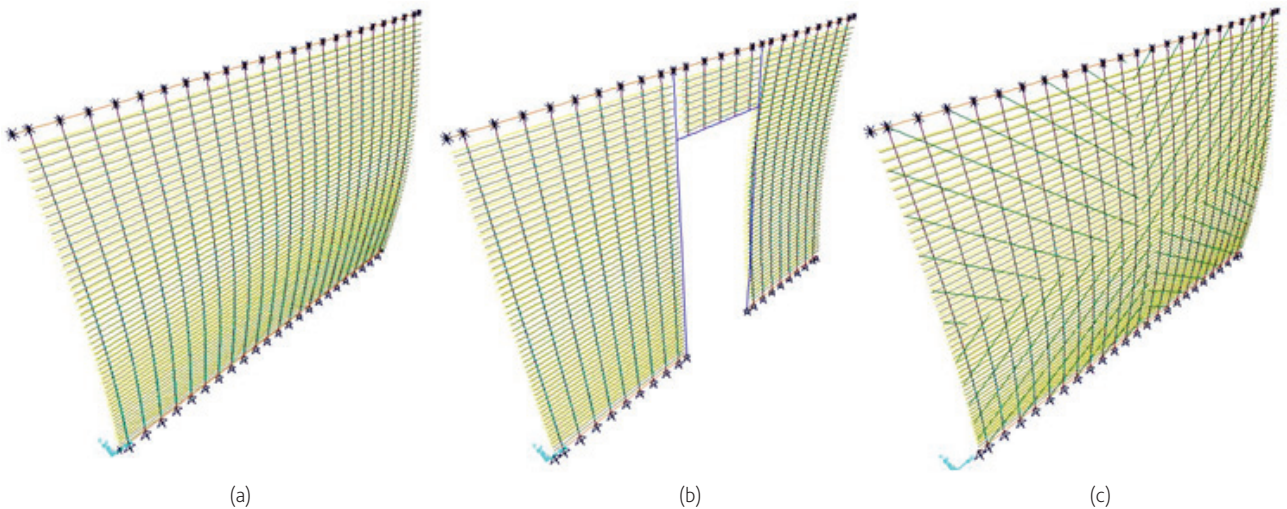


Figura 7 Primeiro modo de encurvadura global dos modelos: (a) S; (b) SP e (c) D

simultâneo e da mesma forma, correspondendo a uma carga crítica uniformemente distribuída no topo da parede $P_{cr} = 46,4$ kN/m. Este resultado mostra que a influência do fasquio é desprezável, podendo ser facilmente validado dividindo o valor da carga crítica de uma tábuia isolada determinado anteriormente ($P_{cr} = 7,893$ kN) pelo comprimento de influência de cada tábuia (0,17 m): $7,893$ kN / 0,17 m = $46,4$ kN/m.

Relativamente ao modelo SP, o primeiro modo de encurvadura desta parede corresponde à encurvadura em torno do eixo de menor inércia das tábuas verticais localizadas à direita da abertura. Verifica-se que existem nove tábuas verticais do lado esquerdo e oito do lado direito, correspondendo o primeiro modo de encurvadura não local à instabilização da parede do lado com menor número de tábuas e para uma carga $P_{cr} = 38,7$ kN/m, inferior em cerca de 16% ao valor obtido para a parede S. Neste caso, os prumos desligados do fasquio não instabilizam e a sua presença não interfere de forma significativa nos resultados. A redução da carga crítica em relação ao modelo S resulta, principalmente, do facto de a carga sobre a padieira ser desviada para os nembos que por isso necessitam de menor carga atuante para instabilizar. Também aqui, e por causa do sistema construtivo que desliga os prumos do fasquio, o efeito do fasquio continua a ter um papel pouco significativo.

Finalmente, o primeiro modo de encurvadura não local do modelo D corresponde a uma configuração da deformada em que todas as tábuas verticais encurvam em torno do seu eixo de menor inércia, no mesmo sentido e ao mesmo tempo, arrastando as tábuas diagonais, para uma carga associada $P_{cr} = 7,8$ kN/m. Este resultado foi comparado com o valor da carga crítica de uma tábuia vertical isolada com 2 cm de espessura ($P_{cr} = 0,987$ kN), dividindo o valor associado à tábuia pelo comprimento de influência de cada tábuia, 0,17m: $0,987$ kN / 0,17 m = $5,8$ kN/m. Este é o resultado que se obteria se a parede fosse apenas constituída pelas tábuas verticais de secção 15×2 cm², constatando-se que a melhoria que as tábuas diagonais proporcionam em relação à existência apenas das tábuas verticais é de 2,0 kN/m, ou seja de 34,4%, um valor bastante reduzido se tivermos em consideração que corresponde à duplicação da quantidade de material. Por outro lado, embora o conjunto de tábuas verticais e diagonais totalize a mesma espessura da parede de tabique simples, o tabique duplo é bastante mais instável que o tabique simples com a mesma espessura total, apresentando neste caso um rácio de capacidade resistente de 17%.

Apesar da elevada esbelteza das paredes, os valores das cargas verticais críticas determinados são ainda assim suficientemente elevados para permitirem utilizar as paredes de tabique, em particular as do modelo S, como elementos portantes verticais. Em particular, uma carga de 40 kN/m corresponde, no caso deste modelo, a descarregar sobre esta parede, sem momento fletor, uma carga de 5,0 kN/m² sobre um piso numa largura de influência de 5 m, garantindo ainda assim um fator de segurança de cerca de 1,5.

Os valores de carga crítica determinados, e indicados no Quadro 4, foram comparados com os valores obtidos em campanhas de ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP em paredes de alvenaria irregular de granito de folha única, típicas das construções da cidade do Porto [11] e que coexistem com as paredes de tabique aqui analisadas nas mesmas construções.

As paredes, com espessura de 28 cm, altura de 1,8 m e largura de 1,2 m apresentaram em média uma capacidade resistente vertical de 1000 kN por metro linear de desenvolvimento de parede, ou seja, cerca de 20 vezes a capacidade das paredes de tabique simples.

Quadro 4 Carga de compressão crítica

	Modelo			Paredes de alvenaria de pedra [11]
	S	SP	D	
P (kN/m)	46,4	38,7	7,8	1000

5 Comportamento a ações horizontais

5.1 Pressupostos de cálculo

Neste capítulo será avaliada a rigidez das paredes de tabique submetidas a ações horizontais no seu plano. Em particular, os modelos serão submetidos a uma carga horizontal uniformemente distribuída atuante no plano da parede, direção x, aplicada no frechal superior. Este cálculo permitiu estimar a capacidade de estas paredes poderem funcionar como elementos de contraventamento horizontal.

Determinou-se então, de forma numérica, o comportamento linear elástico das paredes de tabique às ações horizontais referidas, analisando-se o contributo do fasquio e a influência da distribuição das tábuas (tabique simples e tabique duplo). Relativamente às condições de apoio, na extremidade superior das tábuas restringiu-se apenas o deslocamento na direção y; na extremidade inferior restringiram-se os deslocamentos x, y e z e a rotação na direção z.

5.2 Análise do comportamento da estrutura

A análise dos resultados consistiu na determinação do valor da rigidez horizontal k_h de cada um dos três modelos S, SP e D através do quociente entre a força total aplicada e a média dos deslocamentos dos dois nós extremos superiores. Na Figura 8 são apresentadas as deformadas obtidas para os três casos estudados e no Quadro 5 os valores de rigidez obtidos.

Antes de analisar os resultados, lembra-se que os elementos de viga que simulam a ligação do fasquio excêntrico às tábuas têm uma rigidez axial e à flexão muito alta e uma rigidez à torção muito reduzida, de forma a simular o efeito dos pregos, em particular a possibilidade de o fasquio poder rodar em relação às tábuas.

Analisando as deformadas, verifica-se que as dos protótipos S e SP são idênticas, apresentando um perfil lateral de dupla curvatura, denotando uma participação importante dos frechais na ligação e restrição da rotação das tábuas nas extremidades. No caso do protótipo D, a deformação apresenta um movimento de flexão de conjunto com curvatura única, materializando um funcionamento globalmente mais monolítico da parede.

Relativamente à rigidez, verifica-se uma queda de 24% do valor da rigidez horizontal do modelo SP relativamente ao modelo S, pelo facto de a parede anterior conter uma abertura. Esta redução é superior à encontrada para a carga crítica, indicando que o efeito da

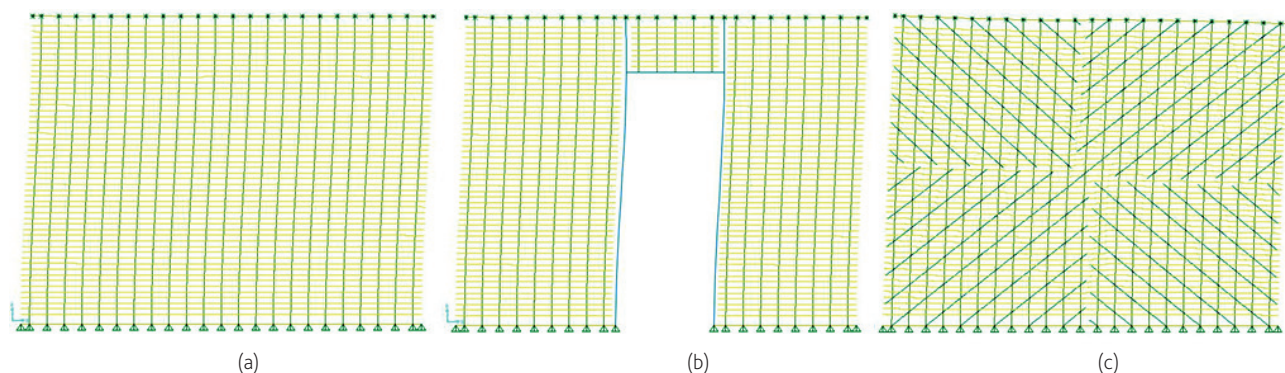


Figura 8 Deformação para ação horizontal dos modelos: (a) S; (b) SP e (c) D

abertura parece ser mais importante para a rigidez da parede no seu plano do que para a instabilidade vertical. Estes valores, comparados com os valores obtidos em campanhas de ensaios realizados LESE da FEUP nas paredes de alvenaria de granito anteriormente referidas, apresentam uma rigidez horizontal média em fase não fendilhada de 20 000 kN/m. Esses ensaios mostraram haver um comportamento repartido entre flexão e corte. Embora seja impossível fazer a repartição entre o que seriam os deslocamentos no topo da parede resultantes de cada um desses mecanismos, assumiu-se, simplificada, que seriam idênticos de modo a que fosse possível extrapolar a rigidez obtida no ensaio para a parede com 1,8 m de altura (rácio altura largura $R = 1,5$) para uma hipotética parede de características idênticas com 3,0 m de altura ($R = 2,5$). Nesse pressuposto, e assumindo, simplificada, que a rigidez horizontal para a parcela de corte é inversamente proporcional à altura da parede, e ao cubo da altura da parede para a parcela de flexão, resultaria então uma rigidez de 6360 kN/m para a parede de alvenaria de pedra com 3,0 m de altura, um valor superior a 6 vezes o valor de rigidez encontrado na simulação das paredes de tabique S.

Quadro 5 Rigidez horizontal

	Modelo			Paredes de alvenaria de pedra [11]
	S	SP	D	
k_h (kN/m)	997,4	640,0	23363,4	6360

No entanto, quando se passa para as paredes de tabique duplo, o cenário e os valores associados mudam radicalmente. A rigidez associada à tipologia do tabique duplo, neste caso com tábuas diagonais dispostas em ambas as direções, incrementa o valor da rigidez horizontal da parede em relação ao modelo S de cerca de 23 vezes. Este excecional aumento de rigidez é totalmente conferido pela disposição das tábuas diagonais que contribuem fortemente para melhorar a transmissão de forças através de um funcionamento do tipo escora-tirante. Neste caso, não existem apenas as tábuas verticais encastradas nos frechais a funcionar no seu plano de forma praticamente isolada (o efeito do fasquio é diminuto já que as tábuas podem rodar quase livremente em torno destes elementos), mas existem barras diagonais que ligam e travam a deformação das tábuas verticais, promovendo a transferência dos esforços para a

base da parede por esforço axial diagonal, rigidificando a parede ao corte no seu plano. Quando comparada com as paredes de alvenaria referidas, a rigidez da parede D é cerca de 3,5 vezes superior à rigidez da parede de alvenaria. No entanto, realça-se que este estudo envolveu apenas a determinação da rigidez de corte elástica destas paredes, não tendo sido estimada qualquer capacidade resistente ao corte no plano que permitisse comparar também este valor com o das paredes de alvenaria.

Esta análise permite concluir que as paredes de tabique duplo, embora apresentem uma menor capacidade resistente às cargas verticais quando comparada com a de paredes de tabique simples com a mesma espessura, apresentam uma muito maior rigidez horizontal no seu plano que, aparentemente, lhes atribui capacidade para funcionarem como elemento de contraventamento horizontal nas construções onde se inserem.

6 Conclusões

Apesar de as conclusões dos estudos realizados se poderem estender a paredes de tabique localizadas noutras regiões do País, este trabalho incidiu sobre as paredes de tabique existente nas construções do centro histórico da cidade do Porto. Foram apresentadas as técnicas mais comuns aplicadas à construção das paredes de tabique e apresentadas algumas variantes construtivas. Em particular foram detalhadas e depois simuladas numericamente paredes de tabique simples e duplo com o objetivo de analisar o seu comportamento estrutural através de um programa comercial de cálculo automático.

Estas análises permitiram concluir que se trata de paredes com uma boa capacidade portante a cargas verticais, em particular no caso do tabique simples, mesmo quando comparadas com paredes de alvenaria de granito típicas da cidade do Porto. A existência de abertura, tais como portas, mostrou ter uma influência relativamente diminuta nessa capacidade, apresentando uma parede de tabique simples com uma abertura central, com cerca de 20% da área total da parede, uma redução de cerca de 15%. Por outro lado, o tabique duplo com a mesma espessura do tabique simples apresenta uma capacidade portante bastante inferior, cerca de 20% da capacidade da parede de tabique simples. Este resultado inverte-se quando passamos para o cálculo da rigidez horizontal no plano

das paredes. Neste caso, a rigidez da parede dupla é cerca de 23 vezes a rigidez da parede simples com a mesma espessura. As tábuas diagonais incrementam significativamente a rigidez horizontal das paredes, parecendo indicar que esta disposição de tábuas teria como objetivo melhorar o comportamento das paredes para ações horizontais no seu plano. Finalmente, conclui-se que o fasquio tem uma contribuição desprezável para o comportamento estrutural do esqueleto de madeira das paredes. Note-se que em nenhuma das análises efetuadas foi considerada a participação da argamassas que terá uma contribuição acrescida positiva para a capacidade portante e para a rigidez horizontal deste tipo de paredes.

Por fim, conclui-se que estes modelos constituem uma ferramenta de trabalho importante na análise do comportamento de paredes deste tipo, devendo, no entanto e em trabalhos futuros, ser calibrados com resultados experimentais, infelizmente ainda inexistentes.

7 Referências

- [1] Cardoso, R. – *Caracterização da construção em tabique de Lamego e Alto Douro*, Tese de Doutoramento, UBI, 2013.
- [2] Carvalho, J. – *Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2009.
- [3] Cepeda, A.J.B. – *Construções de tabique existentes na associação de municípios do Alto Tâmega*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2009.
- [4] Martinho, J.M.G. – *Construção de tabique na Associação de Municípios da Terra Fria do Nordeste Transmontano*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2010.
- [5] Carvalho, J.; Pinto, T.; Varum, H.; Jesus, A.; Lousada, J.; Morais, J. – "Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro", 4th International Conference on Structural Defects and Repair, in CINPAR 2008, Aveiro, 2008.
- [6] Teixeira, J.J.L. – *Salvaguarda e Valorização do Edifício Habitacional da Cidade Histórica. Metodologia de Intervenção no Sistema Construtivo da Casa Burguesa do Porto*, Tese de Doutoramento, FAUP, Porto, 2014.
- [7] *Manual de Apoio ao Projecto de Reabilitação de Edifícios Antigos*. Coordenação de Vasco Peixoto Freitas e Edição da Ordem dos Engenheiros da Região Norte, Porto, 2012.
- [8] SAP2000 – "CSI Analysis Reference Manual for SAP2000", Computers and Structures Inc. Berkeley, California, USA. Abril, 2009.
- [9] NP 4305 – "Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual", Instituto Português da Qualidade, Portugal, 1995.
- [10] BS EN 338 – "Structural timber – Strength classes", European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- [11] Almeida, C. – *Paredes de Alvenaria do Porto. Tipificação e Caracterização Experimental*, Tese de Doutoramento na FEUP, Porto, 2013.