

Análise de medidas de reforço de paredes de tabique. Estudo numérico

Analysis of strengthening measures of tabique walls.
Numerical study

João Miranda Guedes
André Pires
Tiago Ilharco

Resumo

Este artigo insere-se na análise do comportamento de paredes de tabique, ou seja, paredes de estrutura interna de madeira constituída por tábuas verticais e/ou inclinadas, que são comumente consideradas como paredes de partição de espaços, sem grande capacidade portante. Neste âmbito, este trabalho apresenta o resultado numérico de algumas soluções de reforço que melhoram o seu comportamento mecânico, nomeadamente que dotam estas paredes de (i) uma maior capacidade resistente que permita utilizá-las como elementos portantes verticais capazes de suportar pavimentos e coberturas com fatores de segurança adequados, e de (ii) uma maior rigidez no seu plano de forma a poderem contribuir para o contraventamento das construções. Mostra-se que através da utilização de soluções simples e tecnologia facilmente acessível, recorrendo ao uso de elementos metálicos e de madeira, é possível, se necessário, aumentar significativamente a capacidade resistente vertical e a rigidez ao corte destas paredes.

Abstract

This article is in line with the analysis of the behavior of "tabique" walls (light timber partition walls), i.e. walls with an internal wooden structure made of vertical and/or inclined boards, which are commonly considered as partition walls, without major bearing capacity. In this context, this work presents the numerical results of strengthening solutions that improve these walls mechanical behavior, namely that increase: (i) their load capacity to allow them to be used as vertical load bearing elements, i.e. to sustain floors and roofs with appropriate safety factors, and (ii) their in-plane stiffness so that they may contribute to the constructions' stability as bracing elements. It is shown that by using simple solutions and easily accessible technology, resorting to steel and wooden elements, it is possible, if necessary, to increase significantly the vertical load capacity and the shear stiffness of these walls.

Palavras-chave: Reabilitação / Tabique / Encurvadura / Simulação numérica / Reforço

Keywords: Rehabilitation / "Tabique" technique / Buckling / Numerical simulation / Reinforcement

João Miranda Guedes

Professor Auxiliar
FEUP
Porto, Portugal
jguedes@fe.up.pt

André Pires

Engenheiro Civil (MIEC)
FEUP
Porto, Portugal
andre.manuel.cheu.pires@gmail.com

Tiago Ilharco

Engenheiro Civil (M.Sc.)
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.

GUEDES, J. [et al.] – Análise de medidas de reforço de paredes de tabique. Estudo numérico. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 8. ISSN 2183-8488. (novembro 2018) 71-82.

1 Introdução

Este trabalho insere-se na temática da reabilitação e surge na sequência de outros estudos efetuados a respeito das construções antigas, [1], [2], tendo neste caso como alvo de estudo as paredes de tabique [3], [4], [5], nomeadamente através de ensaios experimentais em laboratório [6], [7]. A conservação e reabilitação, não só deste elemento construtivo específico, mas de todos os elementos que constituem o património construído antigo em geral, resultam da necessidade, ou apenas da vontade, de manter estas tipologias construtivas pelo valor cultural, económico, social e mesmo simbólico que representam. A documentação, cartas e recomendações internacionais sobre a intervenção e preservação do património construído antigo consideram-no na sua globalidade, como um todo e não um conjunto de partes desfragmentadas que se podem substituir, ou anular em detrimento de outras [8].

As paredes de tabique foram já alvo de um estudo, também numérico, detalhado, efetuado pelos autores deste artigo onde era analisado o seu comportamento em condições normais, não reforçadas [9]. No presente estudo pretende-se agora analisar possíveis soluções de reforço e a melhoria que introduzem, se e quando necessário, no comportamento das paredes de tabique às ações verticais e horizontais no seu plano.

Neste contexto, este trabalho de investigação tem como objetivo último estimular a preservação da construção de tabique, propondo para isso diferentes soluções de reforço tecnicamente acessíveis, utilizando elementos metálicos e de madeira, com vista a melhorar o seu comportamento e, inclusivamente, a dotá-las de capacidade resistente suficiente para suportarem pavimentos e coberturas com fatores de segurança adequados, caso a sua capacidade original não seja suficiente. Para além disso, procura-se também incrementar a rigidez das paredes ao corte no seu plano de forma a poderem contribuir para o contraventamento das construções onde se integram. A análise que se apresenta, de carácter puramente numérico, utiliza os casos de estudo já apresentados no artigo dos mesmos autores anteriormente referido, nomeadamente os mesmos modelos numéricos para a geometria e para os materiais, integrando agora as soluções de reforço que se pretende testar e, simultaneamente, diferentes condições de ligação das paredes no seu contorno. Para além disso, procurou-se numa primeira fase avaliar o impacto que a degradação de algumas das tábuas poderá eventualmente ter no comportamento das paredes à compressão vertical.

2 Breve apresentação dos casos de estudo

Neste ponto serão apresentados brevemente os modelos utilizados e que se encontram descritos com maior detalhe em [9]. Em particular, são analisados 3 modelos de paredes de tabique designados por S, SP e D, os dois primeiros de tabuado simples e o segundo de tabuado duplo (Figuras 1 e 2). Por opção, as análises consideram apenas a contribuição do esqueleto de madeira das paredes, não simulando o material de enchimento nos modelos numéricos. Todos os cálculos foram realizados com recurso ao programa de análise de estruturas SAP2000 [10]. A escolha deste programa apoiou-se nos bons resultados obtidos na simulação de

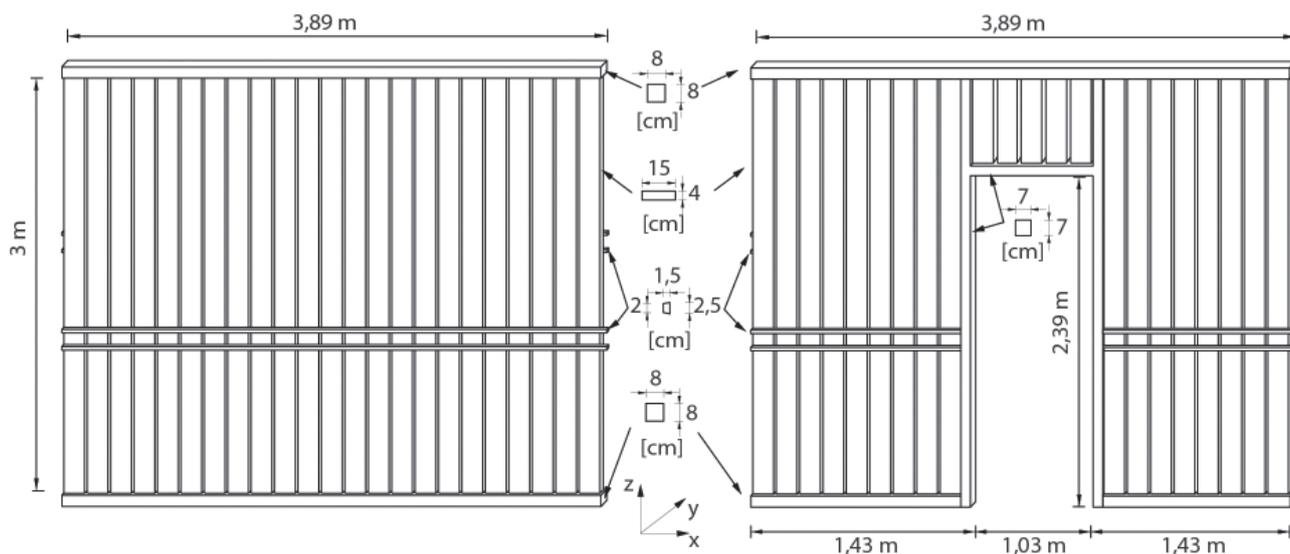


Figura 1 Modelos S e SP (esquerda e direita, respetivamente)

resultados experimentais realizados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Experimental (LESE) da FEUP em paredes com altura e estrutura de tabuado semelhantes [6].

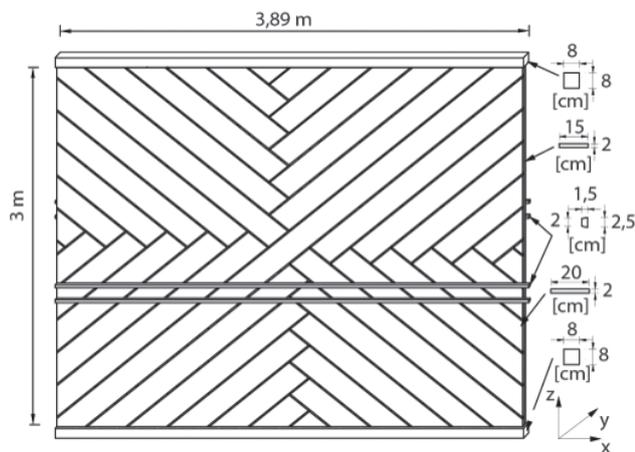


Figura 2 Modelo D

As ripas de madeira (correspondentes ao fasquio) 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, de forma a permitir apenas a rotação das ripas em relação às tábuas. A folga entre ripas é de 3 cm, a que qual corresponde um afastamento entre eixos longitudinais de 5,5 cm. Todas as medidas adotadas nos elementos que constituem os tabiques modelados correspondem a valores estimados médios usualmente encontrados neste tipo de paredes. Considerou-se madeira de pinho nacional da classe de qualidade 'E', de acordo com a norma NP 4305 (1995) [11], que corresponde à classe de resistência

das madeiras resinosa C18 definidas na norma EN 338 (2003) [12], e para a qual o valor médio do módulo de elasticidade é $E = 9,0$ GPa. 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. Este modelo foi testado em [9] com bons resultados, quando comparados com os obtidos pelo modelo teórico de encurvadura.

3 Impacto causado pela degradação de tábuas

Antes de serem apresentadas as diferentes soluções de reforço a analisar, foram admitidos possíveis cenários de dano associados à deterioração de tábuas escolhidas de forma seletiva, de modo a simular degradações pontuais e a verificar o impacto desses danos no funcionamento à compressão vertical das paredes. Foram considerados quatro cenários de deterioração simulados através da redução do módulo de elasticidade da madeira para 5,0 GPa. De referir que, apesar desses danos, se assumiu que a ligação das tábuas aos outros elementos não sofria alterações, assim como se mantinham inalteradas todas as restantes condições no modelo. Relativamente aos cenários, o primeiro e o segundo afetam a zona central, enquanto o terceiro e o quarto afetam o terço esquerdo da parede. Estes cenários adotam a designação de TF (Tábua Fraca), seguida de C ou T consoante as tábuas com o módulo de elasticidade reduzido se localizam na zona central ou no terço esquerdo da parede, respetivamente, e do número de tábuas degradadas consideradas. Na Figura 3 são apresentados, a título ilustrativo, os esquemas de dano definidos para o modelo S.

Assim, os cenários propostos para a representação de anomalias são os seguintes:

- Cenário TFC1: Modelo com uma tábua fraca no centro;
- Cenário TFC3: Modelo com três tábuas fracas no centro;

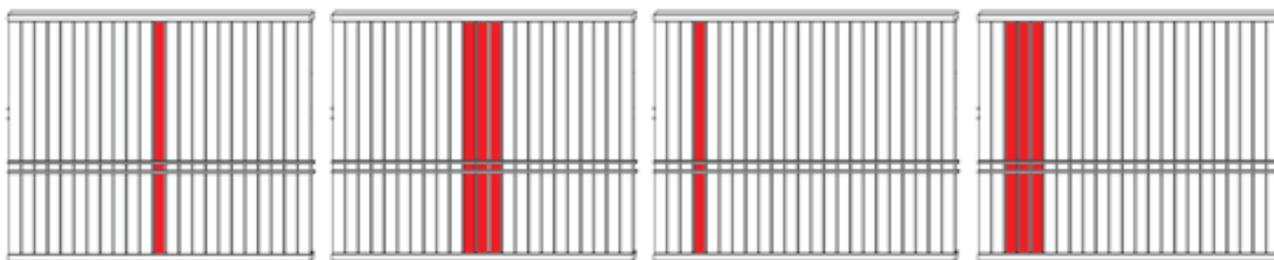


Figura 3 Esquemas de dano: TFC1, TFC3, TFT1 e TFT3, respetivamente

- Cenário TFT1: Modelo com uma tábua fraca no terço esquerdo;
- Cenário TFT3: Modelo com três tábuas fracas no terço esquerdo.

Nesta seção são então estudados os modelos S, SP e D nos quatro cenários de dano referidos. No caso do modelo SP foram apenas introduzidas modificações nos terços da parede, dado que a zona central é ocupada pela abertura. Relativamente aos resultados, constata-se que as configurações da deformada (1º modo de encurvadura) são idênticas às das estruturas base correspondentes às paredes sem qualquer tipo de dano. A diferença reside unicamente no valor da carga crítica uniformemente distribuída que decresce com a introdução do dano, mas de forma pouco significativa. A diferença verificada nos valores das cargas limite é mínima, concluindo-se que, mesmo que a parede tenha uma zona degradada nas condições simuladas, isso não altera significativamente o comportamento geral da parede à encurvadura. Para este resultado contribui, definitivamente, o fasquio que liga as tábuas e obriga a parede a ter uma deformada por encurvadura “homogénea”, atenuando o peso negativo das tábuas danificadas. Os valores para os casos estudados são apresentados no Quadro 1, bem como os valores dos modelos base não danificados.

Quadro 1 Carga crítica de encurvadura (kN/m) (incremento em relação ao modelo Base)

Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	
S-base	46,4	SP-base	38,7	D-base	7,8
S-TFC1	43,2 (-6,9%)	SP-TFC1	-	D-TFC1	7,7 (-1,3%)
S-TFC3	41,4 (-10,8%)	SP-TFC3	-	D-TFC3	7,4 (-5,1%)
S-TFT1	43,1 (-7,1%)	SP-TFT1	37,3 (-3,6%)	D-TFT1	7,7 (-1,3%)
S-TFT3	41,3 (-11,0%)	SP-TFT3	33,4 (-13,7%)	D-TFT3	7,3 (-6,4%)

Verifica-se que a maior diferença entre os valores obtidos e o valor da carga crítica associado ao modelo base é de cerca de 14%, e que se obtém uma redução idêntica para os cenários de dano na zona central e na zona do terço da parede. Conclui-se portanto que a importância e a relevância destes danos são reduzidas e que não influem significativamente no comportamento da parede nas condições analisadas. Note-se que, no caso do modelo S, este estudo corresponde a considerar 1 a 3 tábuas degradadas num total de 23, ou seja, uma percentagem de dano entre 4,3% e 13,0%, respetivamente.

4 Condições de fronteira

Neste ponto são admitidos cinco cenários associados a diferentes condições fronteira que se podem encontrar, ou introduzir, nestas paredes, podendo algumas ser associadas a medidas de reforço estrutural (Quadro 2):

- Cenário 1: Modelo base com nó extremo esquerdo do frechal superior fixo na direção vertical. Trata-se de uma condição existente em algumas situações reais, nomeadamente quando as paredes encostam a paredes de alvenaria e se encontram ligadas nessa extremidade a vigas de pavimento encastradas na parede;
- Cenário 2: Modelo base com ambos os nós extremos do frechal superior fixos na direção vertical;
- Cenário 3: Modelo base com cantoneiras na ligação dos frechais superior e inferior aos elementos estruturais onde a parede apoia na base e liga no topo. Neste caso trata-se declaradamente de uma ação de reforço;
- Cenário 4: Modelo base com ligação rotulada no topo lateral esquerdo (apoios triplos de translação ao longo de todos os pontos da tábua mais à esquerda). Este cenário pretende simular a ligação entre a parede e outra que lhe é transversal no topo esquerdo. Note-se que neste cenário não se considera a rigidez à rotação que é potencialmente introduzida pelo sistema a utilizar na ligação das paredes;
- Cenário 5: Modelo base com ligação rotulada nos topos laterais esquerdo e direito (apoios triplos de translação ao longo de todos os pontos das duas tábuas extremas). Este cenário pretende simular a ligação entre a parede e outras duas que lhe são transversais em ambos os topos. Também neste cenário não se considera a rigidez à rotação que é potencialmente introduzida pelo sistema a utilizar na ligação das paredes.

Relativamente ao cenário 3, a introdução de cantoneiras de ligação da parede na base e no topo pretende restringir a liberdade de rotação destas duas fronteiras. Na escolha das cantoneiras recorreu-se ao catálogo de chapas e ligadores para madeira da empresa Rothoblaas (www.rothoblaas.pt). Na Figura 4 mostram-se possíveis configurações de ligações utilizando um ou dois angulares colocados simetricamente e, finalmente, a cantoneira escolhida para a análise efetuada.

Trata-se de uma cantoneira de aço ($E = 210$ GPa), de abas desiguais, do tipo WHO ANGOLAR 16080 (aba maior de 160 mm de comprimento, aba menor e largura de 80 mm e espessura de 4 mm). No modelo numérico, a cantoneira é representada por uma

mola de rotação, cuja rigidez foi calculada através de um programa de cálculo estrutural elástico.

Quadro 2 Cenários relativos às condições de fronteira

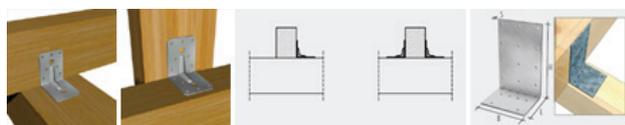
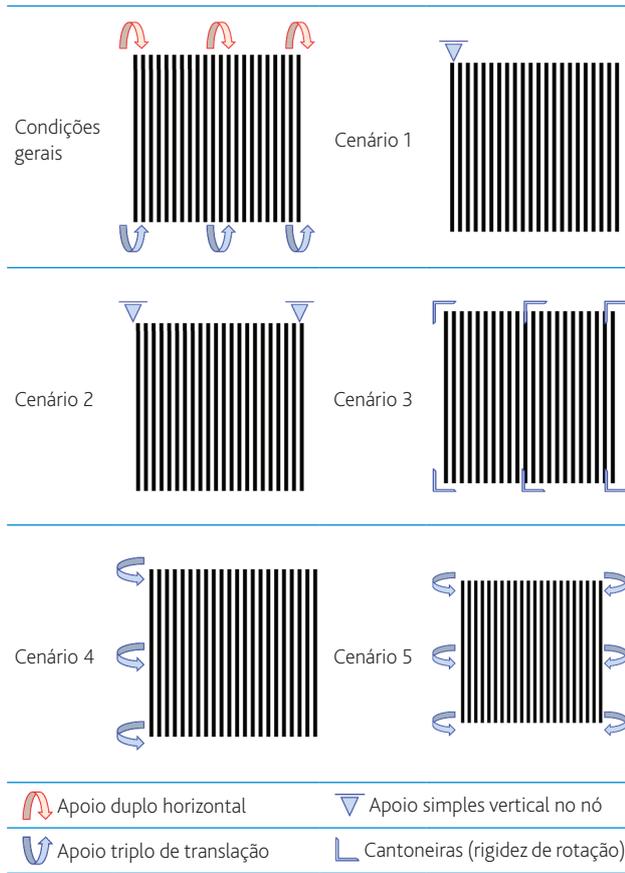


Figura 4 Possíveis ligações com angulares e a peça escolhida à direita

Para isso foi construído um modelo representativo do que se pretende analisar. Estando a cantoneira pregada, e assumindo a eficácia perfeita dessa ligação, quando o elemento vertical, neste caso a parede, sofre uma deformação na direção perpendicular ao seu plano por aplicação de cargas nessa direção, a cantoneira flete a partir do limite da ligação, ou seja, e no presente caso (ilustrado na Figura 5), como se de uma consola com 1/3 do vão da aba menor se tratasse.

Ao modelo numérico que representa a cantoneira com as condições de fronteira referidas, foram adicionadas as características do material e foi aplicada uma carga de 1000 kN/m na parede. O propósito consistia na determinação da rigidez de rotação que a cantoneira é capaz de gerar quando sobre ela é aplicada uma carga distribuída horizontal que simularia o hipotético efeito da

parede. Assim, depois de calculada a estrutura, extraiu-se a rotação e o momento a que o nó B estariam sujeitos: $\varphi = 4,286 \text{ rad}$ e $M = 12,8 \text{ kNm}$ e, através da relação entre o momento e a rotação, determinou-se o valor da rigidez equivalente por cantoneira, $K = 2,99 \text{ kNm/rad}$.

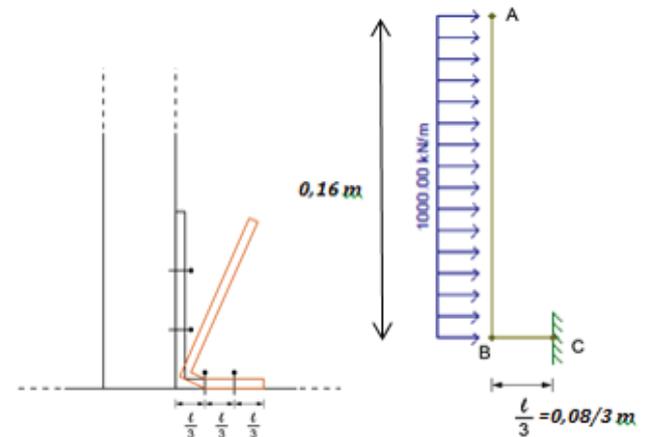


Figura 5 Movimento realizado pela cantoneira e modelo numérico associado

Optou-se por considerar seis cantoneiras por metro de parede (3 em cada face), ou seja, três pares por metro. Esta opção traduz-se numa rigidez por metro de valor igual a $K = 17,9 \text{ kNm/rad/m}$. No entanto, a rigidez que interessa quantificar é a rigidez por apoio, neste caso por tábua já que os apoios nas paredes no modelo numérico no programa de cálculo SAP2000 se encontram igualmente distribuídos pelas tábuas. Chega-se então a uma rigidez de rotação por apoio de $K = 17,9 \times 0,17 = 3,05 \text{ kNm/rad}$, sendo a solução simulada através da inclusão desta rigidez em cada apoio, superior e inferior, na direção de flexão da parede para fora do seu plano. Os Quadros 3 e 4 ajudam a compreender e a sistematizar os cenários propostos e as condições que lhes estão associadas. As translações e as rotações bloqueadas são indicadas nas tabelas com o número 1, seguido do valor da rigidez entre parêntesis, no caso de ser finito. Caso se encontrem livres, são indicadas com o número 0.

Quadro 3 Condições de fronteira correspondentes aos frechais inferior e superior

	Nós do frechal inferior				Nós do frechal superior				Nó extremo	
	Ux	Uy	Uz	Rx (kNm/rad)	Ux	Uy	Uz	Rx (kNm/rad)	Uz	Uz
Cenário 1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0
Cenário 2	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
Cenário 3	1	1	1	1 (3,05)	1	1	0	1 (3,05)	0	0
Cenário 4	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
Cenário 5	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0

Quadro 4 Condições de fronteira correspondentes aos topos esquerdo e direito

	Nós do topo lateral esquerdo				Nós do topo lateral direito			
	Ux	Uy	Uz	Rx	Ux	Uy	Uz	Rx
Cenário 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 2	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenário 4	1	1	1	0	0	0	0	0
Cenário 5	1	1	1	0	1	1	1	0

5 Ações de reforço principais

Neste capítulo irão discutir-se soluções de reforço de paredes de tabique, prevenindo-se ações que melhorem o seu desempenho e, com isso, o desempenho global do edifício onde se integram. Assim, propõe-se um conjunto de soluções destinadas a melhorar o comportamento e a aumentar a capacidade resistente destas paredes, evitando a sua demolição. Deste modo, são propostos quatro cenários de reforço que incluem o aço e a madeira por se tratar de materiais compatíveis com as componentes e a estrutura das paredes de tabique.

5.1 Reforço utilizando chapas de aço

A primeira ação de reforço proposta diz respeito à introdução de chapas metálicas e considera duas opções. A primeira, designada por RA (abreviatura para Reforço de Aço), corresponde à aplicação de uma chapa de aço S235 ($E = 210$ GPa) com uma largura de 6 cm e uma espessura de 3 mm. Nesta primeira abordagem, a introdução destas chapas implica retirar o reboco e o fasquio. A parede passa a ser constituída apenas pelas tábuas de madeira verticais, ou verticais e diagonais no caso dos protótipos tipo D, e pelas chapas metálicas aplicadas apenas num dos lados da parede. A serem testadas experimentalmente no futuro, como se pretende, poder-se-á equacionar nestas soluções a aplicação direta das chapas sobre o fasquio, ou o corte do fasquio apenas no alinhamento das chapas. A colocação das chapas é feita em forma de cruz de Sto. André: duas chapas colocadas na diagonal e que percorrem toda a parede, e mais duas chapas centradas, uma colocada na horizontal, ao longo de todo o comprimento da parede, e outra na vertical, abarcando toda a sua altura.

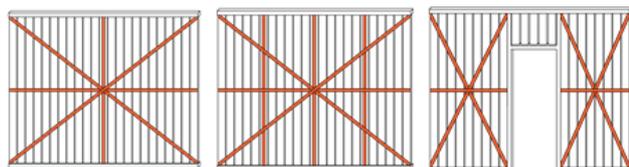


Figura 6 Modelos S-RA, S-RAV, SP-RA

A segunda opção de reforço em aço, designada por RAV (abreviatura para Reforço de Aço Vertical), acrescenta ao cenário RA um reforço suplementar que consiste na adição de chapas verticais aos quartos

do vão. A sua colocação dá origem a uma distribuição de elementos de reforço mais homogénea, colmatando zonas laterais menos rigidificadas. As Figuras 6 e 7 apresentam, de forma esquemática, os cenários de reforço adotados.

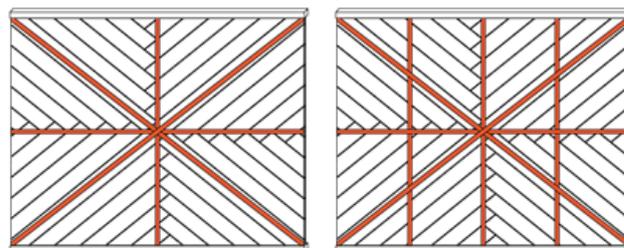


Figura 7 Modelos D-RA, D-RAV

5.2 Reforço utilizando tábuas de madeira

A segunda ação de reforço passa pela utilização da madeira, em detrimento do aço. Assim, é proposta uma ação de reforço RM (abreviatura para Reforço de Madeira) em que são utilizadas tábuas com o mesmo material das tábuas que constituem a parede. Este reforço é executado com quatro tábuas simples (largura $L = 0,15$ m e espessura $e = 0,04$ m), assumindo uma disposição diferente da anterior. Existe um conjunto de três tábuas de reforço dispostas na diagonal: uma tábua diagonal central e duas tábuas diagonais aos quartos da diagonal da parede, e uma tábua vertical que reforça a zona central. Assim, o modelo é composto pelas tábuas que constituem a parede e pelas que servem de reforço e que apresentam as mesmas características.

À semelhança do que acontece para as soluções que envolvem o aço como material de reforço, no caso da madeira é também contemplada a hipótese de inserção de tábuas verticais aos quartos do vão. Para este reforço complementar atribuiu-se a designação RMV (abreviatura para Reforço de Madeira Vertical). As Figuras 8 e 9 apresentam, de forma esquemática, os cenários de reforço adotados.

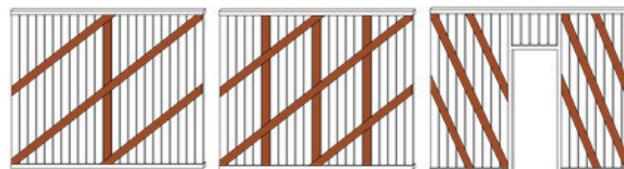


Figura 8 Modelos S-RM, S-RMV, SP-RM

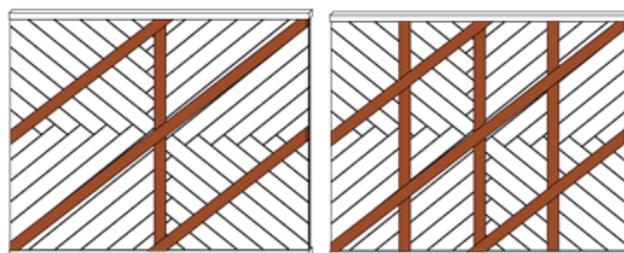


Figura 9 Modelos D-RM, D-RMV

Considera-se nestas operações que as tábuas de reforço serão rigidamente ligadas às tábuas do tabique. Por outro lado, e tal como nas soluções de reforço que envolvem a utilização de aço, considera-se que a intervenção é feita apenas de um lado da parede e que envolve a remoção total do ripado.

6 Análise à compressão vertical (encurvadura)

Definidas as condições de fronteira bem como os quatro cenários de reforço que incluem elementos em aço e madeira: RA, RAV, RM e RMV, a análise prossegue com a determinação do valor da carga de compressão crítica associada a cada modelo. Numa primeira fase, é analisado o comportamento estrutural das paredes de tabique considerando apenas as novas condições de fronteira definidas. Posteriormente é avaliada a melhoria introduzida pelas medidas de reforço em aço e em madeira.

6.1 Apresentação de resultados e discussão

6.1.1 Resultados relativos aos cenários associados às condições de fronteira

Os cálculos efetuados envolvem os 3 modelos em estudo, S, SP e D e a informação relativa aos cenários indicados nos Quadros 3 e 4. O Quadro 5 apresenta os valores da carga crítica correspondente a cada um dos modelos analisados.

Quadro 5 Carga crítica de encurvadura (kN/m) (incremento em relação ao modelo Base)

Modelo	S	SP	D	
Base	46,4	38,7	7,8	
Cenários	1	47,5 (2,4%)	39,8 (2,8%)	8,7 (11,5%)
	2	49,4 (6,5%)	43,6 (12,7%)	10,4 (33,3%)
	3	64,0 (37,9%)	56,1 (45,0%)	20,0 (156,4%)
	4	54,1 (16,6%)	38,7 (0,0%)	10,9 (39,7%)
	5	113,9 (145,5%)	65,7 (69,8%)	29,0 (271,8%)

Nos parágrafos seguintes faz-se a análise comparativa da resposta dos diferentes modelos:

- Modelos S-1 e S-2: Estes dois modelos, com um ou os dois nós extremos do frechal superior fixos na direção vertical z, traduzem-se num incremento máximo da carga de 6,5%, ou seja, reduzido. Observa-se que as tábuas que estão próximas do(s) nó(s) bloqueado(s) experimentam no modo de encurvadura uma curvatura menos acentuada do que as tábuas mais afastadas.
- Modelo S-3: Neste caso, obtém-se uma melhoria de 37,9 % em relação ao modelo S-base. As tábuas encurvam com tripla

curvatura como resultado da restrição da rotação imposta aos frechais pelas cantoneiras.

- Modelos S-4 e S-5: Neste modelo a melhoria só é significativa e bastante benéfica, 145,5%, quando a parede se encontra rotulada em ambas os topos. No caso S-4 a parede encurva apenas no lado não restringido e no caso S-5 o modo de encurvadura é marcado pela deformação da zona central da parede, funcionando os topos como charneiras.
- Modelo SP-1 e SP-2: A consideração destas duas condições de fronteira não alteram significativamente o modo de encurvadura relativamente ao modelo base, nem introduzem melhorias expressivas na capacidade de carga da parede, no limite 12,7%. A zona da parede que encurva primeiro alterna entre os troços de parede que se situam do lado direito (SP-1) e do lado esquerdo (SP-2) da porta.
- Modelo SP3: Este modelo apresenta uma melhoria de 45,0% em relação ao modelo SP-base. As tábuas encurvam com tripla curvatura como resultado da restrição da rotação imposta aos frechais pelas cantoneiras.
- Modelo SP-4 e SP-5: O modelo SP-4 não apresenta qualquer benefício em relação ao modelo SP-base. Esta igualdade resulta de o modo de encurvadura associado a este modelo encurvar, tal como no modelo base, apenas o lado direito da parede, não sendo afetado pelas novas condições de fronteira. No caso do modelo SP-5, constata-se que a parede encurva na zona central, envolvendo apenas os prumos das ombreiras da porta; as tábuas verticais permanecem na posição inicial, uma vez que estas e os prumos se encontram desligados entre si, tal como acontece habitualmente em paredes de tabique reais. Neste caso verifica-se um incremento da carga limite de 69,8%.
- Modelo D-1 e D-2: Enquanto o modelo D-1 apresenta uma deformada para o modo de encurvadura semelhante à do modelo D-base e um incremento da carga crítica de apenas 11,5%, o modelo D-2 apresenta um incremento 3 vezes maior, ou seja, de 33,3%, indiciando que a ligação de ambos os topos laterais da parede influem significativamente no comportamento da parede de tabique.
- Modelo D-3: Verifica-se que o valor da carga crítica aumenta 156,4 % em relação ao valor base, evidenciando que a introdução das cantoneiras materializa uma solução que provoca um aumento considerável da capacidade resistente da parede.
- Modelo D-4 e D-5: A configuração da deformada de D-4 é marcada por uma curvatura muito ligeira na zona do lado restringido, resultando numa eficiência idêntica à obtida com o modelo D-2. No caso do modelo D-5, a parede apenas se deforma na região central, apresentando um valor de carga crítica superior a duas vezes e meia o obtido no modelo D-base, 271,8%.

Como nota final, realça-se que a condição de restrição lateral do movimento das paredes obriga o fasquio a participar de forma ativa no modo de encurvadura, "retardando" a encurvadura das tábuas mais centrais e adoçando a forma do modo.

6.1.2 Resultados dos modelos reforçados com a adição de material

As ações de reforço RA, RAV, RM e RMV foram aplicadas a cada um dos modelos S e D definidos, sendo executadas não só sobre o modelo base, mas também sobre os modelos sujeitos aos cenários 3, 4 e 5 associados às condições de fronteira, de modo a perceber a melhoria que é introduzida na estrutura quando é tida em conta esta ação conjunta. Relativamente ao modelo SP, apenas é considerado o reforço RA, já que os troços de parede que ladeiam a porta (nembos) não apresentam dimensão suficiente para justificar a introdução dos reforços suplementares aos quartos de vão. As condições de fronteira correspondentes aos cenários 1 e 2 não foram consideradas nesta análise por não introduzirem melhorias significativas no comportamento das paredes. Para além disso, lembra-se que as opções de reforço escolhidas, destinadas a melhorar o comportamento à encurvadura das paredes estudadas, implicaram a remoção do fasquiado no modelo numérico de modo a permitir o contacto direto dos elementos de reforço com os elementos verticais (tábuas). Numa situação real, esta remoção poderá eventualmente ser pontual, ou ser efetuada apenas numa das faces; no entanto nestas análises foi considerada como total. Nos Quadros 6 e 7 apresentam-se os valores para a carga crítica dos diferentes modelos reforçados analisados.

Quadro 6 Carga crítica de encurvadura (kN/m) – Reforço em aço

Modelo	Reforço	S		SP		D	
		RA	RAV	RA	RA	RAV	RAV
Cenários	Base	85,3	132,5	92,9	19,7	63,0	
	3	106,9	155,5	108,6	33,7	82,4	
	4	88,7	139,0	115,9	20,8	70,4	
	5	97,7	161,2	156,1	21,9	78,1	

Quadro 7 Carga crítica de encurvadura (kN/m) – Reforço em madeira

Modelo	Reforço	S		SP		D	
		RM	RMV	RM	RM	RMV	RMV
Cenários	Base	101,4	128,2	89,2	33,1	73,2	
	3	121,9	141,5	98,3	46,2	87,5	
	4	107,9	140,4	89,5	36,5	98,7	
	5	130,1	145,1	89,0	52,1	143,7	

Para uma análise mais detalhada, de forma a perceber a melhoria introduzida por cada solução, apresentam-se os Quadros 8, 9 e 10,

onde se encontram os modelos por ordem decrescente de melhoria introduzida e o respetivo incremento do valor da carga crítica (em percentagem) quando comparada com a que foi obtida para os modelos base; o número na designação dos modelos indica o cenário associado às condições de fronteira.

Para o mesmo modelo são apresentadas, lado a lado, as soluções de reforço que envolvem o aço e a madeira de modo a facilitar a sua comparação quando se combinam com a mesma condição de fronteira. É ainda apresentada a percentagem de subida dos valores das cargas correspondentes aos reforços RAV e RMV relativamente aos modelos RA e RM que apresentam a mesma condição de fronteira.

Quadro 8 Incremento percentual da carga crítica dos modelos S reforçados em relação ao modelo S-Base e entre soluções de reforço (RA vs. RAV e RM vs. RMV) com as mesmas condições de fronteira

	Reforço em Aço		Reforço em Madeira		
	Incremento em relação ao modelo		Incremento em relação ao modelo		
	Base (%)	RA (%)	Base (%)	RM (%)	
S-5-RAV	247,4	65,0	S-5-RMV	212,7	11,5
S-3-RAV	235,1	45,5	S-3-RMV	205,0	16,1
S-4-RAV	199,6	56,7	S-4-RMV	202,6	30,1
S-RAV	185,6	55,3	S-5-RM	180,4	–
S-3-RA	130,4	–	S-RMV	176,3	26,4
S-5-RA	110,6	–	S-3-RM	162,7	–
S-4-RA	91,2	–	S-4-RM	132,5	–
S-RA	83,8	–	S-RM	118,5	–

Quadro 9 Incremento percentual da carga crítica dos modelos SP reforçados em relação ao modelo SP-Base

	Reforço em Aço		Reforço em Madeira	
	Incremento em relação ao modelo SP-Base (%)		Incremento em relação ao modelo SP-Base (%)	
SP-5-RA	303,4	SP-3-RM	154,0	
SP-4-RA	199,5	SP-4-RM	131,3	
SP-3-RA	180,6	SP-RM	130,5	
SP-RA	140,1	SP-5-RM	130,0	

Quadro 10 Incremento percentual da carga crítica dos modelos D reforçados em relação ao modelo D-Base e entre soluções de reforço (RA vs. RAV e RM vs. RMV) com as mesmas condições de fronteira

	Reforço em Aço		Reforço em Madeira		
	Incremento em relação ao modelo		Incremento em relação ao modelo		
	Base (%)	RA (%)	Base (%)	RM (%)	
D-3-RAV	956,4	144,5	D-5-RMV	1742,3	175,8
D-5-RAV	901,3	256,6	D-4-RMV	1165,4	170,4
D-4-RAV	802,6	238,5	D-3-RMV	1021,8	89,4
D-RAV	708,0	219,8	D-RMV	838,5	121,1
D-3-RA	332,1	–	D-5-RM	567,9	–
D-5-RA	180,8	–	D-3-RM	492,3	–
D-4-RA	166,7	–	D-4-RM	367,9	–
D-RA	152,6	–	D-RM	324,4	–

Os valores apresentados para a carga crítica evidenciam uma melhoria no comportamento à encurvadura para todos os casos decorrentes da aplicação dos reforços, quer em aço quer em madeira. Relativamente ao modelo S, verifica-se que a intervenção com o aço ou com a madeira traduz-se em resultados semelhantes. Para o modelo com abertura, a utilização do aço apresenta melhorias mais evidentes e para a parede dupla é o reforço com madeira o mais eficiente. Nos parágrafos seguintes faz-se uma análise mais detalhada destes resultados para os diferentes modelos:

- No modelo S, quando se comparam os resultados dos reforços que complementam os quartos do vão com chapas metálicas, ou tábuas de madeira com as soluções RA e RM, respetivamente, verifica-se que a primeira se traduz num incremento significativo em relação à segunda. As soluções que combinam a introdução do reforço em aço com a "amarração" da parede nos topos e com a introdução das cantoneiras na base e no topo da parede são as que apresentam melhores resultados. Relativamente às paredes reforçadas com madeira, esta ordem de um modo geral mantém-se. Como já foi referido, o reforço com aço ou com madeira origina resultados semelhantes.
- No modelo SP, as soluções com reforço de madeira apresentam piores resultados quando comparadas com as soluções com reforço com aço. Em particular, a solução em aço com os dois topos laterais fixos, a mais eficiente, apresenta um acréscimo de

carga de cerca de três vezes a carga do modelo base, reduzindo-se para cerca de duas vezes no caso de apenas um dos topos se encontrar fixo. No caso do reforço com madeira, as condições de fronteira não alteram significativamente o incremento de carga crítica em relação à situação do modelo base.

- Relativamente ao modelo D, os melhores resultados surgem com a introdução dos reforços RAV e RMV combinados com as condições de fronteira 5, 3 e 4, tal como no modelo S. Para este modelo, a intervenção com madeira apresenta melhores resultados, originando incrementos do valor da carga crítica superiores aos que ocorrem quando são aplicados reforços em aço, podendo atingir incrementos de carga em relação ao modelo base de cerca de dezassete vezes.

7 Comportamento a ações horizontais

Depois de avaliada a capacidade resistente à compressão dos modelos reforçados através do cálculo da carga crítica de compressão, nesta secção avalia-se a rigidez das paredes reforçadas quando submetidas a ações horizontais no plano no topo, ou seja, a capacidade de estas paredes poderem contribuir para o contraventamento horizontal das construções onde se integram.

Estudou-se então, de forma numérica e em comportamento linear elástico, a rigidez das paredes de tabique às ações horizontais referidas, analisando-se o contributo das ripas do fasquio, e a influência da distribuição das tábuas (tabique simples e tabique duplo) e das ações de reforço.

7.1 Modelos analisados

Nesta secção são apenas consideradas como condições de fronteira o cenário base e os cenários 1 e 2. O efeito do cenário 3 é difícil de reproduzir neste modelo e os cenários 4 e 5 não permitiriam a deformação horizontal no plano da parede. Estes cenários são depois combinados com as soluções de reforço descritas anteriormente.

7.2 Comportamento a ações horizontais dos modelos reforçados

Selecionados os modelos a analisar, determinou-se a rigidez horizontal ($k = F/\Delta h$) considerando a média dos deslocamentos horizontais dos dois nós extremos superiores (Δh) quando se aplica uma carga horizontal total F uniformemente distribuída ao longo do comprimento L do freixal superior. Na Figura 10 são apresentados exemplos das deformadas obtidas para os modelos S-2-RAV e SP-2-RM. No Quadro 11 apresentam-se os valores de rigidez obtidos para cada caso estudado e os incrementos em relação aos modelos base respetivos.

Quadro 11 Rigidez horizontal (kN/m) (incremento em relação ao modelo Base)

		Sem reforço		Com reforço			
		Base	1	2	2-RA	2-RAV	2-RM
Modelo S	997	1012	1019	16345	16483	8722	9861
		(1,4%)	(2,2%)	(1539%)	(1553%)	(775%)	(889%)
Modelo SP	761	769	777	10471	–	6295	–
		(0,1%)	(2,1%)	(1276%)	–	(727%)	–
Modelo D	23363	26735	30751	41604	42283	40311	44205
		(14,4%)	(31,6%)	(78%)	(81%)	(73%)	(89%)

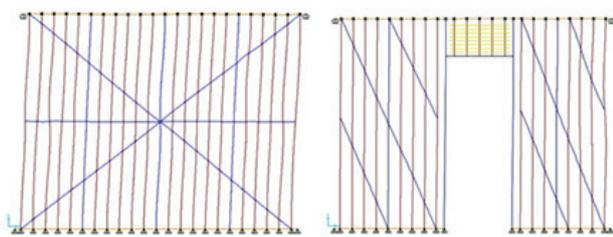


Figura 10 Modelo S-2-RAV e SP-2-RM (exemplos de deformadas)

Em termos gerais, os resultados mostram que o modelo SP apresenta uma diminuição do valor da rigidez horizontal, relativamente ao modelo S, pelo facto de a parede conter uma abertura. Por outro lado, o modelo D-Base apresenta uma rigidez cerca de vinte e duas vezes superior à do modelo S-Base, mostrando que o uso de tábuas diagonais tem um efeito particularmente benéfico para a rigidez horizontal no plano da parede. Nos parágrafos seguintes faz-se uma análise mais detalhada dos resultados obtidos com cada um dos modelos:

- No caso do modelo S, constata-se que, para as soluções que não apresentam qualquer tipo de reforço, a variação do valor da rigidez horizontal é pouco pronunciada, verificando-se que os cenários 1 e 2 não aumentam significativamente a rigidez da estrutura. Porém, as paredes reforçadas apresentam aumentos de rigidez enormes em relação às paredes não reforçadas, sendo maiores no caso dos reforços com aço; o incremento de rigidez da solução RA em relação à RM é de 87%. Por sua vez, o acréscimo de reforços verticais aos quartos do vão não produz aumentos significativos de rigidez.
- Relativamente ao modelo SP, continua a verificar-se que as paredes reforçadas apresentam aumentos de rigidez enormes em relação às paredes não reforçadas, e que a solução com as chapas de aço é a que apresenta maior aumento de rigidez, cerca de treze vezes em relação ao modelo base.
- No caso do modelo D os resultados indicam que a fixação de um ou dos dois nós extremos traz, no caso desta parede e quando comparada com as paredes anteriores, benefícios superiores em termos de rigidez horizontal da estrutura. No que diz respeito às soluções reforçadas, verifica-se que, embora provoquem um aumento considerável no valor da rigidez horizontal da

parede, em termos percentuais esse incremento é menor do que o obtido para os modelos das paredes de tabique simples. A rigidez associada a esta tipologia de parede é maioritariamente conferida pelas tábuas diagonais do tabique.

8 Conclusões

O presente trabalho tem como principal objetivo promover a reabilitação das paredes de tabique como elementos construtivos com valor e interesse técnico e cultural, evitando ações de intervenção que considerem a sua substituição integral e arbitrária por novos elementos. O trabalho surge na continuidade do estudo realizado em artigo anterior que descrevia e caracterizava este tipo de paredes e apresentava a simulação numérica do comportamento à compressão de um conjunto de paredes de tabique de tabuado simples e duplo [9] representativas de situações reais. Em particular, e utilizando os mesmos modelos, neste artigo são testadas algumas soluções de reforço que permitem aumentar, se e quando necessário, a capacidade resistente às cargas verticais das paredes (carga de encurvadura) e a sua rigidez horizontal no plano. Para além disso, foram simulados cenários de dano pontuais nas tábuas verticais do modelo de tabique simples S, tendo-se mostrado, para esses cenários, que o impacto desses danos no comportamento das paredes seria desprezável. Para este comportamento contribui, definitivamente, o fasquio que adoça o modo de encurvadura, atenuando o peso negativo das tábuas danificadas.

Associados a medidas de reforço estrutural, foram admitidos cinco cenários que envolvem diferentes condições de fronteira. Da análise dos resultados concluiu-se que os cenários que mais contribuem para a resistência à encurvadura da parede são o reforço dos topos laterais, através da ligação da parede de tabique a outras que lhe são perpendiculares, e a introdução de cantoneiras na ligação da parede à estrutura dos pavimentos e dos tetos.

Estas condições de fronteira foram depois combinadas com outras ações de reforço, mais interventivas e aplicadas apenas numa das faces das paredes, destinadas a aumentar a sua capacidade resistente à compressão vertical. Foram considerados dois materiais em alternativa: aço e madeira, e duas soluções para cada um dos materiais. Todas as soluções testadas aumentaram significativamente a capacidade resistente destas paredes. No entanto, e de uma forma geral, as melhores soluções surgiram quando foram combinadas com as condições de fronteira referidas anteriormente como mais eficazes. Na fase final do trabalho avaliou-se ainda a rigidez das paredes submetidas a ações horizontais no plano da parede, tendo-se verificado que a parede de tabique de tabuado duplo apresenta uma rigidez ao corte cerca de 25 vezes maior do que a de tabique simples.

Referências

- [1] Teixeira, J.J.Lopes (2004) – *Descrição do Sistema Construtivo da Casa Burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX*, Porto.
- [2] *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.

- [3] Carvalho, J. (2009) – *Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD.
- [4] Cepeda, A.J.B. (2009) – *Construções de tabique existentes na associação de municípios do Alto Tâmega*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD.
- [5] Martinho, J.M.G. (2010) – *Construção de tabique na Associação de Municípios da Terra Fria do Nordeste Transmontano*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD.
- [6] Rebelo, A.; Guedes, J. M.; Quelhas, B.; Ilharco, T. (2016) – "Assessment of the Mechanical Behaviour of Tabique Walls Through Experimental Tests". In *Historical Earthquake-Resistant Timber Framing in the Mediterranean Area* (pp. 437-446). Springer, Cham.
- [7] Amorim, M.; Silva, B. Q. D.; Miranda Guedes, J. (2018) – "Experimental assessment of in-plane mechanical behavior of tabique walls". *International Journal of Architectural Heritage*, 1-17.
- [8] ICOMOS (2003) – *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico*.
- [9] Pires, A.; Guedes, J.; Ilharco, T. (2016) – "Análise de paredes de tabique: estudo numérico". *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, rpee | Série III | n.º 1 | julho de 2016, pp 55-66.
- [10] SAP2000 – CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, and SAFE. Computers and Structures Inc. Berkeley, California, USA. Abril, 2009.
- [11] NP 4305 – *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 1995.
- [12] BS EN 338 – *Structural timber – Strength classes*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2003.

Esta investigação tem como principal objetivo promover a reabilitação das paredes de tabique como elementos construtivos de grande valor e interesse técnico, histórico e cultural, evitando ações de intervenção que considerem a sua substituição integral e arbitrária por novos elementos. Nesse sentido, o trabalho mostra que através da utilização de soluções simples e tecnologia facilmente acessível, recorrendo ao uso de elementos metálicos e de madeira, poderá ser possível, se e quando necessário, aumentar significativamente a capacidade resistente vertical e a rigidez ao corte destas paredes, dotando-as de uma maior capacidade portante vertical e de contraventamento das estruturas onde se integram.

