

Edifícios Pombalinos: Comportamento e reforço

Paulo B. Lourenço, Graça Vasconcelos, Elisa Poletti

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães
pbl@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

A análise estrutural de edifícios existentes é um desafio complexo por muitas razões, incluindo o desconhecimento sobre o comportamento dos materiais e componentes estruturais. Os edifícios pombalinos representam uma tipologia valiosa do nosso edificado, pelo contexto cultural do sismo de 1755 em Lisboa e de criação de uma cidade nova, bem como pelos aspetos tecnológicos inovadores. O presente artigo apresenta, inicialmente, um breve estado do conhecimento dos edifícios alvenaria-madeira. Posteriormente, são apresentados resultados de ensaios cíclicos recentes na Universidade do Minho sobre esta tipologia de paredes, que permitem caracterizar o seu comportamento e avaliar diferentes soluções de reforço.

PALAVRAS-CHAVE: EDIFÍCIOS POMBALINOS, ALVENARIA-MADEIRA, ENSAIOS EXPERIMENTAIS, CORTE

1. INTRODUÇÃO

Em 1775, no dia de todos os Santos, um violento terramoto, seguido de um *tsunami* e um incêndio formaram a maior catástrofe que Portugal conheceu até hoje. O violento sismo que abalou Lisboa foi de tal forma violento que foi sentido em todo Portugal. O sismo terá destruído cerca de 10% dos edifícios de Lisboa, danificou 60% e poupou os restantes 30%, sendo os edifícios de maior altura os mais sacrificados. Os escombros resultantes dos edifícios caíram para as ruas causando mais vítimas e dificultando a prestação de socorros.

A reconstrução da Baixa levantou diversos problemas construtivos, não só ligados à grandiosidade da obra, como à necessária rapidez de execução e, acima de tudo, à viabilidade perante novas situações de risco. Tendo em vista ultrapassar estes problemas, foi implementado um processo construtivo novo, focando aspetos que até então não tinham sido tratados, como a estabilidade dos edifícios perante as ações sísmicas, a segurança contra incêndio e a standardização dos elementos construtivos, tendo em vista a economia e rapidez da construção. Estes edifícios com estrutura mista madeira e alvenaria são habitualmente designados por edifícios Pombalinos.

1.1. A estrutura resistente dos edifícios Pombalinos

Os edifícios Pombalinos eram construídos em bloco, com a existência de um ou mais saguões centrais para recolha das águas pluviais. As paredes exteriores eram construídas em

alvenaria de pedra rebocada e ligadas a uma estrutura interior de madeira em carvalho ou azinho, que lhes conferia maior rigidez. A ligação entre estes dois elementos era feita por intermédio de peças metálicas pregadas no gradeamento de madeira e chumbadas nas juntas da parede exterior. As peças de madeira que faziam parte do gradeamento são designadas por mãos e ficavam embebidas na parede de alvenaria. Estas paredes, em média, tinham uma espessura de 0.9 m no r/c, que diminuía com a elevação do edifício, ver Figura 1.

Também existiam paredes meeiras perpendiculares às paredes exteriores, com cerca de 0.5 m de espessura, sem qualquer abertura, em alvenaria de pedra rebocada, desde o rés-do-chão até saírem acima dos telhados. Estas tinham não só a finalidade de dividir os edifícios, mas também de constituírem elementos corta-fogo.

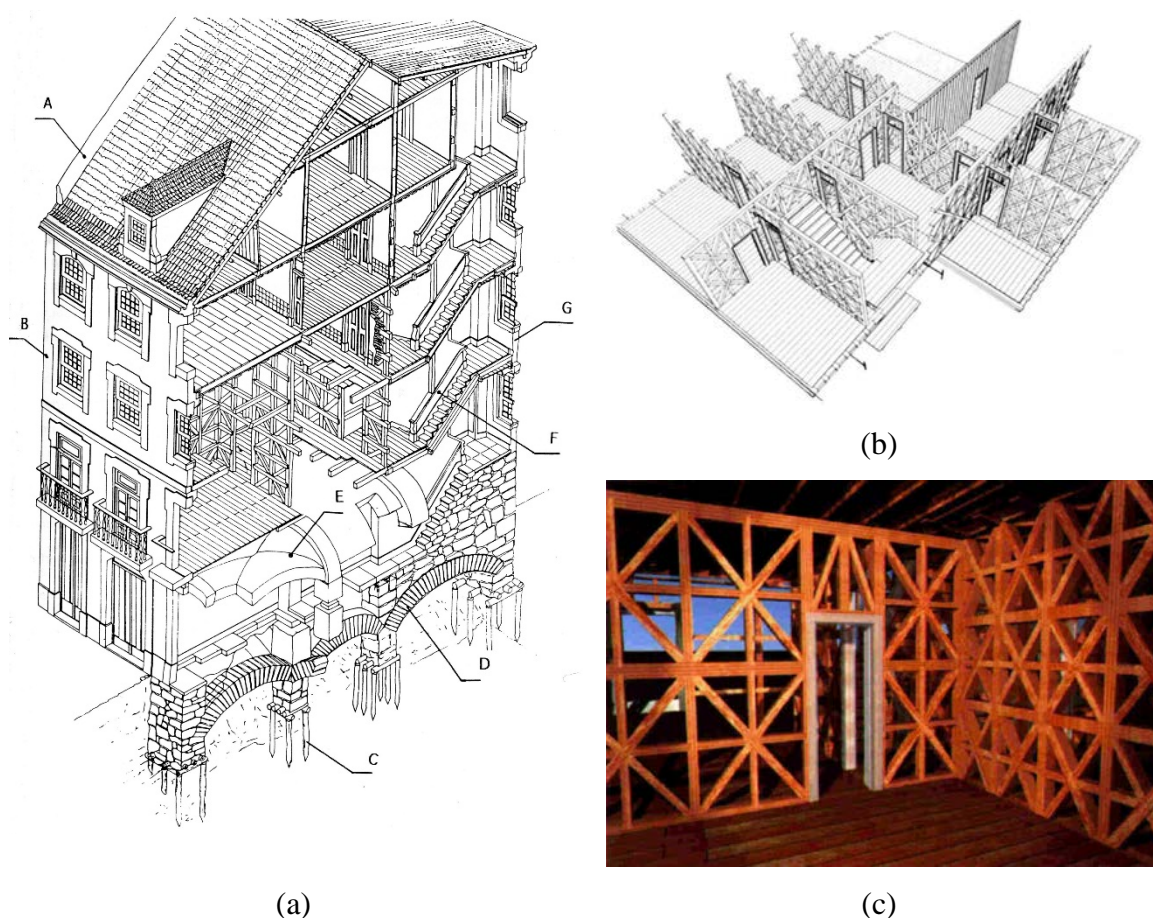


Figura 1 – Pormenores construtivos: (a) perspetiva em corte da construção Pombalina: A – paredes corta-fogo; B – fachadas em paredes grossas de alvenaria de pedra; C – sistema de estacas; D – arcos em pedra; E – abóbadas em pedra no primeiro piso; F – parede que dificultava a ascensão rápida dos fumos pelas escadas; G – escadas colocadas junto dos logradouros para iluminação; (b) perspetiva de um piso formado por gaiolas pombalinas; e (c) imagem virtual do interior de um edifício [1].

Em geral, toda a estrutura do r/c era construída em pedra. Para além das paredes exteriores existiam abóbadas de berço cuidadosamente trabalhadas em cantaria ou abóbadas de aresta executadas em alvenaria de tijoleira, mas apoiadas em paredes, arcos ou pilares em cantaria de pedra. Além deste sistema proporcionar maior ductilidade à estrutura na sua base, coexistia a função de elemento corta-fogo, caso deflagrasse algum incêndio nas lojas. A parte

superior das abóbadas era preenchida com material de enchimento que restava dos escombros do terramoto, com a finalidade de tornar a sua superfície horizontal.

A partir do r/c existiam três tipos de paredes: as de alvenaria de pedra rebocada; as de frontal pombalino, também designadas por gaiolas, formadas por uma treliça de madeira preenchida com elementos cerâmicos e rebocada; e por último as paredes de tabique. A introdução das paredes em frontal pombalino pretendia conferir aos edifícios a capacidade resistente necessária para dissiparem toda a energia transmitida pelas ações horizontais, sem que sofressem estragos consideráveis na totalidade da sua estrutura.

A invenção deste sistema de paredes resistentes não está historicamente comprovada, mas atribui-se a sua origem ao colaborador direto de Manuel da Maia, o engenheiro e arquiteto militar Carlos Mardel [2]. Mardel mandou construir, no Terreiro do Paço, um estrado de madeira onde ergueu um edifício com o novo sistema construtivo, à escala real. De seguida ordenou que um destacamento militar marchasse descontroladamente em cima do estrado com a finalidade de simular a aceleração sísmica transmitida às estruturas, para verificar e comprovar, aos olhos de todos, a viabilidade do sistema. A estrutura dos edifícios pombalinos recebeu muita atenção da comunidade técnica, referindo-se entre outros os estudos de Vítor Córias e Silva [3] e diversas teses de mestrado, por exemplo [4-6].

1.2. Edifícios mistos alvenaria-madeira no mundo

Os edifícios mistos de alvenaria e madeira são populares na Europa, e não apenas em regiões sísmicas, tais como Alemanha ou Inglaterra, ver [7] para detalhes. Esta técnica permite utilizar de peças delgadas de madeira e alvenaria de fraca qualidade nas paredes, sendo particularmente económica e permitindo um bom desempenho estrutural, exigindo no entanto abundância de madeira. Os edifícios pombalinos são caracterizados por uma estrutural tridimensional bastante complexa, incluindo elementos invisíveis de reforço nas fachadas e uma ligação cuidada entre todos os elementos construtivos. A inovação deste género de construção não é tanto na técnica mista, mas mais nos detalhes para melhorar o desempenho sísmico, na definição de soluções *standard* e na sua aplicação em larga escala, e em aspetos como a segurança ao fogo, a salubridade e o planeamento urbano.

Em Itália, edifícios mistos alvenaria-madeira existiam pelo menos desde o império Romano, ver Figura 2a, que combina alvenaria irregular com madeira para uma construção eficiente e ligeira. Estes edifícios foram também utilizados de forma sistemática a seguir ao sismo de 1783 em Reggio Calabria, ver Figura 2b. O novo sistema, designado literalmente por casa tipo cabana, possivelmente devido ao facto de ser necessário construído inúmeros abrigos a seguir a um grande sismo, foi adotado pelas autoridades como forma de construção sismo-resistente, algumas décadas depois do sismo de Lisboa. As instruções emanadas pelo Casa Real regulavam o aspeto exterior e altura dos edifícios, a largura das ruas, a construção das varandas, cúpulas e torres, e a adição do esqueleto de madeira. Esta foi, provavelmente, a primeira normativa sísmica para construção. Em 1908, na sequência do sismo de Messina, os edifícios misto alvenaria-madeira foram novamente utilizados em larga escala, ainda que por pouco tempo, com o advento do betão armado. A normativa que resultou sugeria preparar uma laje de fundação e proceder a escavações, se necessário, uma vez que as fundações em rocha ou solo firme são preferidas. Os elementos verticais de madeira devem ser fixados na rocha ou na laje de fundação com um comprimento mínimo de 0.8 m, e devem ainda ser tratados por carbonização nas extremidades. Mas a estrutura de madeira, que deve ser pregada, não estava definida e existem inúmeras variações de aplicação.

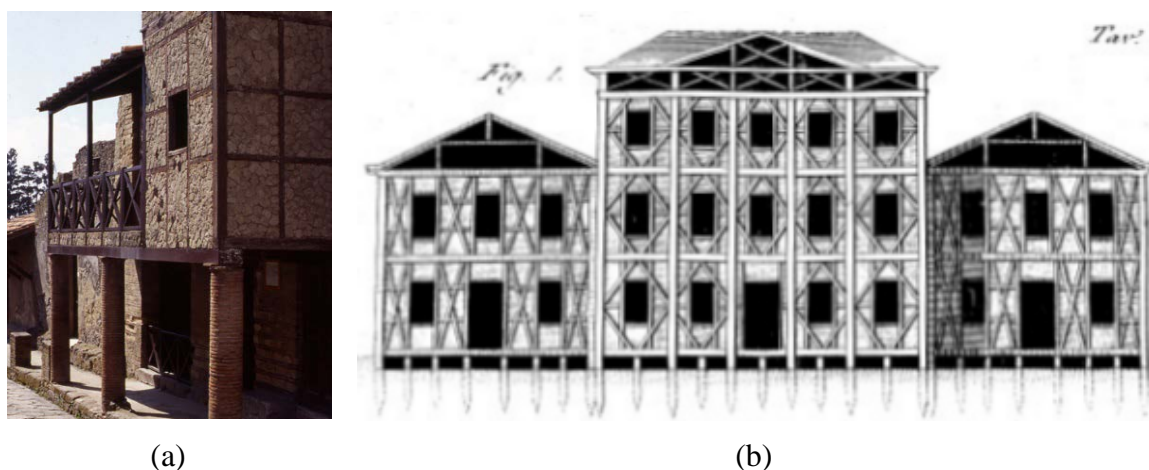


Figura 2 – Exemplos de construção mista em Itália; (a) *opus craticium*, Herculaneum, antes de 80 DC; (b) *casa baraccata*, Reggio Calabria, século XVIII.

Outro país que utilizou estes edifícios como uma solução resistente aos sismos foi a Grécia. Esta solução era comum em toda a Grécia durante diversos períodos [8]. A solução evoluiu do uso de elementos horizontais para reduzir a fendilhação da alvenaria para soluções mais robustas com elementos verticais e horizontais. Países com sismicidade elevada como a Turquia e a Índia possuem também muitos edifícios mistos alvenaria-madeira, ver Figura 3, que parecem ter resistido bem a eventos fortes recentes [9].

Na Turquia existem novamente os dois sistemas referidos na Grécia: *hatıl*, com elementos horizontais na alvenaria, e *himis*, com um esqueleto tridimensional. É habitual encontrar o primeiro sistema no piso térreo e o segundo sistema nos pisos superiores. Estes sistemas foram quase abandonados no século XIX devido aos incêndios e a imposição do império otomano em construir em alvenaria. Posteriormente, ocorreu alguma retoma devido aos danos observados em sismos fortes. Na Índia, os sistemas tradicionais são semelhantes, com referências à utilização da madeira na alvenaria desde o século XII [10]. Existem ainda exemplos de utilização destes edifícios noutros países, alguns introduzidos na América pelos emigrantes europeus, e outros sistemas locais, como a *quincha* no Perú.

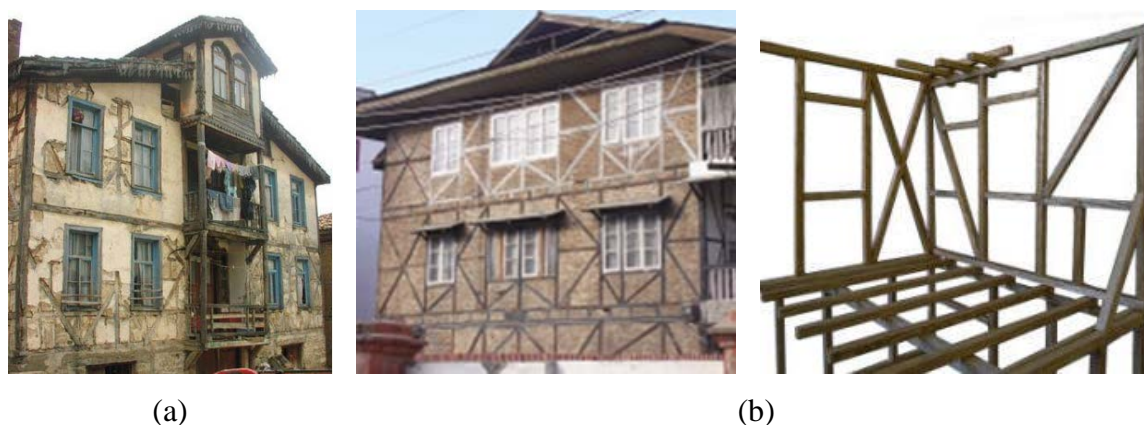


Figura 3 – Exemplos de construção mista na Turquia e Índia; (a) sistema *himis* na Turquia; (b) sistemas *Dhajji* e *Taq* na Índia.

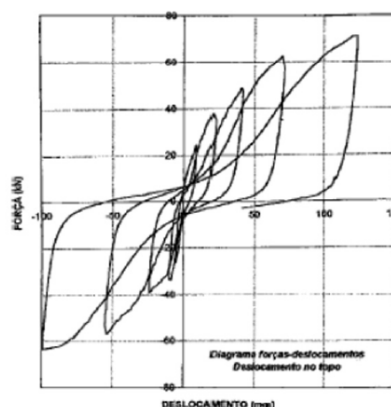
Apesar da variação das tipologias, a ideia comum é que a estrutura de madeira pode resistir à tração, ao contrário da alvenaria que resiste à compressão, proporcionando, assim, uma melhor resistência a ações horizontais. Além disso, os elementos de madeira permitem confinar para a estrutura de alvenaria, melhorando as propriedades mecânicas do conjunto. Em geral, a secção transversal dos elementos de madeira era muito semelhante (cerca de 0.10×0.12 m).

2. ENSAIOS RECENTES NA UNIVERSIDADE DO MINHO

A avaliação do comportamento das paredes mistas alvenaria-madeira é necessária para adquirir conhecimento sobre o comportamento sísmico desta tipologia de construção. Existem poucos estudos experimentais, tanto do ponto de vista nacional e internacional sobre o comportamento destas paredes disponíveis na literatura, particularmente no que respeita ao sistema pombalino. Uma parede real que ia ser demolida foi removida de um edifício existente e testada sob cargas cíclicas estáticas em [11,12]. Os ciclos de histerese da parede ensaiada, ver Figura 4, são indicativos de boa capacidade de dissipação de energia da estrutura. Testes cíclicos foram realizados também em réplicas construídas em escala real de acordo com a geometria original e usando ligações tradicionais [13,14]. Finalmente, foram testadas algumas soluções possíveis de reforço nas paredes e nos próprios edifícios [14-16].



(a)



(b)

Figura 4 – Ensaio experimentais numa parede real com carregamento lateral; (a) mecanismo de rotura; (b) comportamento histerético [13].

Na Universidade do Minho foram realizados um conjunto de ensaios cíclicos estáticos, a fim de avaliar o desempenho destas sob ações horizontais cíclicas [7,17-18]. Foram analisados, o mecanismo de resistência lateral e o desempenho face às ações cíclicas laterais em termos de ductilidade, dissipação de energia, rigidez cíclica e amortecimento viscoso equivalente. É importante também para entender o comportamento das paredes originais e as soluções de reparação e reforço, uma vez que a deterioração natural dos materiais envolvidos e as mudanças no uso das estruturas podem exigir intervenções. Além disso, a aplicação dos novos regulamentos e requisitos adequados de segurança, podem também exigir intervenções de reparação e reforço.

2.1. Ensaio em painéis (escala reduzida)

Estes ensaios adotaram painéis com $0.80 \times 0.90 \text{ m}^2$, correspondentes a dimensões típicas de paredes no norte do país, ver Figura 5. Os painéis incluem três elementos verticais e dois elementos horizontais, com dimensões de $0.05 \times 0.07 \text{ m}^2$. As dimensões adotadas correspondem a uma escala 1:2, podendo representar algumas estruturas pombalinas. As ligações são todas do tipo cavilha, com exceção das diagonais, que são a meia madeira. Foram ainda colocados pregos de 40 e 70 mm, indicados respetivamente com um traço e um círculo na Figura 5a.

Foram testados 9 painéis, apenas com o esqueleto de madeira (painel base), com reforço dos nós através de mantas de polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP) e com preenchimento de alvenaria, sendo 3 painéis iguais de cada tipologia, ver Figura 6, mas com carga axial distinta. Os ensaios cíclicos foram realizados considerando as paredes apoiadas na fundação, considerando ações combinadas (verticais e horizontais).

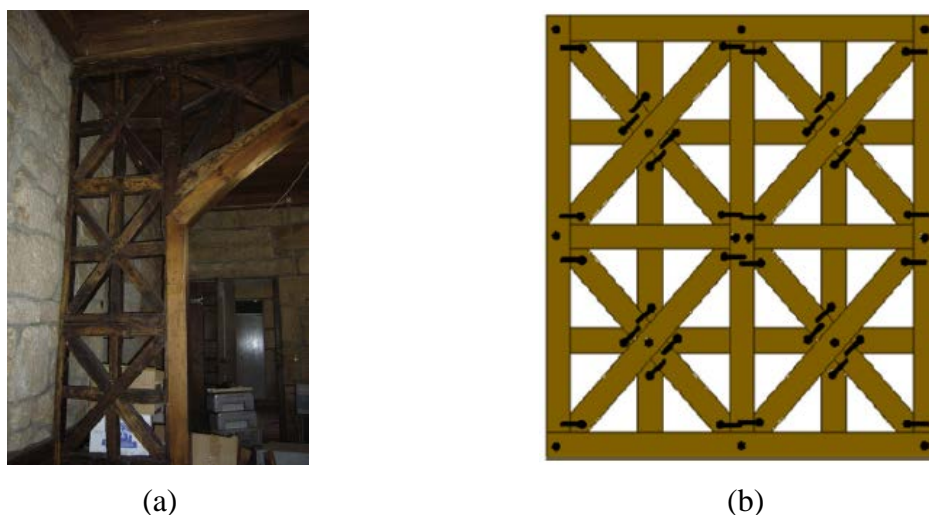


Figura 5 – Definição do painel de ensaio; (a) parede no norte do país; (b) painel adotado e localização dos pregos.

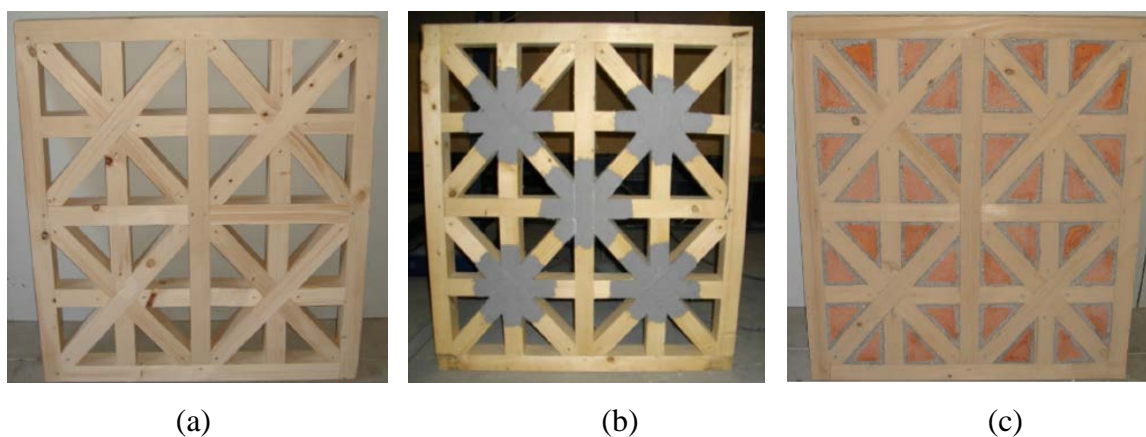


Figura 6 – Diferentes painéis; (a) apenas madeira; (b) apenas madeira, com reforço; (c) painel preenchido com alvenaria.

Os resultados permitiram obter informação ampla sobre o comportamento destas estruturas e sobre o seu cortamento até à rotura, ver Figura 7 e [17]. Foi possível concluir o seguinte: (a) para valores baixos da ação vertical a resposta é controlada pela ligação em cavilha da parte inferior da parede, enquanto para valores elevados a resposta é controlada por corte; (b) o dano concentra-se fortemente nas ligações em cavilha, com grandes deformações. No caso da parede preenchida, o dano é ligeiro e no interface entre alvenaria e madeira; (c) a rigidez é fortemente dependente do nível de tensão vertical; (d) o enchimento tem pouca influência na resposta global deste painel, apesar da alteração do modo de rotura; (e) o reforço adotado para os nós também teve pouca influência na resposta do painel que, obviamente, se encontrava em estado novo; (f) a ductilidade e dissipação de energia são muito elevadas.

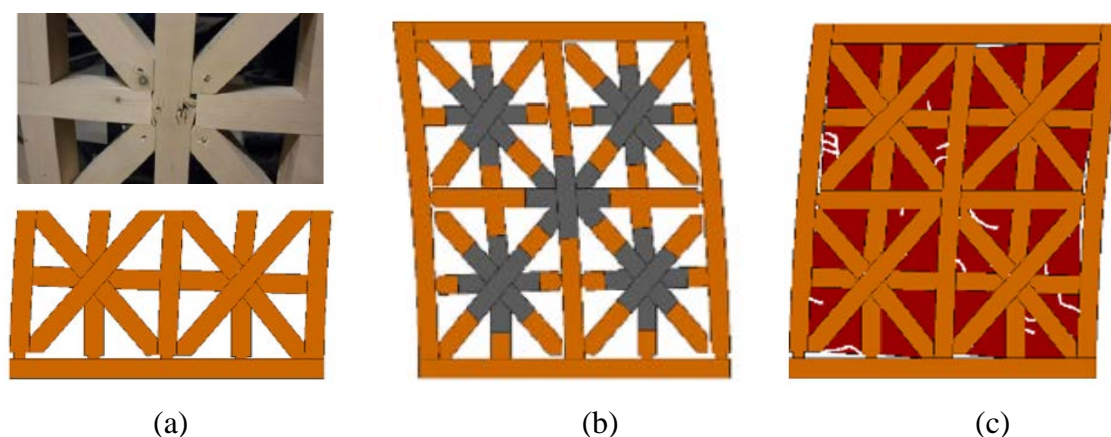


Figura 7 – Deformação e dano nos painéis; (a) apenas madeira; (b) apenas madeira, com reforço; (c) painel preenchido com alvenaria.

2.2. Ensaios em paredes (escala real)

Estes ensaios adotaram paredes com $2.42 \times 2.36 \text{ m}^2$, ver Figura 8 e [7, 18]. As paredes incluem três elementos verticais e dois elementos horizontais, tal como nos painéis, com dimensões de $(0.08 \text{ e } 0.16) \times 0.12 \text{ m}^2$. As ligações são todas a meia madeira, como exceção das extremidades das diagonais, que são a topo sem qualquer encaixe e pregagem. Foram testadas 8 paredes, incluindo paredes com reforço dos nós através de inserção de cavilhas metálicas e colocação de chapas metálicas (elementos específicos em forma de estrela e chapas comerciais perfuradas). O reforço foi aplicado em paredes danificadas e anteriormente ensaiadas. As chapas metálicas perfuradas foram aplicadas em paredes sem preenchimento. Os ensaios cíclicos foram realizados novamente considerando as paredes apoiadas na fundação, considerando ações combinadas (verticais e horizontais).

Os resultados permitem concluir o seguinte: (a) o preenchimento com alvenaria influencia significativamente a resposta em paredes não reforçadas; (b) o preenchimento com alvenaria e o nível de tensão vertical influenciam a resposta mas de forma pouco significativa nas paredes reforçadas, uma vez que o reforço controla fortemente a resposta; (c) o reforço com cavilhas metálicas alterou o mecanismo de colapso e melhorou a capacidade dissipativa das ligações; (d) o reforço com chapas metálicas, permitiu um aumento entre 50% a 200% da capacidade resistente.

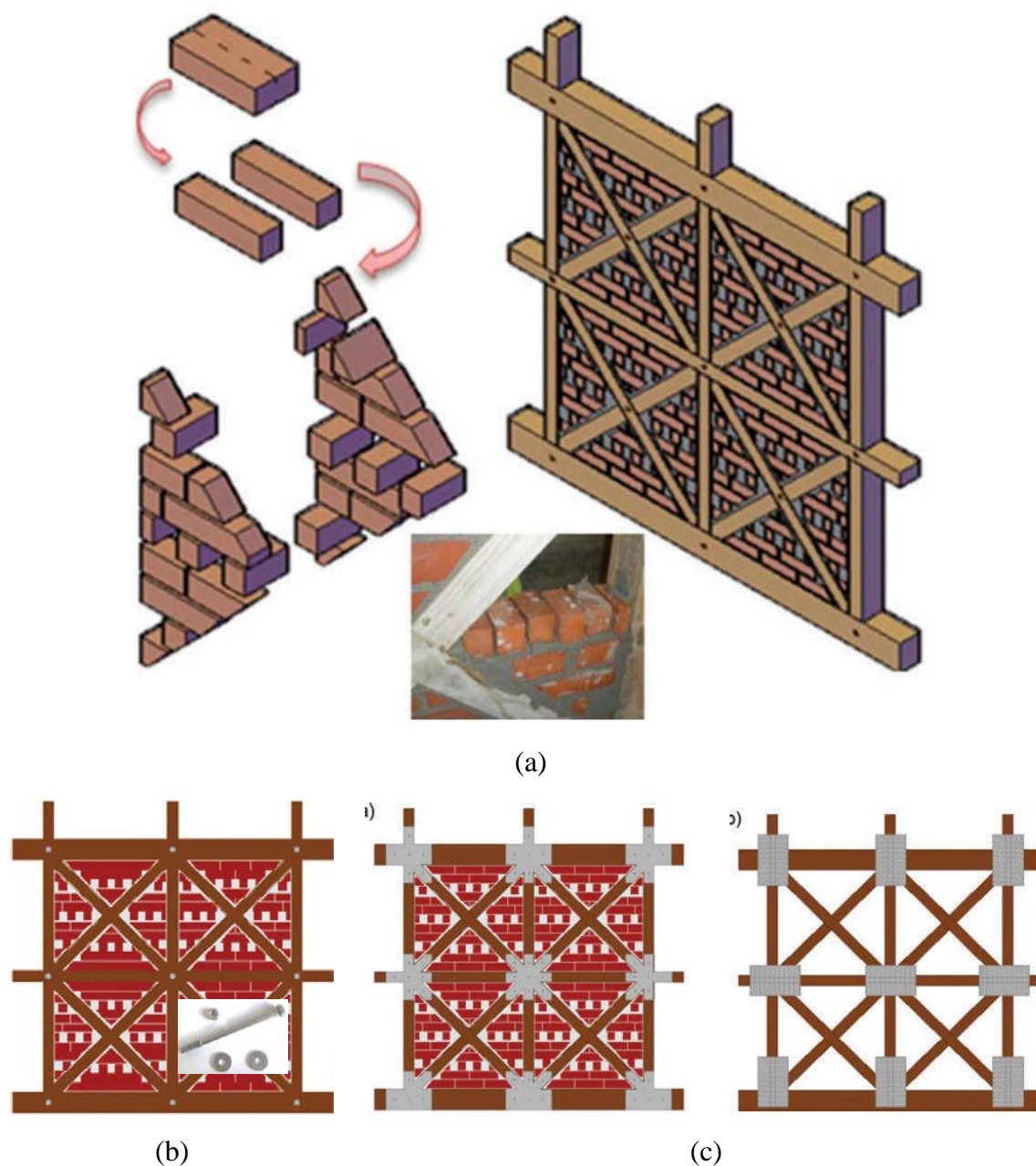


Figura 8 – Paredes consideradas; (a) construção e parede de referência; (b) reforço dos nós com conectores metálicos; (c) reforço dos nós com chapas metálicas.

3. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta uma breve revisão sobre os edifícios pombalinos e os edifícios mistos de alvenaria e madeira. Em seguida, apresenta-se um conjunto de ensaios experimentais realizados na Universidade do Minho e diferentes possibilidades de reforço. Os resultados são um contributo para permitir usar efetivamente os frontais na análise estrutural de edifícios pombalinos, como apresentado em [19], uma vez que uma análise sem os frontais parece conduzir a coeficientes de segurança reduzidos [4]

4. REFERÊNCIAS

- [1] Córias, V., *Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos: Técnicas pouco Intrusivas*. Argumentum, 2ª edição, 2007.
- [2] França, J.A., *Lisboa Pombalina e o Iluminismo*. Bertrand Editora, 1987.
- [3] Córias e Silva, V., Um novo modelo (e uma nova visão) do edificado pombalino. *Monumentos*, 6, 1997.
- [4] Ramos, L.F., *Análise experimental e numérica de estruturas históricas de alvenaria*. Universidade do Minho, tese de mestrado, 2002.
- [5] Cardoso, R., *Vulnerabilidade sísmica de Estruturas Antigas de Alvenaria - Aplicação a um Edifício Pombalino*. Instituto Superior Técnico, tese de mestrado, 2002.
- [6] Rocha, M., *Comportamento sísmico de edifícios pombalinos*. Universidade Católica Portuguesa, tese de mestrado, 2008.
- [7] Poletti, E., *Characterization of the seismic behaviour of traditional timber frame walls*. Universidade do Minho, tese de doutoramento, 2013.
- [8] Tsakanika-Theohari E., The constructional analysis of timber load bearing systems as a tool for interpreting Aegean Bronze Age architecture. *Proceedings of the Symposium 'Bronze Age Architectural Traditions in the Eastern Mediterranean: Diffusion and Diversity'*, 7-8 May 2008, Munich, 2008.
- [9] Gülhan D., Güney I.Ö., The behaviour of traditional building systems against earthquake and its comparison to reinforced concrete frame systems: experiences of Marmara earthquake damage assessment studies in Kocaeli and Sakarya. *Proceedings of Earthquake-safe: Lessons to be Learned from Traditional Construction*, Istanbul, Turkey, 2000.
- [10] Langenbach R., Don't Tear it Down! Preserving the earthquake resistant vernacular architecture of Kashmir. UNESCO, New Delhi, 2009.
- [11] Santos, S.P., *Ensaio de paredes pombalinas*. LNEC, Nota Técnica Nº 15/97-NCE, 1997.
- [12] Córias e Silva, V., Using advanced composites to retrofit Lisbon's old "seismic resistant" timber framed buildings. *European timber buildings as an expression of technological and technical cultures*, Elsevier, p. 109–124, 2002.
- [13] Meireles, H., Bento, R., Cyclic behaviour of Pombalino "frontal" walls. *European conference on earthquake engineering (14ECEE)*, Ohrid, República da Macedónia; 2010.
- [14] Gonçalves, A.M., Ferreira, J.G., Guerreiro, L., Branco, F., Caracterização experimental do comportamento cíclico de paredes pombalinas simples e reforçadas, *Revista Engenharia Civil*, 45, p. 5-19, 2013.
- [15] Cruz, H., Moura, J.P., Machado, J.S.. The use of FRP in the strengthening of timber reinforced masonry load-bearing walls. *Proceedings of the 3rd international seminar on historical, constructions*, Guimarães, p. 847–56, 2001.
- [16] Paula, R., Coias, V., Rehabilitation of Lisbon's old "seismic resistant" timber frames buildings using innovative techniques. *International workshop on earthquake engineering on timber structures*, Coimbra, p. 33–45, 2006.
- [17] Vasconcelos, G., Poletti, E., Salavessa, E., Jesus, A.M.P., Lourenço, P.B., Pilaon, P., In-plane shear behaviour of traditional timber walls. *Engineering Structures*, 56(11), p. 1028–1048, 2013.
- [18] Poletti, E., Vasconcelos, G., Jorge, M., Full-Scale Experimental Testing of Retrofitting Techniques in Portuguese "Pombalino" Traditional Timber Frame Walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(4), p. 553–579, 2014.

- [19] Bento, R., Lopes, M., Cardoso, R., Seismic evaluation of old masonry buildings. Part II: analysis of strengthening solutions for a case study. *Engineering Structures*, 27, p. 2014–23, 2005.