

# Avaliação simplificada da vulnerabilidade sísmica de construções de taipa do Alentejo

## Simplified seismic vulnerability assessment of rammed earth constructions from Alentejo

Rui A. Silva

Antonio Romanazzi

Daniel V. Oliveira

Oriol Domínguez-Martínez

Nuno Mendes

### Resumo

O Alentejo possui um vasto património construído em taipa, apesar de o recurso a esta técnica construtiva ter-se tornado residual nas últimas décadas. Este património tradicional gera alguma preocupação relativamente à sua segurança sísmica, uma vez que esta região apresenta uma perigosidade sísmica moderada e as construções em terra são geralmente associadas a uma vulnerabilidade sísmica elevada. Contudo, existe uma falta acentuada de conhecimento sobre o desempenho sísmico das construções tradicionais de taipa do Alentejo, não permitindo concluir sobre a sua estabilidade estrutural.

Este trabalho pretende contribuir para uma melhor compreensão da vulnerabilidade sísmica das construções tradicionais de taipa do Alentejo através da aplicação de uma metodologia de avaliação simplificada do comportamento no plano e fora do plano das paredes de uma amostra de vinte edifícios. Esta metodologia incluiu o cálculo de índices geométricos e uma análise cinemática linear simples. O estudo realizado sugere que o comportamento sísmico destas construções beneficia das suas características arquitetónicas tradicionais.

### Abstract

An important rammed earth built heritage can still be found in Alentejo, despite its use became marginal during the last decades. This traditional heritage rises some level of awareness with regard to its seismic safety since this region is characterised by moderate seismic hazard and earth constructions are often associated with a high seismic vulnerability. Nevertheless, the existing knowledge is insufficient to correctly assess the seismic performance of traditional rammed earth constructions from Alentejo and conclude about their structural stability.

This work contributes for a better comprehension of the seismic vulnerability of rammed earth constructions from Alentejo by means of a simplified methodology for assessment of the in-plane and out-of-plane behaviour of walls from twenty selected buildings. This methodology included the computation of geometry-based indexes and a simple linear kinematic analysis. The conducted study indicates that the seismic behaviour of these constructions benefits from their traditional architectonic features.

**Palavras-chave:** Construção em terra / Taipa / Vulnerabilidade sísmica / Índices simplificados / Análise cinemática

**Keywords:** Earth construction / Rammed earth / Seismic vulnerability / Simplified indexes / Kinematic analysis

## Rui A. Silva

Investigador de Pós-Doutoramento  
ISISE/UMinho  
Guimarães, Portugal  
ruisilva@civil.uminho.pt

## Antonio Romanazzi

Aluno de Doutoramento  
ISISE/UMinho  
Guimarães, Portugal  
aromanazzi89@gmail.com

## Daniel V. Oliveira

Professor Associado  
ISISE/UMinho  
Guimarães, Portugal  
danvco@civil.uminho.pt

## Oriol Domínguez-Martínez

Mestre em Engenharia Civil  
Associação Terrachidia  
Madrid, Espanha  
oriol.arq@gmail.com

## Nuno Mendes

Investigador de Pós-Doutoramento  
ISISE/UMinho  
Guimarães, Portugal  
nunomendes@civil.uminho.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.*

SILVA, R. A [et al.] – Avaliação simplificada da vulnerabilidade sísmica de construções de taipa do Alentejo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 8. ISSN 2183-8488. (novembro 2018) 59-70.

## 1 Introdução

A terra crua tem sido utilizada durante milhares de anos como material de construção principal em várias regiões do Mundo. As evidências mais antigas da utilização da terra crua remontam a 10 000 a.C., tal como comprovam as escavações arqueológicas das primeiras habitações permanentes do Sudoeste Asiático [1]. Além disto, a utilização da terra ao longo do tempo resultou em diversas técnicas construtivas tradicionais, entre as quais a alvenaria de adobe e a taipa se destacam como das mais utilizadas globalmente [2].

Os adobes são unidades de alvenaria que resultam da secagem ao sol de terra com uma consistência plástica, com a qual são previamente moldados em moldes de madeira. Estas unidades são tipicamente assentes com argamassa à base de terra para construir paredes, arcos, abóbadas e cúpulas [3].

A construção em taipa consiste em compactar terra húmida em camadas no interior de uma cofragem, com o objetivo de construir paredes (ver Figura 1). Esta cofragem é tipicamente chamada de taipal e constitui um elemento fundamental para a execução deste tipo de paredes, que formam estruturas consideradas monolíticas. Os taipais tradicionais são constituídos por elementos de madeira, cuja conceção simples e leve visa facilitar a sua montagem, desmontagem e reutilização por um número reduzido de trabalhadores. São reutilizados de uma forma corrida através de um movimento horizontal para construir os blocos de taipa de uma fiada e depois são movidos verticalmente para construir a fiada seguinte, repetindo-se o procedimento até à altura desejada da parede. Este procedimento implica que o taipal seja apoiado diretamente sobre a fiada anterior com recurso a elementos transversais (agulhas), que podem ou não ser removidos após compactação do bloco de taipa [4]. Em alternativa, o taipal pode ser apoiado externamente numa estrutura preparada para o efeito. Apesar de este último procedimento não ser comum em construções tradicionais, a sua utilização é evidenciada em algumas construções pré-muçulmanas de Espanha [5]. Nas construções de taipa modernas tem-se recorrido frequentemente a taipais apoiados externamente, com a diferença de estes formarem uma cofragem completa e poderem ser constituídos por elementos metálicos, cuja resistência, rigidez e durabilidade são mais elevadas do que os elementos de madeira dos taipais tradicionais. Por outro lado, constituem sistemas de cofragem muito mais pesados que os taipais tradicionais, pelo que a sua montagem e desmontagem não é tão simples.



Figura 1 Paredes de uma casa de taipa em construção.

Existem várias vantagens associadas à construção em terra, tais como a baixa energia incorporada, desempenhos acústico e térmico adequados, elevada resistência ao fogo e capacidade de promover ambientes interiores confortáveis e saudáveis (regulação higrotérmica) [2][3][6]. Porém, estas construções são também conhecidas por uma vulnerabilidade sísmica elevada [7][8], tal como tem sido observado em sismos recentes com intensidade elevada, como por exemplo os sismos de Bam de 2003 [9], de Pisco de 2007 [10] e de Maule de 2010 [11]. A elevada vulnerabilidade sísmica destas construções resulta de vários fatores, entre os quais se destacam geralmente as ligações fracas entre elementos estruturais, elevado peso próprio e os valores reduzidos das propriedades mecânicas (especialmente da resistência à tração).

Apesar de a vulnerabilidade sísmica das construções em terra ser um problema antigo, apenas recentemente se tem assistido a uma preocupação da comunidade científica e técnica em estudar o comportamento sísmico das construções de taipa em específico, mas que se restringe a um número reduzido de investigações experimentais e numéricas. O comportamento estrutural de paredes de taipa no plano tem sido investigado através de ensaios de compressão diagonal em muretes [12][13] e ensaios de corte cíclico de paredes [14][15][16]. Por suavemente, a investigação do comportamento para fora do plano é ainda mais escassa, destacando-se apenas o trabalho de Yamín Lacouture *et al.* [7], onde são apresentados e discutidos ensaios de rotação de paredes para fora do plano e ensaios em mesa sísmica de modelos à escala reduzida (1:5).

De uma forma geral, os estudos experimentais têm permitido constatar a elevada variabilidade das propriedades mecânicas da taipa e o seu comportamento altamente não-linear. O comportamento estrutural de paredes de taipa carregadas no seu plano também tem sido objeto de modelação numérica, quer através do método dos elementos finitos (MEF) [17][18], quer através do método dos elementos discretos (MED) [19]. Os estudos numéricos com o MEF também têm incidido sobre o comportamento sísmico global das estruturas de taipa, nomeadamente através de análises lineares dinâmicas [20], análises não-lineares estáticas (*pushover*) [21] e análises não-lineares dinâmicas [22]. Apesar do carácter pioneiro e relevância de alguns destes estudos, torna-se claro que o comportamento sísmico das construções de taipa ainda não é suficientemente conhecido.

O Sul de Portugal apresenta atualmente um património construído em taipa expressivo, cuja concentração assume maior preponderância na zona meridional da região do Alentejo [4]. Contudo, esta região é também caracterizada por uma perigosidade sísmica moderada, cuja aceleração máxima regulamentar em rocha pode atingir  $2,0 \text{ m/s}^2$  [23]. Este facto em combinação com a reconhecida elevada vulnerabilidade sísmica das construções de terra devem ser motivos de preocupação, pelo que se torna imperativo o desenvolvimento de estudos que visem a avaliação do comportamento sísmico das construções de taipa desta região. Só assim será possível promover a proteção deste património construído e assegurar a segurança dos seus utilizadores. Além disso, este conhecimento é relevante para suportar a continuação da utilização desta técnica construtiva na região e estendê-la ao restante território nacional.

O trabalho apresentado neste artigo pretende contribuir para uma melhor compreensão do desempenho sísmico do património

construído em taipa do Alentejo. Para este fim, avaliou-se o desempenho sísmico de um conjunto de vinte construções tradicionais de taipa da região através de uma metodologia simplificada. Esta metodologia considera um conjunto de índices baseados na geometria das construções e que permitem avaliar o desempenho sísmico das construções quando as paredes são solicitadas no plano ou fora do plano.

## 2 A construção em taipa no Alentejo

A construção em taipa tem uma longa tradição em Portugal, onde prosperou durante a ocupação muçulmana da Península Ibérica entre os séculos VIII e XIII. Por exemplo, os castelos de Paderne e Silves são evidências ainda existentes da utilização desta técnica construtiva durante este período [24]. Estas fortificações constituem parte do património de taipa militar de Portugal e as suas paredes são caracterizadas por espessuras elevadas (em castelos pode atingir cerca de 1,80 m) e por uma percentagem elevada de estabilização com cal aérea [25], explicando a sua elevada durabilidade. Porém, o património construído em taipa de Portugal é principalmente constituído por construções civis na forma de habitações, moinhos, armazéns agrícolas e igrejas [12]. A maioria das construções de taipa existentes foi construída até aos anos 50 do século XX, nomeadamente nas regiões Alentejo, Ribatejo e Algarve [26].

As construções de taipa civil do Alentejo apresentam características que podem variar ligeiramente de local para local, de acordo com os recursos disponíveis e fatores socioculturais [27]. O levantamento apresentado em Correia [26] incluiu a caracterização de quatro dezenas de construções tradicionais de taipa da região e permitiu identificar um conjunto de características arquitetónicas e construtivas deste património, seguidamente resumidas.

Em geral, as construções tradicionais de taipa apresentam uma planta com forma retangular e são constituídas por um único piso, apesar de se ter registado um número reduzido de construções em meio urbano com dois pisos. As fachadas apresentam poucas aberturas, cuja dimensão é reduzida para evitar a entrada excessiva de luz solar, demonstrando uma preocupação com as elevadas temperaturas atingidas nesta região durante o verão. As superfícies das paredes de taipa são rebocadas e, no caso das superfícies exteriores, são caiadas com uma periodicidade anual (ver [28]). As paredes de taipa encontram-se em geral construídas sobre um soco de alvenaria de pedra para evitar um contacto direto com a humidade dos solos e com a água das chuvas. Contudo, registam-se alguns casos em que as paredes de taipa são erguidas diretamente sobre o solo de fundação. Os blocos de taipa apresentam dimensões bastante variáveis em termos de comprimento e altura, respetivamente, 1,40-2,50 m e 0,40-0,55 m. A espessura das paredes é em geral de cerca de 0,50 m, mas pode variar entre 0,40 e 0,57 m. Paredes com espessura inferior (0,10-0,30 m) correspondem em geral a paredes divisorias construídas com alvenaria de adobe ou tabique. Na constituição das paredes de taipa observa-se em geral a utilização de solos locais recolhidos diretamente da fundação e do terreno adjacente à construção ou de um local de empréstimo próximo. Assim, a utilização destes solos locais resulta numa diversidade de características distinguível em termos de cor (vermelha, amarela



**Figura 2** Técnicas de reforço sísmico utilizadas nas construções tradicionais de taipa do Alentejo: a) tirantes de ferro; b) contrafortes; c) elementos de reforço dos cunhais

ou cinzenta), percentagem de argila (8-26%) e origem litológica (calcária, quartzítica, arenítica ou xistosa) (ver também [29][30]).

A perceção da necessidade de adoção de medidas de mitigação da vulnerabilidade sísmica é também bastante visível nas construções tradicionais de taipa do Alentejo. É possível observarem-se reforços com tirantes de ferro a ligar paredes opostas, com o objetivo de melhorarem o comportamento monolítico do edifício sob ações sísmicas (Figura 2a). A construção de contrafortes de alvenaria é outra solução utilizada (Figura 2b), embora seja menos frequente. Quando estes contrafortes se localizam em secções intermédias das paredes de taipa, funcionam como paredes de contraventamento que melhoraram o comportamento das paredes de taipa para fora do plano, sobretudo na mitigação do seu derrube para o exterior. Em alguns edifícios, os contrafortes são também encontrados contíguos aos cunhais para reforçarem a ligação entre as paredes ortogonais. Embora não seja observável em construções em bom estado de conservação, a preocupação com o reforço dos cunhais através do método construtivo é também visível em algumas construções degradadas. Nestes casos são introduzidos elementos de reforço de pedra ou de madeira que conferem maior resistência e profundidade à ligação (Figura 2c).

Após os anos 50 do século passado, a construção em taipa caiu em desuso no Alentejo, devendo-se esta situação à introdução e rápido crescimento do uso de materiais de construção ditos modernos (exemplo: betão, aço e tijolo cerâmico) e ao êxodo das populações rurais para os grandes centros urbanos [26]. Contudo, nos anos 80 do mesmo século assistiu-se ao renascer da utilização da taipa como técnica construtiva, promovido primeiramente pela necessidade de reabilitação das construções existentes e posteriormente pelo seu uso em edifícios novos. Note-se que a inexistência de construção nova em taipa durante três décadas exigiu reaprender a técnica, uma vez que este conhecimento popular perdeu-se praticamente no tempo. Este processo foi liderado por um número reduzido de arquitetos mesmerizados pela técnica construtiva e inspirados pelos

ensinamentos dos poucos mestres taieiros ainda vivos à data [31].

Atualmente, a construção nova em taipa no Alentejo tenta ainda conservar algumas das características arquitetónicas das construções tradicionais. Porém, este é um paradigma que tende a ser alterado por uma nova geração de arquitetos, que começa a negligenciar as características originais e a procurar uma arquitetura mais ousada, inspirada na estética particular da taipa.

A construção em taipa no Alentejo encontra-se num processo de modernização, cujas alterações mais significativas podem resumir-se a: (i) execução de configurações geométricas mais complexas em planta e altura (e.g. distribuição de rigidez de corte pouco uniforme e construção superior a um piso); (ii) execução de paredes com geometria mais complexa (e.g. mais esbeltas, formas curvas e aberturas com vãos extensos ou de geometria irregular); (iii) utilização de sistemas de cobertura modernos e mais pesados (e.g. coberturas planas); (iv) combinação com materiais de construção modernos (e.g. utilização de betão e aço para construção de pilaretes embebidos e vigas de bordadura); (v) recurso à estabilização da taipa com cimento; (vi) reforço com varões de aço embebidos na taipa; (vii) recurso a sistemas de compactação mecânicos (e.g. compactadores pneumáticos); (viii) ausência de rebocos de proteção; (ix) consolidação superficial com soluções à base de silicatos. Estas são mudanças concordantes com a arquitetura de taipa moderna/industrializada de outras regiões do mundo, nomeadamente dos Estados Unidos da América, onde esta técnica tem sido utilizada para construir habitações de luxo e edifícios públicos [32]. Note-se que algumas destas mudanças promovem uma efetiva melhoria das propriedades mecânicas da taipa, que por sua vez podem traduzir-se num melhor desempenho sísmico do sistema estrutural. Por outro lado, o aumento da complexidade da geometria da estrutura antevê-se como prejudicial. Neste sentido, torna-se relevante perceber se a simplicidade da geometria das construções tradicionais de taipa do Alentejo configura uma forma de cultura de construção sísmica que importa preservar.

### 3 Metodologia de avaliação

De forma a obter-se um melhor entendimento sobre o desempenho sísmico das construções tradicionais de taipa da região do Alentejo, considerou-se uma amostra de construções avaliadas em levantamentos anteriores [26][33]. A análise do desempenho sísmico das construções desta amostra baseou-se na avaliação de índices simplificados, calculados de acordo com a metodologia proposta em Lourenço e Roque [34] e validada em Lourenço *et al.* [35] para igrejas de alvenaria e em Sadeghi *et al.* para edifícios de adobe [36]. Estes índices são calculados com base na geometria das construções e na perigosidade sísmica do local de construção. Note-se que a avaliação sísmica baseada em métodos simplificados é normalmente válida para estruturas de alvenaria com comportamento de caixa (*box-behaviour*) [37]. Contudo, este não é o caso da maioria das construções de alvenaria antiga, uma vez que não apresentam diafragmas de piso rígidos e os seus modos de rotura são dominados por corte no plano e flexão para fora do plano das paredes. Este é também o caso das construções de taipa tradicionais do Alentejo, já que apresentam apenas um único piso e uma cobertura leve de madeira, geralmente apoiada diretamente sobre as paredes. Apesar de os métodos simplificados não serem propriamente adequados para uma avaliação quantitativa da segurança sísmica de construções tradicionais de taipa, podem ser utilizados como indicadores qualitativos do seu desempenho sísmico.

A metodologia simplificada da avaliação do desempenho sísmico da amostra de construções selecionadas consistiu no cálculo de quatro índices, de acordo com as direções principais (longitudinal-X e transversal-Y), em que os três primeiros índices se referem ao comportamento no plano das paredes resistentes ( $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $Y_3$ ) e o quarto índice ao comportamento para fora do plano ( $\lambda$ ).

O índice  $Y_1$  corresponde a um quociente de áreas em planta, nomeadamente entre a área das paredes resistentes numa dada direção principal  $i$  ( $A_{wi}$ ) e a área total das paredes resistentes do edifício ( $A_w$ ):

$$Y_{1,i} = \frac{A_{wi}}{A_w} \quad [-] \quad (1)$$

Note-se que este índice apresenta como desvantagem principal o facto de ignorar a esbelteza e o peso próprio do edifício no seu cálculo. Relativamente a valores limite, o Eurocódigo 8 [23] recomenda valores superiores a 0,05-0,06 para estruturas com diafragmas rígidos. Porém, nos casos em que o valor de cálculo da aceleração à superfície para solos rochosos é superior a 0,20 g (elevada sismicidade), Meli [38] recomenda um valor mínimo de 0,1 para edifícios históricos de alvenaria. No caso das construções de taipa não existem valores limite propostos na literatura, pelo que se consideraram os mesmos limites propostos em Lourenço *et al.* [35]. Neste caso, o limite mínimo aumenta linearmente com a aceleração máxima à superfície (PGA) (ver Secção 5 para maior detalhe).

O índice  $Y_2$  relaciona a área das paredes resistentes com o peso da estrutura e é calculado de acordo com a Equação (2), onde  $G$  é a ação vertical quase-permanente. Note-se que apesar de este índice considerar a altura da construção através do cálculo das ações

verticais, este apresenta como desvantagem não ser adimensional, o que significa que deve ser analisado para uma unidade fixa, aqui assumida como  $[m^2/MN]$ . Relativamente a valores limite, Meli [38] recomenda um valor mínimo de  $1,2 m^2/MN$  para edifícios históricos de alvenaria, enquanto um trabalho mais recente [34] recomenda um limite de  $2,5 m^2/MN$  para zonas com sismicidade elevada. Este índice também carece de limites definidos especificamente para construções de taipa, pelo que se assume novamente o limite definido em Lourenço *et al.* [35], que também aumenta linearmente com o PGA (ver Secção 5 para maior detalhe).

$$Y_{2,i} = \frac{A_{wi}}{G} [L^2F^{-1}] \quad (2)$$

O índice  $Y_3$  é um fator do corte basal, uma vez que relaciona o corte induzido pela ação sísmica ( $F_E$ ) e a resistência ao corte da estrutura ( $F_{Rd,i}$ ). O primeiro parâmetro pode ser determinado com base numa análise estática com cargas horizontais equivalentes à ação sísmica, designadamente  $F_E = \beta G$ , onde  $\beta$  é um fator sísmico equivalente relacionado com o PGA. Por sua vez, a resistência de corte ( $F_{Rd,i}$ ) pode ser estimada como a contribuição da resistência de todas as paredes resistentes numa dada direção  $F_{Rd,i} = A_{wi} f_{vk}$  onde, de acordo com o Eurocódigo 6 [39],  $f_{vk} = f_{vkd} + 0,4\sigma_d$ . Na ausência de resultados experimentais, a coesão  $f_{vkd}$  pode ser assumida de forma conservativa como um valor baixo ou igual a zero, enquanto 0,4 corresponde a um valor regulamentar assumido para o coeficiente de atrito da alvenaria ( $\tan \phi$ ). No caso da taipa, observa-se uma ausência de valores de  $f_{vkd}$  disponíveis na bibliografia, pelo que assumir um valor igual a zero para este parâmetro é um procedimento conservativo e resulta na simplificação do cálculo de  $Y_3$ , que se torna independente da altura do edifício:

$$Y_{3,i} = \frac{A_{wi}}{A_w} \cdot \frac{\tan \phi}{\beta} [-] \quad (3)$$

Devido à complexidade e incerteza em definir valores mais precisos de  $\beta$ , Lourenço *et al.* [35] recomenda assumir-se um valor igual ao PGA. Note-se que para a determinação da sismicidade local considerou-se um solo do tipo C como o cenário desfavorável mais provável segundo o anexo nacional do Eurocódigo 8 [23], em que o respetivo coeficiente de solo ( $S$ ) é 1,20. Relativamente a limites, este índice assume-se como uma verificação de segurança, pelo que deve apresentar um valor superior a um.

O índice relativo ao comportamento para fora do plano,  $\lambda$ , é um fator de esbelteza, uma vez que relaciona a altura das paredes submetidas à ação sísmica para fora do seu plano na direção  $i$  ( $h_{wi}$ ) e a sua espessura ( $t_w$ ), de acordo com a equação seguinte:

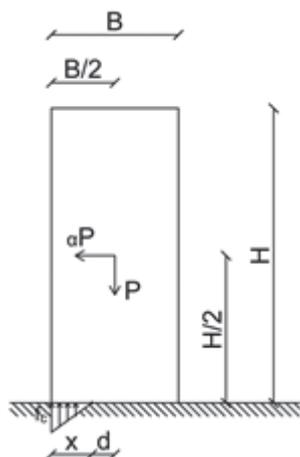
$$\lambda_i = \frac{h_{wi}}{t_w} [-] \quad (4)$$

Em termos de valores limite para este índice, existem várias recomendações definidas especificamente para construção em terra. A norma neozelandesa NZS 4297 [40] é a mais permissiva, uma vez que define um limite máximo de 10, enquanto a norma ASTM E2392-10 [41] é a mais restritiva com um limite máximo de 6. Contudo, na maioria dos documentos consultados (Arya *et al.* [42], IS 13827 [43], NCB204 [44] e NMAC 14.7.4 [45]) é recomendado um limite máximo intermédio, nomeadamente de 8.

Complementarmente ao índice anterior, decidiu-se avaliar o comportamento das paredes para fora do plano com base numa metodologia de análise cinemática linear [46][47], assumindo-se um mecanismo de derrube com comportamento de corpo rígido. Através da consideração de forças horizontais proporcionais à massa e aplicando-se o princípio dos trabalhos virtuais, é possível obter-se a curva de capacidade de um sistema de múltiplos graus de liberdade (MDOF) em termos de deslocamento  $d$  e de um fator de carga  $\alpha$ . A avaliação da segurança resulta da comparação do requisito sísmico com a aceleração espectral de um sistema com um grau de liberdade (SDOF) equivalente ao sistema MDOF que inicia o mecanismo de colapso ( $a_0^*$ ). Uma vez que as construções analisadas apresentam apenas um piso (ver secção seguinte), apenas se consideram as paredes como um sistema SDOF. Neste caso o centro de rotação foi determinado assumindo-se uma resistência à tração nula e uma resistência à compressão de  $1,0 \text{ N/mm}^2$  (ver esquema da Figura 3). Note-se que a resistência à compressão assumida para a taipa corresponde a um valor aproximado e ligeiramente inferior aos valores reportados para taipa não estabilizada do Alentejo ( $1,2\text{-}1,5 \text{ N/mm}^2$ ) [12][48]. O requisito sísmico das paredes é estimado de acordo com:

$$\text{Requisito} = \frac{a_g \cdot S}{q} \cdot \left(1 + 1,5 \frac{Z}{H}\right) \quad (5)$$

onde  $a_g$  é o valor do PGA,  $q$  é o coeficiente de comportamento,  $Z$  é a posição do centro de gravidade e  $H$  é a altura da parede. O coeficiente de comportamento foi definido com base no código italiano [47], assumindo-se que as estruturas de taipa se comportam de forma equivalente a estruturas de alvenaria antiga, cujo fator recomendado é de 2. Além disto, a taipa é um material com comportamento não-linear bastante expressivo [12], cujo sistema estrutural se espera que apresente uma capacidade de dissipação de energia semelhante à da alvenaria antiga.



**Figura 3** Mecanismo de colapso por derrube assumido para as paredes de taipa

## 4 Amostra de edifícios

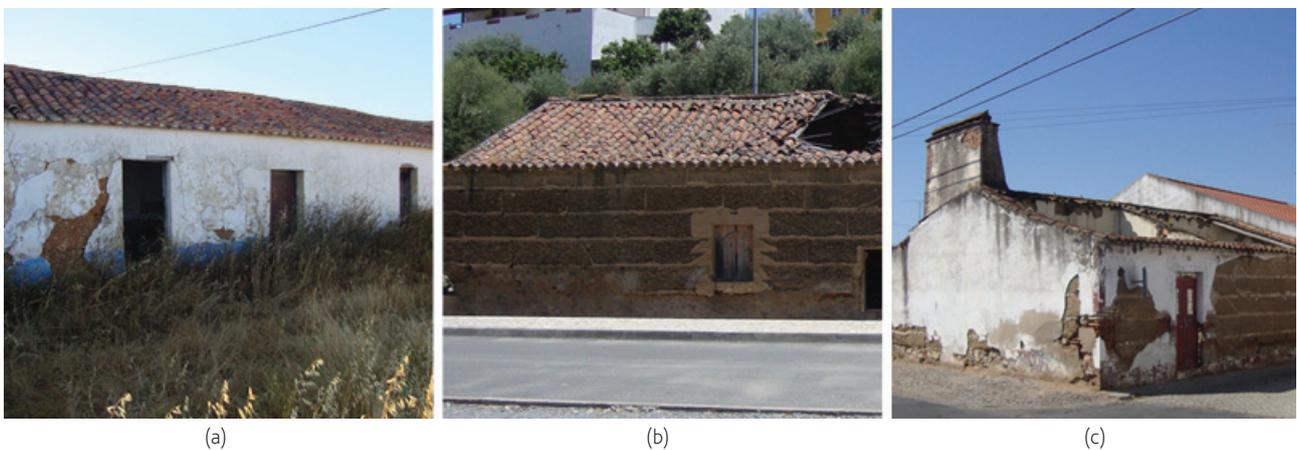
A amostra de construções tradicionais de taipa, avaliada segundo a metodologia apresentada anteriormente, resultou da seleção de edifícios estudados em levantamentos realizados anteriormente no Alentejo, sendo 9 construções identificadas em Domínguez [33] e 11 em Correia [26] num total de 20. Refira-se que destes levantamentos recolheu-se diversa informação sobre construções tradicionais de taipa, designadamente localização, tipo de utilização, tipo de materiais de construção utilizados, utilização de socos de alvenaria, número de pisos, tipologia do ambiente envolvente, tipologia da cobertura, utilização de soluções de reforço e estado de conservação. Contudo, a informação mais relevante para a aplicação da metodologia consiste na disponibilização de elementos desenhados da geometria das construções, essencial para calcular os índices simplificados de desempenho sísmico. Assim, apenas foram selecionados os edifícios apresentando informação suficiente sobre a sua geometria. Note-se que apesar de não ser identificada a data de construção de uma grande parte das construções investigadas, esta terá sido anterior aos anos 50 do século XX, tal como sugerido por Correia [26]. Portanto, a sua construção não teve por base um projeto de execução. Além disto, apenas 20% das construções se encontravam em utilização à data do respetivo levantamento (ID 11, 12, 16 e 20). No entanto, evidencia-se a necessidade de se reunir uma informação mais detalhada sobre as construções de taipa existentes no Alentejo para se obter uma melhor compreensão sobre o seu desempenho estrutural e sísmico.

As características principais das construções selecionadas são apresentadas no Quadro 1 em termos de tipo de utilização, localização, tipologia de cobertura, área de implantação ( $A_i$ ), PGA, razão entre a dimensão longitudinal e transversal ( $L/T$ ), espessura média ( $t_w$ ) e altura média ( $h_w$ ) das paredes. A Figura 4 ilustra algumas destas construções.

Todas as construções apresentam um único piso ( $h_w$  entre 2,1 e 3,6 m) e planta retangular, mas com alongamento bastante variável ( $L/T$  entre 1,1 e 4,7). Em termos de função e cobertura, a maioria apresenta uma utilização de habitação e possui uma cobertura de duas águas. As áreas de implantação são também bastante variáveis ( $30\text{-}250 \text{ m}^2$ ), demonstrando a versatilidade da taipa na construção do Alentejo. A Figura 5 permite observar que a localização das construções estudadas é bastante distribuída na região. Além disto, é possível visualizar a perigosidade sísmica da região para sismos distantes de acordo com o Eurocódigo 8 (PGA entre 0,1 e 0,2 g) [23], que se estima ser o cenário mais gravoso comparativamente ao sismo próximo, por apresentar valores superiores de PGA. Relativamente a soluções de reforço sísmico, os levantamentos apenas identificaram na totalidade dos casos a existência ou não de contrafortes, que apenas estavam presentes em 15% das construções (ID 10, 14 e 15). Note-se que a existência destes contrafortes não foi considerada no cálculo dos índices.

**Quadro 1** Características principais das construções tradicionais de taipa avaliadas

ID	Ref	Uso	Localização	Cobertura	PGA (g)	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	L/T (-)	$t_w$ (m)	$h_w$ (m)
1	[33]	Habitação	Colos	2-águas	0,20	117	4,7	0,54	3,4
2	[33]	Habitação	Serpa	2-águas	0,10	149	1,6	0,54	2,9
3	[33]	Habitação	Vales Mortos	2-águas	0,10	236	2,9	0,58	3,3
4	[33]	Habitação	Vales Mortos	2-águas	0,10	146	1,3	0,50	2,5
5	[33]	Habitação	Mértola	2-águas	0,15	169	2,8	0,58	3,4
6	[33]	Habitação	Aljustrel	2-águas	0,15	65	1,1	0,52	2,9
7	[33]	Habitação	Montes Velhos	2-águas	0,10	96	1,6	0,50	3,0
8	[33]	Habitação	Cuba	2-águas	0,10	82	1,2	0,50	3,6
9	[33]	Quinta	Pedrógão	2-águas	0,10	250	4,4	0,50	3,3
10	[26]	Celeiro	Montoito	2-águas	0,06	130	3,2	0,54	3,1
11	[26]	Armazém	Montoito	2-águas	0,06	30	2,1	0,47	2,7
12	[26]	Armazém	Montoito	1-água	0,06	40	2,0	0,50	2,9
13	[26]	Habitação	Montoito	2-águas	0,06	40	1,9	0,50	2,5
14	[26]	Habitação	Safara	1-água	0,10	35	3,1	0,50	2,9
15	[26]	Habitação	Vila Nova de S. Bento	2-águas	0,10	85	1,7	0,46	2,4
16	[26]	Habitação	Santana de Cambas	2-águas	0,10	75	1,5	0,55	3,2
17	[26]	Curral	Saraiva	2-águas	0,15	52	1,1	0,45	2,1
18	[26]	Habitação	Ermidas-Sado	2-águas	0,15	82	1,8	0,45	2,6
19	[26]	Habitação	Ermidas-Sado	2-águas	0,15	60	1,3	0,50	2,8
20	[26]	Habitação	S. Maria do Castelo	2-águas	0,15	67	4,3	0,50	2,9



**Figura 4** Exemplos das construções de taipa analisadas: (a) ID 1; (b) ID 5; (c) ID 8

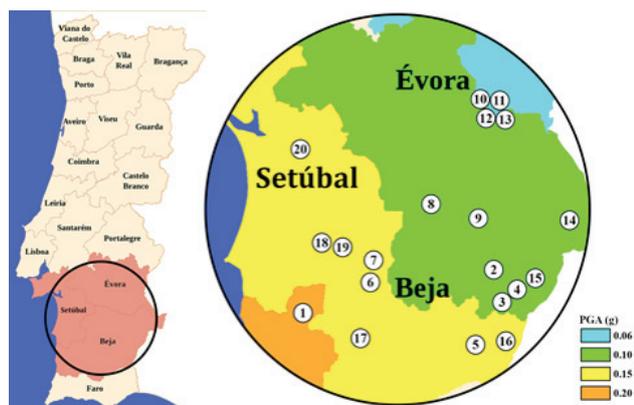


Figura 5 Localização das construções de taipa consideradas para análise e comparação com a perigosidade sísmica local para sismos afastados

## 5 Resultados e discussão

O cálculo dos índices simplificados levou à consideração de algumas hipóteses relativamente a parâmetros físico-mecânicos representativos da taipa do Alentejo, sendo algumas delas já referidas e justificadas na Secção 3. Adicionalmente, assumiu-se um valor da massa específica da taipa de  $1900 \text{ kg/m}^3$ , o que corresponde a um valor intermédio relativamente aos referidos na bibliografia [13]. O valor do coeficiente de atrito também foi assumido considerando a elevada variabilidade associada ao tipo de solo utilizado na construção, pelo que se adotou o valor mínimo apresentado em Jaquin *et al.* [49], nomeadamente  $0,70$  ( $\phi = 35^\circ$ ). Note-se que este valor é significativamente superior ao valor regulamentar da alvenaria ( $0,4$ ) definido no Eurocódigo 6 [39]. Além disto, os parâmetros definidos anteriormente não estão disponíveis especificamente para o caso português, destacando a falta de investigação dedicada à caracterização abrangente das propriedades físico-mecânicas do património de taipa nacional.

A Figura 6 apresenta os resultados dos índices referentes ao comportamento no plano quando avaliados para as duas direções principais e compara-os com os limites referidos na Secção 3. De forma a ilustrar a influência das aberturas no cálculo destes índices, a Figura 7 exemplifica o caso da construção ID 13, de onde é possível observar que todas (ou a maioria) das aberturas pertencem às paredes resistentes na direção longitudinal (X). Esta é uma observação aplicável aos restantes casos considerados. Apesar disto, os valores dos índices na direção longitudinal (X) são superiores aos obtidos para a direção transversal (Y), devido ao desenvolvimento retangular em planta das construções avaliadas. De facto, a maioria da área das paredes resistentes orienta-se segundo a direção longitudinal, pelo que se antevê um comportamento sísmico melhor nesta direção. Relativamente aos limites definidos, é possível constatar que os valores do índice  $Y_1$  são superiores ao respetivo limite, com a exceção de 4 construções quando avaliadas na direção transversal. No caso dos índices  $Y_2$  e  $Y_3$  observa-se que todos os edifícios

cumprem os respetivos limites. Além disto, verifica-se que o índice  $Y_3$  depende significativamente do PGA, uma vez que  $Y_3$  apresenta uma clara tendência decrescente com o aumento do PGA. Este aspeto parece indicar que o comportamento sísmico das paredes das construções tradicionais de taipa apenas se poderá considerar comprometida em zonas de perigosidade sísmica elevada a muito elevada (PGA superior a  $0,2 \text{ g}$ ). O facto de o índice  $Y_3$  depender significativamente do PGA e a aparente aleatoriedade da variação dos índices  $Y_2$  e  $Y_3$  em função do PGA também parecem indicar a inexistência de uma relação direta entre a sismicidade local e a geometria das construções.

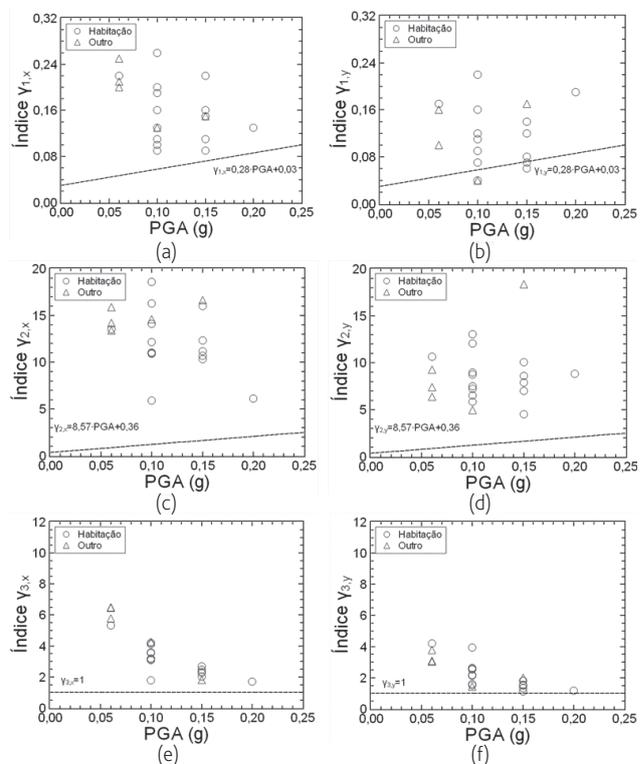
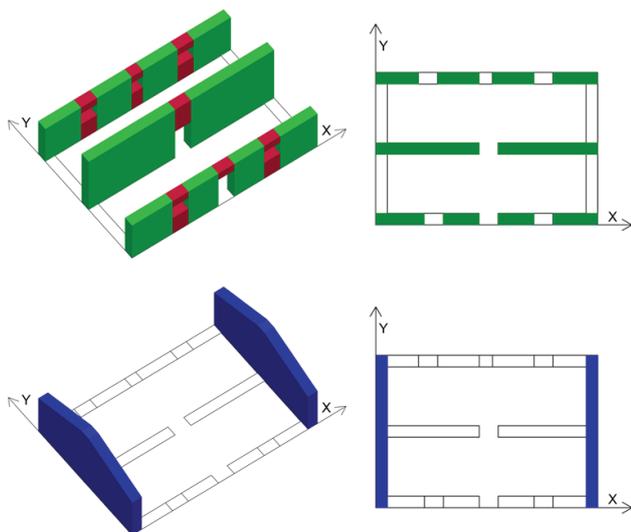
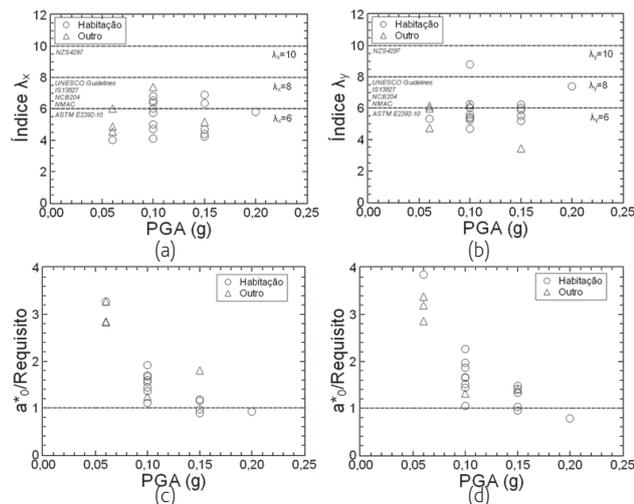


Figura 6 Resultados dos índices relativos ao comportamento no plano: (a)  $Y_{1,x}$ ; (b)  $Y_{1,y}$ ; (c)  $Y_{2,x}$ ; (d)  $Y_{2,y}$ ; (e)  $Y_{3,x}$ ; (f)  $Y_{3,y}$

Os resultados da análise do comportamento para fora do plano das paredes das construções tradicionais de taipa são apresentados na Figura 8 em termos do índice  $\lambda$  e da verificação cinemática. Relativamente ao índice  $\lambda$ , todas as construções respeitam o limite menos exigente ( $\lambda = 10$ ) e quase todas respeitam o limite intermédio  $\lambda = 8$ , excetuando um edifício quando analisado na direção Y. Contudo, o limite mais exigente ( $\lambda = 6$ ) é excedido por 8 edifícios na direção X e 5 na direção Y. Note-se que de acordo com este índice, a direção X é a mais vulnerável, pois apresenta as paredes resistentes mais esbeltas devido à presença das empenas. Além disto, os resultados deste índice parecem não apresentar uma dependência clara com o PGA, indicando que a variação de sismicidade de local para local não terá tido influência na definição da geometria das construções ao nível da altura e espessura das paredes.



**Figura 7** Paredes consideradas no cálculo dos índices de comportamento no plano segundo as respetiva direções principais da construção ID 13



**Figura 8** Resultados da análise do comportamento para fora do plano: (a)  $\lambda_x$ ; (b)  $\lambda_y$ ; (c) verificação cinemática na direção longitudinal (X); (d) verificação cinemática na direção transversal (Y)

Relativamente à verificação cinemática e tal como esperado, os resultados demonstram uma tendência decrescente do nível de segurança com o aumento do PGA. Porém, a capacidade sísmica satisfaz o requisito sísmico para quase todos os edifícios, exceto em três construções edificadas em zonas com PGA entre 0,15 g e 0,20 g. Além disto, a capacidade de algumas construções pode ser 1,5-4 vezes maior que o requisito sísmico em áreas com PGA inferior a 0,15 g.

De uma forma geral, constata-se que a maioria das construções tradicionais de taipa analisadas satisfaz os limites impostos para cada índice, sendo o resultado da utilização de práticas tradicionais de

construção, nomeadamente da utilização de geometria retangular e regular em planta, bem como da construção de paredes com espessura elevada. De facto, constatou-se que a altura das construções é o parâmetro com maior variação, cuja importância é assumidamente relevante para o desempenho sísmico das construções tradicionais de taipa. Por exemplo, as construções de taipa utilizadas como armazéns agrícolas apresentam em geral melhor desempenho sísmico, uma vez que para além de apresentarem condições de planta retangular e espessura das paredes semelhantes às das outras construções, são geralmente construções mais baixas, devido a uma exigência inferior das condições de habitabilidade. Relativamente ao comportamento para fora do plano das paredes das construções com contrafortes, não se observou nenhuma relação entre a sua presença e um eventual pior desempenho sísmico. Nestes casos,  $\lambda$  variou entre 4 e 6, enquanto  $a_0^*/Requisito$  variou entre 1,7 e 3,4.

## 6 Conclusões

Este artigo apresenta um trabalho de investigação que permite uma melhor compreensão da segurança sísmica das construções tradicionais de taipa do Alentejo. Para tal, foram analisados 20 edifícios através de uma metodologia simplificada que consistiu no cálculo de índices do comportamento das paredes no plano e para fora do plano, bem como numa verificação segundo um método de análise cinemática linear. Apesar das limitações enunciadas na aplicação desta metodologia às construções de taipa (estruturas sem comportamento de caixa), este estudo sugere que as construções analisadas apresentam, em geral, um comportamento adequado para o sismo afastado regulamentar.

Relativamente ao comportamento das construções analisadas no plano, quatro edifícios (20%) não cumprem o limite definido para o índice  $Y_1$  e nenhum edifício apresentou incumprimento para os índices  $Y_2$  e  $Y_3$ . Contudo, note-se que os limites considerados não foram definidos especificamente para construções em taipa, pelo que estas conclusões deverão ser assumidas com as devidas reservas.

No caso do comportamento para fora do plano, nenhum edifício excedeu o limite mais permissivo considerado para o índice  $\lambda$ , enquanto apenas uma (5%) ultrapassou o limite intermédio e oito (40%) ultrapassaram o mais restritivo. A análise cinemática linear mostrou que apenas 3 edifícios (15%) apresentam um desempenho inferior ao requerido. Além disso, a direção longitudinal revelou ser a mais vulnerável devido à presença das empenas, que aumentam a altura das paredes sujeitas à ação para fora do plano.

Por último, constata-se que o comportamento sísmico das construções tradicionais de taipa beneficiam de muitas das suas características arquitetónicas típicas, entre as quais se pode destacar a construção de um único piso (estruturas de baixa altura), a geometria em planta bastante regular e a utilização de paredes de taipa com espessura bastante elevada. Por outro lado, note-se que a construção moderna em taipa tem seguido uma tendência de aumento de complexidade estrutural, negligenciando muitas das características mencionadas anteriormente. Assim, o dimensionamento de estruturas de taipa modernas em zonas com perigosidade sísmica significativa requer a utilização de métodos de análise avançados que contabilizem os parâmetros relevantes que influenciam o

seu desempenho sísmico. Contudo o desenvolvimento, aplicação e validação destes métodos exige um trabalho de investigação futuro dedicado à caracterização experimental mecânica e estrutural da taipa, bem como à sua modelação numérica. A redução da vulnerabilidade sísmica do património construído em taipa é outro tema que merece investigação futura, e que deve incluir tanto o estudo das soluções de reforço tradicionais (ver Secção 2) como o desenvolvimento e implementação de novas soluções de reforço sísmico. Entre estas últimas, destaca-se o reforço com rebocos armados compatíveis [50] e a introdução de vigas de bordadura [20].

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos do FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da Fundação para Ciência e a Tecnologia - FCT no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-007633, POCI-01-0145-FEDER-016737 (PTDC/ECM-EST/2777/2014) e das bolsas FRH/BPD/97082/2013 e SFRH/BD/131006/2017. Os autores agradecem todo o financiamento concedido.

## Referências

- [1] Schroeder, H. – “The development of earth building” em *Sustainable Building with Earth*. Ed. por H. Schroeder, Springer International Publishing, p. 1-46, 2016.
- [2] Houben, H.; Guillaud, H. – *Earth construction: a comprehensive guide*. CRATerre - EAG, Intermediate Technology Publication, 372 p., 2008.
- [3] Minke, G. – *Building with earth, design and technology of a sustainable architecture*. Birkhäuser – Publishers for Architecture, 208 p., 2006.
- [4] Rocha, M. – “Taipa na arquitetura tradicional: técnica construtiva” em *Arquitetura de Terra em Portugal*. Ed. por M. Fernandes e M. Correia, Argumentum, p. 22-26, 2005.
- [5] Jaquin, P. A. – *Analysis of historic rammed earth construction*. Tese de Doutoramento, Universidade de Durham, 2008.
- [6] Allinson, D; Hall, M. – “Humidity buffering using stabilised rammed earth materials”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, Vol. 165(6), p. 335-344, 2012.
- [7] Yamín Lacouture *et al.* – “Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada”, *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural-Journal of Cultural Heritage Studies*, Vol. 20(2), p. 286-303, 2007.
- [8] Oliveira *et al.* – “As construções em taipa e os sismos” em *Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia - SÍMICA 2010*, Aveiro, 2010.
- [9] Maheri *et al.* – “Performance of adobe residential buildings in the 2003 Bam, Iran, earthquake”, *Earthquake Spectra*, Vol. 21(S1), p. 337-344, 2005.
- [10] Blondet *et al.* – “Observed behaviour of earthen structures during the Pisco (Peru) earthquake of August 15, 2007”, em *14<sup>th</sup> World conference on earthquake engineering*, 2008.
- [11] Elnashai *et al.* – “The Maule (Chile) earthquake of February 27, 2010: Consequence assessment and case studies”, *Mid-America Earthquake Center*, 2010.
- [12] Silva *et al.* – “Effectiveness of the repair of unstabilised rammed earth with injection of mud grouts”, *Construction and Building Materials*, Vol. 127, p. 861-871, 2016.
- [13] Miccoli *et al.* – “Mechanical behaviour of earthen materials: a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob”, *Construction and Building Materials*, Vol. 61, p. 327-339, 2014.
- [14] Nabouch *et al.* – “Seismic assessment of rammed earth walls using pushover tests”, *Procedia Engineering*, Vol. 145, p. 1185-1192, 2016.
- [15] Miccoli *et al.* – “In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling”, *Engineering Structures*, Vol. 125, p. 144-152, 2016.
- [16] Arslan *et al.* – “Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study”, *Construction and Building Materials*, Vol. 133, p. 433-442, 2017.
- [17] Silva *et al.* – “Modelling the structural behaviour of rammed earth components” em *12<sup>th</sup> International Conference on Computational Structures Technology*. Ed. por B.H.V. Topping e P. Iványi, Civil-Comp Press, 2014.
- [18] Miccoli *et al.* – “Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling”, *Materials and Structures*, Vol. 48, p. 3443-3456, 2015.
- [19] Bui *et al.* – “Modeling rammed earth wall using discrete element method”, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol. 28, p. 523-538, 2015.
- [20] Gomes *et al.* – “Seismic resistance of earth construction in Portugal”, *Engineering Structures*, Vol. 33(3), p. 932-941, 2011.
- [21] Ortega *et al.* – “Evaluation of seismic vulnerability assessment parameters for Portuguese vernacular constructions with nonlinear numerical analysis” em *5<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Ed. por M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris, 2015.
- [22] Librici, C. – *Modelling of the seismic performance of a rammed earth building*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2016.
- [23] NP ENV 1998-1: *Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismo – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [24] Correia, M. – “Fortificações islâmicas em taipa militar”, *Pedra & Cal*, Vol. 24, p. 16, 2004.
- [25] Braga, A. M.; Estêvão J. M. C. – “Os sismos e a construção em taipa no Algarve” em *Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia*, 2010.
- [26] Correia, M. – *Taipa no Alentejo*. Argumentum, 176 p., 2007.
- [27] Silva *et al.* – “Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal”, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, p. 181-191, 2013.
- [28] Gil *et al.* – “Colour Assays: an inside look into Alentejo traditional limewash paintings and coloured lime mortars”, *Color Research & Application*, Vol. 36(1), p. 61-71, 2011.
- [29] Silva, R. A. – *Repair of earth constructions by means of grout injection*. Tese de Doutoramento, Universidade Minho, 2013.
- [30] Gomes *et al.* – “Unstabilized rammed earth: characterization of material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements”, *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 8(2), p. 185-212, 2014.

- [31] Marques *et al.* – “Contemporary use of rammed earth in Portugal. The case of Alentejo coast” em *40<sup>th</sup> IAHS World Congress on Housing - Sustainable Housing Construction*, 2014.
- [32] Lima *et al.* – “Rammed earth construction nowadays-comparing methodologies and design between Portugal and USA” em *12<sup>th</sup> World Congress on Earthen Architecture (TERRA 2016)*, 2016.
- [33] Domínguez, O. – *Preservation of rammed earth constructions*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2015
- [34] Lourenço, P. B.; Roque, J. A. – “Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings”, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, p. 200-208, 2006.
- [35] Lourenço *et al.* – “Simplified indexes for the seismic assessment of masonry buildings: International database and validation”, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 34, p. 585-605, 2013.
- [36] Sadeghi *et al.* – “Seismic performance of historical vaulted adobe constructions: a numerical case study from Yazd, Iran”, *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 12(5), p. 879-897, 2018.
- [37] Lourenço *et al.* – “Analysis of masonry structures without box behavior”, *International Journal Architectural Heritage*, Vol. 5, p. 369-382, 2011.
- [38] Meli, R. – *Structural engineering of historical buildings*, Mexico-City: Fundación ICA, 1998.
- [39] EN 1996-1-1: *Eurocode 6: Design of masonry structures, Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*. European Committee of Standardization, 2005.
- [40] NZS 4297: *Engineering design of earth buildings*. Standards New Zealand, 1998.
- [41] ASTM E2392-10: *Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*. American Society for Testing and Materials, 2010.
- [42] Arya *et al.* – “Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction”, UNESCO, 2014.
- [43] IS13827: *Improving Earthquake Resistance of Earthen Buildings - Guidelines*. Bureau of Indian Standards, 1998.
- [44] NBC204: *Guidelines for Earthquake Resistant Building Constructions: Earthen Building*. Government of Nepal, Ministry of Physical Planning and Works, Department of Urban Development and Building Construction, 1994.
- [45] NMAC 14.7.4: *Housing and Construction. Building codes. General*. 2015 New Mexico Earthen Building Materials Code. Construction Industries Division of the Regulation and Licensing Department, 2015.
- [46] Mendes, N. – “Masonry macro-block analysis” em *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Ed. por Beer *et al.*, Springer, 2014.
- [47] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*, Decreto Ministeriale, 2008 (em italiano).
- [48] Silva *et al.* – “Assessment of the injection of grouts to repair cracks in rammed earth” em *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, Conference segment on Historical Masonry*, 2016.
- [49] Jaquin *et al.* – “Analysis of historic rammed earth construction” em *5<sup>th</sup> Int. Conf. Structural Analysis of Historical Constructions*, 2006.
- [50] Oliveira *et al.* – “Characterization of a compatible low cost strengthening. Solution based on the TRM Technique for Rammed Earth”, *Key Engineering Materials*, Vol. 747, p. 150-157, 2017.

