

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DE UMA ESTRUTURA DE TAIPA

Daniel V. Oliveira
Prof. Associado
ISISE, Univ. Minho

Reza Allahvirdizadeh
Bolsheiro Investigação
ISISE, Univ. Minho

Rui A. Silva
Investigador Doutorado
ISISE, Univ. Minho

SUMÁRIO

A importância da terra enquanto material de construção é evidenciada pelos milhões de pessoas que vivem em edifícios de terra e pelos numerosos monumentos históricos construídos em terra. As construções de terra resistem razoavelmente bem às cargas gravíticas, mas são significativamente vulneráveis a sismos. Neste sentido, tem sido dada atenção ao desenvolvimento de soluções de reforço eficientes, compatíveis e economicamente acessíveis. Contudo, poucos estudos abordam a caracterização experimental ou a modelação numérica da resposta sísmica de tais construções. O presente artigo investiga o desempenho sísmico de uma estrutura de taipa, simples e reforçada, para fora do plano usando uma abordagem numérica avançada baseada no método dos elementos finitos, calibrada com base em resultados experimentais.

ABSTRACT

The importance of raw earth is highlighted by the millions of persons living in earthen buildings around the World and by numerous historical monuments made of this material. Rammed earth buildings acceptably resist to gravity loads, but are significantly vulnerable to earthquakes. In this regard, attention has been put on the development of efficient, compatible and affordable strengthening solutions. However, very limited studies address either the experimental testing or modelling of the seismic response of such buildings. The current study investigates the seismic out-of-plane performance of a rammed earth structure (plain and strengthened) using an advanced finite element modelling approach, calibrated based on experimental tests.

PALAVRAS-CHAVE: taipa; análise numérica não-linear; comportamento para fora do plano; reforço; análise pushover.

1. INTRODUÇÃO

A terra, enquanto material abundante no mundo, foi um dos primeiros materiais de construção usados pelo Homem. A este respeito, foram desenvolvidas inúmeras técnicas construtivas tradicionais, entre as quais as mais conhecidas são o adobe e a taipa. A natureza sustentável da construção em terra faz com que seja considerada uma escolha possível para futuras construções. Assim, torna-se necessário compreender o comportamento das construções de terra, não apenas para os objetivos da construção nova, mas também para a reabilitação e reforço do património construído. Do ponto de vista estrutural, as construções de terra exibem um comportamento aceitável para cargas gravíticas, mas apresentam elevada vulnerabilidade sob ações laterais, como outros tipos de estruturas de alvenaria não reforçada. Além disso, muitas construções de terra estão localizadas em regiões com perigosidade sísmica não negligenciável. A este respeito, muitas pessoas que habitam construções de terra foram afetadas em sismos recentes, como por exemplo em Erzinkan na Turquia (1992), Bam no Irão (2003), Pisco no Peru (2007) e Concepción no Chile (2010).

O presente trabalho está focado na construção de taipa. Geralmente, a taipa exibe uma resistência baixa à compressão e muito baixa à tração. Apesar do trabalho experimental desenvolvido para caracterizar suas propriedades (principalmente ensaios de compressão uniaxial ou diagonal), a definição do seu comportamento mecânico ainda constitui uma tarefa desafiante [1-3], pois depende de vários parâmetros, como o fuso granulométrico, teor de humidade, tipo de compactação, índice de vazios e coesão das partículas. Apesar do processo de construção por camadas, as propriedades mecânicas (especialmente a resistência à compressão e o módulo de Young) não variam significativamente em relação à direção considerada [3].

Como já referido, as construções em taipa são muito vulneráveis do ponto de vista sísmico. Os modos de colapso observados em sismos incluem rotura frágil devido a ações para fora do plano, fendas nos cunhais e em pontos de aplicação de cargas verticais, conduzindo muitas vezes a perdas de integridade estrutural [4-5]. Na literatura propõe-se várias medidas de intervenção para mitigar a vulnerabilidade das estruturas de terra, nomeadamente a injeção com materiais compatíveis (do ponto de vista físico, mecânico e químico) [6], a utilização de vigas de coroamento e o uso de rebocos armados (*textile reinforced mortar* ou TRM) [7].

Recentemente, têm sido realizados diversos estudos experimentais para a caracterização das propriedades dos sistemas TRM e avaliação da resposta de componentes estruturais de alvenaria reforçados desta forma [8]. Adicionalmente, foram realizadas investigações para avaliar a eficiência das soluções baseadas na técnica TRM na resposta sísmica de paredes de alvenaria no plano e para fora do plano [9]. Contudo, estes trabalhos dizem respeito a alvenaria, sendo que a eficiência da técnica TRM em construções de terra é basicamente desconhecida, principalmente em taipa. Espera-se que este tipo de reforço possa promover uma redistribuição das tensões e impedir (ou retardar) a perda de integridade dos componentes estruturais.

Para além da análise experimental, a modelação numérica é também uma ferramenta fundamental para entender o comportamento das construções de terra. Contudo, o comportamento fortemente não linear destas construções requer necessariamente o uso de modelos numéricos avançados, incorporando leis constitutivas adequadas e baseadas em evidência experimental.

O presente trabalho investiga numericamente a resposta sísmica de uma estrutura de taipa para fora do plano e avalia o desempenho sísmico de uma solução de reforço baseada em TRM. Neste sentido, adota-se o método dos elementos finitos para simular o comportamento estrutural. Os modelos numéricos foram calibrados com base em resultados experimentais disponíveis na literatura e foram submetidos a análises pushover para avaliar sua capacidade de carga e modos de colapso correspondentes.

2. CASO DE ESTUDO

A maioria dos estudos realizados sobre o comportamento mecânico de construções de taipa são limitados a pequenos provetes, pouco representativos do comportamento estrutural, uma vez que não fornecem uma compreensão abrangente dos possíveis mecanismos de colapso. A geometria do caso de estudo a analisar numericamente deve ser representativa das construções reais, tanto quanto possível, e deve permitir a observação do modo de rotura para fora do plano, que aqui se pretende estudar.

2.1. Levantamento de campo

A região do Alentejo possui um grande número de monumentos e edifícios construídos em taipa. A Fig. 1 ilustra dois edifícios vernaculares típicos da região. Assim, foi considerado um levantamento de onze edifícios de taipa representativos, construídos no Alentejo antes de 1950, para definir a geometria do modelo [10]. Observou-se que em todos os casos a espessura das paredes é de cerca de 0,5 m, tendo sido esta a espessura adotada no presente estudo. Por sua vez, a altura, o comprimento e a razão comprimento/largura das paredes variam em torno de $2,2 \pm 0,3$ m, $3,7 \pm 1,5$ m e $2,2 \pm 1,0$, respetivamente.



Fig. 1 – Edifícios vernaculares de taipa típicos do Alentejo.

2.2. Geometria do modelo de referência

Representa-se na Fig. 2 algumas plantas típicas dos edifícios estudados [10]. As paredes são geralmente travadas por paredes perpendiculares. Assim, uma estrutura em forma de U (destaque a vermelho na Fig. 2) poderia ser considerada representativa das geometrias de taipa encontradas no trabalho de campo. Considerando a informação indicada acima, fixou-se para o modelo numérico a geometria representada na Fig. 3, com uma espessura constante de 0.50 m.

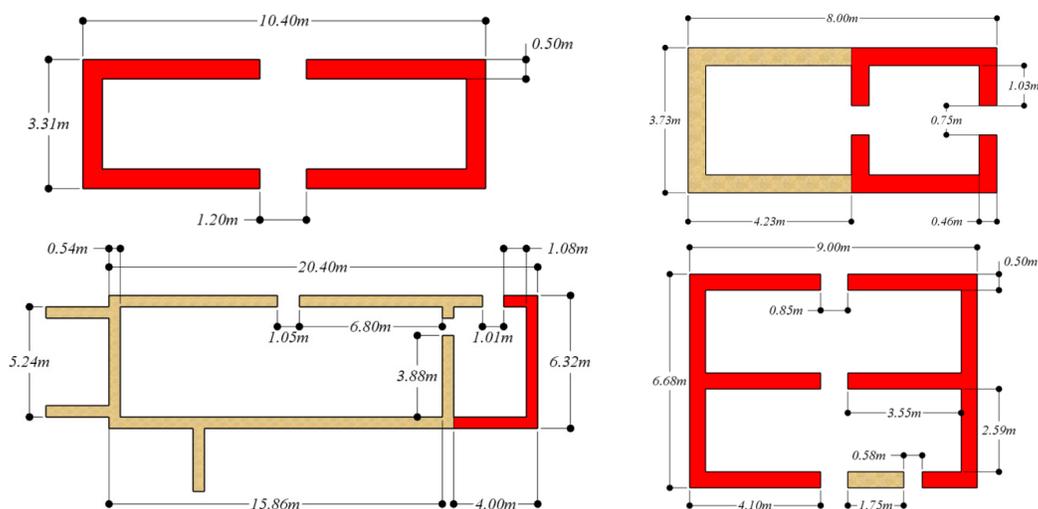


Fig. 2 – Exemplos de plantas estruturais representativas das construções de taipa levantadas [10].

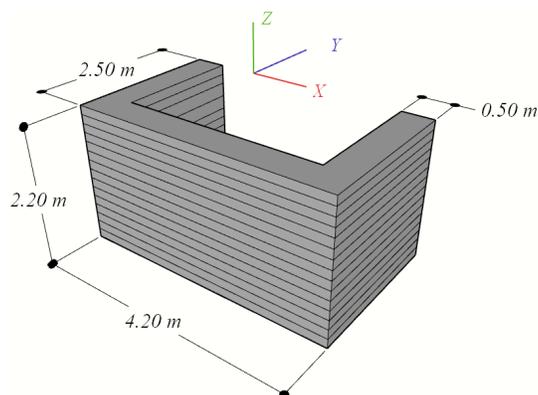


Fig. 3 – Geometria representativa adotada para o modelo numérico.

3. MODELO NUMÉRICO

Os modelos de elementos finitos (FEM) da estrutura simples e reforçada foram preparados e calculados com base no software DIANA 10.2 [11]. Para a modelação do comportamento não linear dos elementos de taipa e do reforço foi necessária a definição de propriedades materiais adequadas, com base em resultados experimentais. As seções seguintes apresentam as leis constitutivas adotadas e as abordagens seguidas.

3.1. Lei constitutiva da taipa

O comportamento material da taipa foi simulado por meio do modelo de extensão total com fenda rotativa (total strain rotating crack model, TSRM). Sendo o comportamento da taipa em compressão fortemente não-linear, adotou-se uma relação constitutiva multilinear, como recomendado em [12], ilustrada na Fig. 4a e definida como a média de curvas experimentais obtidas em ensaios de compressão [13]. Devido à falta de informação fidedigna sobre o comportamento pós-pico, este foi estimado prolongando a curva com a mesma inclinação dos dados experimentais (como indicado pela linha a tracejado). Por sua vez, assumiu-se que o comportamento pós-pico em tração segue uma relação exponencial, tendo sido os respetivos

parâmetros calibrados com base num estudo numérico anterior sobre o comportamento de taipa ao corte [14]. A relação adotada em tração e os respetivos parâmetros estão representados na Fig. 4(b).

Para tornar os resultados numéricos independentes do tamanho do elemento de malha, a largura da banda fendilhada (h) foi considerada igual à raiz quadrada da área do elemento (A). Note-se que os dados experimentais acima mencionados resultaram de ensaios de provetes fabricados com solo recolhido da mesma região onde foi realizado o levantamento geométrico (Alentejo).

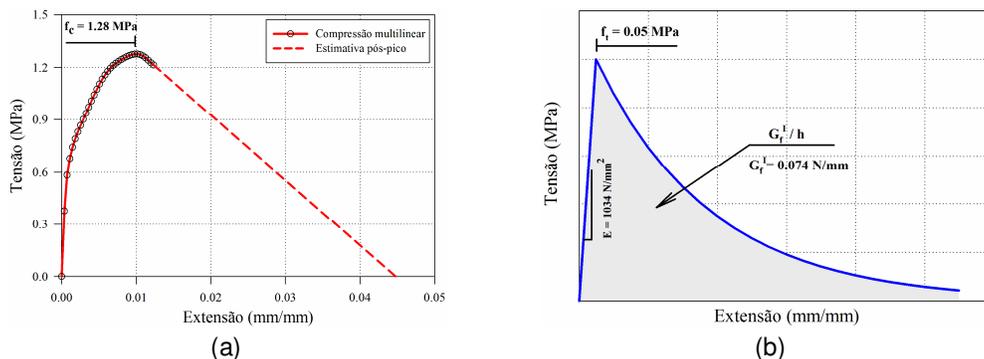


Fig. 4 – Relações constitutivas adotadas para taipa: (a) relação multilinear para compressão; (b) relação pós-pico exponencial para tração.

3.2. Lei constitutiva do material composto de reforço

A seleção da solução de reforço TRM a ser usada no modelo de taipa foi baseada num trabalho de investigação recente, onde foi efetuada a caracterização de diferentes soluções de argamassa reforçada com têxteis de baixo custo (LC-TRM) [15]. O conceito fundamental inerente a esta solução de reforço consiste na utilização de materiais compatíveis (do ponto de vista físico, químico e mecânico), acessíveis e facilmente disponíveis no mercado tendo em vista a generalização do seu uso.

Os trabalhos experimentais acima mencionados avaliaram várias malhas de reforço de baixo custo disponíveis localmente, tendo-se selecionado uma malha de fibra de vidro (G1) e uma malha de fibra de plástico (G2) para integrar a solução de reforço. Em relação às restantes malhas ensaiadas, a malha G1 apresenta maior resistência, menor deformação e comportamento linear até o pico, seguido de um pós-pico frágil. Por sua vez, a malha G2 apresenta rigidez e resistência inferiores malha G1, com visível endurecimento pré-pico e elevada extensão de pico, com rotura frágil [15]. A solução LC-TRM estudada emprega uma argamassa à base de terra, sem ligantes adicionais [13].

Para a modelação do comportamento do material composto LC-TRM, foi seguida uma abordagem semelhante à da taipa, adotando-se o modelo TSRM. Este modelo requer o conhecimento do comportamento tensão-extensão uniaxial do material composto em tração e compressão. O comportamento em tração foi adotado de ensaios de tração direta do composto (argamassa e malha) [15], como representado na Fig. 5. Assim, o comportamento numérico em tração consistiu numa relação trilinear (ou bilinear) obtida da média de resultados experimentais. Foi ainda considerada a hipótese de aderência perfeita entre a malha e a argamassa, por falta de informação experimental mais detalhada.

O comportamento do composto LC-TRM à compressão é regido principalmente pelo comportamento da argamassa, podendo-se ignorar a contribuição da malha. Assim, a resposta em compressão foi baseada em curvas experimentais de compressão axial

de provetes de argamassa cilíndricos [15]. Estas curvas apresentam um comportamento não linear acentuado, adotando-se uma relação multilinear baseada em valores médios experimentais, ver Fig. 6a. Por sua vez, a Fig. 6b exemplifica o comportamento uniaxial do compósito baseado na malha G1.

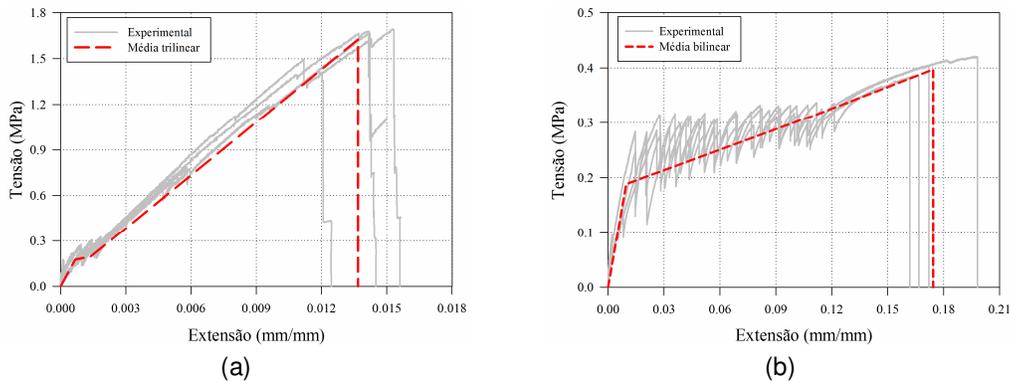


Fig. 5 – Relações constitutivas para o compósito LC-TRM baseadas em ensaios de tração direta: (a) malha G1; (b) malha G2.

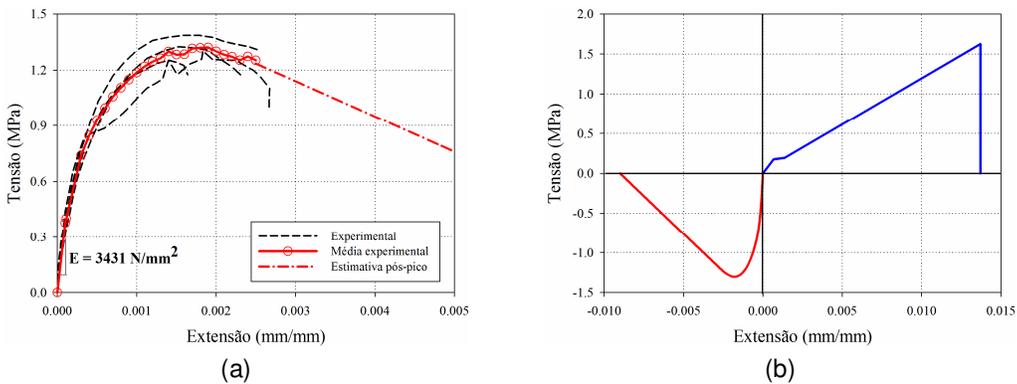


Fig. 6 – Relações constitutivas para o compósito LC-TRM: (a) compressão axial; (b) compressão-tração para compósito baseado na malha G1.

3.3. Modelo de elementos finitos

A modelação FEM 3D de paredes estruturais envolve normalmente a utilização de elementos de casca ou sólidos, sendo a primeira abordagem computacionalmente menos intensiva e a segunda mais precisa na contabilização dos efeitos tridimensionais. Devido à espessura relevante das paredes da estrutura em análise, foi adotado um modelo MEF baseado em elementos finitos sólidos. Em relação às condições fronteira, a estrutura foi considerada totalmente fixa na base.

A estrutura de taipa foi discretizada por meio de elementos sólidos isoparamétricos de 20 nós (Fig. 7a). Por sua vez, foram usados elementos de casca (Fig. 7b) para discretizar o reforço TRM, que se liga aos elementos sólidos através de elementos de interface quadrilaterais de 16 nós (Fig. 7c). Note-se que esta interface foi assumida como rígida devido à ausência de resultados experimentais que permitam uma abordagem mais precisa. No entanto, considera-se que esta simplificação não terá uma influência significativa no comportamento global do modelo de taipa reforçado, pois o uso de dispositivos de ancoragem que liguem o reforço ao substrato previne (ou adia) o destacamento daquele.

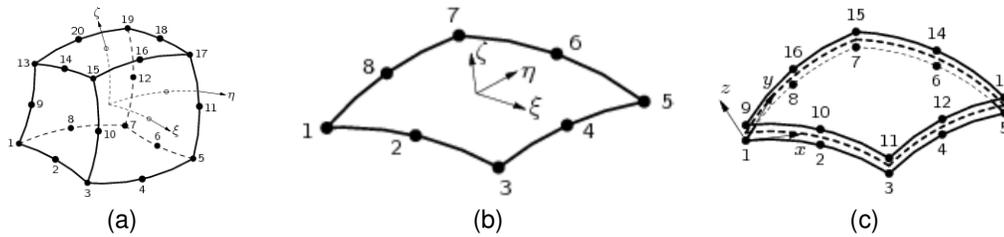


Fig. 7 – Elementos finitos considerados no modelo: (a) elementos de volume; (b) elementos de casca; (c) elementos de interface.

4. ANÁLISE PUSHOVER

O principal objetivo do presente estudo é investigar a resposta sísmica para fora do plano de uma estrutura representativa de taipa com foco no seu comportamento mecânico, na caracterização dos possíveis modos de rotura e na avaliação do desempenho da solução de reforço adotada. Note-se que a realização de análises temporais não lineares resultaria em informação muito detalhada, mas também num esforço computacional muito superior. Por outro lado, a realização de análises estáticas não-lineares (pushover) podem proporcionar uma simulação aceitável da resposta sísmica com um esforço computacional significativamente inferior, embora o padrão de dano previsto e os deslocamentos laterais máximos estimados possam diferir entre ambos os métodos [16]. Apesar de tais desvantagens, as análises pushover podem fornecer uma visão preliminar e geral do comportamento, sendo amplamente usadas na literatura.

Esta seção apresenta os resultados das análises pushover realizadas, em que se optou por aplicar um padrão de carga lateral proporcional à massa do modelo. A análise foi realizada na direção Y (ver Fig. 3) para induzir o comportamento para fora do plano da parede central. Devido à geometria não-simétrica do modelo, as análises pushover foram realizadas em ambos os sentidos [17].

4.1. Modelo não reforçado

Representa-se na Fig. 8 as curvas pushover do modelo não reforçado, através da relação entre o coeficiente sísmico (corte basal normalizado pelo peso do modelo) e o deslocamento horizontal do nó de controlo (topo da seção média da parede central). Indica-se igualmente o sentido do carregamento e o nó de controlo considerado. O carregamento no sentido negativo resulta numa carga máxima e capacidade de deslocamento menores. Este comportamento é explicado pela contribuição menos eficiente das paredes laterais, o que também explica que a iniciação do dano ocorra para cargas mais baixas. De facto, o início do dano para o carregamento no sentido negativo ocorre para um coeficiente sísmico de aproximadamente 0.2, enquanto no caso do sentido positivo esse valor é praticamente o dobro. Assim, pode-se concluir que a direção negativa é a direção que limita a resposta do modelo de taipa.

Relativamente ao comportamento pós-pico, o modelo carregado no sentido negativo apresenta uma queda súbita de capacidade imediatamente após o pico, enquanto o modelo carregado no sentido oposto exibe uma degradação menos frágil da capacidade. O comportamento observado numericamente do modelo carregado no sentido negativo é explicado pelo movimento de derrube da parede central devido à perda de ligação com as paredes laterais. Quando o sentido de carregamento se inverte, a parede central é empurrada contra as paredes laterais comprimindo-as, enquanto estas condicionam fortemente o derrube daquela para fora do seu plano.

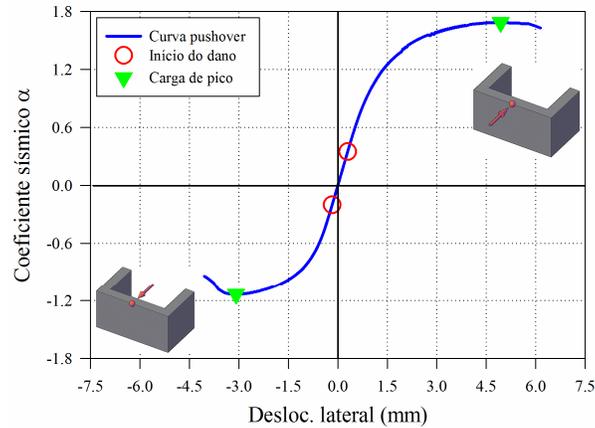


Fig. 8 – Curvas pushover do modelo não reforçado.

A Fig. 9 apresenta as deformadas laterais para as respectivas cargas de pico. Em ambos os casos, a parte média da parede central apresenta os maiores deslocamentos, como esperado, embora seja evidente a localização dos deslocamentos laterais máximos no caso do carregamento positivo, motivada pelo diferente envolvimento das paredes laterais.

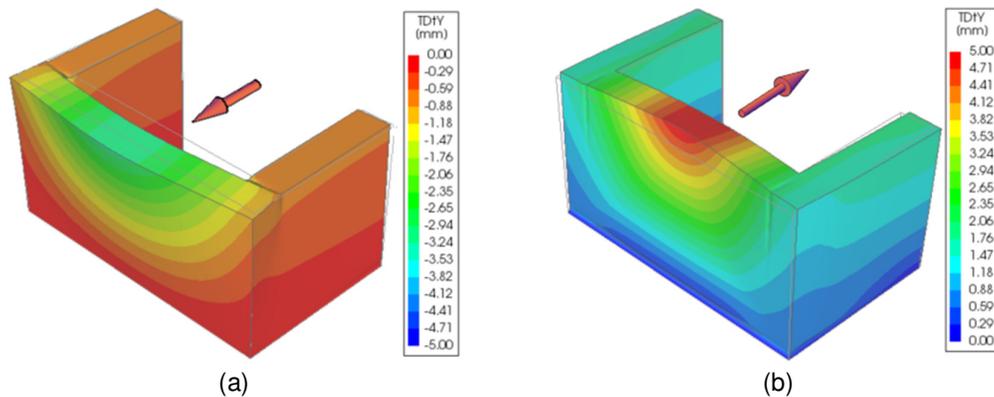


Fig. 9 – Deslocamento lateral para as cargas de pico: (a) sentido negativo; (b) sentido positivo.

Para uma melhor percepção do padrão de dano instalado, apresenta-se na Fig. 10 o mapa das extensões principais de tração para as cargas de pico dos modelos. Relativamente ao modelo carregado no sentido negativo, os maiores valores das extensões principais concentram-se no topo da zona de ligação entre as paredes e também na base (indicador de *rocking*). Este padrão pode ser interpretado como a tendência da parede central se desprender das paredes laterais e rodar em trono da base, colapsando para fora do seu plano.

Por outro lado, quando o modelo é carregado lateralmente no sentido positivo, ocorre a flexão da zona central da parede, sendo evidente a função de suporte revelada pelas paredes laterais, o que resulta diretamente em capacidade de carga e deslocamento superiores.

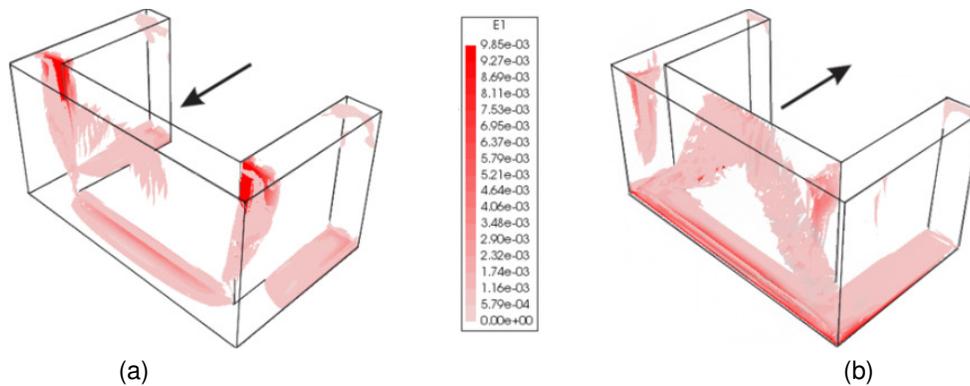


Fig. 10 – Extensões principais de tração para as cargas de pico:
(a) sentido negativo; (b) sentido positivo.

4.2. Modelo reforçado

Esta seção discute a influência da aplicação do reforço LC-TRM no desempenho sísmico para fora do plano do modelo de taipa. Seguindo aplicações práticas comuns, o reforço é considerado em ambos os lados das três paredes.

Considerando que as malhas G1 e G2 têm um custo relativamente semelhante entre si, à volta 0.8 Euro/m², a opção entre as duas malhas estará relacionada com o melhor desempenho estrutural. A este respeito, ambas as malhas foram analisadas numericamente, considerado a ação da gravidade a atuar no sentido negativo do eixo Y, ver Fig. 3, para avaliar a eficácia do reforço. As curvas pushover assim obtidas estão ilustradas na Fig. 11a. É possível observar que o reforço baseado na malha G2 permite um aumento de 7% e 13% da capacidade de deslocamento e de carga, respetivamente. Por sua vez, para o compósito G1 registam-se aumentos em cerca de 45% e 29%, para deslocamento e coeficiente sísmico, respetivamente. Face aos resultados numéricos obtidos, parece mais indicado utilizar a malha G1 no sistema compósito, pelo que a investigação numérica subsequente é realizada utilizando esta solução.

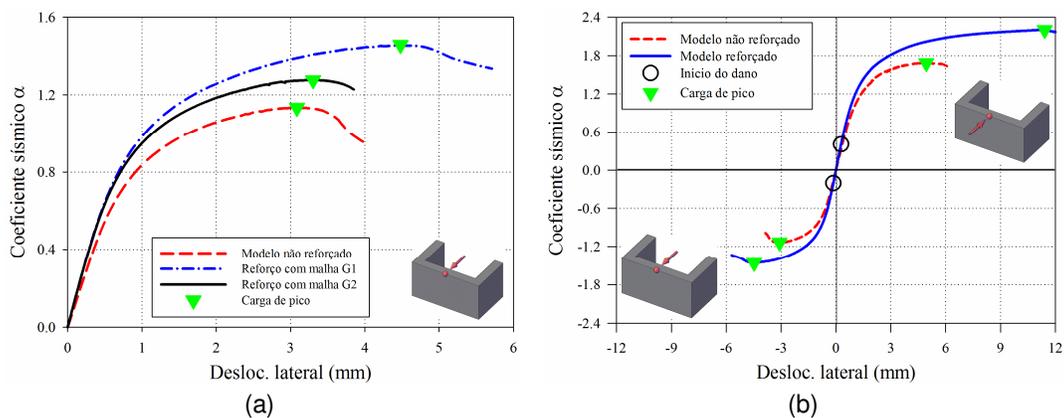


Fig. 11 – Curvas pushover dos modelos: (a) modelo reforçado com as malhas G1 e G2;
(b) modelo não reforçado e reforçado com a malha G1.

Na Fig. 11(b) representa-se as curvas pushover do modelo simples e reforçado com a malha G1, para os dois sentidos do carregamento lateral. Os resultados indicam que o reforço aumenta ligeiramente a rigidez lateral pré-pico do modelo, modificando

também o processo de fendilhação, embora sem influência significativa sobre o início do dano, uma vez que este tende a iniciar-se na taipa. A influência mais relevante do reforço prende-se com o aumento do nível de deslocamento lateral e capacidade de carga, conforme referido anteriormente. Como esperado, a resposta no sentido positivo é menos frágil que no sentido negativo, observando-se um aumento relativamente ao modelo não reforçado de 131% e 31% para o deslocamento e carga máximos, respetivamente.

Os modos de colapso dos modelos foram analisados através da distribuição de deslocamentos laterais e extensões principais de tração. A Fig. 12 retrata os deslocamentos laterais dos modelos simples e reforçados carregados lateralmente no sentido $-Y$. Por uma questão de simplicidade, apenas se apresenta resultados para este sentido. A comparação dos deslocamentos laterais do modelo simples e reforçado (Fig. 12a e Fig. 12b) permite identificar uma redução significativa, especialmente na seção média da parede central, devido ao aumento da rigidez lateral do modelo. Por outro lado, o mapa de deslocamentos do modelo reforçado para a sua carga máxima (Fig. 12c) apresenta melhorias consideráveis em relação ao caso não reforçado. Por exemplo, existe uma maior porção da parede central em deformação e um maior envolvimento das paredes laterais, permitindo-se assim alcançar uma maior resistência lateral.

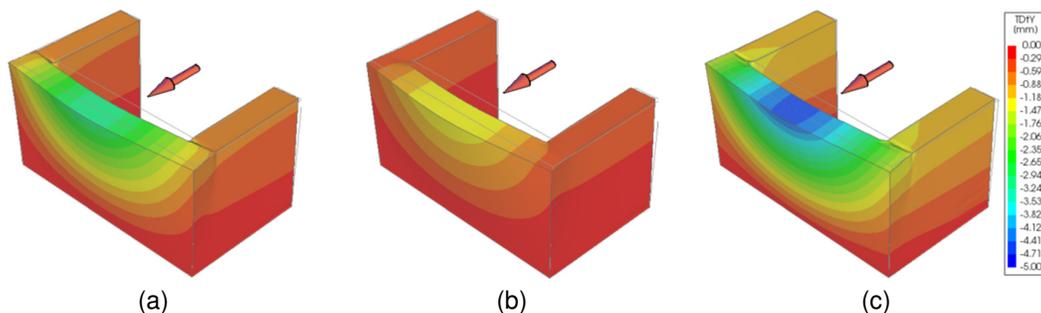


Fig. 12 – Deslocamento lateral dos modelos carregados no sentido $-Y$: (a) modelo simples para a sua carga máxima; (b) modelo reforçado para a carga máxima do modelo simples; (c) modelo reforçado para a sua carga máxima.

A Fig. 13 ilustra as extensões principais de tração nos elementos de taipa, dos modelos simples e reforçado, e dos elementos de reforço TRM. A comparação direta das Fig. 13a e Fig. 13b evidencia uma redução considerável do nível das extensões para o modelo reforçado para uma carga lateral igual à carga máxima do modelo simples. O potencial destacamento entre a parede central e as paredes laterais é assim mitigado pela presença do reforço. Além disso, é perceptível uma redução das extensões de tração na base da parede. Esta situação pode ser interpretada como uma melhoria da integridade da estrutura devido à aplicação do reforço. Ou seja, a solução de reforço usada permite que a parede central redistribua tensões e se retarde a tendência de colapso para fora do plano. A distribuição das extensões principais de tração do modelo reforçado para a sua carga máxima, apresentado na Fig. 13c, evidencia que o mecanismo de rotura é semelhante ao do modelo simples, envolvendo aparentemente a flexão de uma maior área da parede central. Por sua vez, os valores elevados de deformação concentrados na base demonstram a eficiência do reforço aplicado na preservação da integridade do modelo.

O dano observado no material compósito de reforço, para a carga máxima do modelo reforçado, ilustrado na Fig. 13d através das extensões principais de tração, indica que o reforço contribui para a transferência de tensões em regiões da taipa mais propensas a apresentarem dano, isto é, nas ligações entre as paredes e na base.

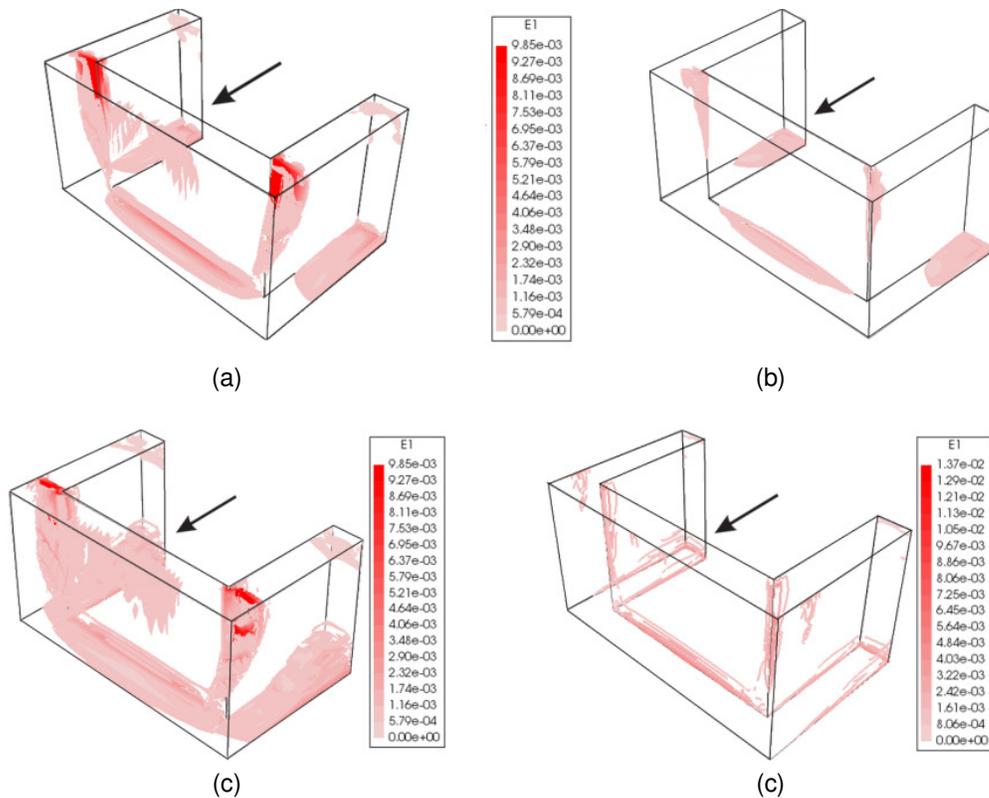


Fig. 13 – Extensões principais de tração dos modelos carregados no sentido $-Y$: (a) modelo simples para a sua carga máxima; (b) modelo reforçado para a carga máxima do modelo simples; (c) modelo reforçado para a sua carga máxima; (d) elementos do reforço para a carga máxima do modelo reforçado.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal do presente artigo foi avaliar o comportamento sísmico para fora do plano de uma estrutura de taipa representativa e estimar a eficiência mecânica de uma solução de reforço de baixo custo baseada na técnica TRM, através de uma série de análises estáticas não lineares avançadas. Os resultados mostraram que o sentido crítico corresponde a carregar lateralmente o modelo de forma a induzir a separação entre as paredes. Nesta situação, o modo de rotura é caracterizado pela flexão da zona média da parede central, separação desta das paredes laterais, e pela rotação das paredes laterais no seu plano. Verifica-se que o dano se inicia para níveis de carga lateral muito baixos, devido ao comportamento marcadamente não linear da taipa.

Em relação à modelação do sistema compósito de reforço, a falta de evidência experimental sobre a ligação entre a taipa, a argamassa e as malhas conduziu a assumir, nesta fase, a adesão perfeita. Apesar das limitações inerentes a esta simplificação, foi possível obter uma primeira visão minimamente confiável sobre o comportamento esperado para a estrutura reforçada. A este respeito, verificou-se que o reforço aumentou ligeiramente a rigidez lateral pré-pico, embora não tenha promovido um atraso no início do dano. A influência do reforço foi claramente visível através do aumento de deslocamento máximo e capacidade de carga em cerca de 45% e 29% (sentido crítico), respetivamente.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado por fundos do FEDER através do COMPETE (Programa Operacional Fatores de Competitividade) e por fundos nacionais através da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) no âmbito dos projetos POCI-01-0145-FEDER-016737 (PTDC/ECM-EST/2777/2014) e POCI-01-0145-FEDER-007633. Agradece-se também o apoio da bolsa SFRH/BPD/97082/2013.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Yamin, L.E., Philips, C.A., Reyes, J.C. and Ruiz, D.M. (2004) Seismic behavior and rehabilitation alternatives for adobe and rammed earth buildings. *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada.
- [2] Bui, Q.B. and Morel, J.C. (2009) Assessing the anisotropy of rammed earth. *Construction and Building Materials*, **23**(9), 3005-3011.
- [3] Miccoli, L., Müller, U. and Fontana, P. (2014) Mechanical behavior of earthen materials: a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials* **61**, 327-339.
- [4] Wang, Y., Wang, M., Liu, K., Pan, W. and Yang, X. (2016) Shaking table tests on seismic retrofitting of rammed earth structures. *Bulletin of Earthquake Engineering* **15**(3), 1037-1055.
- [5] Correia, M.R., Varum, H. and Lourenço, P.B. (2015) Common damages and recommendations for the seismic retrofitting of vernacular dwellings, *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture*. Taylor & Francis Group, London, UK.
- [6] Silva, R.A. (2013) Repair of earth constructions by means of grout injection. *PhD Thesis*, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- [7] Figueiredo, A., Varum, H., Costa, A., Silveira, D. and Oliveira, C. (2013) Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall. *Materials and Structures* **46**(1), 203-219.
- [8] De Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Ghiassi, B., Larrinaga, P., Lourenço, P.B., Oliveira, DV, Paolacci, F. and Papanicolaou, C.G. (2014) Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry. *Materials and Structures* **47**(12), 2021-2037.
- [9] Mordanova, A., De Santis, S. and De Felice, G. (2016) State-of-the-art review of out-of-plane strengthening of masonry walls with mortar-based composites. *Proceedings of the 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC)*. Leuven, Belgium.
- [10] Correia, M. (2007) *Rammed Earth in Alentejo*. Argumentum, Lisbon, Portugal.
- [11] DIANA (2017) *Displacement method ANALyser*. Release 10.1, Netherlands.
- [12] Miccoli, L., Oliveira, D.V., Silva, R.A., Müller, U. and Schueremans, L. (2015) Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling. *Materials and Structures* **48**(10), 3443-3456.
- [13] Silva, R.A., Oliveira, D.V., Schueremans, L., Miranda, T. and Machado, J. (2016) Effectiveness of the repair of unstabilised rammed earth with injection of mud grouts. *Construction and Building Materials* **127**, 861-871.
- [14] Silva, R.A., Oliveira, D.V., Schueremans, L., Lourenço, P.B. and Miranda, T. (2014) Modelling the structural behaviour of rammed earth components. *Proceedings of the 12th International Conference on Computational Structures Technology*. Naples, Italy.
- [15] Oliveira, D.V., Silva, R.A., Barroso, C. and Lourenço, P.B. (2017) Characterization of a compatible low cost strengthening solution based on the TRM technique for rammed earth. *Key Engineering Materials* **747**, 150-157.
- [16] Allahvirdizadeh, R. and Gholipour, Y. (2017) Reliability evaluation of predicted structural performances using nonlinear static analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering* **15**(5), 2129-2148.
- [17] Allahvirdizadeh, R. (2017) Modelling of the seismic behaviour of TRM-strengthened rammed earth walls. *MSc Thesis*, University of Minho, Guimarães, Portugal.