

A CONSTRUÇÃO EM TAIPA E OS SISMOS

D.V. OLIVEIRA

Prof. Auxiliar
ISISE, Universidade do Minho
Guimarães – Portugal

R.A. SILVA

Aluno de doutoramento
ISISE, Universidade do Minho
Guimarães – Portugal

L. SCHUEREMANS

Prof. Associado
Katholieke Universiteit Leuven
Heverlee – Bélgica

P.B. LOURENÇO

Prof. Catedrático
ISISE, Universidade do Minho
Guimarães – Portugal

SUMÁRIO

A reconhecida sustentabilidade da construção em taipa e o vasto património arquitectónico edificado segundo este processo construtivo são motivos, por si só suficientes, para justificar o crescente interesse pela construção taipa por parte das autoridades, investigadores, projectistas e empresas. Todavia, este tipo de construção apresenta tipicamente um deficiente desempenho sísmico, o que torna desaconselhada a adopção da taipa como solução estrutural em zonas de perigosidade sísmica não negligenciável. Neste contexto, o presente artigo descreve a construção em taipa bem como a sua importância cultural. Seguidamente, caracteriza-se o desempenho sísmico deste tipo de construções, com especial ênfase nos modos de rotura. Por fim, discutem-se possíveis modificações do processo construtivo para melhorar o desempenho sísmico das construções em taipa novas, bem como as técnicas de reforço sísmico e reparação para construções existentes.

1. INTRODUÇÃO

A terra é certamente um dos materiais de construção mais antigos, facto comprovado por evidências arqueológicas que sugerem a existência de cidades milenares totalmente construídas em terra como Jericó (Israel), Çatal Huyuk (Turquia), Harappa (Paquistão), Akhet-Aton (Egipto), Chan-Chan (Peru), Babilónia (actual Iraque) e Duheros (Espanha) [1]. As técnicas construtivas de construção em terra mais comuns são, actualmente, o adobe e a taipa [2-3]. A construção em adobe consiste na execução de uma alvenaria de tijolos ou blocos de barro moldados num molde de madeira e secos ao sol (adobes), cuja argamassa de assentamento é tipicamente à base de terra. Por seu lado, a taipa consiste na construção de paredes resistentes através da execução *in situ* de blocos de taipa constituídos por camadas delgadas de terra compactadas entre taipais (nome dado à cofragem) [4].

A taipa foi utilizada como solução construtiva durante séculos, resultando em diversas construções classificadas como património histórico. A Grande Muralha da China é actualmente classificada pela UNESCO como património mundial e constitui um bom exemplo do património edificado em taipa, em que várias secções foram erguidas segundo esta técnica construtiva, ver Figura 1.

Com o desenvolvimento e expansão dos materiais de construção modernos, tais como o betão e o aço, a construção em terra, e portanto a taipa, caiu em desuso e ficou (erradamente) associada a uma imagem de pobreza, típica de países em vias de desenvolvimento ou de situações extremas de crise habitacional e económica (como foi o caso da Alemanha após a Segunda Guerra Mundial). De certa forma, estes factos fizeram com que a taipa fosse esquecida e marginalizada pelos actuais regulamentos construtivos. No entanto, o recente aumento das preocupações ecológicas e ambientais no sector da construção, assim como a procura de materiais de construção sustentáveis levaram a uma mudança de mentalidades, que voltaram a dirigir a atenções sobre a terra como material de construção.



Figura 1 – Secção em taipa da Grande Muralha da China na província de Ningxia [5].

Tipicamente, as paredes em taipa são espessas (0.50 a 0.90 m) [6] e as respectivas edificações são geralmente baixas (um a dois pisos), pelo que os esforços de compressão não constituem um problema, apesar da taipa ser um material de baixa resistência mecânica. No que diz respeito à acção sísmica, o comportamento das construções em terra é, em geral, deficiente e resulta da contribuição de vários factores, nomeadamente baixas propriedades mecânicas dos materiais, elevado peso próprio, irregularidade em planta e altura, distribuição inadequada das paredes em planta, existência de paredes com desvios de verticalidade, problemas de humidade e infiltrações, ligação deficiente entre paredes, perda de material (exemplo: por erosão basal), modificações/reparações com materiais incompatíveis, pavimentos muito flexíveis (i.e. ausência de um diafragma rígido), apoios e ligações dos pavimentos e da cobertura com as paredes inadequados, aberturas demasiado largas e mal distribuídas, vãos muito extensos e soluções estruturais de cobertura desadequadas [1].

Do exposto, resulta que as construções em terra são geralmente caracterizadas por uma elevada vulnerabilidade sísmica. Por outro lado, grande parte das construções em terra encontra-se em zonas de moderada a elevada perigosidade sísmica [7], o que torna o seu risco sísmico ainda mais elevado. Isto constitui um enorme entrave à adopção da construção em terra como uma solução estrutural actual. De forma a contrariar esta limitação, têm sido realizados estudos recentes que visam a caracterização da vulnerabilidade sísmica das construções em terra, bem como o desenvolvimento de soluções construtivas e de reforço que objectivamente diminuam a vulnerabilidade de construções novas e existentes, respectivamente. Neste contexto, o presente artigo apresenta uma breve revisão do conhecimento sobre o comportamento sísmico de construções em taipa, bem como as técnicas construtivas e de reforço usadas para diminuir a vulnerabilidade destas construções.

2. A CONSTRUÇÃO EM TAIPA

A construção em taipa é relativamente recente dentro do universo da construção em terra [8] e a sua origem não é consensual, mas de acordo com Houben e Guillaud [3], remonta ao período dos três reinos na China (221-581 DC). Por seu lado, Jaquin *et al.* [5] argumentam que esta técnica construtiva terá sido desenvolvida de forma independente na China e na região Mediterrânea, tendo sido iniciada na China, durante o período Muomhong (2300-1810 AC) e mais tarde na região Mediterrânea através das colónias Fenícias (800 AC). Na Península Ibérica, a construção em taipa está documentada em textos árabes do séc. VIII, em construções defensivas de acampamentos militares e alcáçovas como a de Badajoz. Mas a construção em taipa ter-se-á iniciado anteriormente a esta data, uma vez que são conhecidas documentos mais antigos, sem no entanto se saber exactamente se se referem a paredes em terra dentro de cofragem ou paredes em terra compactada [8]. A partir do séc. XVI, os colonos Portugueses e Espanhóis introduziram a taipa na América do Sul, e mais tarde (séc. XVIII e XIX) seria introduzida na América do Norte e na Oceânia através da colonização Europeia [5]. A partir do séc. XVIII, a construção em taipa na Europa foi marcada e impulsionada pela publicação e posterior tradução dos manuais de construção de François Cointeraux [9], responsáveis por uma revolução do panorama arquitectónico Francês [8]. Na Alemanha, a taipa foi intensivamente usada para resolver o problema habitacional e económico gerado após a Segunda Guerra Mundial [8].

Na Península Ibérica podem ser encontradas várias tipologias de paredes em taipa, cujas diferenças residem sobretudo nos materiais incorporados, dimensão e geometria dos blocos, tipo de junta, características dos taipais adoptados e combinação da taipa com outros materiais. Quanto ao tipo de material e método de compactação, uma parede de taipa pode ser classificada de taipa real, taipa calicastrada ou taipa simples [10]. A taipa real está geralmente associada à construção de paredes de fortificações, o que muitas vezes a confunde com taipa militar. Este tipo de taipa aparece normalmente sob duas formas. Numa primeira, camadas delgadas (2-5 cm) de terra e pasta de cal são compactadas alternadamente, e numa segunda, uma camada de pasta de cal (8-12 cm) é executada após a construção do bloco (60-80 cm) de forma a envolvê-lo [11]. Tipicamente, a taipa real é caracterizada por incorporar uma percentagem muito elevada de cal, o que a torna num material bastante resistente e semelhante a um betão, daí muitas vezes ser também designada por betão Árabe [10]. Normalmente, estas paredes não necessitam de um revestimento de protecção, já que a cal incorporada lhes confere bastante resistência à água e à erosão. Grande parte das fortificações construídas em taipa real encontra-se em Espanha e refere-se como exemplo as paredes da muralha da Alhambra em Granada, que são património Mundial classificado pela UNESCO, ver Figura 2.



Figura 2 – Muralhas em taipa real da muralha da Alhambra em Granada (UNESCO).

Por sua vez, a taipa calicastrada surgiu como uma solução contra o dano causado pela erosão, e consiste em aplicar nas faces internas do taipal uma camada de argamassa de terra enriquecida com bastante cal. Posteriormente, o bloco de taipa é executado através da compactação de terra que pode ou não ser estabilizada com cal. Esta camada pode constituir o revestimento definitivo da taipa e assemelha-se a um reboco de cal, que funciona como uma camada de protecção da taipa contra a chuva e erosão, ver Figura 3. A taipa dita simples ou normal é executada com um só tipo de terra que pode ou não ser estabilizada. Caso a taipa seja estabilizada, a terra poderá ser alvo de adição de pequenas quantidades de cal, palha, materiais cerâmicos ou de outros estabilizantes [10].



Figura 3 – Acabamento de uma parede em taipa calicastrada [10].

As paredes de taipa também podem ser caracterizadas quanto à existência de outros materiais nas juntas horizontais entre blocos. Até ao séc. XIII os blocos de taipa eram construídos continuamente, passando posteriormente a incorporar materiais como pedra, tijolos ou argamassa de cal ou gesso, a servirem de junta horizontal entre os blocos de taipa. Este aspecto construtivo constitui uma solução para evitar a propagação de fendas resultantes da retracção diferencial entre os blocos [12] e para promover uma melhor ligação entre blocos [10]. A taipa de “*lunetos*”, ver Figura 4, constitui um exemplo deste último caso, em que se aplicam pedras misturadas com argamassa de cal em forma de crescente para reforçar as juntas entre blocos.

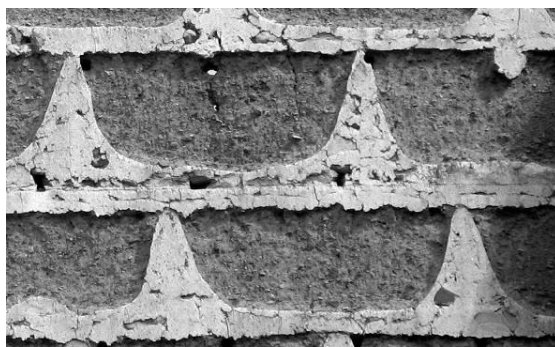


Figura 4 – Taipa de “*lunetos*” em Villafeliche, Espanha [10].

O taipal tem também uma grande influência na definição das características finais das paredes de taipa, bem como no seu processo construtivo. Ao taipal exige-se que suporte as cargas dinâmicas aplicadas e que ao mesmo tempo se mantenha indeformável, para assim permitir uma boa compactação da terra [2]. Nos dias de hoje, as cofragens metálicas utilizadas para a execução de elementos de betão armado são utilizadas como tapais, permitindo construir paredes de uma só vez. No entanto, esta forma de construir tende a apresentar problemas de retracção que resultam em fendilhação não controlada da parede, que são muitas vezes evitados através do recurso a estabilização com cimento ou cal. Por outro lado, a construção tradicional de uma parede em taipa é feita por blocos, através da movimentação sucessiva de um taipal de madeira. Ao proceder desta forma, são criadas juntas que permitem a retracção dos blocos de taipa sem que ocorra fendilhação nestes, caso a retracção não seja muito elevada.

Tal como as dimensões dos blocos de taipa, também os respectivos taipais tradicionais tendem a variar em dimensões e em configuração. Como tal, podem ser identificadas paredes em taipa, cujo comprimento dos respectivos taipais terão tido desde 1.75 m a 3.0 m, enquanto a sua altura terá variado entre 0.75 m e 0.95 m [10]. A dimensão do taipal é condicionada não só pelo nível de retracção que possa ocorrer nos blocos, mas também pelo rendimento da mão-de-obra, pelo que estes devem ser leves e o seu sistema de montagem deverá ser simples. Na Figura 5 é apresentado um exemplo de um possível taipal tradicional com os seus diversos componentes. Refira-se que apesar de os componentes e configuração dos taipais tradicionais poderem ser diferentes entre si, o seu princípio de utilização e funcionamento é semelhante.

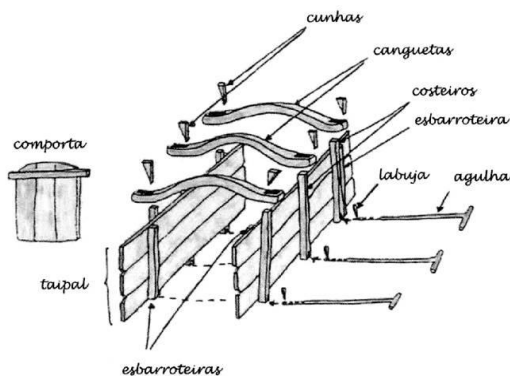


Figura 5 – Os vários componentes de um taipal tradicional [13].

As estruturas em taipa são muitas vezes consideradas como sendo monolíticas [2, 3], porém são geralmente constituídas por blocos descontraídos de grandes dimensões, ao estilo de uma alvenaria. O facto de os blocos serem compactados in situ confere a estas paredes um comportamento monolítico superior ao conseguido por outras técnicas de construção em terra, tal como a construção em adobe. Tradicionalmente, a compactação da taipa era feita manualmente com recurso um pilão ou maço. Actualmente, a compactação é executada com recurso a compactadores pneumáticos ou vibratórios, o que permite uma redução considerável da mão-de-obra requerida por bloco e do tempo necessário à sua execução [2].

Apesar da terra não ser considerada um material de construção normalizado na esmagadora maioria dos países desenvolvidos, existem diversas vantagens em construir em taipa quando se compara com a construção com materiais ditos modernos (betão, aço, alvenaria de tijolo, etc.), como se indica de seguida [2]:

- Capacidade de estabilização e de equilíbrio do ambiente interior através da absorção ou libertação rápida da humidade, tornando o ambiente mais saudável;
- Boa inércia térmica das paredes em taipa, o que lhes permite armazenar eficazmente calor através de ganhos solares, reduzindo as necessidades energéticas de aquecimento. A elevada massa destas paredes também lhes confere bom isolamento acústico;
- Boa resistência ao fogo, uma vez que a taipa é um material incombustível;
- Elevada sustentabilidade, uma vez que a terra local pode, em geral, ser utilizada na construção sem ser necessário depender energia com o seu transporte ou processamento. Para além disto, a terra da taipa é reutilizável ou pode ser devolvida à natureza sem necessidade de tratamento prévio;
- Processo construtivo simples que não requer mão-de-obra especializada, podendo ser executado por qualquer pessoa com recurso a ferramentas simples.

Contudo, para além da falta de regulamentação adequada, existem desvantagens associadas à construção em taipa, nomeadamente [2]:

- Propriedades mecânicas baixas (principalmente a resistência à tracção) e comportamento frágil, o que confere a estas construções um mau comportamento a acções perpendiculares ao seu plano e um fraco desempenho sísmico, que geralmente limita a altura dos edifícios a um ou dois pisos;
- Retracção devido à perda de água por secagem, resultando em fendilhação e consequente diminuição da já baixa resistência do material;
- Resistência à água praticamente inexistente, o que requer muitas vezes a estabilização por adição de ligantes (cal, cimento ou betume) ou outras formas de protecção (reboco de desgaste, prolongamento do beiral, etc.). Note-se ainda que existe uma forte dependência das propriedades mecânicas da taipa do seu teor em água;
- Técnica construtiva exigente em termos de mão-de-obra, o que pode ser um impedimento económico nos países desenvolvidos onde a mão-de-obra é um recurso caro;
- Necessidade de manutenção mais frequente que a generalidade das construções modernas, sem a qual a construção degrada-se rapidamente.

Apesar de algumas das desvantagens da terra como material de construção, a realidade é que este material é muitas vezes a única opção economicamente viável para construir nos países em desenvolvimento. Por outro lado, nos países desenvolvidos este material tem-se tornado cada vez mais popular, devido à necessidade de se adoptarem materiais que promovam a redução da emissão de gases com efeito de estufa no sector da construção. De facto, nos últimos anos tem-se assistido a movimentos nacionais e internacionais que promovem a reabilitação e preservação das construções históricas de terra (por exemplo: CRATerre, Centro da Terra, associação Matriz, etc.), bem como movimentos no sentido de regulamentar a utilização da terra como material de construção [14, 15].

3. DESEMPENHO SÍSMICO DAS CONSTRUÇÕES EM TAIPA

A relação entre as construções em terra e os sismos foi desde sempre complicada, uma vez que estas construções apresentam geralmente uma vulnerabilidade sísmica bastante elevada. Não obstante, grande parte deste tipo de construções encontra-se edificada em zonas de moderada a elevada perigosidade sísmica, ver Figura 6. Como tal, é frequente a ocorrência de sismos com efeitos catastróficos nas construções em terra, os quais implicam

elevadas perdas económicas e humanas. Refira-se como exemplo o sismo de 26 de Dezembro de 2003 que destruiu a cidadela de Bam no Irão (ver Figura 7) e que resultou em cerca de 30000 mortos [12]. Esta cidadela foi construída há cerca de 2000 anos e as técnicas construtivas predominantes são o adobe e uma técnica de terra empilhada conhecida por “*chineh*” [12, 17]. Pela grande dimensão, esta cidadela era considerada como o maior complexo construído em terra até à data do sismo de 2003. Actualmente, a cidadela de Bam está classificada pela UNESCO como património mundial, no entanto a destruição causada pelo sismo de 2003 colocou-a também na lista do património mundial em risco.

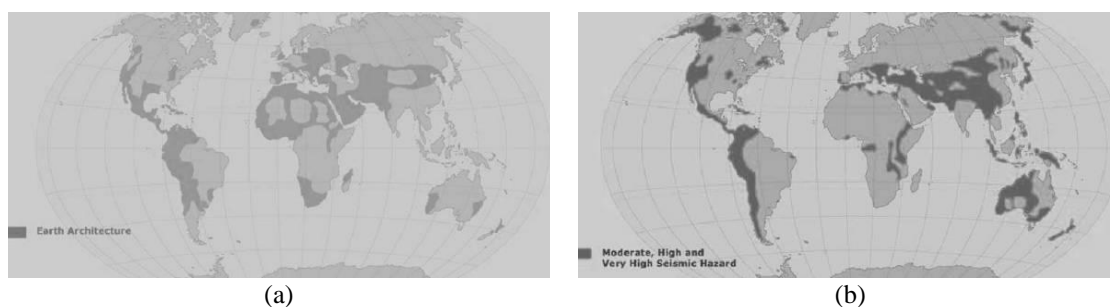


Figura 6 – Distribuição geográfica mundial da construção em terra (a) e da perigosidade sísmica (b) [16].

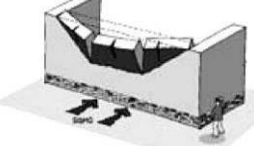
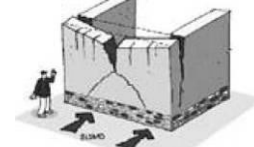
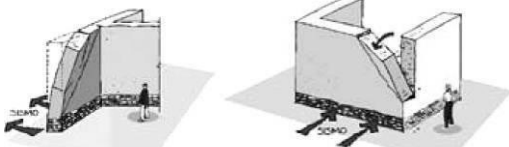
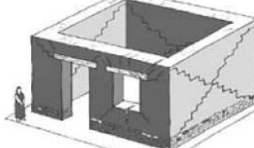
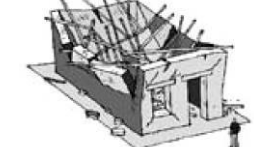

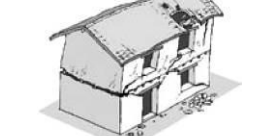


Figura 7 – A cidadela de Bam antes e após o sismo de 26 Dezembro de 2003.

Actualmente, a maioria dos estudos de vulnerabilidade sísmica sobre construções em terra encontra-se essencialmente centrada nas construções em adobe, não existindo praticamente trabalhos desenvolvidos sobre a vulnerabilidade sísmica de construções em taipa. Porém, existem algumas regiões com perigosidade sísmica relevante onde abunda a construção em taipa, como é o caso do Sul de Portugal. Muitas destas construções são classificadas como património, como é o caso das várias fortificações centenárias de origem islâmica (por exemplo: castelo de Paderne, castelo de Silves, muralha de Alcácer do Sal, etc.) [18], as quais importa preservar, o que implica um conhecimento da sua vulnerabilidade sísmica. Mas não é apenas o património classificado destas regiões que deve ser motivo de preocupação, pois existem igualmente inúmeras habitações em taipa e uma continuidade da sua cultura construtiva, que justificam a avaliação da sua vulnerabilidade sísmica.

Apesar das várias diferenças entre as diversas técnicas de construção em terra, os factores que contribuem para a sua vulnerabilidade são geralmente comuns. Muitos destes factores são também comuns a construções executadas com materiais de construção modernos, enquanto outros são específicos das construções em terra. A maioria dos factores específicos das construções em terra encontra-se associada à reduzida resistência à tracção e elevada fragilidade dos materiais, que torna estas construções pouco propensas a suportarem acções perpendiculares ao plano das paredes. Este é precisamente um tipo de carregamento que resulta da acção sísmica, através da componente horizontal das forças de inércia e da interacção das paredes com paredes de contraventamento, pavimentos e cobertura, ver Tabela 1.

Tabela 1 - Modos de rotura e dano associados à acção sísmica em construções em terra [1].

Modo de rotura/dano	Esquema
<p>Rotura por flexão para fora do plano da parede. Fendilhação horizontal na base ou numa altura intermédia da parede. Adicionalmente, formam-se fendas verticais intermédias.</p>	
<p>Rotura por flexão para fora do plano da parede. Formação de uma fenda vertical a meio da parede. Posterior formação do mecanismo de colapso por fendilhação diagonal e desprendimento da parede por fendilhação da parte superior dos cunhais</p>	
<p>Rotura por flexão para fora do plano de paredes isoladas ou de paredes contraventadas com ligação deficiente às paredes de contraventamento e com ausência de contrafortes.</p>	
<p>Rotura por corte no plano da parede, associada a impulsos horizontais elevados. Fendilhação diagonal através dos blocos e juntas, amplificada por pavimentos e coberturas pesadas e pelas aberturas.</p>	
<p>Colapso da cobertura para o interior da construção devido a um suporte deficiente na parede. O colapso é geralmente devido à rotura da zona superior das paredes.</p>	
<p>Colapso generalizado da cobertura devido a um suporte deficiente na parede e à adopção de uma solução estrutural desadequada para a cobertura.</p>	
<p>Rotura por má ligação das paredes do segundo piso com as do primeiro. Formação de uma fenda horizontal generalizada por desprendimento das paredes, resultando na instabilidade generalizada do segundo piso.</p>	

Adicionalmente, existem vários aspectos construtivos que agravam o comportamento das paredes para fora do seu plano. Tais aspectos incluem excentricidades nas cargas verticais transmitidas pelos pavimentos, impulsos horizontais aplicados pela cobertura, presença e distribuição das paredes de contraventamento e ligações entre paredes pouco eficazes ou inexistentes. Assim, as paredes de contraventamento devem ser capazes de absorver os esforços de corte gerados pelo sismo. Contudo, a sua resistência ao corte pode ser significativamente reduzida pela presença de aberturas nestas. Por outro lado, ligações mais eficientes proporcionam um comportamento mais monolítico das construções, permitindo uma melhor dissipação da energia transmitida pelo sismo. Desta forma, a construção tem capacidade de resistir a um sismo de magnitude moderada sem colapsar, apesar da resistência dos materiais em terra ser baixa. Como tal, a resistência dos materiais é geralmente ultrapassada, originando dano, mas a ductilidade conferida pelo comportamento monolítico impede o seu colapso.

4. TÉCNICAS DE REFORÇO E REPARAÇÃO

A elevada vulnerabilidade sísmica é uma realidade das construções em terra, e as construções em taipa não são exceção. De forma a melhorar o desempenho sísmico das construções em taipa, várias modificações e melhorias têm vindo a ser sugeridas ao nível do processo construtivo, a seguir discutidas. A forma mais simples de melhorar o desempenho sísmico destas construções consiste na construção de paredes com maior espessura, mas sem aumentar à sua altura. Contudo, proceder desta forma aumenta os custos com a mão-de-obra, o que pode tornar esta solução inviável do ponto de vista económico [19]. Em alternativa, pode-se recorrer à estabilização da terra, o que conduz a uma melhoria significativa das propriedades mecânicas da taipa, nomeadamente da resistência à tracção [2]. Isto é muitas vezes conseguido através da correcção da distribuição de partículas da terra ou através da adição de ligantes, tais como cimento e cal. Porém, o efeito destes ligantes é prejudicial para outras propriedades da taipa, pois aumentam a fragilidade do material e limitam a sua capacidade de controlo da humidade interior, o que proporciona um nível de conforto inferior ao da taipa não estabilizada. Por outro lado, a estabilização também pode ser conseguida através da adição de palha, o que permite controlar a microfendilhação causada pela retração e eventualmente aumentar a resistência da taipa [20].

Uma forma mais elaborada de dotar uma parede de taipa de maior ductilidade e resistência à tracção consiste na introdução de elementos que funcionem como reforço à tracção. Os materiais que constituem estes elementos devem ser compatíveis com a terra, e como tal são tipicamente utilizadas canas de bambo ou madeira. As canas são colocadas verticalmente a meio da parede com um determinado espaçamento, e as suas extremidades são fixas à fundação e à viga de bordadura [19], como se ilustra na Figura 8.



Figura 8 – Reforço de uma parede em taipa através da introdução de canas de bambo [19].

Como já foi discutido, um dos pontos fracos das construções em terra encontra-se na zona de ligação entre paredes ortogonais. O reforço destas zonas pode ser conseguido através da inclusão de pilastras de betão armado ou pedra, que podem apresentar reentrâncias para promoverem uma ligação ainda mais eficaz [6], ver Figura 9.

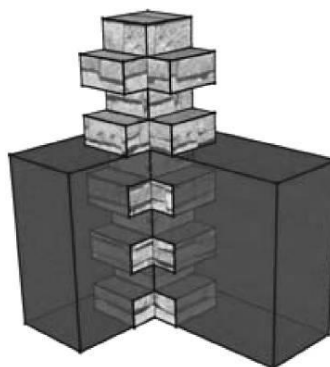


Figura 9 – Representação esquemática de um cunhal reforçado com uma pilastra de pedra com reentrâncias [6].

A resistência ao corte das paredes em taipa é outra propriedade que pode ser melhorada de forma a aumentar-se o desempenho sísmico destas construções. As juntas entre blocos são geralmente zonas frágeis, pelo que é corrente promover-se o atrito nas juntas horizontais através da inclusão de materiais tais como pedras, telhas e tijolos cozidos. Também as juntas verticais são muitas vezes alvo de reforço, o qual pode ser concretizado através da inclusão de elementos de bambu ou madeira que ligam dois blocos adjacentes [1], ver Figura 10.

A limitação da altura da construção a apenas um piso é outra forma de reduzir a vulnerabilidade sísmica destas construções. Para além disto, no coroamento das paredes deverá ser executada uma viga de bordadura para apoio da cobertura, a qual deve ser bem ligada às paredes, de forma a cinta-las convenientemente.

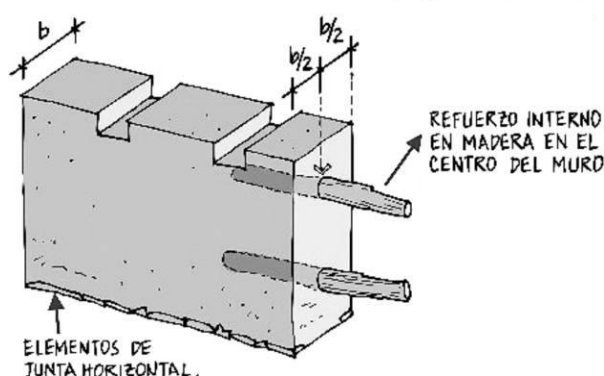


Figura 10 – Reforço das juntas de paredes em taipa [1].

No que diz respeito ao reforço de construções de taipa já existentes, a forma mais comum e antiga consiste na execução de contrafortes (geralmente em alvenaria de pedra) que melhoram o comportamento das paredes para fora do seu plano, ver Figura 11. Contudo, a maioria das técnicas de reforço de construções existentes baseia-se no melhoramento da resistência à tracção das paredes e do confinamento da construção, os quais resultam numa melhoria significativa da ductilidade. Isto pode ser conseguido através de elementos constituídos por materiais com boas propriedades mecânicas de tracção, os quais são fixados na superfície das paredes e posteriormente rebocados. Devido à boa compatibilidade da madeira com a terra, devem ser preferencialmente utilizados elementos de madeira para este fim [1]. Contudo, podem também ser utilizadas malhas metálicas ou geomalhas, ver Figura 12. O confinamento de uma construção em taipa também pode ser melhorado pelo reforço dos cunhais com pregagens e pela aplicação de tirantes para ancoragem de paredes opostas.



Figura 11 – Contraforte de uma construção em taipa de Vila Alva, no Alentejo [21].

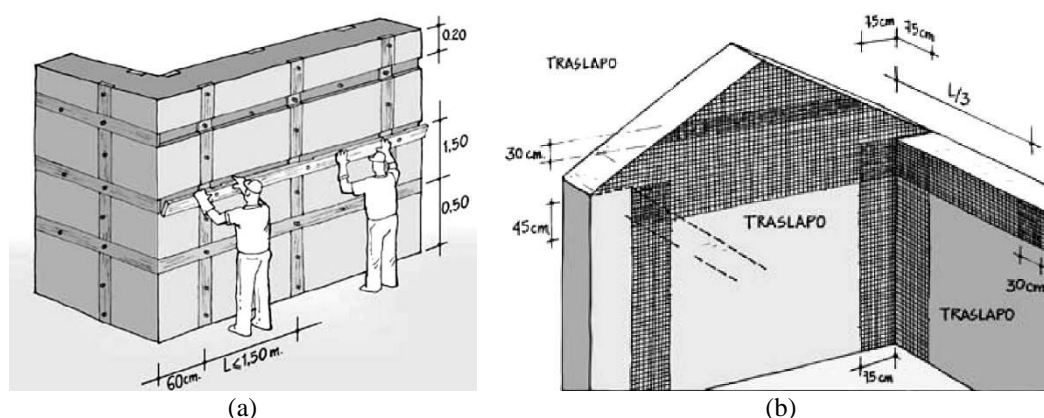


Figura 12 – Reforço de paredes em taipa existentes: (a) fixação superficial de elementos de madeira [1]; (b) malhas metálicas ou geomalhas [22].

A má condição das paredes de uma construção em taipa é outro factor que contribui para um mau desempenho sísmico. A presença de dano causado por sismos anteriores ou por outros factores (tais como erosão provocada pela chuva ou vento, assentamentos diferenciais da fundação, infiltração de água, subida de água por capilaridade, má concepção estrutural, acção biológica, etc.) é de todo indesejável. Este dano traduz-se principalmente em fendas e perda de material das paredes, o que reduz a sua capacidade resistente. Para além disto, a presença de fendas verticais de grande extensão prejudica também o efeito monolítico que é pretendido nestas construções, uma vez que os segmentos de parede separados pelas fendas comportam-se de forma independente. Por outro lado, o aumento do teor de água, causado por infiltrações ou por capilaridade, reduz drasticamente as propriedades mecânicas da taipa, sobretudo se esta não foi estabilizada. Deste modo, a manutenção frequente destas construções permite evitar estes problemas, e portanto constitui um aspecto essencial no que diz respeito ao desempenho sísmico [3].

A erosão basal é um outro fenómeno comum em construções de taipa desprotegidas do impacto da chuva, como é o caso das muralhas de fortificações. Este fenómeno resulta numa diminuição da secção resistente das paredes, e portanto numa redução da capacidade de resistir a acções fora do seu plano. Tipicamente, o restauro do material perdido é feito através da remoção do material solto, à qual se segue a compactação *in situ* do material em falta. Contudo, a aplicação desta solução é complexa, muito devido à compactação vertical das últimas camadas, a qual é dificultada pela falta de espaço para manobrar o pilão. Conjuntamente com a retracção da terra compactada, este problema torna difícil garantir uma ligação eficiente entre o material antigo e o material de restauro. Uma solução interessante para resolver o problema da erosão basal foi adoptada no restauro do Castelo de Paderne, a qual consistiu na projecção de terra nas zonas erodidas, ver Figura 13.



Figura 13 – Técnicas de restauro para erosão basal [23]: (a) técnica tradicional; (b) terra projectada.

A reparação de fendas existentes em paredes de taipa é essencial para restabelecer o seu desempenho sísmico original. O simples preenchimento destas, com uma argamassa de terra e agregados de grande dimensão, é o procedimento geralmente adoptado para a sua reparação. Contudo, esta solução não permite uma ligação eficiente entre os segmentos da parede, o que a torna inútil do ponto de vista estrutural. Uma forma mais eficaz de promover esta ligação consiste em “coser” a fenda com a introdução de reforços pontuais distribuídos ao longo desta. Para tal, são escavadas cavidades que posteriormente são preenchidas com material compatível, por exemplo argamassa de terra, adobes ou telhas, ver Figura 14.

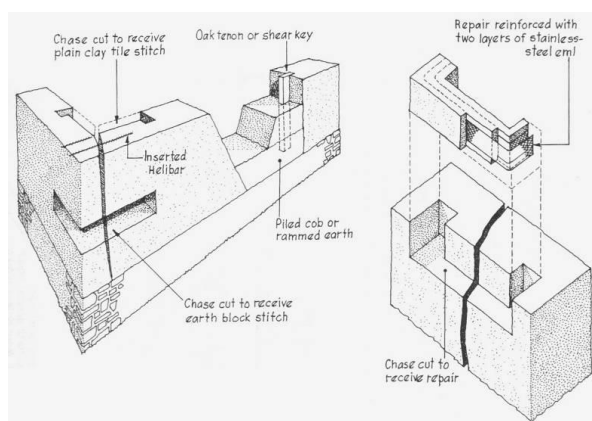


Figura 14 – Reparação de fendas através de reforços pontuais [24].

A injeção de caldas constitui uma técnica para reparar fendas que permite promover uma ligação mais eficiente que a ligação promovida pela técnica mencionada anteriormente. Para além disto, a injeção é uma técnica menos intrusiva e a sua execução é claramente mais simples. Porém, as caldas de injeção utilizadas correntemente na consolidação de alvenarias históricas não são adequadas para construções em terra, pois apresentam uma composição diferente dos materiais destas e são geralmente muito mais resistentes e rígidas, ou seja, não apresentam compatibilidade físico-mecânica com os materiais de terra. A incompatibilidade entre materiais é algo que deve ser evitado no restauro de uma construção histórica, pois poderá resultar numa intervenção ineficaz e eventualmente pode conduzir a problemas de durabilidade [24]. Neste sentido, a aplicação desta técnica a construções em terra requer o desenvolvimento de caldas de injeção específicas. Este tem sido o objectivo de investigações recentes [25, 26], onde a terra é o principal componente destas caldas (daí serem designadas de caldas de terra), o que à partida as torna compatíveis com os materiais de terra.

As caldas de terra estudadas por Vargas *et al.* [25] consistiram de terra que foi primeiramente peneirada para eliminarem-se as partículas de maior dimensão, e à qual foi posteriormente adicionada água para se obter um material fluido. A retracção exagerada das caldas de terra foi o principal problema encontrado, pelo que adicionalmente foi investigado o efeito da adição de ligantes (tais como cal, cimento e gesso) na aderência conseguida pela calda. Contudo, as caldas com adição de ligantes apresentaram em geral pior desempenho do que aquelas sem ligantes, e adicionalmente a injectabilidade foi prejudicada. Por outro lado, Silva *et al.* [26] estudaram caldas de terra “artificiais”, as quais consistiram na mistura de diferentes proporções de pó de caulino (em representação da fracção de argila) e pó de calcário (em representação da fracção de silte). Este estudo permitiu avaliar a influência da fracção de argila nas propriedades reológicas da calda durante o seu estado fresco. Ficou demonstrado que o comportamento coloidal da argila limita em muito a fluidez das caldas de terra e depende do tipo de argila e suas características, bem como do pH e força iónica da suspensão. A percentagem de argila presente numa calda de terra deve ser limitada a um máximo, sem contudo comprometer as propriedades mecânicas desta quando endurecida. Mesmo assim, verificou-se ser necessário recorrer-se à adição de um desfloculante/dispersante de argilas para se conseguir reduzir ainda mais teor em água da calda sem comprometer a sua fluidez e, assim, reduzir a retracção resultante da secagem. Todavia, o desenvolvimento de caldas de terra ainda se encontra numa fase inicial, pelo que devem surgir novos resultados num futuro próximo.

5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Nos últimos anos tem-se assistido a um crescente interesse na terra como material de construção, cuja causa é em grande parte atribuída à sustentabilidade deste material e ao facto de actualmente existir um imenso património edificado em terra. Uma das várias técnicas de construção em terra é a construção em taipa que, conjuntamente com a construção em adobe, constitui uma das técnicas mais comuns. Contudo, constata-se que o desempenho sísmico destas construções é muitas vezes deficiente, quer por causas ligadas a aspectos construtivos, comuns a outras tipologias construtivas, quer pelo facto dos materiais de terra apresentarem propriedades mecânicas muito baixas e um comportamento frágil. Consequentemente, a vulnerabilidade das paredes em taipa a acções aplicadas fora do seu plano (como é o caso da acção sísmica) é muito elevada. Por estas razões, existe actualmente alguma relutância em utilizar-se a taipa como material estrutural em zonas de perigosidade sísmica não negligenciável. Adicionalmente, a regulamentação construtiva para a construção em taipa é escassa e são escassos os países que também a incluem na sua regulamentação sísmica, como é o caso da Nova Zelândia [27].

Tal como discutido, existem várias possibilidades a introduzir no processo construtivo da taipa para aumentar o seu desempenho sísmico. Relativamente às construções existentes, existem também algumas técnicas de reabilitação que permitem reduzir a sua vulnerabilidade sísmica. Contudo, a boa condição dos elementos estruturais das construções de taipa, proporcionada por uma manutenção adequada, é essencial para o seu bom desempenho sísmico.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Comissão Europeia através do projecto FP7-ENV-2009-1-244123-NIKER. O segundo autor agradece à FCT o financiamento concedido através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/39145/2007.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Lacouture, L., Bernal, C., Ortiz, J. and Valencia, D. (2007) Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes*, **20**(2), 286-303.
- [2] Minke, G. (2006) *Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture*. Birkhäuser-Publishers for Architecture, Basel-Berlin-Boston.
- [3] Houben, H and Guillaud, H (1994) *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. CRATerre – EAG, Intermediate Technology Publication, London, UK.
- [4] Rodrigues, P.F. (2007) Construções em Terra Crua, Tecnologias, Potencialidades e Patologias. *Revista MUSA (Museu de Arqueologia e Etnografia do Distrito de Setúbal)*, **1**(2),149-155.
- [5] Jaquin, P.A., Augarde, C.E. and Gerrard, C.M. (2008) A chronological description of the spatial development of rammed earth techniques. *International Journal of Architectural Heritage*, **2**, 377-400.
- [6] Gomes, I (2008) Construção Sismo-Resistente em Terra Crua. *Tese de Mestrado*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [7] Blondet, M., Garcia, G. and Brzev, S. (2003) *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial*. *Earthquake Engineering Research Institute*, Oakland, California.
- [8] Fernandes, M. (2008) A Taipa no Mundo. Seminário de Construção e Recuperação de Edifícios em Taipa, Almodôvar, Portugal.
- [9] Cointeraux, F. (1791) *Traite dès Constructions Rurales et e Leur Disposition*. Paris, França.
- [10] Jaquin, P.A. (2008) Analysis of Historic Rammed Earth Construction. *PhD Thesis*, Dept. of Civil Engineering, Durham University – School of Engineering, Durham, UK.
- [11] Sebastián, E. e Cultrone, G. (2010) Technology of Rammed-Earth Constructions (“Tapial”) in Andalusia (Spain): Their Restoration and Conservation. *In Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*, Maria Bostenaru Dan, Richard Prikryl, Ákos Török (eds.), Springer, Berlim.
- [12] Langenbach, R. (2004) Soil Dynamics and the Earthquake Destruction of the Arg-e Bam. *Iranian Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Special Issue on 26th December 2003 Bam Earthquake **5**(4).
- [13] Cabral, J. L. (2006) Formação em Restauo e Conservação, *In Houses and Cities Built With Earth -*

- Conservation, Significance and Urban Quality*, Argumentum, Lisboa.
- [14] Delgado, M. e Guerrero, I. (2007) The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review, *Construction and building materials*, **21**(2), 237-351.
- [15] Ziegert, C., Müller, U. e Röhlen, U. (2010) Standardization of earth blocks in Germany. *In proceedings 8th International Masonry Conference*, Dresden, Germany, 981-988.
- [16] De Sensi, B. (2003) Terracuda, La Diffusione Dell'architettura Di Terra - Soil, Dissemination of Earth Architecture.
- [17] Langenbach, R. (2005) Performance of the Earthen Arg-e Bam (Bam Citadel) during the 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Earthquake Engineering Research Institute*, **21**(1), 345-374.
- [18] Correia, M. (2004) Fortificações islâmicas em taipa militar, *Pedra & Cal*, **24**, 16.
- [19] Minke, G. (2001) *Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth*. Gate – BASIM (Building Advisory Service and Information Network), Eschborn, Germany.
- [20] Vargas, J. (1992) Earthquake resistant rammed-earth (tapial) buildings, *International Symposium on Earthquake Disaster Prevention*, México, 140-151.
- [21] Parreira, D.J. (2007) Análise Sísmica de uma Construção em Taipa. *Tese de Mestrado*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [22] Pérez, C., Valencia, D., Barbosa, S., Saavedra, P., Escamilla, J. and Díaz, E. (2007) Rehabilitación sísmica de muros de adobe de edificaciones monumentales mediante tensores de acero. *Apuntes*, **20**(2), 369-383.
- [23] Costa, J.P., Córias, V. and Pifano, A. (2008) Avantages de l' terre projetée dans la conservation structurelle du patrimoine en terre. *In Séminaire: Le Patrimoine Architectural d'Origine Portugaise au Maroc: Apports à sa Conservation*, Rabat, Marrocos.
- [24] Keefe, L. (2005) *Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation*. Taylor & Francis: Londres e Nova Iorque.
- [25] Vargas, J., Blondet, M. and Cancino, C. (2009) Research on the use of mud-based grouts in the repair of structural cracks in adobe walls. *In Proceedings MEDITERRA 2009*, Cagliari, Italy.
- [26] Silva, R.A., Schueremans, L. and Oliveira, D.V. (2010) Repair of earth masonry by means of grouting: importance of clay in the rheology of a mud grout. *8th International Masonry Conference 2010*, Dresden, Germany, 403-412.
- [27] Standards New Zealand (1998) NZ 4297: Engineering Design of Earth Buildings, Earth Building Association of New Zealand, New Zealand.