



2.º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

QIC2016

Lisboa • LNEC • 21 a 23 de novembro de 2016

CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL COM BLOCOS DE TERRA COMPACTADA: A SOLUÇÃO HILOTEC

Luís F. Ramos

Prof. Auxiliar, ISISE/IB-S, Universidade do Minho, lramos@civil.uminho.pt

Alfredo Campos-Costa

Investigador Principal, NESDE, LNEC, alf@lnec.pt

Cláudia Ramos Rocha

Tecnologia e Inovação, Mota-Engil Engenharia e Construção, S.A., claudia.ramos@mota-engil.pt

Resumo

A construção de edifícios de pequeno porte em países subdesenvolvidos, através de métodos simples e sustentáveis, define a missão do projeto HiLoTec. Foi neste âmbito que foi desenvolvido um sistema construtivo baseado na utilização de blocos de terra compactada (BTC) com estabilização hidráulica e junta seca, sistema esse que o artigo seguinte pretende expor tendo em conta a experiência no Malawi, o país que serviu para o caso de estudo. O projeto consistiu em estudos de desenvolvimento do sistema construtivo sob o ponto de vista arquitetónico e funcional e numa campanha experimental que incluiu ensaios de caracterização do sistema a diferentes níveis: material (solo), blocos, prismas de alvenaria, paredes de alvenaria, assim como um protótipo ensaiado na mesa sísmica no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa. O conhecimento adquirido nas diferentes fases do projeto HiLoTec foi utilizado para produzir um manual de autoconstrução de moradias para países em desenvolvimento que queiram aplicar a tecnologia dos blocos de terra compactada para construir edifícios mais sustentáveis e de baixo custo. O manual utiliza meios gráficos e conteúdo de texto minimalista para torná-lo compreensível para a autoconstrução, ilustrando cada passo da construção, desde a seleção do solo para a produção dos blocos, até à construção da cobertura.

Palavras-chave: Bloco de terra compactada, estabilização de BTC, comportamento sísmico, alvenaria.

1. Introdução

A responsabilidade social de instituições públicas, ONG e empresas em países em desenvolvimento tem vindo a ganhar relevância nas últimas décadas. Face ao aumento demográfico, ao aumento das áreas urbanizadas e ao aumento das exigências de qualidade e conforto das construções, as políticas de habitação são agora uma grande preocupação, especialmente em África. À medida que a população no globo cresce, a necessidade de alojamento aumenta. As Nações Unidas estimam que a população mundial vai aumentar para quase 9 bilhões até o ano de 2050, com o seu principal crescimento em África (ver mapas de crescimento em (The World Bank; 2000)). É um facto que as regiões em forte crescimento são regiões onde é comum a construção em terra. As mesmas regiões enfrentam enormes dificuldades para conseguirem soluções construtivas alternativas e acessíveis do ponto de vista económico para a habitação social, um problema que parece tender a perdurar no futuro.

Tendo em conta esta crescente procura de habitação, parece improvável, tanto do ponto de vista técnico, como económico, que a solução para a construção em massa em países em desenvolvimento se fará apenas com base em soluções construtivas industrializadas, tais como as do betão armado ou metálicas. A procura de soluções construtivas deverá, pois, passar pela utilização de materiais locais com uma visão para a autoconstrução. Por exemplo, a terra (solo) como um material de construção pode ser encontrada na maioria das regiões do globo com necessidades de crescimento, sendo uma solução eficaz para construções de pequeno porte (MINKE, G.; 2009).

É neste contexto que se insere o projeto HiLoTec - Desenvolvimento de um Sistema Sustentável de Autoconstrução para Países em Desenvolvimento, desenvolvido pela Universidade do Minho e apoiado pela Mota-Engil Engenharia e Construção S.A. e Fundação Manuel António da Mota. O estudo aqui apresentado incidiu sobre a utilização de blocos de terra compactada (BTC) com encaixe para utilização em alvenaria de junta seca, aplicável a regiões com atividade sísmica moderada.

O presente artigo centra-se, principalmente, nos aspetos gerais do projeto, na caracterização dos materiais, no desenvolvimento do sistema construtivo, no processo de fabrico dos BTC, na construção de um protótipo testado na mesa sísmica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e no manual ilustrado de autoconstrução para países em desenvolvimento que queiram aplicar esta tecnologia na construção de casas sustentáveis e de baixo custo.

2. O Projeto HiLoTec

No presente estudo o Malawi foi escolhido como país de referência para a aplicação da técnica de construção, pelas suas características demográficas e económico-sociais, assim como pelo interesse revelado das instituições governamentais e não-governamentais para o estudo, experimentação e uso de soluções construtivas alternativas aos tijolos cozidos.

A primeira fase do projeto, decorrida entre outubro de 2009 e março de 2010, teve como principal objetivo avaliar as especificidades locais do Malawi para o desenvolvimento da solução HiLoTec e recolher informações específicas do país. A segunda fase contemplou a análise dos solos existentes, a elaboração de um conjunto de estudos de índole arquitetónica, material, estrutural e construtiva, com o objetivo da sistematização de um novo processo e adaptação dos materiais e sistemas estruturais às necessidades socioculturais e às exigências funcionais.

2.1 Caracterização do material

No âmbito do projeto foi efetuada uma extensa campanha de ensaios para caracterização dos solos, tendo sido recolhidas amostras dos solos provenientes do Malawi de diferentes localidades, designadamente Blantyre, Zomba, Lilongwe, Netcheu e Salima. As amostras recolhidas foram analisadas no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST). Para a realização da campanha experimental mais alargada, foi necessário construir BTC com um solo equivalente português. Para tal e antes da produção dos blocos, um processo de homogeneização de misturas e de análise de similitudes foi realizado entre solos do Malawi e solos de Portugal. Esta análise experimental está apresentada em (Eires, R.; 2012) e (Sturm, T.; 2014).

2.2 O Sistema Estrutural HiLoTec

Os BTC são blocos produzidos com solo cru estabilizado com pequenas percentagens de cimento ou cal hidráulica (tipicamente entre 3% e 9%). O respetivo processo de fabrico passa pela prensagem da mistura terra/estabilizante/água num molde, através de uma máquina manual ou hidráulica e pela secagem ao ar até se atingir a idade de cura. Desta forma, não é necessário nenhum processo de cozedura, o que se torna numa vantagem para países com poucos recursos naturais.

Para o projeto HiLoTec foi desenhado um novo BTC com encaixe para funcionar com juntas secas (ver Fig. 2a). Trata-se de um bloco com $280 \times 140 \times 90 \text{ mm}^3$ com dois orifícios simétricos que permitem a passagem, quer de reforços (armaduras), quer de instalações elétricas ou hidráulicas. Nos orifícios encontram-se dois encaixes/reentrâncias do tipo macho-fêmea, com uma elevação de 10 mm para aumentar a regularidade do assentamento dos blocos, bem como a conectividade e resistência ao corte. A geometria do bloco permite a construção de panos simples com 14 cm de espessura ou duplos com 28 cm de espessura (ver Fig. 2b e c). No caso dos panos duplos, a cada cinco fiadas é necessário colocar uma fiada de blocos travadouros para manter a estabilidade para fora do plano da parede.

No âmbito do projeto HiLoTec vários desafios sob o ponto de vista arquitetónico, construtivo e estrutural, foram amplamente estudados (MENDONÇA, P.; 2011), (EIRES, R.; 2012), (RAMOS, L.F.; 2011). A solução final focou-se numa moradia térrea, com uma geometria em planta bastante regular, conforme se pode observar na Fig.2d. Os alinhamentos 1, 2 e 4 são responsáveis pelas cargas verticais, enquanto o travamento e cargas horizontais são assegurados pelos alinhamentos 1, 2 e 4 e A, C e D/E. No topo das paredes é executada um viga-cinta, neste caso em betão armado, para assegurar a conectividade entre todas as paredes formando um diafragma. A cobertura é em madeira formando duas águas (Fig. 2e), cujas madres assentam em vigas-freixais diretamente apoiadas nas paredes de alvenaria dos alinhamentos 1, 2 e 4. Para aumentar o efeito de diafragma, são também adicionados elementos em madeira em forma de X e rasantes mas inferiores às madres, ligando as extremidades das vigas-freixais, formando, assim, um sistema com melhor comportamento às ações horizontais.

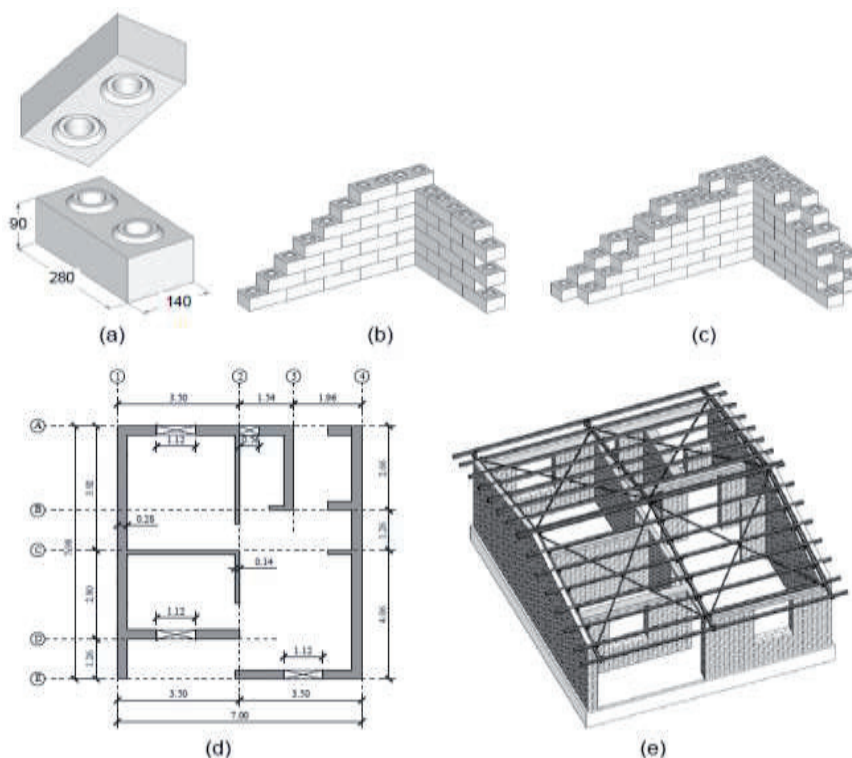


Figura 2: Bloco de terra compactada: (a) dimensões do bloco em mm; (b) pano simples, a meia vez; (c) pano duplo, a uma vez; (d) planta estrutural; e (e) perspetiva do sistema estrutural.

3. Construção do Protótipo

3.1 Configuração e escala

Para o projeto conceitual do modelo da mesa sísmica, alguns aspetos críticos foram tidos em consideração: (a) capacidade máxima de peso da mesa de agitação; (c) as dimensões no plano da agitação da mesa; (c) a altura máxima permitida para uma estrutura sobre a mesa de agitação; (d) as limitações das capacidades da mesa de agitação; e (d) efeitos da escala de tamanho nos resultados dos testes (e.g. a lei de similitude de Cauchy). O modelo/protótipo construído na mesa sísmica foi erguido à escala real, mas com dimensões em planta de $3.36 \times 3.64 \text{ m}^2$, enquanto uma moradia “HiLoTec” possui uma área de implantação igual a $7.00 \times 7.58 \text{ m}^2$ (ver Fig. 3). A solução escolhida teve de passar por uma geometria representativa da distribuição em planta dos elementos estruturais da moradia completa. Foram mantidas as paredes de pano duplo e as paredes de pano simples (divisórias), as assimetrias e as aberturas da estrutura original. Ainda assim, as características importantes foram mantidas no modelo adotado, a saber: (a) a razão entre o comprimento e a largura das paredes no plano é quase a mesma; (b) a distribuição das paredes no modelo é semelhante às da casa; (c) as longas paredes presentes nos eixos S e N são semelhantes às presentes no eixo 1 e 4 da casa; (d) uma única parede de pano simples está presente no meio de ambas as estruturas; (e) a altura das paredes do modelo é a mesma que a da estrutura original, mantendo a esbeltez de parede; e (f) a assimetria no plano da fachada frontal (eixos D e E) da casa também estão presentes no modelo (eixos E1 e E2).

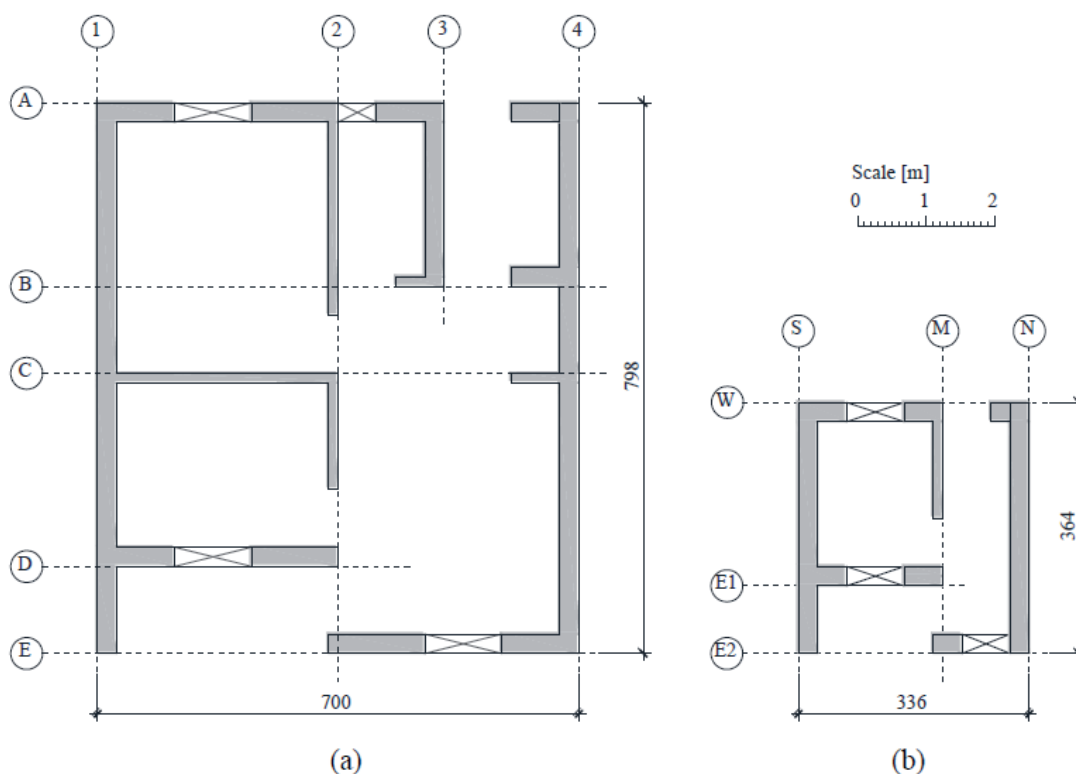


Figura 3 - Comparação entre os planos [cm]: (a) casa HiLoTec; e (b) modelo da mesa sísmica.

Uma vista em planta mais detalhada e as vistas em perspetivas do modelo estrutural adotado, com as suas dimensões, podem ser observadas na Figura 4. O peso total do modelo da mesa sísmica foi de aproximadamente 16 toneladas e o peso da laje de fundação de aproximadamente 11 toneladas. Juntos, os pesos do conjunto perfazem 27 toneladas, valor inferior ao peso máximo permitido na mesa sísmica. A altura máxima do modelo foi de 3.3 m.

A planta do modelo não tem simetria e tenta reproduzir a particularidade dos desalinhamentos da zona da entrada da moradia, uma vez que não há uma continuidade do pano na fachada principal (direção Norte-Sul) para a existência de um alpendre. As aberturas foram todas concentradas nos panos com orientação Norte-Sul, enquanto na direção Este-Oeste foram deixadas empenas cegas. O modelo não é escalado, uma vez que se utilizaram blocos reais e se tentou respeitar a altura das paredes, não sendo necessário utilizar qualquer lei de similitudes de Cauchy para alterar os sinais de entrada ou de pós-processamento.

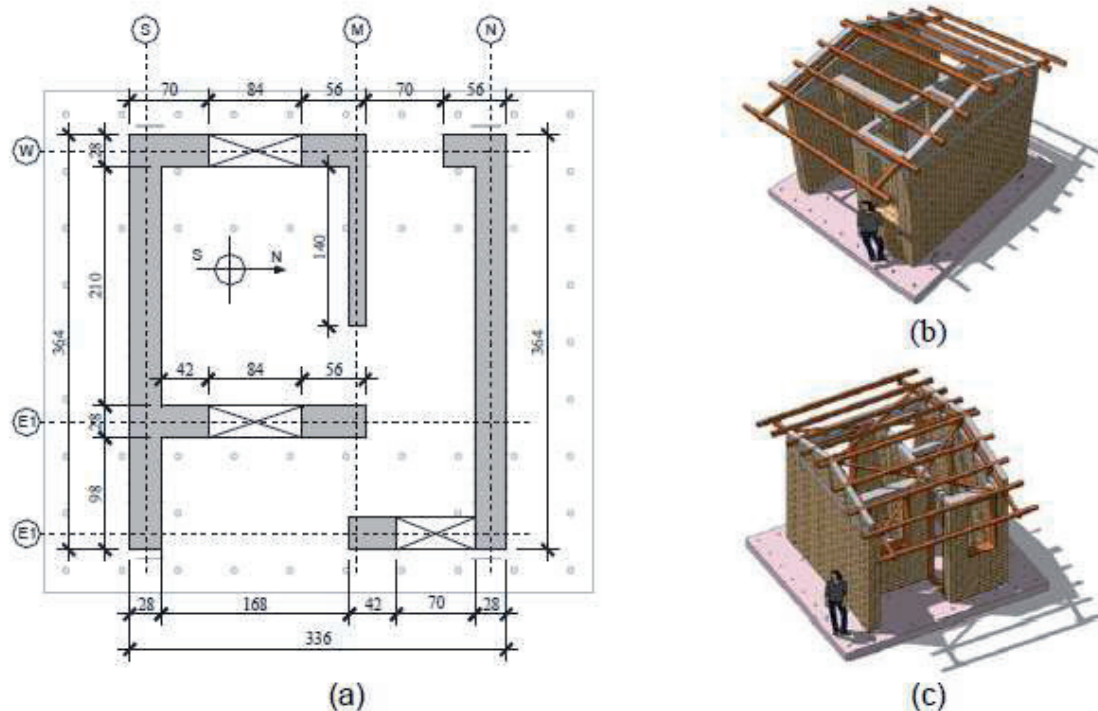


Figura 4: Modelo da mesa sísmica: (a) planta [cm]; (b) e (c) perspetivas.

3.2 Produção dos Blocos

Para construir o modelo da mesa sísmica, foram necessários cerca de 2 500 blocos de terra, cuja produção decorreu entre os meses de julho e agosto de 2014 nas instalações do LNEC. Uma vez que o solo utilizado para fazer os blocos na Universidade do Minho não estava mais disponível, foi necessário identificar outro solo, com características idênticas para ser utilizado na produção dos BTC. O solo escolhido foi do concelho de Odemira, Distrito de Beja, região do Baixo Alentejo. Como o teor de argila era demasiado elevado para a produção dos BTC, este foi corrigido através da peneiração com uma rede de 5 mm, seguida da adição de areia, numa proporção de 1:2 (solo:areia). Finalmente, a mistura foi estabilizada com 5% de cimento. Uma vez que a estabilização do solo foi conseguida, 8 m³ de solo foram trazidos do Alentejo para o LNEC e o processo de produção foi iniciado.

A máquina de compressão utilizada na produção destes blocos foi a mesma utilizada nos ensaios de caracterização mecânica realizados na Universidade do Minho, cujo molde foi especificamente desenvolvido para este projeto. Os passos relevantes realizados no processo de produção dos blocos no LNEC estão apresentados na Figura 5. Todo o processo de produção foi realizado por três trabalhadores e teve uma duração de 19 dias. Um trabalhador estava no comando da mistura do solo, enquanto os outros dois pressionavam os blocos na máquina de compressão. Em seguida, o bloco era retirado da máquina e colocado em paletes com o máximo cuidado.



Figura 5: Processo de Produção dos BTC: (a) recolha das terras no Alentejo; (b) terras no LNEC; (c) peneiração da terra; (d) preparação da mistura para a compressão; (e) colocação da mistura no molde; (f) compressão do bloco (g) bloco final; (h) colocação do bloco em paletes; (i) blocos na palete; (j) controlo das dimensões; (k) cura durante os primeiros 7 dias sob um filme de polietileno; e (l) cura por processo de secagem ao ar até aos 28 dias de idade.

3.3 Construção do Protótipo

O modelo da mesa sísmica foi construído sobre uma laje de betão, existente na própria mesa sísmica. Em primeiro lugar, a laje foi regularizada na localização das paredes, de forma a estabelecer uma superfície horizontal para colocação da primeira fiada de blocos. Em seguida, o *layout* das paredes foi marcado sobre a superfície regularizada e foi assente a primeira fiada de blocos através de uma argamassa de cimento (traço volumétrico 1:2, cimento:areia).

A construção das paredes era bastante simples, já que não foram utilizadas juntas de argamassa (ver Figura 6a). Foi necessário colocar andaimes de apoio à execução do trabalho ao redor de toda a estrutura. Quando as paredes atingiram o nível da viga-cinta, foi colocada a cofragem para a sua execução.

A armadura de reforço da viga de betão foi executada fora das instalações do LNEC pela área de prefabricados da Mota-Engil Engenharia, tendo sido depois colocada no lugar e ligada *in situ*. Para execução da viga de betão, foram necessários 0,6 m³ de betão, da classe C25/30, que foi vertido sobre a viga com o apoio de um equipamento próprio para o efeito existente no LNEC que permitiu que a tarefa fosse executada num período de tempo mais curto que o previsto. Foram retiradas três amostras cúbicas de betão para realização dos ensaios de resistência do betão.

O betão foi vibrado e, em seguida, nivelado enquanto fresco (ver Figura 6b). A cofragem foi retirada ao fim de 3 dias. De seguida, a primeira fiada de blocos das empenas foi fixada à viga de betão (ver Figura 6c).

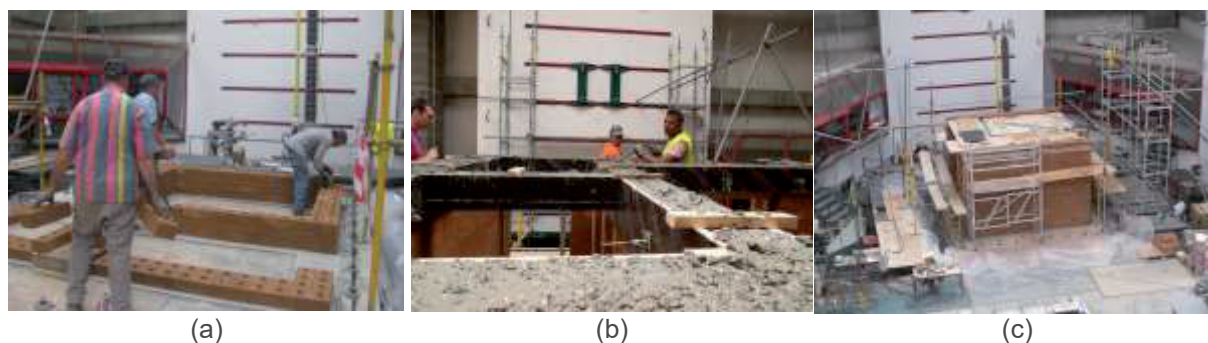


Figura 6: Processo de construção: (a) erguer as paredes; (b) colocar e ligar os reforços da viga, verter e vibrar o betão; e (d) colocar a primeira fiada de blocos das empenas.

Os reforços de aço da estrutura da cobertura foram inseridos na viga, durante o processo de cura do betão (ver Figura 7a). As empenas que se situavam acima da viga foram então erguidas.

Seguidamente, foi executada a metade da parede interna da empena criada para fazer a inclinação para assentar as vigas de madeira da estrutura da cobertura. Foi colocada a cofragem, e os buracos onde se localizavam os furos com as armaduras de reforço foram preenchidos com betão. No final foi feita a respetiva regularização com argamassa (ver Figura 7b).

Depois da colocação das vigas de madeira, foram aparafusadas a estas placas metálicas para fazer a ligação entre as vigas e as armaduras de reforço (ver Figura 7c).

Posteriormente, as madres foram colocadas transversalmente na parte superior das vigas, fixadas por meio de pregos e cavilhas de madeira (ver Figura 7d). Em seguida, o pano exterior das fachadas foi regularizado com argamassa de cimento (traço volumétrico 1:2, cimento:areia) até obter um acabamento liso.

Finalmente, as diagonais da estrutura da cobertura foram pregadas nas madres pela parte de baixo (ver Figura 7e). No final, foram colocadas chapas metálicas para ilustrar melhor a cobertura no protótipo (ver Figura 7f).

A construção do modelo da mesa sísmica demorou 24 dias, incluindo os períodos de cura do betão e das argamassas. Esta experiência serviu para validar as soluções técnicas propostas. As características estruturais previstas foram executadas sem complicações e os BTC foram utilizados com junta seca. O modelo ficou com uma aparência final atraente (ver Figura 7g, 7h e 7i).

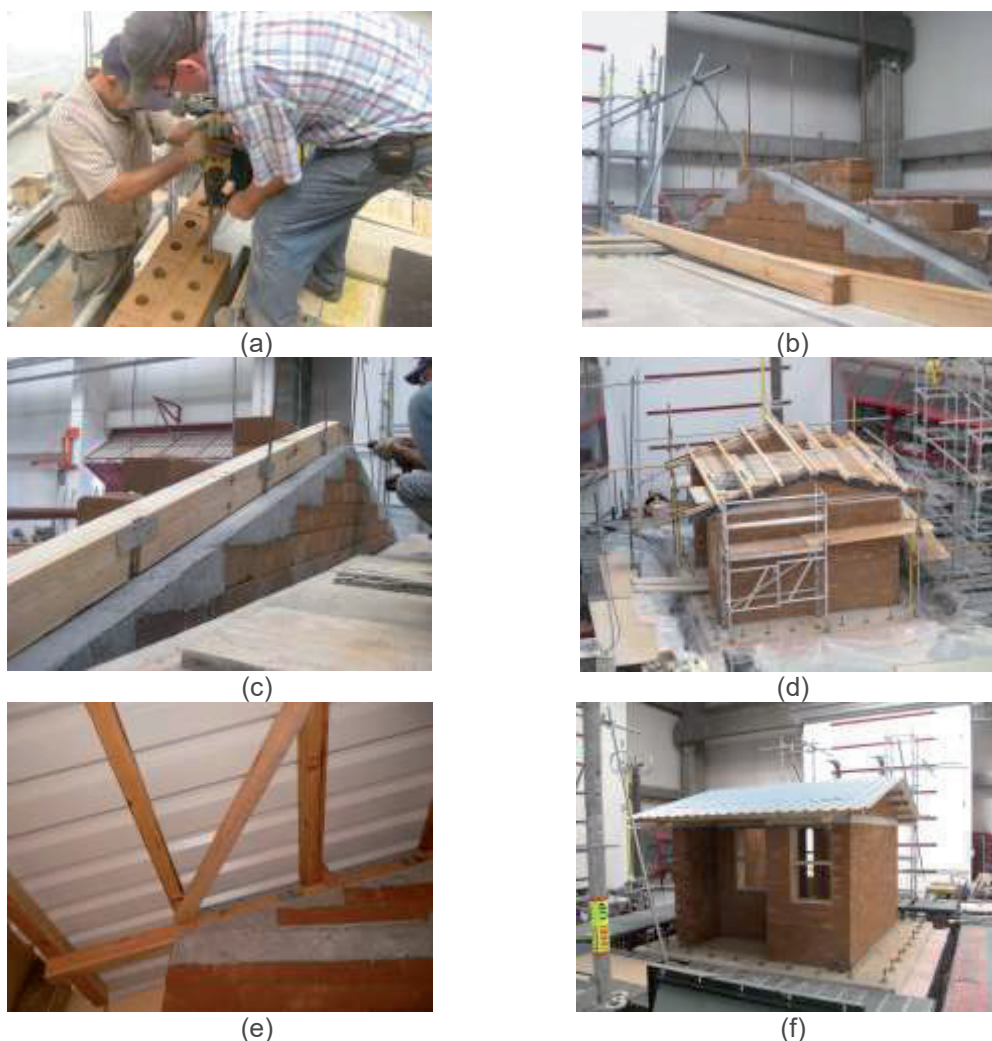


Figura 7: Processo de construção: (a) inserção dos reforços verticais; (b) execução e regularização da empena interior; (c) colocação das vigas de madeira e fixação das vigas aos reforços; (d) colocação das madres e regularização da empena exterior (e) colocação das diagonais e revestimento em chapa metálica; e (f) modelo da mesa sísmica terminado.

4. Ensaio na Mesa Sísmica

Para melhor estudar o comportamento sísmico do sistema estrutural foi realizado um ensaio na mesa sísmica no LNEC. Foi utilizada uma excitação de base crescente nas duas direções principais do modelo. Em cada patamar de excitação realizou-se uma identificação modal para analisar a evolução do dano na estrutura.

4.1 Descrição do modelo

O modelo foi instrumentado com 58 acelerómetros piezoelétricos que registaram a resposta nas duas direções principais, sobretudo para registar o comportamento da viga-cinta de betão armado e o comportamento para fora do plano das paredes (ver Figura 8).



Figura 8: Instrumentação do modelo: (a) e (b) perspetivas.

4.2 Ensaios sísmicos

Não foi possível encontrar nenhum registo sísmico do Malawi ou de África do Sul que pudesse ser introduzido como excitação de base na mesa sísmica. Portanto, foi necessário utilizar um sinal artificial baseado na literatura sobre a sismicidade do Malawi (CHAPOLA, L.S.; 1993), (CHAPOLA, L.S.; 1994), (CHAPOLA, L.S.; 2000). Do ponto de vista da engenharia, as informações mais importantes reunidas indicam que os sismos no Malawi são sismos próximos, com uma profundidade focal de menos de 15 km. Há terremotos recorrentes de magnitude inferior a 5.5 e, raramente, ocorrem eventos de magnitude superior até 6.5. Isto significa que podem causar grandes danos, mas num cenário próximo do epicentro. As acelerações de pico no solo (PGA) dos sismos de magnitude inferior a 5.5 são cerca de 2.4 m/s^2 (0.24 g) (com 10% excedência em 50 anos, com um período de retorno de 475 anos) e para os sismos de magnitude superior a 5.5 cerca de 3.2 m/s^2 (0.32 g) (com 10% de excedência em 100 anos, com um período de retorno de 950 anos). Outra informação tida em conta na geração do sinal foi a preconizada pelo Eurocódigo 8 (Eurocode 8:1998-1), que recomenda o uso de um espectro elástico do Tipo 2 (cenário próximo) para sismos de magnitudes inferiores a 5.5.

O sinal artificial utilizado na mesa sísmica consistiu na simulação de dois sinais não correlacionados para cada direção principal da mesa, que reproduzem uma ação do Tipo 2 num terreno do Tipo B (Eurocode 8:1998-1), incluindo algum ruído. O conteúdo de ruído é importante, já que este é responsável pela aleatoriedade do sinal, como acontece em sismos reais. Depois de se constatar que grande parte das frequências naturais do modelo se situava no patamar do espectro, concluiu-se que este seria o tipo de sinal mais gravoso para a estrutura. No final, o sinal de excitação tinha um comprimento de cerca de 10 s e uma PGA igual a 0.33 g, o que está próximo do máximo PGA esperado para o Malawi.

O procedimento de ensaio consistiu na injeção de uma sequência de sismos com magnitude crescente. Os sinais das diferentes fases de ensaio tinham 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175% do PGA anteriormente definido. Cada fase foi repetida, pelo menos, duas vezes, o que se traduziu num cenário semelhante de sismos com duração superior 10 s. No final de cada etapa sísmica foi realizada uma identificação modal para determinar as frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento. Além da identificação modal, também se realizaram inspeções visuais para avaliar e registar a evolução do dano. O último ensaio atingiu um PGA igual a 175% do valor de referência, correspondendo a um PGA igual a 0.58 g. No final desta fase, o dano acumulado no modelo era significativo e verificou-se o colapso local de um nembro, tendo-se decidido terminar o ensaio.

4.3 Resultados

Durante as várias fases de ensaio e até se atingir um PGA de 100% (0.33 g), não foram observadas fendas ou deslocamentos significativos entre os BTC, ou seja fendas nas juntas da alvenaria. Apenas se observaram fendas de pequenas dimensões a meio do comprimento nas unidades e sem as atravessar em altura, indiciando serem fendas de flexão por ajuste dos apoios dos blocos resultantes do acomodar da excitação. Após um PGA de 100% (0.33 g) foram observadas fendas com um padrão mais definido. Entre as fases de 125% (0.41 g) e 175% (0.58 g) foi possível observar que a parte superior do modelo, formada pela viga-cinta, pelas paredes do tímpano da empena e pela cobertura, se movia como um corpo rígido, tendo ocorrido uma separação das paredes de BTC na junta imediatamente inferior à fiada de contacto com a viga-cinta de betão armado. O topo das paredes vibrava livremente para fora do plano. Isto indiciava que após o PGA de 100% (0.33 g) há uma perda de ligação entre a viga-cinta e o topo das paredes de BTC. Contudo, só no último ensaio (175%) é que foi observado o colapso parcial de elementos estruturais, nomeadamente num nembro/pilar na zona de entrada do modelo (fachada principal) e no cunhal Sudeste (ver Fig. 9).



Figura 9: Dano observado no modelo: (a) parede Norte; (b) fachada principal junto à porta de entrada.

A identificação modal ao longo das várias fases de ensaios sísmicos mostrou que os primeiros modos de vibração na direção Norte-Sul e Oeste-Leste tiveram uma frequência inicial de 2.05 Hz e 2.25 Hz, respetivamente, e que após a última fase diminuíram para 1.17 Hz e 1.27 Hz, respetivamente. Quanto ao amortecimento, o seu valor foi sempre superior a 10%.

5. Manual de Construção HiLoTec

Um dos vários resultados deste projeto foi um manual de autoconstrução. O conhecimento adquirido nas diferentes fases do projeto HiLoTec foi usado para produzir um manual de construção de casas com BTC para países em desenvolvimento que queiram aplicar esta tecnologia para construir casas sustentáveis de baixo custo. A produção do manual contou com a colaboração da Universidade do Minho, Mota-Engil Engenharia e Construção S.A. e um *designer* externo.

O manual utiliza meios gráficos e conteúdo de texto minimalista para torná-lo compreensível para autoconstrução, ilustrando cada passo da construção, desde o método de seleção do solo até à cobertura, passando por todo o processo construtivo, tais como a produção de blocos ou a construção das fundações (com referência aos diferentes tipos de fundações possíveis), construção das paredes, incluindo o método de execução da viga-cinta em betão armado, conforme se pode observar na Figura 10.

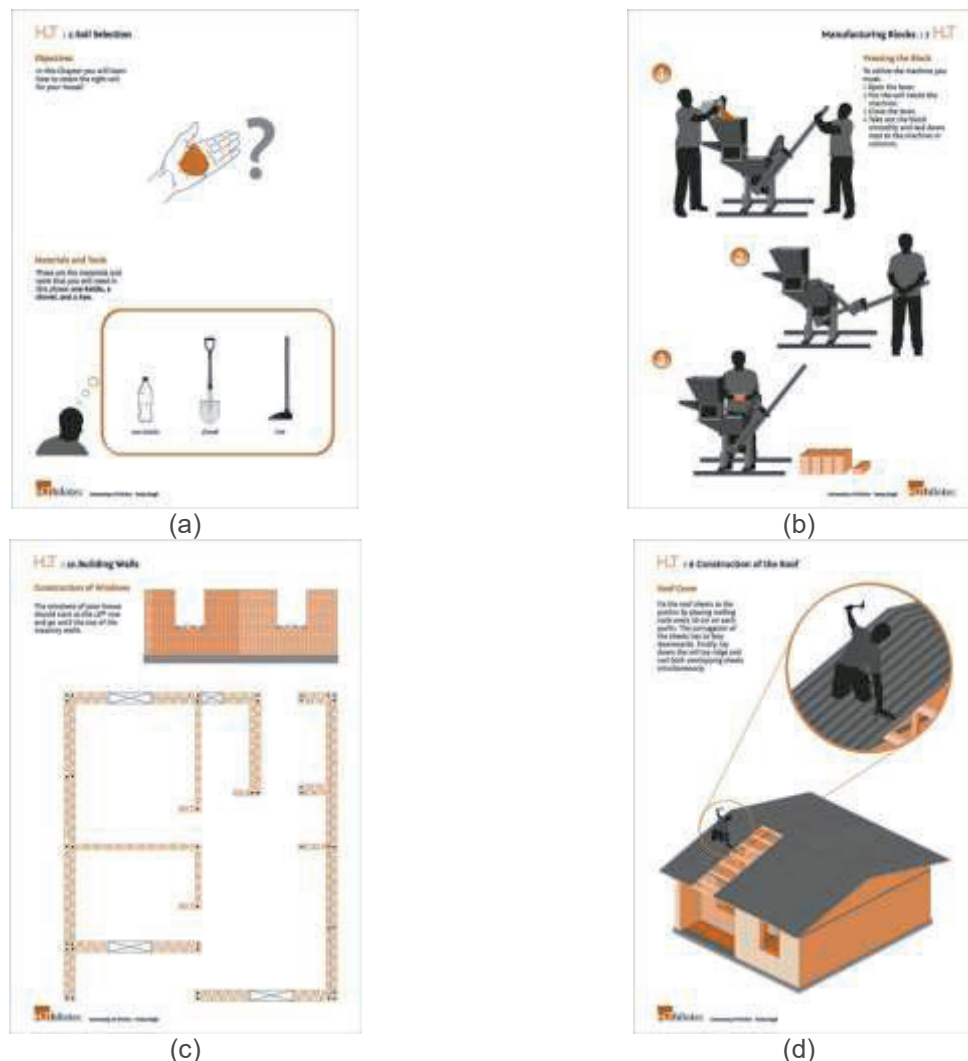


Figura 10: (a) capítulo seleção do solo; (b); capítulo produção dos blocos (c) capítulo construção das janelas; e (d) capítulo construção da cobertura.

6. CONCLUSÕES

O projeto HiLoTec teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma solução construtiva baseada em blocos de terra compactada para habitações de baixo custo em países emergentes, incluindo os países com sismicidade moderada, tendo sido escolhido o Malawi com país caso de estudo. Foi realizada uma extensa campanha de ensaios para caracterizar o comportamento do solo, dos blocos, prismas, paredes de alvenaria e de um modelo na mesa sísmica. O sistema estrutural (paredes de alvenaria construída com blocos de terra compactada) foi caracterizado em relação à compressão, corte, tração e comportamento sísmico. Os blocos obtiveram uma resistência à compressão mínima de acordo com as normas existentes para este tipo de construção. O comportamento ao corte no plano das paredes caracterizou-se por um elevado fator de ductilidade e de comportamento (superior aos preconizados no Eurocódigo 8), embora se tenha observado uma rotura frágil. Quanto ao comportamento sísmico, a resposta do modelo induziu roturas para fora do plano das paredes de alvenaria, assim como o colapso local de nembos/pilares junto dos vãos. Todavia, o modelo resistiu a ensaios sísmicos com uma aceleração de pico (PGA) igual a 0.33 g sem a ocorrência de danos significativos, o que é equivalente à máxima aceleração de pico no Malawi.

Face aos resultados obtidos, tudo indica que, para sismos de cenários próximos no Malawi, com magnitude inferior a 5.5 e uma aceleração de pico inferior a 0.24 g, seja possível utilizar um sistema estrutural construído em blocos de terra compactada com junta seca e apenas com colocação de reforço/armaduras verticais nos cunhais para edifícios de pequeno porte (um piso), desde que se adotem medidas que melhorem a resposta sísmica, tais como a introdução de viga-cinta no topo das paredes, a conveniente ligação da cobertura nas duas direções principais da estrutura, entre outras. Quanto à segurança para uma sismicidade superior, mais estudos são necessários, incluindo o efeito da água na diminuição da resistência dos blocos.

Deste trabalho resultou um manual de autoconstrução ilustrado para países em desenvolvimento que queiram aplicar esta tecnologia para construir casas sustentáveis de baixo custo.

7. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto HiLoTec financiado pela Mota-Engil Engenharia e Construção S.A. e pela Fundação António Manuel da Mota, no seio do protocolo celebrado entre a Universidade do Minho e a Mota-Engil Engenharia e Construção S.A.. Os autores agradecem a todos os investigadores da Universidade do Minho envolvidos no projeto e de forma expressiva ao Diretor do LNEC, Eng. Carlos Alberto de Brito Pina pela possibilidade de realizar o ensaio na mesa sísmica, e ao Eng. Paulo Candeias por todo o apoio durante a realização dos referidos ensaios.

8. Referências bibliográficas

The World Bank - **Beyond economic growth**. 2000. [Consult. 5 de Janeiro de 2014]. Disponível em www.worldbank.org/depweb/beyond/beyondco/beg_all.pdf

MINKE, G. - **Earth construction Handbook: Material, Technics, Adobe architecture** (em Alemão). Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2009.

EIRES, R., outros - **Study of a new interlocking stabilized compressed earth blocks**. Terra 2012 - XIth Int. Conf. on the Study and Conservation of Earthen Architecture Heritage, Lima, 2012.

STURM, T., outros – **Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks**. Materials and Structures, 2014.

MENDONÇA, P., outros - **Low-cost housing in underdeveloped countries – Simple strategies for a more sustainable construction**. Int. Conf. on Earth Architecture in Asia, TerrAsia, Mokpo, 2011.

RAMOS, L.F., outros – **As paredes divisórias num sistema integrado de alvenaria estrutural em BTC**. Seminário sobre Paredes Divisórias: Passado Presente e Futuro, Porto, 2011.

CHAPOLA, L.S. – **An estimation of Earthquake hazards and risks in Malawi**. Geological Survey Department, Ministry of Mining, Zomba, 1993.

CHAPOLA, L.S. – **Seismicity and tectonics in Malawi**. Geological Survey Department, Ministry of Energy and Mining, Zomba, 1994.

CHAPOLA, L.S. – **Seismology in Malawi**. Geological Survey Department, Ministry of Natural Resources and Environmental Affairs, Zomba, 2000.

Eurocode 8:1998-1 – **Design of Structures for Earthquake Resistance. European Standards, Brussels**, 1998.