

CARATERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO CORTE DE ALVENARIA DE BLOCOS DE TERRA COMPACTADA COM JUNTA SECA SHEAR BEHAVIOUR CHARACTERIZATION OF DRY-STACK MASONRY MADE OF COMPRESSED EARTH BLOCKS

Silva, R.A.¹; Oliveira, D.V.¹; Miranda, T.¹; Soares, E.^{1,2}; Cristelo, N.²; Lourenço, P.B.¹

¹ ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho

² C-MADE, Escola de Ciência e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



RESUMO

Como material de construção não normalizado, a terra é ainda associada à construção de subsistência dos países em desenvolvimento. Porém, as vantagens da construção em terra têm sido cada vez mais reconhecidas, nomeadamente a sua sustentabilidade. Esta mudança de paradigma tem levado ao desenvolvimento de técnicas modernas de construção em terra, particularmente a alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC). A estabilização química tradicional do solo é um processo de melhoramento frequentemente utilizado, mas que também aumenta significativamente a energia incorporada dos BTC. Este artigo apresenta uma solução de estabilização alternativa para BTC, baseada na ativação alcalina de cinza volante. O comportamento mecânico dos BTC e da respetiva alvenaria de junta seca é estudado através de um programa experimental, que inclui a caracterização do comportamento ao corte da alvenaria.

ABSTRACT

Raw earth, as a non-standard building material, is still associated to the poor construction from the developing countries. However, the advantages of earth construction have been increasingly recognized, namely its sustainability. This change of paradigm have been led to the development of modern earth construction techniques, in particular of the masonry made of compressed earth blocks (CEBs). The traditional chemical stabilization of the soil is an improvement process used frequently, but which increases significantly the embodied energy of the CEBs. This paper presents an alternative stabilisation technique for CEBs, based on the alkaline activation of fly ash. The mechanical behaviour of the CEBs and of the respective dry-stack masonry is investigated through an experimental program, which includes the characterization of the shear behaviour of the masonry.

1- INTRODUÇÃO

Desde tempos imemoriais que a terra crua tem sido utilizada na construção (Houben e Guillaud 2008). Atualmente a

construção em terra continua a ser uma forma de construção popular, e por vezes a única viável, em países em desenvolvimento (ex: Perú, Angola, Iémen, Índia, etc.). Por

outro lado, o recurso à construção em terra em países desenvolvidos (ex: Portugal, Espanha, França, Alemanha, etc.) caiu em desuso durante o século passado, tendo sido progressivamente substituída pela construção em betão armado e alvenaria de tijolo. Apesar deste contraste entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, estima-se que atualmente cerca de um quarto da população mundial habite numa construção em terra (Jaquin 2013), demonstrando a relevância deste tipo de construção.

O facto de a terra ser um recurso natural disponível praticamente em tudo mundo e o seu uso ser praticado por populações locais, conota a construção em terra de arquitetura vernácula. Isto significa também que a variabilidade existente entre solos e os diferentes enquadramentos sociais, culturais e económicos destas populações resultam numa grande diversidade de técnicas construtivas tradicionais. Apesar disto, a alvenaria de adobe e a construção em taipa são geralmente distinguidas como as técnicas mais populares (Houben e Guillaud 2008).

Atualmente, a construção em terra é cada vez mais reconhecida e aceite como alternativa à construção dita convencional, devido à sua elevada sustentabilidade, bom desempenho térmico e acústico, elevada resistência ao fogo e baixo custo do material (Pacheco-Torgal e Jalali 2012). Contudo, o maior obstáculo ao recurso à construção em terra prende-se com o facto destes materiais (terra) em geral não serem considerados materiais normalizados. A grande variabilidade e heterogeneidade das propriedades da matéria-prima (solo), e processos construtivos sem controlo de qualidade podem ser apontados como os principais fatores desta situação. Além disto, os materiais de terra são associados a baixas resistências mecânicas, ao fraco desempenho sísmico das construções e falta de durabilidade à ação da água. Em geral, estas ideias levam a uma fraca aceitação da construção em terra em países

desenvolvidos, onde este tipo de construção também é erradamente associado a uma construção de subsistência e à pobreza.

A necessidade de se adotarem soluções construtivas mais sustentáveis na indústria da construção tem levado ao melhoramento dos materiais de terra e dos respetivos processos construtivos. A construção em alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC) é provavelmente o caso mais relevante deste melhoramento, onde este tipo de construção pode ser visto como uma modernização da alvenaria de adobe. Os BTC são produzidos com recurso a prensas, onde a terra húmida é compactada estaticamente num molde específico para formar o bloco, que é imediatamente desmoldado e posto a secar. Este processo permite uma uniformização da geometria dos BTC e um aumento considerável da sua densidade, relativamente a unidades de adobe, promovendo uma resistência mecânica bastante superior. Esta técnica construtiva foi apresentada por G. Ramires nos anos cinquenta, com o desenvolvimento da primeira prensa manual e que ficou mundialmente conhecida como CINVA-RAM (Barbosa e Mattone 2002). Hoje em dia, a compactação dos BTC pode ser também realizada com recurso a prensas hidráulicas (Doat et al. 1991), cuja pressão de compactação é superior, e portanto, permitem BTC com melhores propriedades mecânicas (Gomes 2008). Esta técnica construtiva tem ganho alguma popularidade em países como Alemanha, Austrália, Brasil, Espanha, França, Índia, Nova Zelândia e Zimbabué, onde é utilizada como forma de construção sustentável de baixo custo e onde de facto existem algumas recomendações e normas aplicáveis (ex: NZS 4297, NZS 4298, NZS 4299, UNE 41410, HB 195).

A estabilização química por adição de cal ou cimento é outra forma de melhoramento comum no processo de fabrico de BTC, especialmente no caso de o solo disponível não apresentar características adequadas. Este processo visa o aumento da resistência mecânica e

diminuição da vulnerabilidade à água, mas aumenta a energia incorporada dos BTC (Houben e Guillaud 2008, Reddy e Kumar 2010, Lax 2010), o que torna esta solução construtiva menos atrativa do ponto de vista económico e ambiental. A estabilização através da ativação alcalina de cinza volante em aplicações geotécnicas (Cristelo et al. 2011, Cristelo et al. 2012a) e construção em taipa (Silva et al. 2013) é um tema que tem sido estudado recentemente, e que tem como objetivo diminuir o impacto ambiental da estabilização química convencional neste tipo de aplicações.

A ativação alcalina de cinza volante resulta num ligante geopolimérico, que quando misturado com o solo forma uma matriz semelhante a uma matriz cimentícia. Esta matriz endurece com o tempo e envolve as partículas de solo, promovendo um aumento da sua resistência. De uma forma geral, o processo de ativação alcalina consiste na reação entre compostos aluminossilicatos e elementos alcalinos ou alcalinoterrosos, designadamente: $R(OH)_2$, R_2CO_3 , R_2S , Na_2SO_4 , $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $R_2(n)SiO_2$, onde R representa um metal alcalino como sódio (Na^+) ou potássio (K^+), ou um metal alcalinoterroso como o cálcio (Ca^{2+}). No seguimento desta reação dá-se um processo de policondensação onde cristais de sílica (SiO_2) e alumina interligam-se por partilha de iões de oxigénio (AlO_4). Este processo resulta numa estrutura molecular do tipo Al–O–Si, que constitui a estrutura principal da matriz geopolimérica, que é bastante semelhante à estrutura molecular da rocha natural e partilha da sua resistência, rigidez e durabilidade.

A cinza volante é dos materiais ricos em aluminossilicatos mais popularmente usados na ativação alcalina, mas podem ser referidos outros materiais como escórias de alto-forno, pó de tijolo e metacaulino (Roy 1999). A cinza volante e as escórias de alto-forno são resíduos industriais e, portanto, a sua utilização na estabilização de solos é também uma forma de os

valorizar. Além disto, tem-se demonstrado que a estabilização de solos com ativação alcalina é capaz de atingir níveis de resistência semelhantes à estabilização com cal e cimento (Cristelo et al. 2012b). Assim, espera-se que esta técnica de estabilização integrada na produção de BTC produza resultados semelhantes aos referidos anteriormente, além de melhorias relativas à mitigação do impacto ambiental.

Neste contexto, o presente artigo apresenta um programa experimental onde é estudado o comportamento mecânico de uma solução de alvenaria de BTC com junta seca, que tem vindo a ser desenvolvida pela Universidade do Minho e pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Os BTC foram produzidos com solo residual granítico (SRG) típico do norte de Portugal e foram estabilizados com ativação alcalina de cinza volante. Foram fabricados BTC com duas composições incorporando diferentes percentagens de cinza volante (10% e 15%) e os respetivos BTC foram ensaiados à compressão e à flexão (saturados e secos ao ar). A respetiva alvenaria de junta seca foi também ensaiada à compressão e ao corte.

2- PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 - Geometria dos BTC e sistema construtivo

A geometria e sistema construtivo dos BTC apresentados neste artigo foram desenvolvidos no âmbito de um projeto de investigação anterior (HiLoTec), resultante de uma colaboração entre a Universidade do Minho e a Mota-Engil SA. O objetivo do projeto consistiu no desenvolvimento de uma solução construtiva simples e inovadora para edificação de construções sustentáveis e sismo-resistentes no Malawi (Ramos et al. 2011). Assim, os blocos fabricados para o programa experimental consistem de uma unidade com dupla perfuração vertical, que serve para a construção de paredes de pano duplo e de pano simples, tal como ilustrado na Fig. 1. Segundo Minke (2001) e o Aeroville Earth Institute (AIE 2005), a utilização destes

BTC é recomendada em zonas de perigosidade sísmica não negligenciável, uma vez que a perfuração permite a introdução de elementos de reforço e o aligeiramento da alvenaria, e portanto a redução das forças de inércia associadas. Além disto, a geometria do BTC permite a construção de alvenaria com junta seca, simplificando o seu processo construtivo e diminuindo o tempo de construção. Neste caso, o travamento dos BTC é garantido por um sistema de encaixe (ver Fig. 1).

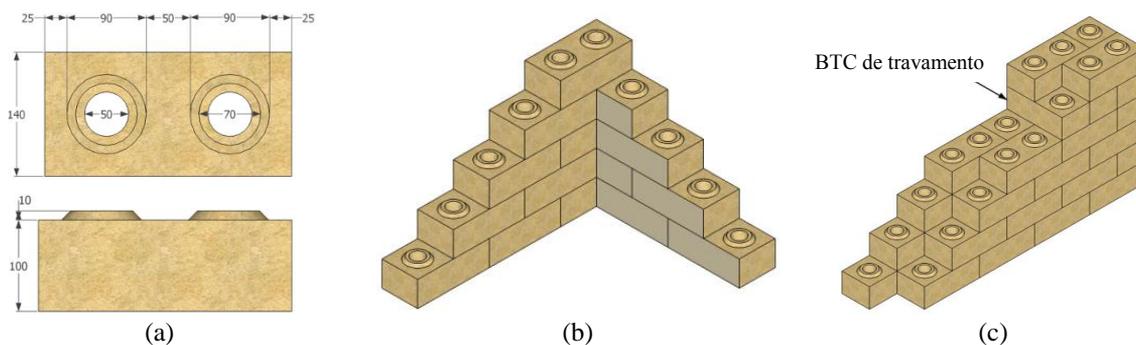


Fig. 1 – Sistema construtivo da alvenaria de BTC (Sturm et al. n/p): (a) geometria dos BTC (em mm); (b) parede de pano simples; (c) parede de pano duplo.

2.2 - Materiais

O SRG utilizado no fabrico dos BTC foi recolhido da localidade de Louredo em Guimarães e as suas propriedades foram analisadas em termos de granulometria (LNEC E196), limites de consistência (NP 143), baridade seca máxima e teor ótimo em água (LNEC E197). A Fig. 2 apresenta a curva granulométrica do SRG e compara-a com a envolvente recomendada por Houben e Guillaud (2008) para fabrico de BTC. Observa-se que o solo apresenta percentagem de finos insuficiente, especialmente no que diz respeito à argila, cuja percentagem é de cerca de 4%. De uma percentagem de argila tão baixa espera-se problemas no processo de fabrico, nomeadamente na obtenção de uma coesão inicial dos BTC para a sua desmoldagem e manuseamento imediatos. A falta de resistência dos BTC é outra consequência esperada desta situação. A insuficiência da percentagem de argila é também identificável através dos limites de consistência, onde não foi

possível determinar o limite de plasticidade e o limite de liquidez é de cerca de 28%, classificando o SRG de não plástico. O valor obtido para o teor ótimo em água foi de cerca de 12% e para a baridade seca máxima foi de cerca de $1,71 \text{ g/cm}^3$, o que também indica que os BTC fabricados com o solo natural poderão apresentar resistência mecânica insuficiente. De acordo com Doat et al. (1991) o uso de um solo com uma baridade seca máxima entre $1,65 \text{ g/cm}^3$ e $1,76 \text{ g/cm}^3$ resulta, provavelmente, num

material de terra com desempenho bastante fraco. Assim, verifica-se a inadequabilidade do SRG recolhido para o fabrico de BTC no seu estado natural, pelo que estabilização química é necessária.

Tal como referido anteriormente, a estabilização dos BTC foi realizada através da ativação alcalina de cinza volante. A cinza volante foi obtida da central termoelétrica PEGOP, e é caracterizada por uma baixa percentagem de cálcio (tipo F) e por uma massa disponível para dissolução (Si e Al) de cerca de 71%. O ativador alcalino utilizado é constituído por uma mistura de hidróxido de sódio com silicato de sódio. O hidróxido de sódio foi originalmente adquirido em estado sólido com uma baridade de cerca de $2,13 \text{ g/cm}^3$ (a 20°C) e grau de pureza de cerca de 95-99%. Este material foi dissolvido em água de forma a obter-se uma concentração de cerca 12,5 molal antes de ser misturado com o silicato de sódio. O silicato de sódio foi adquirido em solução com uma densidade relativa de cerca de 1,45, uma percentagem

de óxido de sódio (Na_2O) de cerca de 13% e rácio $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ de cerca de 2.

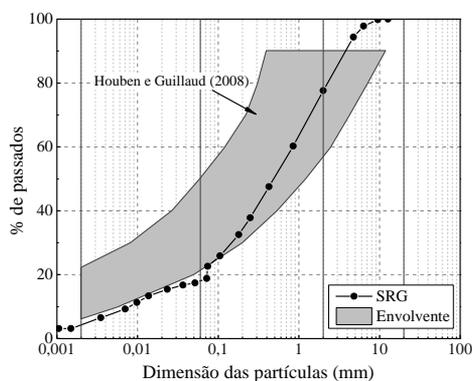


Fig. 2 – Curva granulométrica do SRG e comparação com a envolvente recomendada para BTC por Houben e Guillaud (2008).

uma misturadora de pás giratórias com eixo vertical. O procedimento da mistura foi o seguinte: (i) mistura a seco dos materiais sólidos até se dar a sua homogeneização (cerca de 5 min); (ii) adição do ativador e continuação da mistura até se dar novamente a homogeneização (cerca de 5 min). Cada mistura foi utilizada no fabrico de dez BTC, totalizando 80 por composição. A massa de mistura de cada BTC foi controlada com o objetivo de promover uma uniformização de características. O manuseamento dos BTC foi possível imediatamente após a sua compactação, mostrando que a consistência das misturas e a percentagem adicionada de finos (cinza volante) foi adequada.

Tabela 1 – Composições utilizadas na composição.

Mistura	Solo (%)	Cinza (%)	A/S (-)	Sil./Hidr. (-)	$\text{Na}_2\text{O}/\text{cinza}$ (-)
SFA10	90,0	10,0	0,134	0,5	0,250
SFA15	85,0	15,0	0,137	0,5	0,170

2.3 - Fabrico dos BTC

As composições utilizadas no fabrico dos BTC são apresentadas na Tabela 1, cuja seleção é baseada num estudo prévio (Soares 2013), onde estas apresentarem, aparentemente, trabalhabilidade e resistência mecânica adequadas ao fabrico de BTC. Note-se que a percentagem de cinza é a variável principal na distinção das duas misturas, onde SFA10 e SFA15 incorporam 10% e 15% deste material, respetivamente. Além disto, o rácio A/S (ativador/sólidos) foi definido de forma a ser um pouco superior ao teor ótimo em água do solo, para ter-se em consideração a adição das partículas finas que constituem a cinza na trabalhabilidade das misturas. Em ambas as misturas, o rácio entre a solução de silicato de sódio e a de hidróxido de sódio foi de 0,5.

Uma prensa manual, com designação Terstaram (Bélgica), foi utilizada no fabrico dos BTC, cuja pressão de compactação é superior a 2 N/mm^2 (Fig. 3). As misturas foram preparadas com o solo seco ao ar e sem qualquer peneiração das partículas mais grossas, com recurso a



Fig. 3 – Fabrico de um BTC na prensa Terstaram.

Os BTC foram colocados a curar no chão durante 3 dias, após os quais foram empilhados numa paleta e armazenados expostos ao ar no interior do laboratório, onde a temperatura ambiente média é de cerca de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Durante a cura observou-se a ocorrência de eflorescências na superfície exposta dos BTC, o que teve apenas impacto visual, alterando a sua cor de cinzento para cinzento claro.

2.4 - Procedimentos de ensaio

O programa experimental incluiu a realização de ensaios mecânicos dos BTC e da respetiva alvenaria de pano simples, após um período de cura de cerca de 180 dias. Os BTC foram ensaiados à compressão e à flexão (três pontos), enquanto a alvenaria foi ensaiada à compressão e ao corte. Foram

realizados ensaios em BTC secos e em BTC saturados traduzindo condições extremas de presença de humidade. A saturação dos BTC foi conseguida através da sua submersão em água por um período superior a 24 h e até 30 min antes do respetivo ensaio. Este procedimento visou avaliar a sensibilidade dos BTC à presença de água.

Os ensaios de compressão dos BTC foram realizados segundo o procedimento preconizado na norma EN 772-1, mas através da aplicação da carga em controlo de deslocamento com velocidade de $4 \mu\text{m/s}$. Para cada composição e condição de humidade foram ensaiados 4 provetes num total de 16. As chapas de base e de topo do molde da prensa foram utilizados nos ensaios, por forma evitar-se a retificação dos BTC devido ao seu sistema de encaixe (Fig. 4a).

Os ensaios de flexão foram realizados segundo o procedimento preconizado na norma EN 772-6, mas tendo em consideração alguns ajustes previstos em Standards Australia (2002). Os provetes foram colocados em apoios cilíndricos distando entre si cerca de 220 mm e a carga foi aplicada a meio vão em controlo de deslocamento com velocidade de $2 \mu\text{m/s}$. De forma a garantir-se a rotura na secção de meio vão (evitando-se secções na zona de aligeiramento) foram realizados entalhes nesta secção com uma profundidade e largura de cerca de 10 mm e 3,5 mm, respetivamente (Fig. 4b). Foram ensaiados 4 provetes por composição e condição de humidade, num total de 16.

O comportamento à compressão da alvenaria de BTC de ambas as composições foi avaliado através de ensaios de compressão em prismas de alvenaria de junta seca, constituídos por 5 BTC secos ao ar. Os ensaios foram realizados seguindo o procedimento da norma ASTM C1314-03b, mas aplicando a carga em controlo de deslocamento com velocidade de $5 \mu\text{m/s}$. Os deslocamentos

verticais entre o segundo e o quarto BTC de cada prisma foram medidos em ambas as faces através de LVDTs (Fig. 5a). Foram ensaiados 4 prismas por composição.



(a)



(b)

Fig. 4 – Ensaio mecânicos dos BTC: (a) compressão; (b) flexão.

O comportamento ao corte da alvenaria de BTC foi avaliado através de ensaios de corte em prismas constituídos por três BTC empilhados, seguindo um procedimento semelhante ao preconizado na norma EN 1052-3 (Fig. 5b). Os ensaios foram realizados para três níveis constantes de tensão de compressão, nomeadamente $0,20 \text{ N/mm}^2$, $0,60 \text{ N/mm}^2$ e $0,85 \text{ N/mm}^2$. Os primeiros dois níveis são os previstos na respetiva norma para unidades com resistência superior a 10 N/mm^2 , enquanto o último nível teve de ser ligeiramente reduzido devido a limitações de capacidade de carga do atuador vertical utilizado. A aplicação da força de corte foi efetuada com um atuador horizontal, em controlo de deslocamento com velocidade de $10 \mu\text{m/s}$.

O deslocamento horizontal do BTC intermédio foi medido por 2 LVDTs, e os deslocamentos verticais foram medidos por 2 LVDTs em cada face dos prismas (ver Fig. 5b). Foram ensaios três provetes por nível de carga e composição, totalizando 18 ensaios.

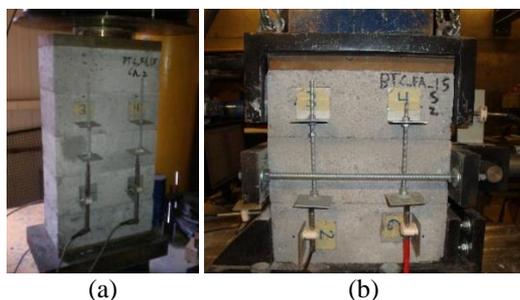


Fig. 5 – Ensaios mecânicos da alvenaria de BTC: (a) compressão; (b) corte.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Ensaios de compressão (BTC)

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de compressão dos BTC em termos de valores médios da respetiva densidade (γ_b), resistência à compressão em condições de secagem ao ar ($f_{c,b}^d$) e saturada ($f_{c,b}^s$). Note-se que todos os valores de resistência à compressão apresentados neste artigo foram calculados com base na área de secção líquida dos BTC.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de compressão dos BTC (coeficiente de variação entre parenteses).

Mistura	γ_b (kg/m ³)	$f_{c,b}^d$ (N/mm ²)	$f_{c,b}^s$ (N/mm ²)
SFA10	1810 (1%)	8,8 (11%)	5.6 (10%)
SFA15	1854 (1%)	12,0 (11%)	8,0 (21%)

Os valores da resistência à compressão dos BTC fabricados com a mistura SFA15 foram superiores, 1,36 vezes e 1,42 vezes para $f_{c,b}^d$ e $f_{c,b}^s$, respetivamente. Esta superioridade é essencialmente explicada pela incorporação de uma percentagem maior de ligante geopolimérico, embora a densidade dos BTC da mistura SFA15 seja também ligeiramente superior. Os valores obtidos para $f_{c,b}^d$ são bastante elevados quando comparados com valores típicos de BTC estabilizados (Walker e Stace 1997). Em geral, a consulta de recomendações internacionais (normativas e não normativas) mostra que a resistência à compressão mínima de BTC deve se ser superior 2 N/mm², o que corresponde ao caso de ambas as misturas. Segundo a

norma espanhola UNE 41410, os BTC de ambas as composições podem ser classificados como de classe BTC 5, já que a sua resistência é muito superior a 5 N/mm². Note-se que esta é a maior classe de resistência prevista na norma, existindo ainda uma larga margem para otimização das misturas relativamente ao ativador alcalino, e portanto do seu custo e impacto ambiental.

Relativamente à influência da presença de água, observou-se que a redução de resistência à compressão resultante da saturação dos BTC foi semelhante para ambas as misturas, em que o fator de redução ($f_{c,b}^d/f_{c,b}^s$) varia entre 0,64 e 0,67. Porém, os valores obtidos para $f_{c,b}^s$ são ainda bastante elevados para BTC.

O modo de rotura dos BTC secos ao ar e saturados foram semelhantes, caracterizando-se pela formação de uma geometria tronco-piramidal promovida pelo efeito de confinamento dos pratos de ensaio (Fig. 6a).

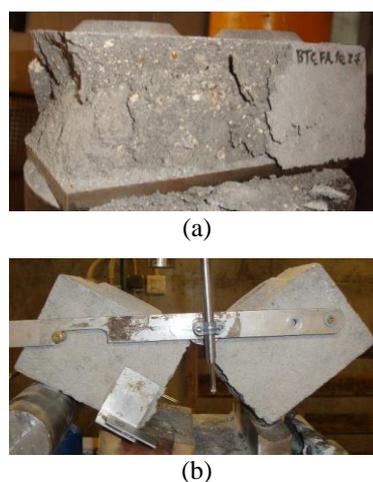


Fig. 6 – Modo de rotura dos BTC ensaiados à: (a) compressão; (b) flexão.

3.2 - Ensaios de flexão (BTC)

Os resultados dos ensaios de flexão são apresentados na Tabela 3, em que $f_{b,b}^d$ e $f_{b,b}^s$ são os valores médios da resistência à flexão dos BTC secos ao ar e saturados, respetivamente. Tal como seria de esperar, também os valores da resistência à flexão dos BTC da mistura SFA15 foram superiores, 1,28 e 1,57 vezes para $f_{b,b}^d$ e $f_{b,b}^s$, respetivamente. Esta propriedade é pouco

abordada em recomendações internacionais, porém a norma neozelandesa NZS 4298 exige um valor mínimo de $0,25 \text{ N/mm}^2$, que é largamente excedido por ambas as misturas. No caso desta norma, a resistência à flexão pode ser usada para verificar a conformidade dos BTC, em vez da resistência à compressão. Assim, segundo a norma NZS 4297, a resistência à compressão pode ser estimada como 3,5 vezes a resistência à flexão, correspondendo a uma subestimativa no caso dos BTC em estudo em que esta relação é de 4,9 e 5,2 para SFA10 e SFA15, respetivamente.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de flexão dos BTC (coeficiente de variação entre parenteses).

Mistura	γ_b (kg/m^3)	$f'_{b,b}$ (N/mm^2)	$f_{b,b}$ (N/mm^2)
SFA10	1810 (1%)	1,8 (14%)	0,7 (36%)
SFA15	1854 (1%)	2,3 (11%)	1,1 (9%)

A redução de resistência à flexão induzida pela saturação dos BTC também foi bastante significativa, sendo o fator de redução de 0,40 e 0,49 para SFA10 e SFA15, respetivamente. A rotura dos BTC secos ao ar ocorreu de um modo muito frágil, onde o colapso do provete foi instantâneo após uma fase plástica muito ligeira (ver Fig. 6b). Já a rotura dos BTC saturados ocorreu de uma forma mais suave.

3.3 - Ensaios de compressão (prismas)

Os resultados dos ensaios de compressão dos prismas de alvenaria são apresentados sumariamente na Tabela 4, em termos de valor médio da resistência à compressão ($f_{c,p}$) e do módulo de elasticidade ($E_{0,p}$). Este último parâmetro foi calculado por correlação linear da curva tensão-extensão entre 5% a 30% da resistência à compressão de cada prisma. Os valores para $f_{c,p}$ mostram, como seria de esperar, que a resistência da alvenaria obtida com a mistura SFA15 é superior. No entanto, existe uma forte redução de resistência relativamente à resistência à compressão dos BTC, cujo fator de redução é de cerca de 0,39 para ambas as

misturas. Este valor mostra que a utilização da norma NZS 4297 conduz a uma sobrestimava da resistência à compressão da alvenaria, em que esta é considerada como metade da resistência à compressão dos BTC, e portanto pode levar a problemas de segurança quando usada para dimensionamento. Esta diferença está, provavelmente relacionada com o facto de a alvenaria ser de junta seca, levando à existência de concentração de tensões em protuberâncias das superfícies de contacto, que danificam e enfraquecem a alvenaria durante o carregamento. O módulo de elasticidade dos prismas é também bastante semelhante em ambas as misturas, mas o valor da mistura SFA10 é ligeiramente superior. Este resultado inesperado está provavelmente relacionado com o facto da deformação da alvenaria se concentrar nas juntas secas e portanto depende do contato entre BTC e do ajuste de imperfeições durante o carregamento. As curvas tensão-extensão referidas anteriormente são apresentadas na Fig. 7, onde é possível observar-se uma fase inicial que se pensa estar relacionada com o ajuste dos contatos entre BTC.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de compressão dos prismas (coeficiente de variação entre parenteses).

Mistura	$f_{c,p}$ (N/mm^2)	$E_{0,p}$ (N/mm^2)
SFA10	3,3 (15%)	551 (16%)
SFA15	4,6 (9%)	463 (8%)

O modo de rotura dos prismas de ambas as composições é caracterizado por um padrão de fendilhação distribuído nos três BTC intermédios (ver Fig. 8). As fendas desta zona parecem desenvolver-se de uma forma contínua de BTC para BTC, demonstrando capacidade de transmissão de tensões de tração e corte. Os BTC em contato com os pratos de ensaio apresentaram pouca fendilhação, o que se deve provavelmente ao confinamento introduzido por estes, mas observou-se algum destacamento de material. Além disto, observou-se algumas formas de dano localizado nos prismas, nomeadamente

destacamento dos cantos dos BTC e esmagamento próximo das juntas.

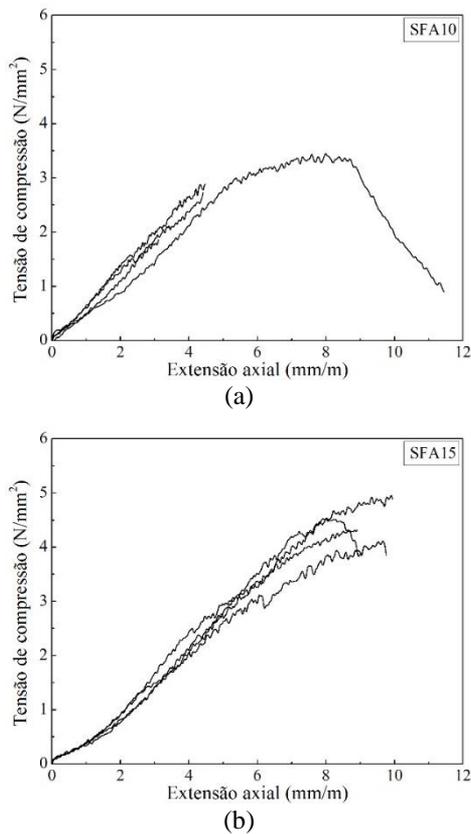


Fig. 7 – Curvas tensão-extensão dos prismas ensaiados à compressão: (a) SFA10; (b) SFA15.



Fig. 8 – Modo de rotura de um dos prismas ensaiados à compressão (SFA15).

3.4 - Ensaios de corte (prismas)

Os resultados dos ensaios de corte são apresentados na Fig. 9, em termos de curvas tensão de corte – deslocamento horizontal (de um provete representativo de cada nível de carga e mistura), e na Fig. 10, em termos da relação entre a resistência ao corte e a tensão de compressão instalada (confinamento). Relativamente aos prismas da mistura SFA15 mostra-se que esta relação é praticamente linear, mas o mesmo não se

sucedo no caso da mistura SFA10. Pensa-se que este comportamento inesperado está relacionado com a ocorrência de esmagamento e desgaste excessivos nas superfícies de contacto dos prismas (SFA10) ensaiados com tensão de confinamento de $0,85 \text{ N/mm}^2$. Isto significa que este nível de tensão de compressão foi exagerado para a resistência dos respetivos BTC e levou a uma ligeira redução da resistência de corte relativamente ao nível anterior.

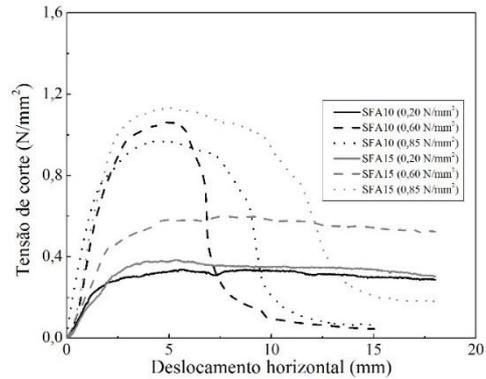


Fig. 9 – Curvas tensão de corte – deslocamento horizontal.

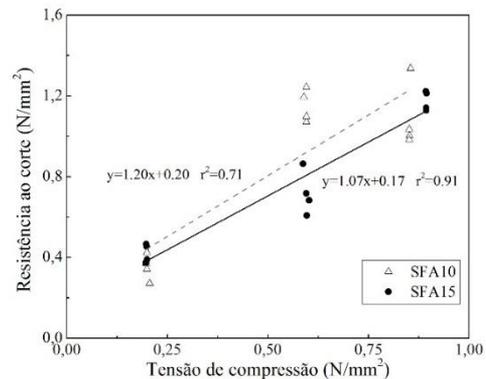


Fig. 10 – Relação entre a resistência ao corte e o nível de tensão de compressão.

Os prismas da mistura SFA10 também revelam, inesperadamente, uma maior resistência ao corte para um mesmo nível de tensão de confinamento. No entanto, a resistência ao corte dos prismas da mistura SFA15 parece ainda ser capaz de aumentar para valores superiores do nível de compressão, não parecendo sofrer ainda de esmagamento e desgaste excessivos. Apesar disto, as regressões lineares apresentadas na Fig. 10 permitem estimar a resistência ao corte inicial como sendo $0,20 \text{ N/mm}^2$ e $0,17 \text{ N/mm}^2$ no caso da mistura SFA10 e SFA15, respetivamente. Estes valores não nulos correspondem à contribuição do

sistema de encaixe para a resistência ao corte da alvenaria. O coeficiente de atrito ($\tan\phi$) também foi estimado como 1,20 e 1,07 para os casos da mistura SFA10 e SFA15, respetivamente. Estes valores são bastante elevados quando comparados com o valor de 0,4 proposto no Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1).

A Fig. 11 apresenta curvas deslocamento vertical – deslocamento horizontal de provetes representativos de cada nível de compressão e mistura, sendo assinalado o respetivo ponto de tensão de corte máxima. De uma forma geral, as curvas do nível de compressão $0,20 \text{ N/mm}^2$ exibem inicialmente deslocamento vertical negativo (aproximação dos pontos de medição) que depois passa a positivo (afastamento dos pontos de medição). Pensa-se que este comportamento inicial se deva a algum nível de ajuste dos BTC antes de ocorrer a solicitação dos encaixes, que passam a obrigar os BTC a afastarem-se devido a um nível de compressão insuficiente.

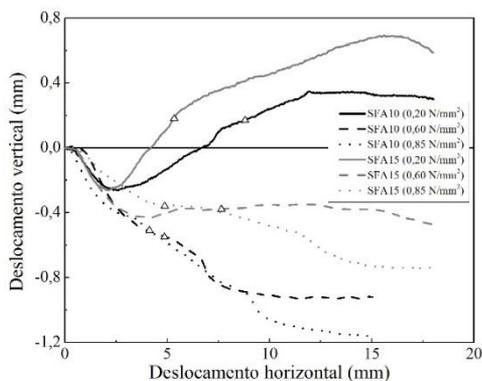


Fig. 11 – Curvas deslocamento vertical – deslocamento horizontal.

Por outro lado, nos dois níveis de compressão seguintes o deslocamento vertical segue o sentido negativo, devido ao esmagamento e desgaste das superfícies de contacto. Este deslocamento é naturalmente mais evidente para o nível de compressão maior. Além disto, os prismas da mistura SFA10 experienciaram deslocamentos verticais negativos bastante superiores aos dos da mistura SFA15, sugerindo a ocorrência do esmagamento e

desgaste excessivos das superfícies de contato, tal como referido anteriormente.

O modo de rotura típico dos prismas é ilustrado na Fig. 12, onde se mostra que o bloco intermédio desliza entre os restantes. Após desmonte dos prismas, observou-se que houve em geral rotura de um ou de ambos os encaixes dos BTC, evidenciando a sua contribuição para o comportamento ao corte. Também foi possível observar-se o desgaste nas superfícies de contato. Porém o contacto entre BTC não foi completo e dependeu do nível de compressão do ensaio, i. e., quanto maior, maior a área de contato. Em geral, as superfícies de contato ocorreram ao longo dos bordos, explicando a existência de esmagamento de material nestas zonas em alguns dos prismas ensaiados com o maior nível de compressão. Esta situação indica que provavelmente os BTC em estudo são demasiados rígidos para serem utilizados em alvenaria de junta seca e que a utilização de uma argamassa de assentamento permitiria melhorar o comportamento ao corte.



Fig. 12 – Modo de rotura típico dos prismas ensaiados ao corte.

4- CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma campanha experimental onde é estudado o comportamento mecânico de uma solução de alvenaria de BTC de junta seca. Os BTC foram fabricados com um SRG do norte de Portugal e estabilizados com ativação alcalina de cinza volante, recorrendo-se a duas composições com diferentes percentagens de cinza (SFA10 e SFA15).

Os ensaios mecânicos realizados nos BTC mostraram que quanto maior for a

percentagem de geopolímero incorporada, maior será a resistência. Além disto, os níveis de resistências conseguidas mostraram ser muito superiores aos exigidos em normas internacionais para BTC. A presença de água nos BTC também mostrou promover uma forte redução da sua resistência, contudo os valores de resistência obtidos para a condição saturada continuaram a ser bastante aceitáveis.

Os ensaios de compressão realizados nos prismas de alvenaria mostraram que houve uma importante redução da resistência à compressão da alvenaria relativamente à dos BTC. A relação encontrada em normas internacionais para dimensionamento sobrestima este valor, pelo que se recomenda adotar um fator de redução inferior a 0,39 para este caso.

Os ensaios de corte mostraram alguns problemas relativos aos BTC da mistura SFA10, onde os níveis de compressão foram demasiado elevados, levado a esmagamento e desgaste excessivos das superfícies de contato. Os parâmetros de resistência ao corte dos prismas de ambas as misturas apresentaram valores bastante elevados, apesar de se observar que o contato entre BTC foi deficiente. Esta última observação demonstra ainda a necessidade de utilização de uma argamassa de assentamento.

Em geral, a ativação alcalina de cinza volante demonstrou promover excelentes resultados relativamente ao melhoramento do desempenho mecânico dos BTC fabricados com SRG. Isto significa que existe uma grande margem para otimização das misturas relativamente ao seu custo e impacto ambiental, que deverá ser abordado em investigação futura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento concedido pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT)

através do projeto FCOMP-01-0124-FEDER-028864 (FCT-PTDC/ECM-EST/2396/2012) e à PEGOP-Energia Eléctrica SA pela disponibilização da cinza volante. Agradece-se também ao Pedro Esteves a ajuda prestada nos ensaios.

REFERÊNCIAS

- AEI 2005. Earthquake resistant buildings with hollow interlocking blocks, Auroville Earth Institute, UNESCO Chair - Earth Architecture.
- ASTM C1314-03b: American Society for Testing and Materials. 2003. Standard test method for compressive strength of masonry prisms.
- Barbosa, N. and Mattone, R. 2002. Building with raw earth, I Seminário Ibero-Americano de Construção com terra, Salvador, Brasil, p. 41-50.
- Cristelo, N., Glendinning, S. e Teixeira Pinto, A. 2011. Deep soft soil improvement by alkaline activation, Proc ICE – Ground Improv, 164, p. 73-82.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., Teixeira Pinto, A. 2012a. Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation, Construction and Building Materials, 29, p. 167-174.
- Cristelo, N.M., Glendinning, S., Miranda, T.F., Oliveira, D.V. e Silva, R.A. 2012b. Soil Stabilisation using Alkaline Activation of Fly Ash for Self Compacting Rammed Earth Construction, Construction and Building Materials, 36, p. 727-735.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk S. e Vitoux, F. 1991. Building with earth, The Mud Village Society, New Delhi, India.
- EN 1052-3: EUROPEAN STANDARD. 2002. Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength.
- EN 1996-1-1: EUROPEAN STANDARD. 2005. Eurocode 6: design of masonry structures - part 1-1: common rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
- EN 772-1: EUROPEAN STANDARD. 2011. Methods of test for masonry units. Part 1: Determination of compressive strength.
- EN 772-6: EUROPEAN STANDARD. 2002. Methods of test for masonry units. Part 6: Determination of bending tensile strength of aggregate concrete masonry units.

Caraterização do comportamento ao corte de alvenaria de blocos de terra compactada com junta seca

- Gomes, I. 2008. Construção sísmo-resistente em terra crua. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- Houben, H. e Guillaud, H. 2008. Earth Construction: A Comprehensive Guide, CRATerre – EAG, Intermediate Technology Publication, London. ISBN 978-1-85339-193-4.
- Jaquin, P.A. 2013. One third of world's population live in earth buildings? <http://historicrammedearth.com/one-third-of-worlds-population-live-in-earth-buildings> (11/10/2013).
- Lax, C. 2010. Life cycle assessment of rammed earth. Tese de Mestrado, Universidade de Bath.
- LNEC E196: LNEC. 1966. Análise granulométrica.
- LNEC E197: LNEC. 1967. Ensaio de compactação.
- Minke, G. 2001. Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth, GATE-BASIN (Building Advisory Service and Information Network) at GTZ GmbH, Eschborn, Germany.
- NP 143: LNEC. 1969. Solos: determinação dos limites de consistência.
- NZS 4297: New Zealand Standard. 1998. Engineering design of earth buildings.
- NZS 4297: New Zealand Standard. 1998. Materials and workmanship for earth buildings.
- NZS 4297: New Zealand Standard. 1998. Earth buildings not requiring specific design.
- Pacheco-Torgal, F. e Jalali, S. 2012. Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction, *Construction and Building Materials*, 29, p. 512-519.
- Ramos, L.F., Mendonça, P., Camões, A., Sturm, T., Eires, R., Reis, P., Sousa, J. e Vasconcelos, G. 2011. As paredes divisórias num sistema integrado de alvenaria estrutural em BTC, Seminário sobre Paredes Divisórias, Portugal.
- Reddy, B.V.V. and Kumar, P.P. 2010. Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. *Energy and Buildings*, 42, p. 380-385.
- Roy, D.M. 1999. Alkali-activated cements opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, 9 (2), p. 249-254.
- Silva, R.A., Oliveira, D.V., Miranda, T., Cristelo, N., Escobar, M.C. e Soares, E. 2013. Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal, *Construction and Building Materials*, 47, p. 181-191.
- Soares, E. 2013. Melhoria do solo residual granítico com recurso à ativação alcalina de cinzas volantes. Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Standards Australia, 2002. HB 195 - The Australian earth building handbook, Walker, P. and Standards Australia, Austrália.
- Sturm, T., Ramos, L.F. e Lourenço, P.B. (n/p). Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks, artigo submetido a *Materials and Structures*.
- UNE 41410: AENOR. 2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques – Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- Walker, P.J. e Stace, T. 1997. Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars, *Materials and Structures*, 30, p. 545-551.