



HABITAÇÃO, CIDADE, TERRITÓRIO E DESENVOLVIMENTO

Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono
2º CIHEL - LNEC - LISBOA - PORTUGAL - 13 A 15 MARÇO 2013

CARACTERIZAÇÃO DE BETÃO COM TERRA PARA APLICAÇÃO EM CONSTRUÇÃO MODULAR PREFABRICADA

Earth-concrete to precast modular building system

Paulina Faria¹, Vitor Silva², Cátia Abreu³, Catarina Pereira⁴



Prof. Paulina Faria

DEC – FCT UNL

Caparica - Portugal



Eng. Vitor Silva

DEC – FCT UNL

Caparica - Portugal



Lic. Cátia Abreu

DEC – FCT UNL

Caparica - Portugal



Arq. Catarina Pereira

DEC – FCT UNL

Caparica - Portugal

¹Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Prof. Associado, 2829-516 Caparica, paulina.faria@fct.unl.pt)

²Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Bolseiro, 2829-516 Caparica, vmd.silva@fct.unl.pt)

³Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestranda, 2829-516 Caparica, catiabreu@gmail.com)

⁴Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Bolseira, 2829-516 Caparica, cs.pereira@campus.fct.unl.pt)

Palavras-chave: betão, cimento, agregado, solo, caracterização, sustentabilidade

Resumo

Um betão é tradicionalmente efetuado a partir de uma mistura de agregados (britas) com cimento como ligante e água. No entanto, é possível realizar betões com outros agregados. O próprio solo pode ser utilizado como agregado, pelo menos parcialmente, em misturas que se designam por betão com terra.

No âmbito de um projeto QREN (Parede Ecoestrutural) que decorre em co-promoção entre a empresa ESLAM e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, estão a ser realizados estudos com vista ao desenvolvimento de soluções modulares prefabricadas para a execução de construção de pequeno porte, especialmente vocacionadas para países com necessidades prementes de construção. Entre outras tarefas, realizou-se um estudo em que se procurou caracterizar betões com terra (solo), mais sustentáveis e ecológicos, face a um betão convencional correntemente utilizado pela empresa. Para esse efeito, realizaram-se provetes de três betões com diferentes teores de cimento, solo e brita, que foram caracterizados e comparados com um betão de referência, realizado apenas com agregados correntes.

Neste artigo apresentam-se e discutem-se as características obtidas com as três composições de betão com terra, avaliando o efeito que maior ou menor percentagem de solo versus agregado corrente, e de cimento versus agregado com determinada percentagem de solo, pode introduzir no betão, em termos mecânicos e face à ação da água, com vista a potenciar a sua utilização na prefabricação de painéis modulares para construção de pequeno porte.

Verifica-se que os betões com terra com composições A e B apresentam valores muito semelhantes entre si na maioria das caracterizações efetuadas, muito embora a composição A seja a que contém traço cimento:agregado comparável ao do betão-padrão e o dobro de proporção de solo na fração de agregado

utilizado; no entanto a composição B consegue atingir valores comparáveis com um traço em cimento:agregado mais fraco. Considera-se que betões do tipo dos A e B ensaiados podem ainda ser otimizados, mas parecem ser viáveis como betões mais sustentáveis para aplicação em prefabricação.

1. INTRODUÇÃO

Um betão é tradicionalmente efetuado a partir de uma mistura de agregados (britas) com cimento como ligante e água. No entanto, é possível realizar betões com outros agregados. O próprio solo pode ser utilizado como agregado, pelo menos parcial, em misturas que se designam por betão com terra.

As misturas de cimento e solo são geralmente estudadas ao nível do denominado solo-cimento, frequentemente utilizado para trabalhos geotécnicos, para a execução de taipa estabilizada com cimento ou para a execução de blocos de terra comprimida também estabilizados com cimento para a execução de alvenarias resistentes [1, 2, 3, 4]; no entanto, não são frequentes estudos sobre betão com solo, como é o caso que se apresenta neste artigo. São também frequentes estudos que relevam as vantagens térmicas, energéticas e ao nível da sustentabilidade de elementos construtivos com terra [5, 6, 7].

Este estudo enquadra-se num projeto mais abrangente, inserido no âmbito de investigação aplicada realizada num projeto QREN, em co-promoção entre a empresa ESLAM e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, com vista ao desenvolvimento de soluções modulares prefabricadas para a execução de construção de pequeno porte, especialmente vocacionada para aplicação em regiões com défice de construção. Nesta fase estão a ser desenvolvidos e caracterizados betões com solo, comparativamente a um betão corrente, para a execução de painéis modulares ecoestruturais para paredes. Esses painéis de betão, corrente ou mais ecológicos, serão complementados em obra com materiais locais que contribuam para o aumento da resistência térmica das paredes. Todo o sistema está a ser, em paralelo, desenvolvido ao nível da otimização da modulação e das soluções construtivas ao nível de ligações e complementos a executar em obra, adequação às necessidades e especificidades de construção de alguns mercados alvo da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa, modulação e dimensionamento estrutural.

No âmbito deste artigo apresentam-se e discutem-se as características obtidas com três composições de betão com terra, comparativamente às de um betão corrente para aplicação em estrutura laminar modular, e avalia-se o efeito que maior ou menor percentagem de solo versus agregado corrente, e de cimento versus agregado com determinada percentagem de solo, pode introduzir no betão, em termos de comportamento mecânico e face à água, para avaliação do comportamento com vista a potenciar a sua utilização na prefabricação de painéis modulares para construção de pequeno porte.

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para avaliar a viabilidade de betões com solo, realizaram-se três betões com incorporação de cimento, solo e brita, que foram caracterizados e comparados com um betão de referência, realizado apenas com agregados correntes. Para a execução dos betões utilizou-se o cimento CEM II/B-L 32,5N, uma brita nº1 de origem calcária e um solo argiloso.

O betão de referência foi realizado com uma composição designada por P (padrão), constituída pela proporção em massa de 1:2:2 de cimento, areia e brita. Os betões com terra realizaram-se com três composições escolhidas pela empresa que produz elementos prefabricados de betão; entre eles varia o traço ponderal dos constituintes, tal como se apresenta no Quadro 1.

Como se pode aferir a partir desse quadro, de entre as composições de betão com terra, a composição A é a única que apresenta um traço cimento:agregado comparável ao do betão corrente utilizado usualmente pela empresa. Com efeito, a composição B apresenta um traço um pouco mais fraco em ligante e a C um traço muito mais fraco em ligante. No entanto, a proporção entre a brita e o solo utilizados como agregado é a mesma entre as composições B e C, sendo a proporção de solo no agregado o dobro no caso da composição A.

Quadro 1: Composição ponderal dos betões analisados

| Betão | Cimento:Solo:Brita | Cimento:Agregado(solo+brita) | Brita:Solo |
|-------|------------------------|------------------------------|------------|
| A | 1:3:1 | 1:4 | 1:3 |
| B | 1:3:2 | 1:5 | 1:1,5 |
| C | 1:6:4 | 1:10 | 1:1,5 |
| P | 1:2:2 [ci:areia:brita] | 1:4 [ci:ag.(areia+brita)] | - |

Com cada composição de betão realizaram-se três provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura e três lajetas retangulares com dimensões de 50 x 30 x 5 (cm). Os operários que executaram os provetes referiram ter mais dificuldades na execução e betonagem do betão C, comparativamente aos betões A e B e ao betão-padrão corrente P. Em cortes efetuados aos provetes para preparação de provetes de menores dimensões para a realização de alguns ensaios, verificou-se que os betões de composições A e B apresentavam-se mais homogêneos, com o solo bem distribuído na pasta de ligante, enquanto o betão C se apresentava com torrões de solo de grande dimensão, que chegavam a atingir 5 cm de maior dimensão, demonstrando um menor cuidado, talvez devido à maior dificuldade sentida na preparação dos materiais, homogeneização para a preparação do betão e na betonagem dos provetes.

Os provetes de betão com terra permaneceram em cura durante 10 meses a cerca de $70\pm 5\%$ de humidade relativa e $20\pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura e foram, até à data, utilizados para a realização de diversos ensaios. Neste artigo serão apresentados apenas alguns dos resultados obtidos a partir das lajetas: em termos de condutibilidade térmica, módulo de elasticidade dinâmico através de ultrassons, resistência à flexão em três pontos e à compressão, absorção de água sobre baixa pressão (pela utilização de tubos de Karsten), absorção de água por ascensão capilar e secagem. Os resultados de cada ensaio derivam da média obtida das medições efetuadas num mínimo de três provetes de cada composição.

O estudo de caracterização destes betões com terra ainda se encontra em curso, estando todos os resultados obtidos com os provetes cilíndricos ainda em fase de tratamento de dados, o mesmo acontecendo com os resultados dos ensaios de resistência superficial por esclerómetro pendular, estabilidade dimensional térmica e hídrica. Alguns provetes e equipamentos estão a ser preparados para serem realizados os ensaios de resistência à compressão simples e diametral (provetes cilíndricos secos e húmidos), resistência à abrasão seca (desgaste a seco), resistência à ação de um jacto de água, determinação da porosidade e resistência à ação de sais. Também ainda por tratar encontram-se os resultados da caracterização da fração fina do solo por sedimentação e a análise por difração de raios X.

2.1 Caracterização do solo

A preparação da amostra de solo seguiu a Especificação de Ensaio E 195 [8] do LNEC. A análise granulométrica foi realizada com base nas Especificações de Ensaio E 196[9] e E239[10], também do LNEC. Apresenta-se, na Figura 1, a respetiva curva granulométrica, que mostra uma distribuição granulométrica extensa, com a maior parte das partículas com dimensão entre 0,1 mm e 1 mm.

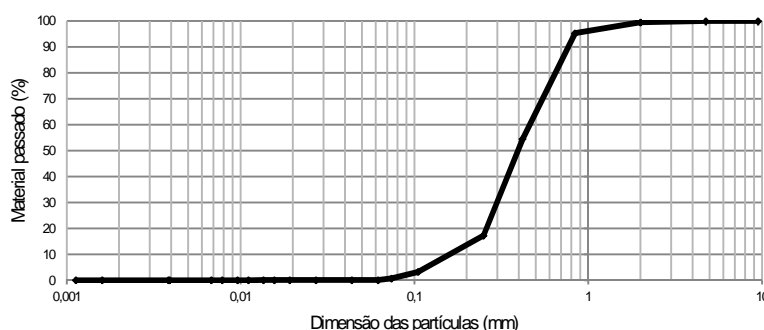


Figura 1: Curva granulométrica do solo utilizado

2.2 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica dos provetes de betão foi determinada através da utilização de um equipamento ISOMET 2104, com uma sonda de contacto superficial de 0,3-2,0 W/(m.°C) após os provetes terem permanecido pelo menos 48h a 65% de humidade relativa e 20°C de temperatura, de acordo com a Ficha de Ensaio 1 do DEC-FCT UNL [11]. Nas lajetas foram efetuadas seis determinações na face lisa (em contacto com o molde). Apresentam-se, no Quadro 2, as condutibilidades térmicas médias e desvios-padrão obtidos para cada betão e, na Figura 2a, o ensaio em curso. Consta-se que os betões com terra registam uma redução da condutibilidade térmica de 37%, 32% e 46% (betões A, B e C), com desvio-padrão baixo. Num painel com uma espessura de 10 cm, uma condutibilidade térmica da ordem das destes betões de terra comparativamente à do betão-padrão P significa um aumento da resistência térmica mínimo de 40%, o que será significativo no conforto térmico.

Quadro 2: Condutibilidade térmica, módulo de elasticidade dinâmico e resistências à tração por flexão e à compressão dos betões

| Betão | λ [W/(m.°C)] | | Rt [MPa] | | Rc [MPa] | | Ed [MPa] | |
|----------|----------------------|------|----------|------|----------|------|----------|-----|
| | Med | dp | Med | dp | Med | dp | Med | dp |
| A | 1,32 | 0,08 | 1,89 | 0,47 | 8,01 | 1,43 | 6664 | 520 |
| B | 1,43 | 0,08 | 1,59 | 0,31 | 7,05 | 1,68 | 7202 | 496 |
| C | 1,14 | 0,07 | 0,46 | 0,15 | 2,22 | 0,40 | 1482 | 115 |
| P | 2,10 | 0,10 | 4,69 | 0,69 | 16,18 | 2,26 | 14578 | 498 |



Figura 2: Ensaio de condutibilidade térmica (a) e de ultrassons (b)

2.3 Análise por ultrassons para determinação do módulo de elasticidade dinâmico

A análise por ultrassons foi efetuada através de um equipamento Proceq Pundit-Lab, de acordo com a Especificação de Ensaio 13 e a Ficha de Ensaio 2 do DEC-FCT UNL [12, 13]. Avaliaram-se as dimensões e massa de cada provete e marcaram-se seis pontos na face superior (lisa) de cada lajeta e três pontos em cada uma das faces laterais. Na face superior os pontos foram marcados a 5 cm das extremidades e distando 20 cm entre si; nas faces laterais menores os pontos foram marcados a meia altura da face distando 5 cm das extremidades e 10 cm entre si, e nas faces laterais maiores os pontos foram marcados a 5 cm das extremidades e distando 20 cm entre pontos a meia altura da face. Efetuaram-se medições entre os pontos da face superior (propagação indireta), entre as faces laterais maiores e entre as faces menores (propagações diretas). Em cada uma das três lajetas de cada betão procedeu-se a um total de 4x4 determinações na face superior em contacto com o molde, a diferentes distâncias, outras 4x4 determinações na face lateral maior da lajeta e outras 3x3 determinações na face lateral menor das lajetas, num total de 41 determinações por lajeta. Cada determinação resultou de três leituras em cada ponto.

Com base nos resultados do tempo de propagação das ondas ultrassónicas obtidos (tempo [μs]) e as distâncias entre pontos, calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico Ed [MPa] através da expressão (eq.1).

$$E_d = V^2 \times M_{ap} \times \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

em que:

V – velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas [km/s]

M_{ap} – massa volúmica aparente do provete [kg/m³]

– coeficiente de Poisson

Considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,3 (valor este que ainda será confirmado em ensaios mecânicos a realizar com os provetes cilíndricos). No Quadro 2 registam-se os valores médios e desvios-padrão do módulo de elasticidade dinâmico determinado para os betões e a Figura 2b ilustra a execução do ensaio.

Constata-se que o betão C apresenta um módulo de elasticidade dinâmico E_d que pode ser considerado demasiado baixo como material resistente, mas que os betões A e B apresentam valores semelhantes de E_d (ligeiramente superiores no caso do betão B, o que é congruente com os valores de condutibilidade térmica registados) que, sendo sensivelmente metade do apresentado pelo betão-padrão, podem ser considerados aceitáveis para elementos resistentes e induzem uma certa capacidade de deformabilidade superior à do betão-padrão, o que pode ser benéfico para situações de aplicação na construção modular.

2.4 Resistência à tração por flexão e à compressão

Após a realização dos ensaios de determinação da condutibilidade térmica, de ultrassons e de absorção de água sob baixa pressão (que será apresentado a seguir), uma área de cada lajeta foi cortada, através de uma rebarbadora, em provetes de menores dimensões para a realização dos restantes ensaios. De cada lajeta foram cortados 6 provetes com 10x5x5 (cm) e 3 provetes com 15x5x5 (cm), num total de 66 provetes de menor dimensão e 33 provetes de maior dimensão, para serem utilizados em ensaios de resistência mecânica e comportamento face à água.

Os provetes de maior dimensão foram utilizados para a realização de ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão, que foram realizados numa máquina universal Zwick, com célula de carga de 50 kN, com base na norma EN 1015-11:1999 [14]. Foram realizados os ensaios de tração a uma amostra de 3 provetes por lajeta, a cada uma de três lajetas de cada composição de betão, num total de 36 provetes. De seguida foram ensaiados à compressão metade dos provetes resultantes do ensaio de tração, perfazendo também um total de 36 provetes.

A resistência à tração por flexão R_t [MPa] foi obtida a partir da expressão (eq.2), em que F representa a força máxima [N], L [mm] o comprimento do provete entre os apoios, b [mm] a sua base e d [mm] a sua altura.

$$R_t = 1,5 \times \frac{F \times L}{b \times d^2}$$

O valor da resistência à compressão R_c [MPa] foi obtido através da expressão (eq.3), em que F representa a força máxima [N] exercida pela máquina e A [mm²] a área de compressão.

$$R_c = \frac{F}{A}$$

No Quadro 2 registam-se os valores médios da resistência medida para os betões. A partir desse quadro constata-se que os valores de resistência à tração são obviamente muito inferiores aos de compressão, em todos os betões, e que os betões A e B apresentam valores semelhantes, muito superiores aos do betão C e muito inferiores aos do betão padrão. Verifica-se ainda que a tendência entre os valores obtidos está de acordo com os valores previamente apresentados nos outros ensaios e que as resistências do betão C deverão estar diretamente ligadas às deficiências de homogeneidade do solo, uma vez que os grandes torrões de solo são bem visíveis nas secções de rotura (Fig. 3c).



Figura 3: Ensaios de flexão (a), de compressão (b) e secções de rotura de um provete do betão C (c)

2.5 Absorção de água sob baixa pressão

A absorção de água sob pressão foi determinada com base em especificações de ensaio da RILEM [15] e do LNEC [16], de acordo com a Ficha de Ensaio 3 do DEC-FCT/UNL [17]. Em cada uma das lajetas, colocadas na vertical, foram colados três tubos de Karsten, segundo uma diagonal, de cada vez, em cada face (lado liso, resultante do contacto com a base do molde, e lado rugoso, exterior do molde), totalizando 78 ensaios com os tubos de Karsten. Foi aferida a área de contacto da água de cada tubo com a superfície do provete; geralmente conseguiu-se garantir, na colagem, a mesma área de contacto entre todos os tubos.

Encheram-se os tubos de Karsten até ao nível 0 cm³ da escala do tubo e foram efetuadas leituras aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, registando-se o valor de água absorvida pela lajeta. Quando o nível de água no tubo atingia os 4 cm³, a água era repostada de novo até ao nível 0 cm³ e o ensaio prosseguia.

O total de água absorvida aos 60 minutos foi obtido por leitura direta [em cm³] da soma dos valores e o coeficiente de absorção de água a baixa pressão aos 60 minutos foi obtido pelo declive do segmento de reta traçado entre o início e o final do ensaio, na curva de absorção - um gráfico tendo como ordenada a massa de água absorvida por área de contacto da água do tubo com a superfície do provete [kg/m²] e tendo como abcissa a raiz quadrada do tempo decorrido [min^{0,5}]. Estas grandezas são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Absorção de água e coeficiente de absorção de água sob baixa pressão ao fim de 60 minutos dos betões

| Betão | Abs. Água Bx. Pr. 60" [cm ³] | | | | Coef. Abs. Água Bx. Pr. 60" [kg/m ² .min ^{0,5}] | | | |
|----------|--|------|-------------|------|--|------|-------------|------|
| | Face Lisa | | Face Rugosa | | Face Lisa | | Face Rugosa | |
| | Med | dp | Med | dp | Med | dp | Med | dp |
| A | 3,69 | 0,92 | 5,36 | 1,27 | 0,99 | 0,25 | 1,44 | 0,34 |
| B | 4,28 | 0,07 | 4,54 | 1,50 | 1,15 | 0,02 | 1,22 | 0,40 |
| C | 11,83 | 1,74 | 7,17 | 1,86 | 3,18 | 0,47 | 1,93 | 0,50 |
| P | 1,53 | 0,70 | 4,60 | 1,10 | 0,41 | 0,19 | 1,24 | 0,30 |

Para além dos valores de água absorvida e do coeficiente de absorção de água sob pressão ao fim de 60 minutos, a curva de absorção permite ainda acompanhar o desenvolvimento do ensaio. No Quadro 3 e na Figura 4c verifica-se que: o betão B é o que apresenta absorção de água mais similar entre as duas faces; a face lisa absorve menos água que a face rugosa nos diversos betões (exceto no betão C, onde a relação é inversa); o betão C é o que regista maior absorção de água; o betão-padrão absorve menor quantidade de água na face lisa, mas quantidade similar aos betões A e B na face rugosa.

A partir do andamento do ensaio, que se pode observar na Fig. 4b, constata-se que: a absorção de água pela face rugosa do betão C, embora no fim do ensaio se distinga do valor da face lisa, tem uma absorção inicial muito semelhante; que a maior absorção final da face rugosa do betão A se deve a uma rápida absorção inicial; a face rugosa dos betões B e P têm comportamento muito similar mesmo na absorção inicial; a face lisa do betão B, embora atingindo um valor final semelhante, tem uma menor absorção inicial; a absorção da face lisa

do betão A, embora atingindo uma absorção final inferior à da face lisa do betão B, tem uma absorção inicial similar.

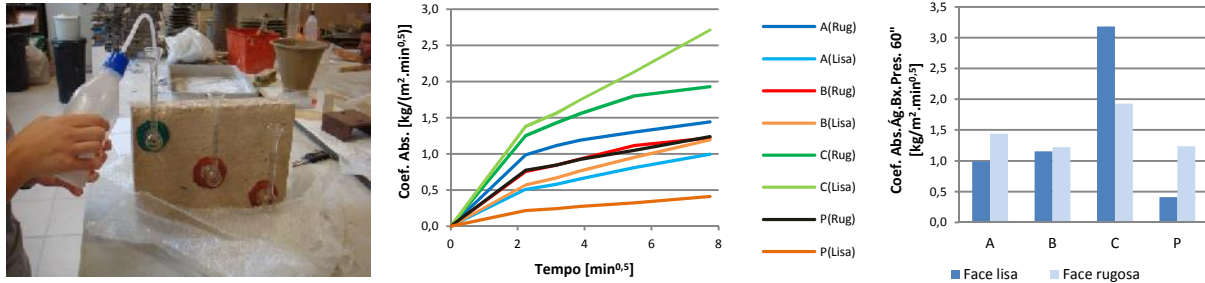


Figura 4: Ensaio de absorção de água sob pressão (a), curva de absorção de água (b) e coeficiente de absorção de água ao fim de 60 minutos (c) em cada face das lajetas de cada betão

2.6 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada com base nas normas EN 15801:2009 [18] e EN 1015-18:2002 [19] e seguindo a Ficha de Ensaio 4 do DEC-FCT UNL [20]. As lajetas, com espessura de 5 cm, foram cortadas em peças com área de 10x5 (cm). Foram preparados e ensaiados seis provetes de cada lajeta, totalizando 18 provetes de cada betão - metade para contacto com a água com cada face distinta (face lisa da lajeta e face mais rugosa). Foram avaliadas as áreas das bases que iriam contactar com o filme de água e a massa seca dos provetes. O ensaio dos provetes de betão-padrão ainda se encontra em curso.

Após a secagem dos provetes em estufa para atingirem massa constante e o seu arrefecimento, as faces laterais dos provetes foram impermeabilizadas através da aplicação de uma película de polietileno e foi colocado um tecido fino de algodão na base de cada provete (para reter eventuais perdas de massa que viessem a ocorrer), fixado lateralmente por um elástico.

Estes foram colocados em contacto com um filme de água com altura de 5 mm sobre uma rede plástica, dentro de caixas estanques mantidas fechadas e com ambiente saturado em humidade. A sua massa foi sendo avaliada ao longo do tempo, permitindo estabelecer a curva de absorção capilar, com a massa por unidade de área da base em ordenada [kg/m²] e a raiz quadrada do tempo em abcissas [min^{0.5}]. O coeficiente de capilaridade (CC), que traduz a velocidade com que a água é absorvida, corresponde ao declive do troço inicial de absorção da curva e foi comparado, em cada betão, entre os dois tipos de superfície em contacto com a água (lisa ou rugosa), não se tendo detetado grande diferença; daí apresentarem-se os valores médios por betão e não individualizados por face. O valor máximo de água absorvida por capilaridade corresponde ao valor assintótico da curva (VA). No Quadro 4 registam-se o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico dos provetes obtidos das lajetas para todos os betões. A partir da Figura 5e do Quadro 4 constata-se que, de entre as três composições de betão com terra, a composição B apresenta o menor valor total de água absorvida por capilaridade e um valor baixo de coeficiente de capilaridade.

Quadro 4: Coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade, taxa de secagem e índice de secagem

| Betão | CC [kg/m²·min. ^{0.5}] | | VA [kg/m²] | | IS [-] | | TS [kg/m²·h] |
|-------|---------------------------------|------|------------|------|--------|------|--------------|
| | Med | dp | Med | dp | Med | dp | Med |
| A | 0,72 | 0,05 | 12,36 | 1,70 | 0,32 | 0,04 | 0,11 |
| B | 0,75 | 0,12 | 11,15 | 0,36 | 0,26 | 0,02 | 0,09 |
| C | 1,35 | 0,16 | 11,76 | 0,26 | 0,17 | 0,03 | 0,14 |
| P | | | | | | | |

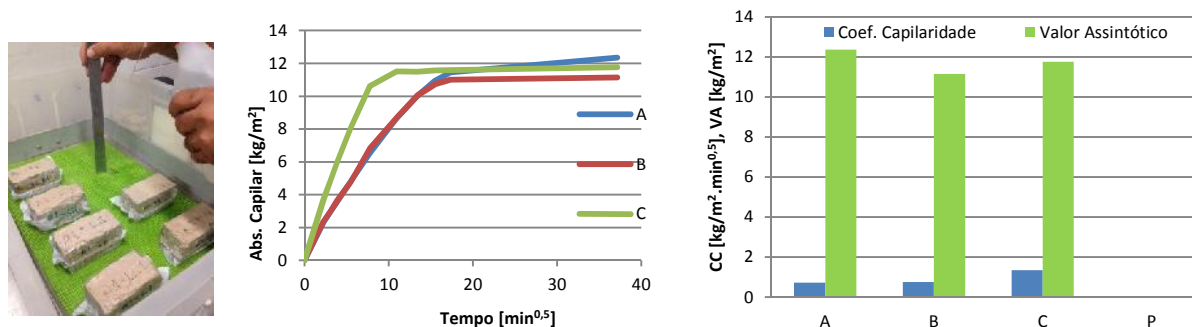


Figura 5: Ensaio de absorção de água por capilaridade (a), curva de absorção capilar (b), coeficiente de capilaridade e valor assintótico (c) de cada betão

2.7 Secagem

A capacidade de secagem dos betões foi determinada com base na especificação da RILEM [21] e de acordo com a Ficha de Ensaio 5 do DEC-FCT UNL [22]. À semelhança da capilaridade, também foram ensaiados 3 provetes com secagem pela face lisa e 3 provetes com secagem pela face rugosa, por lajeta (3 lajetas por composição de betão), num total de 54 provetes. Os ensaios do betão-padrão ainda se encontram em curso.

Após a saturação dos provetes no ensaio de capilaridade, estes foram retirados do contacto com o filme de água, aferida a sua massa e colocados na mesma posição sobre uma base impermeável e lisa, de modo à secagem da água absorvida apenas poder ocorrer pelo topo superior dos provetes, de área conhecida, em condições de 65% de HR e 20°C de temperatura. As medições da massa dos provetes decorreram de hora a hora durante as primeiras 5 horas e foram diárias nos dias seguintes, perfazendo um total de 816 horas.

A partir das pesagens ao longo do tempo foi-se determinando o teor de água (ou a massa de água remanescente por área de secagem), o que permitiu definir a curva de secagem com uma destas grandezas em ordenada e o tempo decorrido em abcissas. Determinou-se a taxa de secagem (TS), pelo declive do troço inicial da curva de secagem, e o índice de secagem (IS) de acordo com Brito et al. [23], usando simplifadamente uma aproximação a trapézios para a determinação do integral. Embora, e à semelhança da capilaridade, o ensaio tenha decorrido com secagem pela face lisa e pela face rugosa, os valores apresentados resultam da média de todos os provetes do mesmo betão, por não diferirem entre si. No Quadro 4 regista-se a taxa de secagem e o índice de secagem dos betões com terra já ensaiados. A partir desse quadro e da Figura 6 constata-se que a secagem dos três betões com terra decorre com facilidade e de forma semelhante nos primeiros tempos; a longo prazo a secagem é mais favorecida no betão C, sendo semelhante entre os betões A e B.

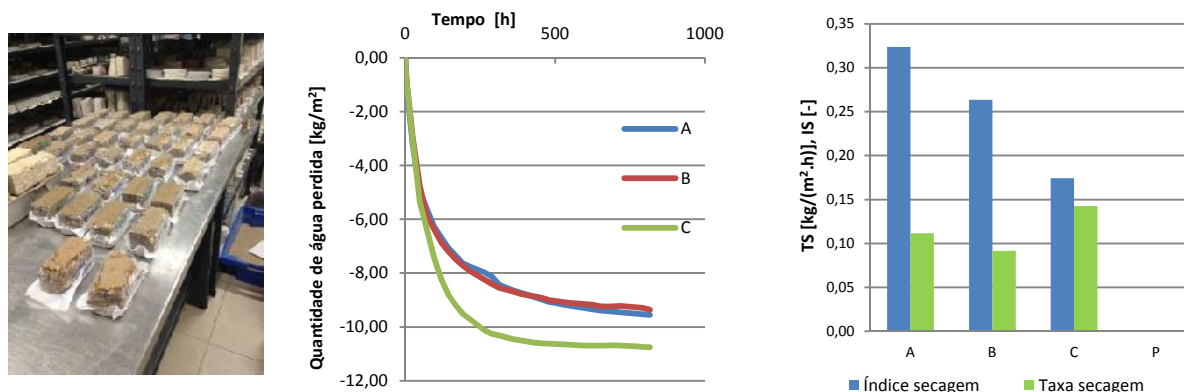


Figura 6: Ensaio de secagem (a), curva de secagem (b), taxa de secagem e índice de secagem (c) de cada betão

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O solo utilizado foi um solo corrente, recolhido da escavação de uma construção e que se encontrava disponível para ser utilizado, não tendo sido um solo especificamente escolhido. As composições dos betões foram escolhidas pela empresa de prefabricação. O betão-padrão apresenta um traço cimento:agregado igual à composição A; no entanto apresenta três partes da massa de agregado constituída por solo, enquanto o cimento-padrão contém apenas agregados correntes. A composição B apresenta um traço cimento:agregado mais fraco em ligante comparativamente aos betões padrão e A; no entanto, face ao betão A, apresenta uma menor quantidade de solo (e maior de agregado corrente) na fração de agregado. A composição C, embora possua uma fração de solo idêntica à de A no traço em agregado, foi realizada com um traço cimento:agregado muito mais fraco que todas as restantes. Especialmente nesta composição registou-se uma deficiente homogeneização do solo, detetando-se, nas secções de corte, grandes torrões na massa de betão, o que teve repercussões nos resultados de caracterização dos betões.

Verifica-se que os betões com terra com composições A e B apresentam valores muito semelhantes entre si na maioria das caracterizações efetuadas; o traço ligeiramente mais fraco em ligante da composição B é compensado pela maior fração em solo do agregado da composição A.

Em termos de condutibilidade térmica o acréscimo de resistência térmica pela utilização de um destes betões em comparação com o betão corrente pode ultrapassar 40% num painel de parede com 10 cm de espessura, o que pode ser considerado bastante significativo. Entre os betões A e B há uma ligeira vantagem para a composição A.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico e de resistências à tração por flexão e à compressão dos betões com terra apresentam uma diminuição significativa face ao betão-padrão; o betão C não é aceitável e a gama de valores registada pelos betões A e B tem de ser tida em conta na modelação estrutural a efetuar. Entre os betões A e B existe uma ligeira vantagem para o betão A.

Em termos da absorção de água no estado líquido sob baixa pressão, de novo o betão C apresenta comportamento deficiente e os betões A e B surgem com comportamento pior que o betão-padrão no contacto com a face lisa, mas muito semelhante a esse betão no contacto da água com a face rugosa. Num painel de betão A, B ou P, há mais vantagem em que seja a face lisa a colocada em contacto com o exterior; essa vantagem é mais relevante no caso dos betões P e A e menos no caso do betão B. Entre os betões A e B há uma ligeira vantagem do betão A no contacto com a face lisa e do betão B no contacto com a face rugosa.

Quanto à absorção de água por capilaridade, a comparação não pode ser efetuada ainda com o betão-padrão pelo facto do ensaio desses provetes estar ainda a decorrer. No entanto, é expectável que o betão-padrão apresente um melhor coeficiente de capilaridade mas um valor assintótico menos favorável comparativamente aos betões com terra - comparação que se conta poder demonstrar aquando da apresentação no congresso. Entre os betões com terra regista-se de novo um pior comportamento do betão C, especialmente face à água absorvida inicialmente; entre os betões A e B regista-se um melhor comportamento do betão B, com um início de absorção de água comparável ao betão A mas um total de água absorvida inferior.

Relativamente à libertação, por secagem, da água que acede à parede de betão ainda não há possibilidade de comparação com o betão-padrão. Através da taxa de secagem, que traduz a velocidade inicial de secagem, entre os betões com terra A e B verifica-se um melhor comportamento do betão A. Quanto ao índice de secagem, que traduz o comportamento de secagem a longo prazo, e que é tão facilitada quanto menor o seu valor, entre os betões A e B denota-se uma vantagem para o betão B. Embora só se venha a poder confirmar aquando da apresentação no congresso, é expectável que o betão-padrão venha a apresentar uma maior dificuldade de secagem face aos betões com terra.

4. CONCLUSÕES

As conclusões finais deste estudo só serão obtidas após a análise dos resultados de todos ensaios já executados e ainda dos programados para serem efetuados. Entre eles encontram-se mais ensaios de durabilidade de betões, que serão importantes para avaliar a sua viabilidade de uso face a betões correntes. No entanto, e face aos resultados obtidos ressalta:

- a necessidade de uma correta homogeneização do solo com os constituintes secos do betão, para se obterem betões eficientes;
- o facto de betões do tipo dos A e B ensaiados indicarem ser viáveis como betões mais sustentáveis para aplicação em prefabricação;
- o interesse destes tipos de betões continuarem a ser estudados com vista à sua otimização e aplicação nomeadamente em prefabricação;
- as vantagens que, a nível tecnológico, económico e ambiental, podem existir pela utilização destes betões mais sustentáveis, que podem utilizar solo resultante de escavações e reduzir a necessidade de exploração de pedra natural como brita corrente.

5. AGRADECIMENTOS

Agradece-se o financiamento ao projeto PQREN/216586/2011 e aos Colegas do referido projeto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Neves, C. – O uso do solo-cimento em edificações. A experiência do CEPED. V SIACOT – Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra, Mendoza, Argentina (CD-rom).
- [2] Neves, C. – Solo-cimento: dosagens e técnicas construtivas. Terra em Seminário 2007, Lisboa, Argumentum, 86-88.
- [3] Cid-Falceto, J. et al. – assessment of compressed earth blocks made in Spain: international durability tests. *Construction and Building Materials* 37 (2012), 738-745.
- [4] Arroyo, M. et al. - Simulation of cement-improved clay structures with a bonded elasto-plastic model: a practical approach. *Computers and Geotechnics* 45 (2012), 140-150.
- [5] Molina-Huelva, M. – La eficiencia energética de los materiales tradicionales. La construcción con tierra. Terra em Seminário 2010, Lisboa, Argumentum, 194-197.
- [6] Reddy, B.; Jagadish, K. - Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and Buildings* 35 (2003), 129-137.
- [7] Reddy, B.; Kumar, P. - Embodied energy in cement stabilized rammed earth walls. *Energy and Buildings* 42 (2010), 380-385.
- [8] LNEC – Solo. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. Especificação LNEC E 195:1966, Lisboa, 1966.
- [9] LNEC – Solos. Análise granulométrica. Especificação LNEC E 196:1966, Lisboa, 1966.
- [10] LNEC – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. Especificação LNEC E 239:1970, Lisboa, 1966.
- [11] Faria, P.; Silva, V. – Determinação expedita da condutibilidade térmica. Ficha de Ensaio de Construção 1, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.
- [12] Henriques, F.M. – Pedras naturais e artificiais. Velocidade de propagação do som. Especificação de Ensaio 13, DEC-FCT UNL, Caparica, 1996.
- [13] Faria, P.; Silva, V. – Determinação expedita do módulo de elasticidade dinâmico por ultrassons. Ficha de Ensaio de Construção 2, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.
- [14] CEN - Methods of test for mortars for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. EN 1015-11: 1999/A1: 2006. Brussels, 1999/2006.
- [15] RILEM TC 25-PEM – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.4 – Water absorption under low pressure. *Materials & Structures* 13 (75), 205-207.
- [16] LNEC – Revestimentos de paredes. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão. Ficha de Ensaio Pa39.1, Lisboa, 2002.
- [17] Faria, P.; Silva, V. – Determinação da absorção de água sob baixa pressão através de tubos de Karsten. Ficha de Ensaio de Construção 3, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.

- [18] CEN – Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity. EN 15801:2009. Brussels, 2009.
- [19] CEN – Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. EN 1015-18: 2002. Brussels, 2002.
- [20] Faria, P.; Silva, V. – Determinação da absorção capilar de provetes friáveis. Ficha de Ensaio de Construção 4, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.
- [21] RILEM TC 25-PEM – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve. *Materials & Structures* 13 (75), 205-207.
- [22] Faria, P.; Silva, V. – Determinação da capacidade de secagem de materiais porosos. Ficha de Ensaio de Construção 5, DEC-FCT UNL, 2012.
- [23] Brito, V. *et al.* - Coatings applied on damp substrates: performance and influence on moisture transport. *J. Coating Technology and Research* 8(4) (2011), 513-525.