



COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM CIMENTO RECICLADO TERMOATIVADO

Sofia Real^a; José Bogas^b; Ricardo Cruz^b; Maria Glória Gomes^b

^aLaboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal; sreal@lnec.pt

^bCERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt; ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt; maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A estabilização de blocos de terra comprimida (BTC) com cimento reciclado termoativado (CRP) tem como objetivo a melhoria do desempenho mecânico e de durabilidade da construção em terra, sem comprometer de forma significativa a sua natureza ecológica e a suas propriedades térmicas. Neste estudo, analisou-se o comportamento higroscópico de BTC estabilizados com CRP, tendo sido comparado com o de blocos de terra não estabilizados ou estabilizados com cimento Portland (CEM). Para tal, foram determinadas as curvas de adsorção-dessorção de BTC considerando diferentes tipos de solo, tipos e quantidades de incorporação de estabilizante, tendo sido relacionadas com a sua microestrutura que foi caracterizada com base em microporosimetria de intrusão de mercúrio e adsorção de nitrogénio.

A influência da estabilização nas propriedades higroscópicas dos BTC dependeu do tipo de solo. Dependendo do teor de argila, a estabilização pode aumentar ou reduzir a capacidade higroscópica dos BTC. O desempenho higroscópico dos BTC não foi afetado de forma relevante pela substituição parcial ou total de CEM por CRP. Assim, o CRP foi efetivo na estabilização dos BTC, tendo-se aproximado do comportamento mecânico e higroscópico dos BTC com CEM.

Palavras-chave: Blocos de terra comprimida; cimento reciclado termoativado; agregado reciclado; adsorção-dessorção; comportamento higroscópico; microestrutura



1 INTRODUÇÃO

Os blocos de terra comprimida (BTC) são reconhecidos como bons controladores higroscópicos (Fabbri et al., 2022), para além de apresentarem impactos ambientais e energia incorporada reduzidos. A estabilização química introduziu melhorias significativas no seu desempenho mecânico e de durabilidade (Augarde, 2012; Rigassi, 1985), tendo trazido um interesse renovado neste material de construção. No entanto, esta estabilização é tipicamente atingida com recurso a cal hidráulica e cimento Portland (CEM), contribuindo para uma redução não só das propriedades higroscópicas, mas também da componente ecológica dos BTC. Saidi et al. (2018) reportaram a redução das capacidade de absorção de BTC com até 12% de estabilizante, tendo atribuído os resultados ao preenchimento da estrutura porosa por produtos de hidratação, enquanto Arrigoni et al. (2017) referiram o decréscimo da afinidade físico-química entre a água e a argila. De acordo com McGregor et al. (2014), a estabilização cimentícia resulta na redução da permeabilidade ao vapor e da capacidade de retenção de água dos BTC, enquanto o teor de argila conduz ao incremento desta capacidade, encontrando-se dependente do tipo da mesma.

Todavia, a estabilização com CEM está associada a níveis elevados de emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante a sua produção (WBCSD and IEA, 2009), contribuindo para um BTC menos amigo de ambiente. Neste sentido, na procura por materiais de construção mais sustentáveis, a investigação tem sido direcionada para o desenvolvimento de alternativas eco-eficientes ao CEM, nomeadamente o cimento reciclado termoativado (CRP), que não só contribui para a redução das emissões de CO₂ e do consumo de recursos naturais, mas também para a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) (Real et al., 2022). De facto, o CRP tem sido utilizado com sucesso como ligante, em substituição total ou parcial do CEM, noutros materiais de construção, nomeadamente em argamassas (Carriço et al., 2022) e betões (Carriço et al., 2021; Real et al., 2021). No entanto, o seu desempenho enquanto estabilizante de BTC ainda foi pouco estudado, tendo apenas sido publicado um estudo de caracterização do comportamento mecânico de BTC com CRP (Bogas et al., 2023), em que este estabilizante contribuiu para duplicar a resistência à compressão em relação ao BTC não estabilizados, demonstrando o seu potencial como alternativa eco-eficiente ao CEM. Contudo, devido à elevada necessidade de água do CRP, a porosidade dos BTC com CRP foi superior e a sua resistência à compressão ligeiramente inferior à dos com CEM. Assim, a microestrutura dos BTC varia consoante o tipo de estabilizante, o que pode afetar o seu desempenho higroscópico. Este aspeto ainda não foi investigado em BTC com CRP. Assim, este estudo caracteriza o desempenho higroscópico de BTC eco-eficientes. Para tal, o comportamento isotérmico de adsorção-dessorção foi analisado em BTC com 2 tipos de solo (S1 e S2), 0-10% de estabilizante (CRP ou CEM), diferentes percentagens de incorporação de CRP (20, 50 e 100%), tendo sido confrontado com a sua microestrutura, que foi avaliada através de porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP) e adsorção de nitrogénio (N₂).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

Os BTC foram produzidos com dois tipos de solo (S1 e S2) oriundos de Montemor-o-Novo, um tipo de resíduo de construção e demolição (RCD) da Vimajas, cimento Portland tipo I 42,5R (CEM) da Secil e cimento reciclado termoativado (CRP) produzido em laboratório.

Os solos S1 e S2 apresentavam massas volúmicas de 2,70 e 2,59 g/cm³ (NP 83, 1965), limites de liquidez de 30 e 23,7%, limites de plasticidade de 22 e 18,9%, índices de plasticidade de 8 e 4,7% (NP 143, 1969), teores de matéria orgânica < 1% e de 1,48% e teores ótimos de humidade de 16 e 10,9% (ASTM



D698, 2021), respetivamente. Adicionalmente, os solos S1 e S2 eram constituídos por aproximadamente 20,1 e 5% de brita, 48,4 e 69,8% de areia, 31,5 e 25,2% de argila/silte (E 239, 1970; HB 195, 2012), com 13 e 4,2% de argila (de acordo com ensaios de sedimentação), respetivamente. Além disso, a composição granulométrica destes solos situava-se entre os limites indicados na XP P 13-901 (2001). Os solos foram também caracterizados através de análises de difração de raios-X e de termogravimetria, sendo basicamente constituídos por quartzo e albite e quantidades reduzidas de argilas expansivas, designadamente nontronite (S1) e montmorillonite (S2). Os resíduos de construção e demolição tinham uma massa volúmica de 2300 kg/m³ e absorção de água às 24 horas de 4,3% (EN 1097-6, 2013), sendo constituídos por aproximadamente 45% de betão, 28% de agregado natural, 17% de cerâmicos de alvenaria, 2% de materiais betuminosos, 0,03% de vidro e 8% de outros materiais.

O CEM era caracterizado por uma consistência normal de 0,295 e um tempo de presa de 190-310 mins, assim como cerca de 1,02% de hidróxido de cálcio (CaO) livre. O CRP foi produzido a partir de pasta com relação água/cimento de 0,55 e resistência à compressão aos 28 dias de 33,4MPa. Cerca de 90 dias após a produção, a pasta foi submetida a processos de redução de dimensão de partículas (< 125 µm). Após este processo, as partículas foram submetidas a tratamento térmico num forno rotativo, tendo sido aquecidas a 10°C/min até 150°C, onde permaneceram durante 1h, seguido de novo aquecimento a 10°C/min até 650°C, onde permaneceram durante 3h, tendo finalmente sido arrefecidas dentro do forno até temperatura ambiente. O CRP era caracterizado por uma consistência normal de 0,73, um tempo de presa de 290-385 mins e por 13,94% de CaO livre.

Para a realização deste trabalho, os BTC foram produzidos em 2 etapas, com dimensões de 220×105×60-80 mm através de uma prensa manual da *Terstaram* com uma força de compactação de 150kN. Na etapa 1, os BTC eram compostos por solo S1 e 5-10% de estabilizante (CRP ou CEM) (Quadro 1), enquanto, na etapa 2, eram constituídos por solo S2 com 25% de RCD e 5-8% de estabilizante (CRP ou CEM) (Quadro 1), de forma a aumentar a sua eco-eficiência. Destaca-se que, após a sua produção, os BTC estabilizados foram submetidos a 1 semana de cura húmida, e os BTC não estabilizados a 1 semana de cura seca cobertos com película.

2.2 MÉTODOS DE ENSAIO

O desempenho higroscópico dos BTC foi avaliado através do método da câmara climática sugerido na EN ISO 12571 (2021). Os BTC foram secos em estufa e colocados numa câmara climática a 23±0,5°C e diferentes humidades relativas (HR) de forma crescente, nomeadamente 35%, 60%, 80% e 95%, para determinar a sua curva de adsorção. De seguida, foi realizado o processo inverso, com HR decrescente, para determinação da sua curva de dessorção.

Adicionalmente, os BTC foram caracterizados em termos de massa volúmica (MV) (EN 772-13, 2000) e de resistência à compressão aos 28dias (fc) (EN 772-11, 2011; NBR 8492, 2012). A resistência à compressão do BTC em ambiente de laboratório foi obtida com recurso a uma prensa hidráulica *Tonipact* com capacidade de 3000kN e uma célula de carga com capacidade de 200kN. Além disso, a distribuição de porosidade de seis composições foi determinada através de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e de adsorção de nitrogénio (N₂). Os ensaios de MIP e de adsorção de N₂ foram efetuados com recurso a um porosímetro *AutoPore IV 9500 V1.09* e um analisador *Micromeritics ASAP 2010*, respetivamente.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MASSA VOLÚMICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O Quadro 1 apresenta a massa volúmica seca (MVseca), porosidade aberta (PA) e resistência mecânica aos 28 dias (fc) dos BTC em ambiente de laboratório. A porosidade aberta dos NE não foi determinada, uma vez que estes perdiam a integridade em contacto com a água.

Quadro 1– Composição dos BTC e resultados dos ensaios

| Etapa | Designação | Tipo de solo | RCD (%) | CEM (%) | CRP (%) | Água total (%) | MV seca (kg/m ³) | PA (%) | fc (MPa) | TH _{95%HR} (%) | H _A (%) |
|---------|------------------|--------------|---------|---------|---------|----------------|------------------------------|--------|----------|-------------------------|--------------------|
| Etapa 1 | S1.CEM10 | S1 | - | 10 | - | 15,0 | 1769 | 31,1 | 5,92 | 4,53 | 0,50 |
| | S1.CRP10 | S1 | - | - | 10 | 16,5 | 1595 | 36,8 | 4,44 | 5,19 | 0,47 |
| | S1.CEM5 | S1 | - | 5 | - | 15,2 | 1737 | 32,6 | 3,34 | 5,03 | 0,28 |
| | S1.CRP5 | S1 | - | - | 5 | 16,2 | 1649 | 35,3 | 2,45 | 5,22 | 0,24 |
| | S1.CRP2.CEM8 | S1 | - | 2 | 8 | 15,0 | 1742 | 32,0 | 5,12 | 4,78 | 0,58 |
| | S1.CRP5.CEM5 | S1 | - | 5 | 5 | 15,5 | 1683 | 33,8 | 4,99 | 4,88 | 0,47 |
| | S1.NE | S1 | - | - | - | 14,4 | 1754 | - | 2,33 | 6,02 | 0,28 |
| Etapa 2 | S2.CEM8 | S2 | 25 | 8 | - | 14,0 | 1865 | 26,4 | 9,04 | 3,01 | 1,19 |
| | S2.CEM5 | S2 | 25 | 5 | - | 14,0 | 1874 | 24,9 | 6,52 | 2,62 | 0,74 |
| | S2.CRP8 | S2 | 25 | - | 8 | 14,0 | 1778 | 25,4 | 5,51 | 3,14 | 0,93 |
| | S2.CRP1,6.CEM6,4 | S2 | 25 | 6,4 | 1,6 | 14,0 | 1845 | 28,6 | 10,43 | 3,24 | 1,09 |
| | S2.CRP4.CEM4 | S2 | 25 | 4 | 4 | 14,0 | 1874 | 26,0 | 8,39 | 2,95 | 1,07 |
| | S2.NE | S2 | 25 | - | - | 12,0 | 1835 | 26,1 | 2,08 | 2,66 | 0,47 |

Os S1.BTC abrangeram gamas de massa volúmica e resistência à compressão de 1595-1769 kg/m³ e 2,33-5,92 MPa e enquanto os S2.BTC compreenderam 1778-1874 kg/m³ e 2,08-10,43 MPa, respetivamente (Quadro 1). Em geral, os S1.BTC apresentaram menor massa volúmica do que os S2.BTC, essencialmente devido à sua maior porosidade. De facto, a composição e a distribuição granulométrica do solo S1 contribuíram para um menor grau de compactação com maior teor ótimo de humidade do que o solo S2 (secção 2.1). No entanto, a resistência à compressão do S1.NE foi superior à do S2.NE, devido ao seu maior teor de argila, que incrementou a cimentação natural entre partículas.

A estabilização dos BTC com CEM teve uma influência pouco relevante na massa volúmica, mas conduziu a um aumento significativo da resistência à compressão (Quadro 1). Por outro lado, a



incorporação de CRP resultou numa redução da massa volúmica e aumento da porosidade dos BTC, independentemente do tipo de solo (Quadro 1). A menor compactidade dos BTC com CRP pode ser explicada pela sua maior necessidade de água e, conseqüente, maior dificuldade de compactação. Desta forma, a sua resistência mecânica foi inferior à dos BTC com CEM com o mesmo teor de estabilizante. No entanto, apesar da sua menor massa volúmica, a resistência à compressão dos BTC com CRP foi até 1,9-2,6 vezes superior à dos BTC.NE, o que significa que as propriedades de cimentação do CRP compensaram o efeito da sua maior porosidade em relação aos BTC.NE.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

O Quadro 2 resume os resultados da análise microestrutural realizada para seis BTC. A porosidade total obtida a partir de MIP (PT_{MIP}) e o volume total de poros obtido para adsorção de N_2 dos S1.BTC variaram entre 31,8 e 34,5% e entre 0,0386 e 0,0447 cm^3/g , enquanto as dos S2.BTC variaram entre 23,9 e 27,5% e entre 0,0206 e 0,0366 cm^3/g , respetivamente. Desta forma, à semelhança do verificado para a massa volúmicas (Quadro 1), os S2.BTC apresentaram menor porosidade do que os S1.BTC, indicando que os S2.BTC atingiram maior compactidade. Por outro lado, os S2.BTC apresentaram menor superfície específica do que os S1.BTC (Quadro 2), apesar de terem um volume de poros inferior e de a sua porosidade ter sido menos grosseira. Adicionalmente, o volume de poros menor do que 50nm (N_2) dos S2.BTC foi inferior ao dos S1.BTC, justificado pelo seu menor teor de partículas finas.

Quadro 2– Resultados das análises MIP e de adsorção de N_2

| Designação | Análise MIP | | | Análise de adsorção de N_2 | | | |
|------------|--|-----------------------------|---|---|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| | Porosidade total <400 μm (%) (PT_{MIP}) | Porosidade entre 6-50nm (%) | Fração da porosidade total entre 6-50nm (%) | Volume de poros total <150nm (cm^3/g) | Volume de poros <50nm (cm^3/g) | Fração do volume de poros total <50nm (%) | Superfície específica BET (m^2/g) |
| S1.CEM10 | 32,30 | 5,98 | 18,51 | 0,0447 | 0,0155 | 34,71 | 9,09 |
| S1.CRP10 | 34,50 | 6,20 | 17,96 | 0,0446 | 0,0186 | 41,68 | 9,72 |
| S1.NE | 31,77 | 4,92 | 15,47 | 0,0386 | 0,0235 | 60,86 | 15,6 |
| S2.CEM8 | 23,94 | 7,53 | 31,47 | 0,0366 | 0,0159 | 43,41 | 6,39 |
| S2.CRP8 | 25,78 | 5,15 | 19,97 | 0,0306 | 0,0138 | 45,18 | 6,02 |
| S2.NE | 27,50 | 2,33 | 8,48 | 0,0206 | 0,0111 | 53,82 | 7,33 |

Os BTC estabilizados apresentaram uma porosidade notoriamente mais refinada do que os BTC.NE, apesar de a sua PT_{MIP} ter sido por vezes superior. Por um lado, a estabilização dos BTC conduziu a um aumento da fração de mesoporos de 6-50nm (MIP). Por outro, esta levou a uma diminuição da superfície específica, tendo sido até 72 e 22% superior nos BTC.NE do que nos BTC estabilizados da etapa 1 e 2, respetivamente. Isto pode ser explicado pelo facto de a estabilização inativar as partículas finas de argila, promovendo a sua separação e aglomeração, diminuindo o espaço intercamada e a superfície específica (Wu et al., 2022). A ocorrência deste fenómeno foi mais evidente nos S1.BTC, devido ao facto de o seu teor de argila ter sido maior do que o dos S2.BTC.



A PT_{MIP} dos BTC com CRP foi superior à dos com a mesma percentagem de CEM, tanto nos S1.BTC como nos S2.BTC. Tal pode ser justificado pelo facto de os BTC com CRP terem sido produzidos com maior quantidade de água total (S1.BTC) ou terem sido mais difíceis de compactar (S2.BTC) do que os BTC com CEM. No entanto, apesar de terem apresentado maior porosidade total, a microestrutura dos BTC com CRP foi semelhante a mais refinada do que a dos BTC com a mesma percentagem de CEM, tendo sido mais claro nos S1.BTC. A porosidade mais fina do S1.CRP10 foi semelhante no MIP (6-50nm) e maior na adsorção de N_2 (<50nm) do S1.CEM10. De facto, como consequência da porosidade das partículas de CRP, uma porção da água é absorvida pela porosidade intrapartícula, levando à diminuição do espaço interpartícula e à densificação da sua microestrutura (Bogas et al., 2022).

Contudo, o mesmo não se verificou nos S2.BTC, em que o BTC com CRP apresentou uma porosidade menos refinada do que o BTC com CEM, o que explica a resistência à compressão ligeiramente maior para determinada porosidade (Quadro 1). Porém, as superfícies específicas dos BTC com CRP e com CEM foram praticamente idênticas, tanto para os S1.BTC como para o S2.BTC, o que demonstra a eficiência dos dois estabilizantes.

3.3 CURVAS DE ADSORÇÃO-DESSORÇÃO E HISTERESE

3.3.1 Influência do tipo de solo

A Figura 1 apresenta as curvas de adsorção-dessorção dos BTC não estabilizados com diferentes tipos de solo (S1 e S2). Para uma dada HR, o S1.NE apresentou maior TH do que o S2.NE, em ambas as curvas. De facto, apesar de terem sido sujeitos à mesma pressão de compactação, a porosidade do S1.NE foi superior à do S2.NE, conforme demonstrado pela sua massa volúmica reduzida e pela análise microestrutural (Quadros 1 e 2). Tal pode ser explicado, não só pelo facto de o S1.NE ter sido produzido com maior quantidade de água e ter atingido um grau de compactação inferior, mas também pelo facto de o solo S1, ao ter maior teor de argila do que o solo S2, ter contribuído para um volume de poros finos e superfície específica superiores no S1.NE do que no S2.NE (Quadro 2). Isto demonstra a importância das propriedades do solo para a microestrutura dos BTC, e consequentemente, para o seu comportamento higroscópico.

A forma das curvas de adsorção-dessorção do S1.NE foi bastante diferente da do S2.NE (Figura 1). O S2.NE apresentou maior histerese local até 60%HR e ligeiramente inferior a 80%HR, tendo exibido maior histerese média e menor $TH_{95\%HR}$ do que o S1.NE (Quadro 1). As curvas do S1.NE apresentaram um aumento acentuado até 35%HR, associado à fase de adsorção superficial monocamada. Tal pode ser explicado pela sua superfície específica elevada (Quadro 2), resultante não só da presença de uma quantidade relevante de argila, mas também da sua natureza expansiva por conter nontronite. De facto, o volume de poros abaixo de 50nm corresponde a cerca de 31% da PT_{MIP} (<400 μ m, Quadro 2) e 61% do volume total de poros de N_2 (<150nm, Quadro 2), demonstrando que este BTC possuía uma quantidade relevante de porosidade fina. Adicionalmente, o TH elevado acima de 80%HR (Figura 1), relacionado com a fase de condensação capilar, pode ser explicado pelo seu teor de mesoporos. A histerese deste BTC ocorreu essencialmente acima de 35%HR, e aumentou significativamente com a HR (Figura 1). De facto, até 35%HR, a adsorção é essencialmente governada pela adsorção nas superfícies externas (maior para maior superfície específica) e pela captação de água no espaço intercamada dos minerais argilosos (<2nm), em especial os expansivos. Acima desta fase, a mesoporsidade também participa na adsorção, contribuindo para a histerese.

As curvas do S2.NE são típicas de um material granular. De facto, o solo S2 apresentava um teor de argila relativamente reduzido, que ficou ainda mais diluído com a incorporação de 25%RCD. A microestrutura mais grosseira deste BTC em comparação com o S1.NE é demonstrada pela sua menor



PT_{MIP} e menor superfície específica (Quadro 2). O S2.NE apresentou adsorção reduzida e histerese semelhante para as várias HR até 80%HR, tendo sido superior à do S1.NE até 60%HR. Contrariamente ao S1.NE, no caso do S2.NE, a fase de adsorção monocamada foi praticamente impercetível (Figura 1) e deverá ter ocorrido antes dos 35%HR, devido à sua superfície específica e teor de partículas finas reduzidos.

Neste estudo, ambos os solos continham argilas expansivas. No entanto, a maior histerese do BTC com maior teor de argila (S1.NE) só ocorreu para HR superior a 60%. Tal pode ser explicado pelo facto, de a distribuição de porosidade também afetar significativamente esta propriedade, nomeadamente o efeito *ink-bottle*.

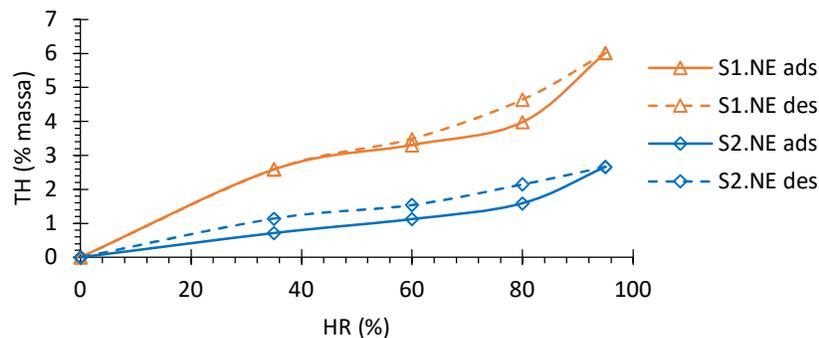


Figura 1 – Curvas de adsorção-dessorção dos BTC não estabilizados

3.3.2 Influência do tipo e teor de estabilizante

A influência do estabilizante dependeu do tipo de solo utilizado na produção dos BTC, nomeadamente do seu teor de argila. A Figura 2 apresenta as curvas de adsorção-dessorção dos S1.BTC produzidos com diferentes percentagens de estabilizante. A incorporação de até 10% de estabilizante resultou num decréscimo das propriedades higroscópicas dos BTC, tendo-se observado a redução progressiva do TH_{95%HR}, independentemente do tipo de estabilizante (Quadro 1). Por um lado, a incorporação de estabilizante promove a floculação e cimentação das partículas de argila, reduzindo a sua atividade e superfície específica (Quadro 2). Tal contribui para a redução da captação de água na fase de adsorção monomolecular (até 35%HR), bem como para o fenómeno de absorção de água intercamada nas partículas argilosas. Por outro lado, a estabilização com cimento terá diminuído a permeabilidade dos BTC, dado que o desenvolvimento de produtos de hidratação reduz a porosidade e interconetividade destes materiais. Além disso, ocorreu um refinamento da microestrutura, tendo aumentado o volume de mesoporos entre 6 e 50nm (Quadro 2), mas diminuído o volume de microporosidade muito fina (Quadro 2). A presença de argila ativa e a sua elevada superfície específica aumenta a captação de água, mesmo para BTC.NE com mesoporosidade semelhante a inferior. O incremento da mesoporosidade e a forma mais irregular da estrutura porosa resultou num aumento da histerese média nos BTC com 10% de estabilizante (Quadro 1).

A incorporação de 5% de estabilizante foi menos efetiva na estabilização e redução de porosidade dos BTC (Quadros 1 e 2). Assim, estes BTC apresentaram maior quantidade de argila ativa com elevada superfície específica e o seu comportamento foi intermédio entre o BTC.NE e os BTC com 10% de estabilizante (Figura 2). Tal pode ser confirmado pela ligeira redução da adsorção de água a 35%HR em comparação com o BTC.NE. Desta forma, a histerese média não foi afetada de forma relevante pela incorporação de 5% de estabilizante (Quadro 1). No entanto, e apesar do seu maior teor de água de



produção, estes S1.BTC apresentaram maior resistência à compressão do que o S1.NE (Quadro 1), bem como mantiveram a sua integridade em contacto com a água, indicando que a estabilização ocorreu.

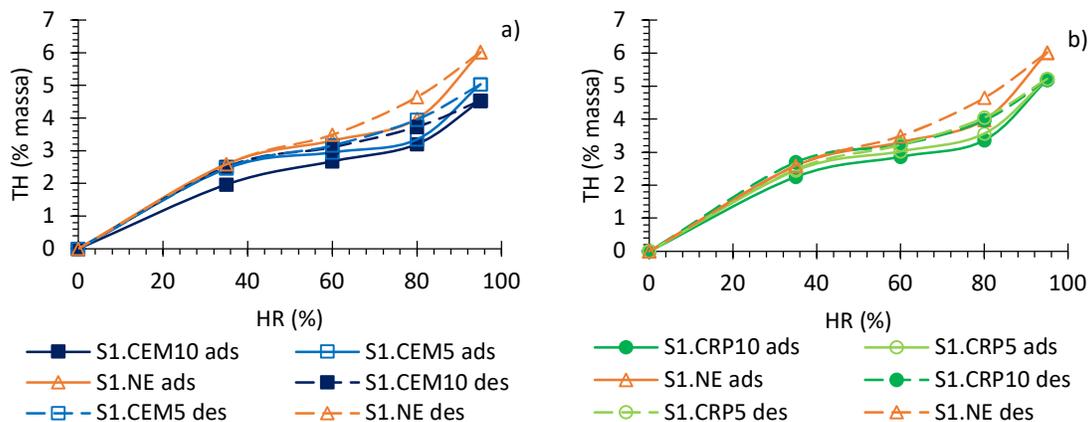


Figura 2 – Curvas de adsorção-dessorção dos S1.BTC produzidos com diferentes quantidades de: a) CEM; b) CRP

Relativamente ao tipo de estabilizante, o comportamento dos S1.BTC com CEM ou com CRP foi semelhante. A adsorção aos 35%HR e 95%HR foi ligeiramente superior nos BTC com CRP do que nos BTC com CEM (Figura 2), o que poderá ser explicado pela sua superfície específica e PT_{MIP} (Quadro 2) ligeiramente superiores, respetivamente.

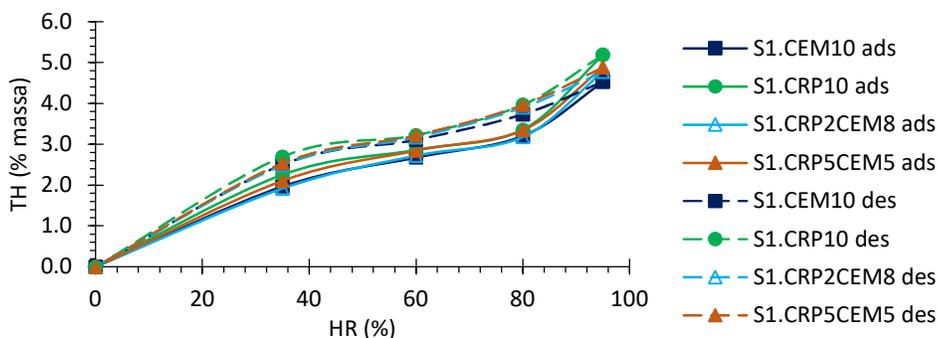


Figura 3– Curvas de adsorção-dessorção dos S1.BTC produzidos 10% de estabilizante composto por diferentes quantidades de CEM e CRP

A histerese média também foi ligeiramente inferior nos BTC com CRP do que nos com CEM (Quadro 1), tanto para 5% como para 10% de estabilizante. No entanto, estes parâmetros foram determinados em percentagem de massa, pelo que os resultados terão sido afetados pela variação da massa volúmica seca dos BTC com CRP e CEM. Tendo em conta que as massas volúmicas dos BTC com CRP foram cerca de 90% das dos BTC com CEM (Quadro 1), a mesma adsorção em percentagem de massa corresponde a menor quantidade de água adsorvida. Desta forma, caso o TH tivesse sido determinado em percentagem de volume, os S1.BTC com CRP teriam apresentado $TH_{95\%HR}$ e histereses médias semelhantes às dos com CEM. Conforme discutido na secção 3.2, a fração de poros abaixo de 50nm e a superfície específica foram idênticas nos S1.BTC com CRP e com CEM (Quadro 2). A substituição parcial de CEM por CRP a curvas de adsorção-dessorção e $TH_{95\%HR}$ intermédios relativamente aos BTC com apenas CRP ou CEM (Figura 3). Em suma, a capacidade higroscópica dos BTC com solo argiloso



(S1.BTC) decresceu com o teor de estabilizante, tendo sido pouco afetada pelo tipo de estabilizante. A Figura 4 apresenta as curvas de adsorção-dessorção dos S2.BTC produzidos com CRP ou CEM. Ao contrário dos S1.BTC, os $TH_{95\%HR}$ dos BTC estabilizados foram superiores aos do S2.NE (Figura 4), independentemente do tipo de estabilizante. De facto, apesar da sua menor massa volúmica e maior PT_{MIP} (Quadro 2), a sua microestrutura foi mais refinada, apresentando maior volume de microporos (Quadro 2). O teor de argila reduzido do solo S2, ainda mais reduzido com a incorporação de RCD, pode explicar a superfície específica reduzida do S2.NE e a sua subsequente pouca adsorção a 35%HR. Devido ao facto de o solo S2 ter um teor de argila reduzido, a estabilização cimentícia teve um efeito pouco relevante na redução da superfície específica dos S2.BTC comparativamente ao S2.NE (Quadro 2), o que explica a sua influência pouco significativa na capacidade de adsorção-dessorção até 60-80%HR (Figura 4). O maior volume de mesoporos (6-50nm) dos S2.BTC estabilizados compensou a redução da superfície específica após a estabilização, tendo aumentado a capacidade de adsorção, em especial ao nível da condensação capilar, acima de 80%HR. Devido à sua maior capacidade de adsorção e à forma mais complexa da estrutura porosa destes BTC (efeito de *ink-bottle* mais relevante), a curva de dessorção foi maior nos S2.BTC estabilizados do que no S2.NE, tendo conduzido a histereses médias mais elevadas (Figura 4 e Quadro 1).

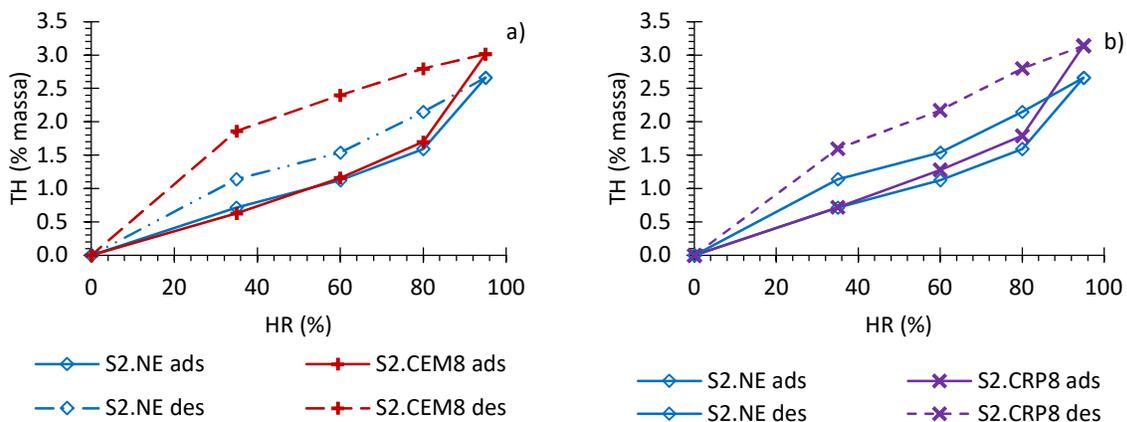


Figura 4 – Curvas de adsorção-dessorção do S2.NE e dos S2.BTC produzidos com: a) 8%CEM; b) 8%CRP

À semelhança dos S1.BTC, os S2.BTC com CRP apresentaram menor histerese média e maior $TH_{95\%HR}$ do que os com a mesma percentagem de CEM (Quadro 1). Com base na discussão de resultados dos S1.BTC, tendo conta a redução de apenas 5% da massa volúmica do S2.BTC com CRP, seria expectável que o $TH_{95\%HR}$ fosse semelhante ao do S2.BTC com CEM. No entanto, ao contrário dos S1.BTC, a fração do volume de poros total abaixo de 50nm do S2.BTC com CRP foi inferior à do com CEM, tendo resultado em curvas de dessorção e histereses menores, em especial para 35-60%HR. Todavia, o tipo de estabilizante não afetou o comportamento higroscópico dos S2.BTC de forma relevante. Além disso, ao contrário dos BTC com solo argiloso (S1.BTC), a estabilização dos BTC com solo arenoso (S2.BTC) incrementou a sua capacidade higroscópica.

À semelhança dos S1.BTC, apenas se observaram pequenas variações das curvas de adsorção-dessorção quando o CEM foi parcialmente substituído por CRP (Figura 5). Ao contrário do que se verificou para o S2.BTC com apenas CRP, a incorporação de até 50% CRP não afetou significativamente a massa volúmica e as curvas de dessorção dos S2.BTC. O $TH_{95\%HR}$ e curva de dessorção mais elevados foram obtidos para o S2.BTC com 20%CRP (S2.CRP1,6CEM6,4), que também apresentou a maior resistência à compressão (Quadro 1).

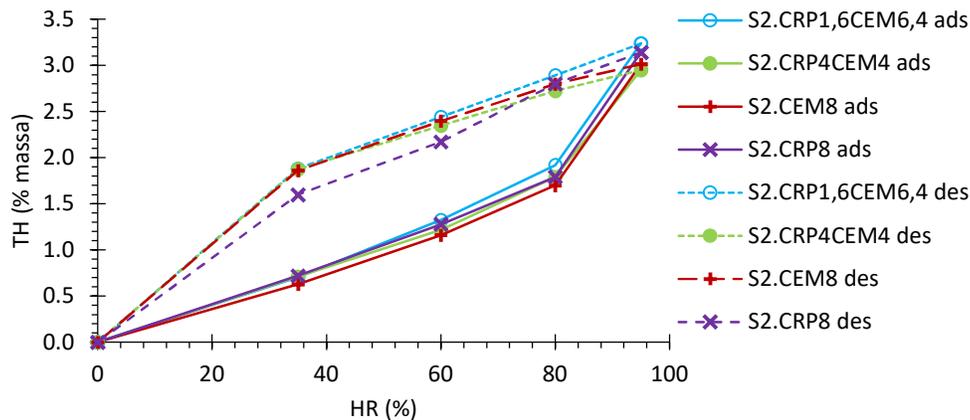


Figura 5– Curvas de adsorção-dessorção dos S2.BTC produzidos 8% de estabilizante composto por diferentes quantidades de CEM e CRP

4 CONCLUSÕES

A microestrutura e capacidade higroscópica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado, como substituição parcial ou total do cimento Portland, foi analisada tendo em conta diferentes tipos de solo e percentagens de estabilizante.

Devido à maior necessidade de água e maior dificuldade de compactação, os BTC com CRP apresentaram menor grau de compactação e resistência à compressão do que os BTC com CEM. No entanto, o CRP exibiu elevada capacidade de hidratação e eficiência na estabilização, tendo atingido resistências à compressão mais de duas vezes superiores às dos BTC.NE.

A microestrutura dos BTC ficou mais refinada após estabilização, independentemente do tipo de solo e estabilizante. O volume de mesoporos aumentou, tendo afetado a capacidade higroscópica e a histerese dos BTC.

A influência da estabilização nas propriedades higroscópicas dos BTC dependeu do tipo de solo, tendo contribuído para o seu decréscimo quando foi utilizado um solo argiloso (S1) e incremento quando foi utilizado um solo arenoso (S2). A estabilização reduziu a atividade e área de adsorção de partículas argilosas disponível (superfície específica e porosidade intercamada), tendo reduzido as propriedades de adsorção, em particular na fase de adsorção monocamada. No entanto, o volume de mesoporos aumentou. Desta forma, dependendo do teor de argila, a estabilização pode aumentar ou reduzir a capacidade higroscópica dos BTC.

A estabilização dos BTC alterou a estrutura porosa dos BTC, tendo resultado em maior quantidade de mesoporos, e consequentemente, aumentado a histerese. Este fenómeno torna-se mais relevante para maior teor de estabilizante.

O desempenho higroscópico dos BTC não foi afetado de forma relevante pela substituição parcial ou total de CEM por CRP. Apesar de terem apresentado maior porosidade, a microestrutura fina dos BTC com CRP foi semelhante à dos com CEM.

Assim, o CRP foi efetivo na estabilização dos BTC, tendo-se aproximado do comportamento mecânico e higroscópico dos BTC com CEM.



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021. Os autores agradecem ainda o apoio do CERIS através do projeto UIDB/04625/2020, bem como a colaboração da SECIL e da Vimajas, pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental, e das Oficinas do convento, Montemor-o-Novo. O terceiro autor gostaria ainda de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento 2023.05651.BD.

REFERÊNCIAS

- Arrigoni, A., Grillet, A., Pelosato, R., Dotelli, G., Beckett, C., Woloszyn, M., Ciancio, D., 2017. Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation. *Build. Environ.* 115, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.034>
- ASTM D698, 2021. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). American Society for Testing & Materials (ASTM).
- Augarde, C., 2012. Soil mechanics and earthen construction: strength and mechanical behaviour. In *Modern Earth Buildings, Materials, Engineering, Constructions and Applications*, A volume in Woodhead Publishing Series in Energy. Edited by M. Hall, R. Lindsay and M. Krayenhoff, pp. 204–221.
- Bogas, J., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J., Guedes, M., 2022. Hydration and phase development of recycled cement. *Cem. Concr. Compos.* 127, 104405. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>
- Bogas, J., Real, S., Cruz, R., Azevedo, B., 2023. Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *J. Build. Eng.* 79. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107892>
- Carriço, A., Bogas, J., Real, S., Pereira, M., 2022. Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Constr. Build. Mater.* 333, 127392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>
- Carriço, A., Real, S., Bogas, J., 2021. Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete. *Cem. Concr. Compos.* 124, 104270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>
- E 239, 1970. Soils. Grain-size analysis by wet sieving. Laboratório de engenharia civil (LNEC).
- EN 1097-6, 2013. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption. European Committee for standardization (CEN).
- EN 772-11, 2011. Methods of test for masonry units. Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry un. European Committee for standardization (CEN).
- EN 772-13, 2000. Methods of test for masonry units. Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone). European Committee for standardization (CEN).



- EN ISO 12571, 2021. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties. European Committee for standardization (CEN).
- Fabbri, A., Aubert, J.-E., Bras, A., Faria, P., Gallipoli, D., Goffart, J., McGregor, F., Perlot-Bascoules, C., Soudani, L., 2022. Hygrothermal and Acoustic Assessment of Earthen Materials. pp. 83–126. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_3
- HB 195, 2012. The australian earth building handbook. Standards Australia.
- McGregor, F., Heath, A., Shea, A., Lawrence, M., 2014. The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Build. Environ.* 82, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>
- NBR 8492, 2012. Soil-cement brick. Dimensional analysis, compressive strength and water absorption. Test method. Associação brasileira de normas técnicas (ABNT).
- NP 143, 1969. Soils. Determination of consistency limits. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP 83, 1965. Soils. Determination of particle density. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- Real, S., Bogas, J., Carriço, A., Hu, S., 2021. Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. *Appl. Sci.* 11, 2454. <https://doi.org/10.3390/app11062454>
- Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J., Carriço, A., 2022. Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production. *Materials (Basel)*. 15. <https://doi.org/10.3390/ma15196766>
- Rigassi, V., 1985. Compressed earth blocks : Manual of production. Vol. I. Eschborn, Germany: CRAterre-EAG.
- Saidi, M., Soukaina, A., Zeghmati, B., Sediki, E., 2018. Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. *Constr. Build. Mater.* 167, 566–577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063>
- WBCSD, IEA, 2009. Cement technology roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA).
- Wu, J., Deng, Z., Deng, Y., Zhou, A., Zhang, Y., 2022. Interaction between cement clinker constituents and clay minerals and their influence on the strength of cement-based stabilized soft clay. *Can. Geotech. J.* 59, 889–900. <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0194>
- XP P 13-901, 2001. Compressed earth blocks for walls and partitions. Definitions. Specifications. Test methods. Delivery acceptance conditions. Association Française de Normalisation (AFNOR).