



DESEMPENHO TÉRMICO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM CIMENTO RECICLADO TERMOATIVADO

Sofia Real^a; José Bogas^b; Ricardo Cruz^b; Martim Nabais^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; ricardojrcruz@tecnico.ulisboa.pt; maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt;
martimnabais@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo a caracterização do comportamento térmico de blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com cimento reciclado termoativado (CRP) e com incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD). Para tal, foi realizado um vasto trabalho experimental, em que foram analisadas as propriedades térmicas de BTC produzidos com diferentes tipos de solo, tipos e teores de estabilizante, e percentagens de incorporação de RCD. Dado que o desempenho térmico dos BTC é afetado pela sua microestrutura, estes também foram caracterizados em termos de microporosimetria de intrusão de mercúrio e adsorção de nitrogénio.

As propriedades térmicas dos BTC foram essencialmente influenciadas pela sua porosidade global, e em segundo plano, pelo tipo e distribuição da porosidade, independentemente da sua composição. A condutibilidade térmica dos BTC foi afetada pelo teor de humidade, dependendo dessa influência da distribuição de porosidade. Mesmo tendo em consideração BTC com idêntica porosidade total e resistência mecânica, a substituição de cimento Portland (CEM) por CRP ou de solo por RCD conduziram a melhor desempenho térmico. O comportamento térmico dos BTC com CRP ou CEM difere pela forma como estes estabilizantes afetam de forma diferente a sua microestrutura.

Palavras-chave: Blocos de terra comprimida, cimento reciclado termoativado, agregado reciclado, condutibilidade térmica, microestrutura



1 INTRODUÇÃO

O desempenho térmico dos edifícios e, conseqüentemente dos materiais de construção, é crucial para a sua sustentabilidade, dado que contribui não só para o conforto térmico, mas também para a redução do consumo energético necessário à manutenção desse estado. Os blocos de terra comprimida (BTC), que são essencialmente compostos por terra, um material abundante e económico, apresentam-se como materiais de construção amigos do ambiente com boa capacidade de isolamento térmico (Rigassi, 1985).

As propriedades térmicas dos materiais de construção encontram-se intimamente ligadas à sua porosidade e, conseqüentemente, à sua massa volúmica (Adam e Jones, 1995; Bogas et al., 2019; Real et al., 2015). Adam e Jones (1995) demonstraram que tal também é válido para BTC estabilizados, tendo obtido uma correlação exponencial entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica. Além disso, os autores salientaram que a composição do solo também afeta a massa volúmica e o desempenho térmico dos BTC. Zhang et al. (2017) destacaram a importância da composição mineralógica do solo para a condutibilidade térmica, em particular da presença de quartzo, que pode conduzir a maiores condutibilidades térmicas do que outros minerais. Por outro lado, Ouedraogo et al. (2020) reportaram que o tipo de solo teve pouca influência para a condutibilidade térmica dos BTC, ao testarem solos com massas volúmicas semelhantes.

Em geral, os BTC com melhor desempenho térmico tendem a apresentar um comportamento mecânico e de durabilidade mais fraco, dado que estas propriedades são influenciadas pela porosidade de forma oposta. Mansour et al. (2016) estudaram a influência da pressão de compactação no desempenho dos BTC, tendo observado que o aumento da pressão de compactação conduzia a maior massa volúmica e menor porosidade, e conseqüentemente, a maior condutibilidade térmica e resistência mecânica. Além disso, geralmente, os BTC não estabilizados (NE) não apresentam durabilidade adequada, em especial em termos de resistência à água (Adam e Jones, 1995; Bogas et al., 2019; Zhang et al., 2017). Assim, a estabilização química apresenta-se como uma solução eficaz para incrementar significativamente a durabilidade dos BTC (Bogas et al., 2019). Saidi et al. (2018) verificaram que a estabilização com cimento e cal hidráulica resultava numa redução da capacidade de absorção dos BTC, mas aumentava a condutibilidade térmica. De facto, a incorporação de estabilizantes, nomeadamente cimento (CEM), leva à formação de produtos de hidratação que preenchem parcialmente a porosidade dos BTC, resultando em maiores massas volúmicas e, conseqüentemente, em menor capacidade de isolamento térmico. No entanto, Zhang et al. (2017) não observaram uma variação relevante da condutibilidade térmica de BTC estabilizados com 5-8% de cimento, com mesma massa volúmica. Tal foi atribuído a uma condutibilidade térmica semelhante entre solo e pasta de cimento, bem como à percentagem de incorporação reduzida, que não terá sido suficiente para reduzir a porosidade após a sua hidratação. Todavia, a resistência à compressão deste BTC aumentou consideravelmente com a incorporação de cimento por efeito de cimentação do solo.

Contudo, em termos de sustentabilidade ambiental, a incorporação de CEM em BTC contraria a natureza ecológica da construção em terra, contribuindo para um aumento relevante da pegada de carbono. Neste sentido, têm sido desenvolvidos novos ligantes eco-eficientes como alternativa ao CEM, nomeadamente cimento reciclado termoativado (CRP), já testados em outros materiais de construção (Carriço et al., 2022; Real et al., 2021a) com potencial para ser incorporados em BTC. No entanto, o conhecimento dos efeitos da incorporação de CRP em BTC ainda é escasso, nomeadamente das suas propriedades térmicas.

Este estudo caracteriza o desempenho térmico de BTC eco-eficientes. Para tal, foi determinada a condutibilidade térmica de BTC produzidos com dois tipos de solo (S1 e S2), substituição parcial de



solo por resíduos de construção e demolição (RCD) (0-25%) e incorporação de 0-10% de estabilizante (CRP e/ou CEM).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÃO

Para a produção dos BTC, foram selecionados dois tipos de solo (S1 e S2) provenientes de Montemor-o-Novo, um resíduo de construção e demolição (RCD) da *Vimajas*, CEM 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. Além disso, S1 e S2 eram compostos por cerca de 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 (com base em ensaios de sedimentação), respetivamente. Adicionalmente, a composição granulométrica dos solos encontrava-se dentro dos limites sugeridos pela XP P 13-901 (2001). Os solos foram ainda analisados de acordo com análises de difração de raios-X e de termogravimetria, sendo essencialmente compostos por quartzo e albita e pequenas quantidades de argilas expansivas, nomeadamente nontronite (S1) e montmorillonite (S2). Os RCD apresentavam uma massa volúmica de 2300 kg/m³ e absorção de água às 24 horas de 4,3% (EN 1097-6, 2013), sendo compostos por cerca de 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 cimento CEM I 42,5R apresentava uma consistência normal de 0,295 e um tempo de presa de 190-310 minutos, bem como apenas 1,02% de hidróxido de cálcio (CaO) livre. O CRP foi obtido a partir de pasta produzida em laboratório com relação água/cimento de 0,55 e resistência à compressão aos 28 dias de 33,4 MPa. Cerca de 3 meses após a produção, a pasta foi submetida a processos de moagem, de forma a obter partículas de dimensão inferior a 125 µm. De seguida, as partículas foram sujeitas a tratamento térmico num forno rotativo, tendo sido aquecidas a 10°C/min até 150°C, onde permaneceram durante 1 hora, seguido de novo aquecimento a 10°C/min até 650°C, onde permaneceram durante 3 horas, tendo finalmente sido arrefecidas dentro do forno até temperatura ambiente. O CRP apresentava uma consistência normal de 0,73, um tempo de presa de 290-385 minutos e cerca de 13,94% de CaO livre.

Para este estudo, os BTC foram produzidos em duas fases, com cerca de 220×105×60-80 mm com recurso a uma prensa manual da *Terstaram* com uma força de compactação de 150kN. Na fase 1, os BTC foram produzidos com o solo S1 e 5-10% de estabilizante (CRP ou CEM), enquanto, na fase 2, foi utilizado o solo S2, até 25% de RCD e 5-8% de estabilizante (CRP ou CEM), para melhorar a sua eficiência. A composição dos BTC encontra-se no Quadro 1. De referir que, após a produção, os BTC estabilizados foram sujeitos a 7 dias de cura húmida, e os BTC não estabilizados a 7 dias de cura seca cobertos com película.

2.2 MÉTODOS DE ENSAIO

A condutibilidade térmica (CT) foi determinada através de um método transiente modificado (ASTM D5334, 2014; ASTM D5930, 2009), recorrendo a um analisador de transferência de calor *ISOMET 2114* com sonda plana da *Applied Precision Enterprise*. A condutibilidade térmica foi convertida para uma temperatura e 10°C, de acordo com a ISO/FDIS 10456 (2007).



A caracterização física e mecânica dos BTC foi realizada através de ensaios de massa volúmica (MV) (EN 772-13, 2000) e de resistência à compressão aos 28 dias (f_c) (EN 772-11, 2011; NBR 8492, 2012). Os ensaios de resistência mecânica foram realizados sobre BTC em ambiente de laboratório com recurso a uma prensa hidráulica *Tonipact* com capacidade de 3000kN e uma célula de carga com capacidade de 200kN. A porosidade total estimada (PT) dos BTC após hidratação do estabilizante foi determinada de conforme explicado em (Bogas et al., 2023). Foram também realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e de adsorção de nitrogénio (N_2) para seis composições. Os ensaios de MIP e de adsorção de N_2 foram realizados com recurso a um porosímetro *AutoPore IV 9500 V1.09* e um analisador *Micromeritics ASAP 2010*, respetivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

O Quadro 1 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas dos BTC estudados. Os S1.BTC apresentaram menores massas volúmicas secas do que os S2.BTC, o que pode ser explicado pelo facto de o solo S2 estar associado a menor teor ótimo de humidade e melhor compactação (secção 2.1). Em geral, a incorporação de RCD não teve um efeito relevante na massa volúmica dos S2.BTC (Quadro 1). Devido à sua menor massa volúmica (RCD), seria expectável que a massa volúmica decrescesse com a substituição de solo por RCD. No entanto, a maior compacidade granular atingida com a incorporação de RCD compensou este efeito. Assim, as ligeiras diferenças observadas deveram-se essencialmente à variação do grau de compactação, pelo que não se observou nenhuma tendência, em que o S2.CEM8.RCD15 foi o BTC que atingiu a maior compacidade.

A incorporação de CEM não influenciou a massa volúmica de forma relevante (Quadro 1), indicando que a compacidade dos BTC foi pouco afetada pelo teor de CEM. No entanto, foram observadas diferenças mais significativas com a incorporação de CRP, devido à sua maior necessidade de água. De facto, as massas volúmicas dos BTC com CRP tenderam a ser inferiores às dos BTC com o mesmo teor de CEM, associado à sua menor porosidade total (Quadro 1). Por um lado, os S1.BTC com CRP foram produzidos com maior teor de água do que os com CEM (Quadro 1). Por outro lado, para teor de água idêntico, os S2.BTC com CRP foram mais difíceis de compactar do que os com CEM, devido à maior necessidade de água do CRP. Além disso, de acordo com estudos anteriores (Bogas et al., 2022), o CRP tende a produzir uma quantidade de produtos de hidratação ligeiramente inferior do que o CEM a longo-prazo, o que contribui para o decréscimo da água ligada em BTC no estado seco.

Os S2.BTC atingiram resistências à compressão quase duas vezes superiores às dos S1.BTC, mesmo tendo um teor de estabilizante inferior. Tal pode ser explicado pelo maior grau de compactação alcançado nos S2.BTC do que nos S1.BTC, que pode ser confirmado pela sua porosidade total (Quadro 1). A substituição parcial de solo por RCD teve um efeito pouco relevante na resistência mecânica dos S2.BTC (Quadro 1), observando-se a mesma tendência da massa volúmica. Por outro lado, a incorporação de estabilizante contribuiu claramente para o aumento da resistência à compressão (Quadro 1), independente do tipo de estabilizante. No entanto, para a mesma percentagem de incorporação de estabilizante, os BTC com CEM apresentaram resistências à compressão cerca de 35% (S1) e 64% (S2) superiores à dos BTC com CRP. Conforme referido, os S1.BTC com CRP foram produzidos com maior teor de água do que os com CEM (Quadro 1). Além disso, devido à maior necessidade de água do CRP, a compactação dos BTC com este tipo de estabilizante foi maior difícil do que a dos com CEM para a mesma quantidade de água. Adicionalmente, conforme referido, os produtos de hidratação produzidos pelo CRP a longo-prazo tendem a ser ligeiramente inferiores aos do CEM, o que poderá contribuir para um menor grau de cimentação dos BTC. Contudo, a incorporação



de CRP resultou numa melhoria da resistência mecânica de cerca de 1,9 (S1) e 2,7 (S2) vezes em relação aos BTC não estabilizados (NE). De referir que, apesar da sua maior porosidade total, o S1.NE atingiu maior resistência mecânica do que o S2.NE, essencialmente devido ao facto de o solo S1 apresentar um maior teor de finos e argila, proporcionando uma maior capacidade de cimentação natural.

Quadro 1 – Composição dos BTC e resultados dos ensaios

Fase	Designação	Tipo de solo	RCD (%)	CEM (%)	CRP (%)	Água total (%)	MV seca (kg/m ³)	PT (%)	fc (MPa)	CT seca (W/mK)
Fase 1	S1.CEM10	S1	-	10	-	15,0	1769	34,2	5,92	0,51
	S1.CRP10	S1	-	-	10	16,5	1595	39,0	4,44	0,38
	S1.CEM5	S1	-	5	-	15,2	1737	36,5	3,34	0,46
	S1.CRP5	S1	-	-	5	16,2	1649	39,3	2,45	0,41
	S1.CRP2.CEM8	S1	-	2	8	15,0	1742	35,4	5,12	0,50
	S1.CRP5.CEM5	S1	-	5	5	15,5	1683	37,1	4,99	0,46
	S1.NE	S1	-	-	-	14,4	1754	34,4	2,33	0,53
Fase 2	S2.CEM8	S2	25	8	-	14,0	1865	28,6	9,04	0,69
	S2.CEM8.RCD15	S2	15	8	-	14,0	1925	28,0	9,99	0,76
	S2.CEM8.RCD0	S2	-	8	-	14,0	1895	28,2	9,34	0,80
	S2.CEM5	S2	25	5	-	14,0	1874	29,2	6,52	0,63
	S2.CRP8	S2	25	-	8	14,0	1778	32,8	5,51	0,63
	S2.CRP1,6.CEM6,4	S2	25	6,4	1,6	14,0	1845	28,1	10,43	0,75
	S2.CRP4.CEM4	S2	25	4	4	14,0	1874	30,3	8,39	0,66
S2.NE	S2	25	-	-	12,0	1835	30,4	2,08	0,75	

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

O Quadro 2 apresenta os resultados da análise microestrutural realizada para 6 composições. A porosidade total obtida a partir de MIP (PT_{MIP}) variou entre 31,8 e 34,5% e entre 23,9 e 27,5%, para S1.BTC e S2.BTC, respetivamente. Da mesma forma, o volume total de poros obtido para adsorção de N_2 variou entre 0,0386 e 0,0447 cm^3/g e entre 0,0206 e 0,0366 cm^3/g , respetivamente. Assim, os S1.BTC apresentaram maior porosidade do que os S2.BTC, o que corrobora os resultados da massa volúmica seca e da porosidade total estimada (Quadro 1), confirmando-se a sua menor compacidade. No entanto, apesar de a sua porosidade ser maior e mais grosseira, os S1.BTC apresentaram maior



superfície específica do que os S2.BTC. Além disso, o volume de poros <50nm (N₂) dos S1.BTC também foi superior ao dos S2.BTC, o que pode ser atribuído ao maior teor de partículas finas destes BTC.

Quadro 2 – Resultados das análises MIP e de adsorção de N₂

Designação	Análise MIP			Análise de adsorção de N ₂			
	Porosidade total <400µm (%)	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

Embora a PT_{MIP} dos BTC estabilizados não tenha sido sempre inferior à dos BTC.NE, a sua porosidade foi claramente mais refinada. De facto, a estabilização resultou num incremento da quantidade de mesoporos entre 6 e 50nm (MIP). Por outro lado, a estabilização contribuiu para o decréscimo da superfície específica, que foi até 72 e 22% maior nos NE do que nos restantes S1.BTC e S2.BTC correspondentes, respetivamente. Tal deve-se ao facto de o estabilizante inativar as partículas finas de argila, promovendo a sua separação e aglomeração, reduzindo o espaço intercamada e a superfície específica (Wu et al., 2022). Este efeito foi mais visível nos S1.BTC porque o seu teor de argila era superior ao dos S2.BTC.

Os BTC com CRP apresentaram maior PT_{MIP} do que os BTC com a mesma percentagem de incorporação de CEM I, independentemente do tipo de solo. Tal deve-se ao 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 I. Todavia, apesar da sua maior porosidade total, a sua microestrutura foi semelhante a mais refinada do que a dos BTC com CEM I correspondentes, em particular nos S1.BTC. De facto, a fração da porosidade correspondente à porosidade mais fina do S1.CRP10 foi semelhante no MIP (6-5nm) e superior na adsorção de N₂ (<50nm) do S1.CEM10. Tal pode ser explicado pelo facto de, devido à porosidade das partículas de CRP, parte da água da mistura ser absorvida pela porosidade intrapartícula, contribuindo para a redução do espaço interpartícula e para a densificação da sua microestrutura (Bogas et al., 2022).

No entanto, o mesmo não se verificou nos S2.BTC, em que o BTC com CEM I apresentou uma microestrutura mais refinada do que o BTC com CRP, o que explica a resistência à compressão ligeiramente menor para determinada porosidade (Quadro 1). Todavia, a superfície específica dos BTC



com CRP foi muito semelhante à dos BTC com CEM I, independentemente do tipo de solo. Tal é indicativo de que, em geral, ambos os estabilizantes foram eficientes.

3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

A condutibilidade térmica seca dos BTC variou entre 0,38 e 0,80 W/mK, em que a dos BTC com 5-10%CEM variou entre 0,51 e 0,8 W/mK (Quadro 1), encontrando-se dentro dos valores apresentados por outros autores (Adam e Jones, 1995; Saidi et al., 2018; Zhang et al., 2017). De acordo com a literatura, as propriedades térmicas dos materiais de construção são essencialmente afetadas pela sua porosidade, conforme demonstrado na Figura 1, em que se observa uma boa correlação entre estas propriedades, mesmo tendo em conta diferentes tipos de solo, percentagens de incorporação de RCD e tipos e teores de estabilizante.

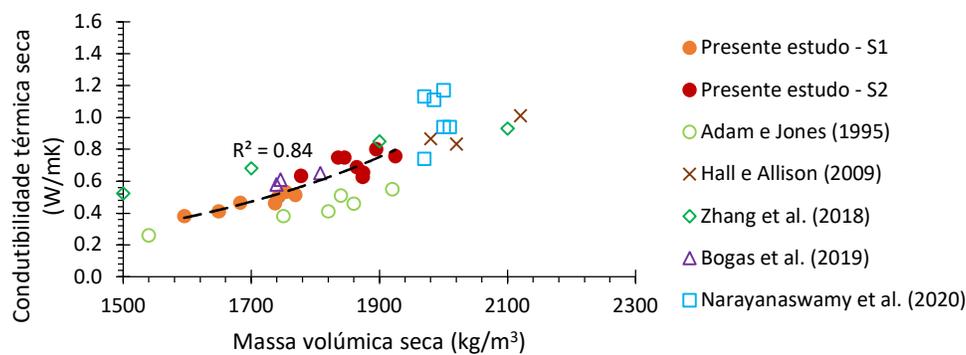


Figura 1 – Condutibilidade térmica seca em função da massa volúmica seca, segundo diferentes estudos (Adam and Jones, 1995; Bogas et al., 2019; Hall and Allinson, 2009; Narayanaswamy et al., 2020; Zhang et al., 2018)

3.3.1 INFLUÊNCIA DO TIPO E TEOR DE ESTABILIZANTE

A Figura 2 apresenta a condutibilidade térmica seca de BTC com diferentes percentagens de incorporação de estabilizante. Em geral, o tipo e percentagem de incorporação de estabilizante não influenciou a condutibilidade térmica de forma relevante, não se tendo observado tendência clara, em especial em BTC com CEM. Tal deve-se ao facto de a massa volúmica seca e a porosidade total dos BTC terem sido mais afetadas pelas condições de compactação do que pelas propriedades de cimentação.

No entanto, a incorporação de estabilizante levou ao decréscimo da condutibilidade térmica, mesmo quando a porosidade total foi menor (Figura 3). Adicionalmente, conforme discutido, para a mesma porosidade total, algumas composições apresentaram diferentes condutibilidades térmicas. Tal deve-se ao facto de a condutibilidade térmica seca ser afetada não só pela porosidade total, mas também pela distribuição de porosidade. De facto, na Figura 3, as composições acima da curva de regressão apresentam porosidades menos refinadas (secção 3.2). Este aspeto é mais evidente no caso do S2.NE, que apresentou uma porosidade muito mais grosseira dos que as outras composições. De forma semelhante, o S2.CEM8 encontra-se abaixo da curva de regressão, tendo apresentado uma porosidade bastante mais refinada do que o S2.CRP8 ou o S2.NE. Por outro lado, os S1.BTC seguiram todos a mesma tendência de condutibilidade térmica seca em função da porosidade total estimada, porque o refinamento da microestrutura do S1.CEM10 e do S1.CRP10 foi semelhante. Para porosidades totais idênticas, o S1.NE, com porosidade ligeiramente mais grosseira, também apresentou uma condutibilidade térmica seca ligeiramente superior à do S1.CEM10.

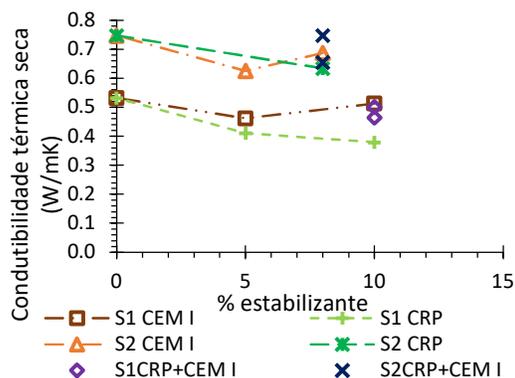


Figura 2 – Condutibilidade térmica seca dos BTC em função da percentagem de incorporação de estabilizante

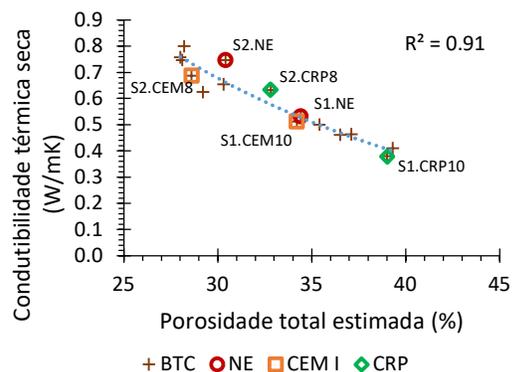


Figura 3 – Condutibilidade térmica seca dos BTC em função da porosidade total estimada

A maior condutibilidade térmica em microestruturas mais grosseiras pode ser explicada pelo facto de, assumindo uma distribuição uniforme de poros, para o mesmo volume total de poros, uma maior quantidade de poros de menor dimensão resultaria numa estrutura mais homogénea do que uma menor quantidade de poros de maior dimensão distribuídos na matriz (Figura 4). Esta última tenderia a contribuir para maiores desvios das linhas de fluxo, com maior condução de calor, do que a outra (Figura 4), i.e., o contrato entre sólidos e o a trajetória do fluxo de calor deverá ser mais difícil em estruturas porosas mais refinadas (Figura 4).

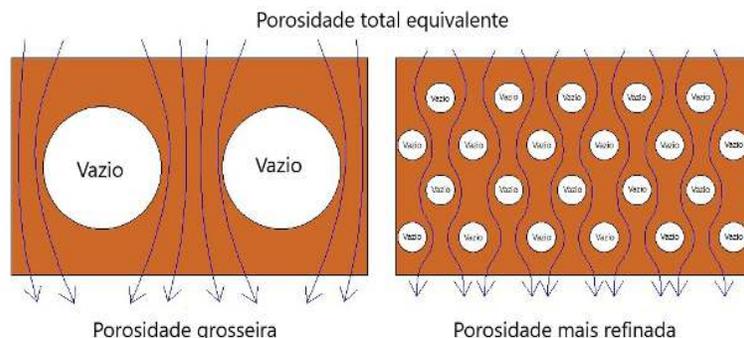


Figura 4 – Representação esquemática da distribuição de fluxo de calor em microestruturas com porosidade mais grosseira (esquerda) ou mais refinada (direita), para porosidade total equivalente

De forma resumida, para a mesma percentagem de incorporação, a condutibilidade térmica seca dos S1.BTC e S2.BTC com CRP foram até 26 e 8% inferiores às dos com CEM, respetivamente. Este resultado pode ser atribuído essencialmente à maior porosidade dos BTC com CRP. Adicionalmente, embora a condutibilidade térmica dos BTC com CRP tenha diminuído com a percentagem de incorporação deste tipo de estabilizante, o mesmo não se verificou para os BTC com CEM, que não apresentaram tendência clara (Figura 2). Tal pode ser explicado pelo facto de a variação da massa volúmica seca dos BTC com CRP ter sido mais relevante do que a dos BTC com CEM. A substituição parcial de CEM por CRP conduziu a propriedades térmicas intermédias (Figura 2). Em comparação com os respetivos BTC não estabilizados (NE), a condutibilidade térmica seca dos S1.BTC e S2.BTC variou até 29 e 16%, respetivamente. A maior diferença observada nos S1.BTC pode ser justificada pela maior variação da



sua massa volúmica seca (até 9 e 3% nos S1.BTC e S2.BTC, respetivamente (Quadro 1)). Conforme seria expectável, observou-se uma correlação fraca entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão dos BTC (Figura 5). Por um lado, para além do eventual preenchimento da porosidade com produtos de hidratação, os estabilizantes contribuíram para o efeito de ligação das partículas, resultando num aumento da resistência mecânica sem afetar a condutibilidade térmica de forma relevante. De facto, a correlação entre estas propriedades melhora quando os NE não foram considerados (Figura 5). Por outro lado, conforme discutido, a incorporação de RCD teve pouca relevância para a resistência à compressão dos BTC, mas reduziu a condutibilidade térmica. Finalmente, dado que a humidade também influencia ambas as propriedades, o facto de os ensaios terem sido realizados em condições diferentes também terá contribuído para os resultados.

3.3.2 INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A Figura 6 mostra a condutibilidade térmica seca dos S2.BTC com 8%CEM e percentagens de incorporação de RCD diferentes. A condutibilidade térmica seca decresceu até 16% com a percentagem de incorporação de RCD.

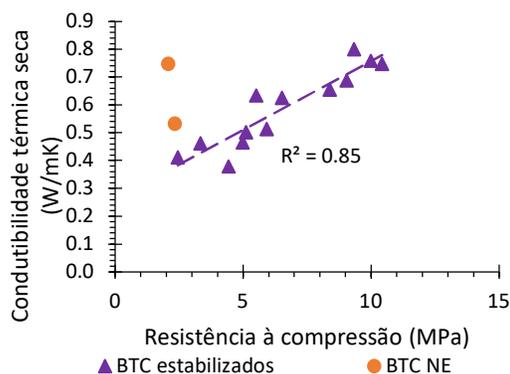


Figura 5 – Condutibilidade térmica seca em função da resistência à compressão em ambiente de laboratório

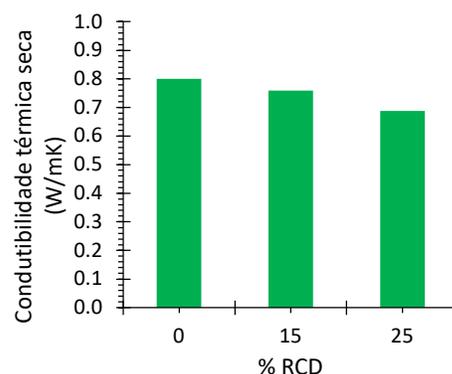


Figura 6 – Condutibilidade térmica seca dos BTC em função da percentagem de substituição de solo por RCD

Por um lado, o solo foi parcialmente substituído por um RCD mais poroso. Por outro lado, os BTC com incorporação de RCD atingiram maior grau de compactação (secção 3.1). A conjugação destes fatores resultou em variações desprezáveis de massa volúmica seca e porosidade total (Quadro 1). No entanto, conforme referido, a condutibilidade térmica também é influenciada por outros aspetos como a composição mineralógica e a distribuição da porosidade. Neste caso, para porosidade total semelhante a ligeiramente superior, os BTC com RCD exibiram uma distribuição de porosidade diferente, sendo compostos por agregados porosos dispersos numa matriz ligeiramente mais densa do que os BTC sem RCD. De facto, a variação de distribuição de porosidade introduzida pela substituição de parte do solo por RCD, afeta o comportamento do fluxo de calor. As partículas de solo densas foram parcialmente substituídas por partículas de RCD porosos, que têm menor condutibilidade térmica do que a matriz de solo (Figura 7). Desta forma, ao contrário de um sistema com apenas solo, em que o fluxo de calor atravessa preferencialmente as partículas de solo densas, num sistema com solo e RCD, o fluxo de calor tende a contornar a partículas porosas de RCD, atravessando a matriz de solo (Real et al., 2021b). Assim, embora a matriz de solo tenha sido ligeiramente mais densa nos BTC com RCD (secção 3.1), a sua condutibilidade térmica foi inferior à dos sem RCD (Figura 6). Por outras palavras, a incorporação de RCD alterou a progressão do fluxo de calor,



tendo influenciado a condutibilidade térmica global além da variação da porosidade total. De facto, a substituição de solo por RCD leva à redução da quantidade de pontos de contacto entre partículas de solo, reduzindo a condutibilidade térmica (Mansour et al., 2016).

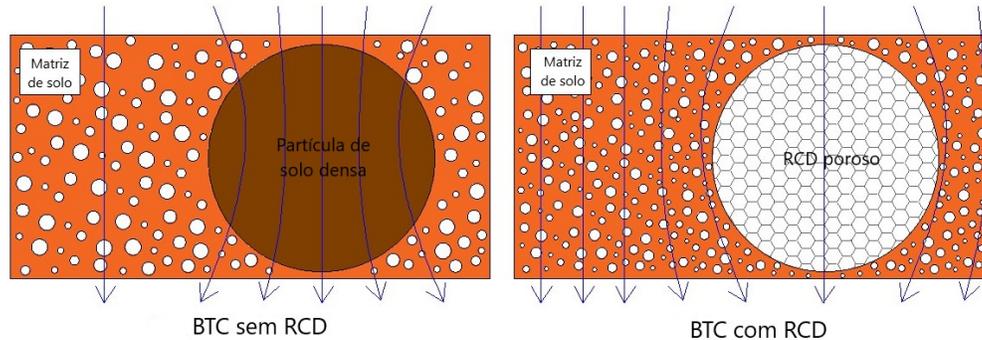


Figura 7 – Representação esquemática da distribuição de fluxo de calor em BTC sem RCD (esquerda) e com substituição de solo por RCD (direita)

4 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo caracterizar o comportamento térmico de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado e com incorporação de resíduos de construção e demolição.

A condutibilidade térmica dos BTC foi essencialmente influenciada pela sua porosidade total, e com menor relevância, pela sua distribuição de porosidade, em vez da sua composição. Devido à sua menor massa volúmica e maior porosidade total, os BTC com CRP apresentaram melhores condutibilidades térmicas do que os BTC com CEM, mantendo, contudo, um desempenho mecânico adequado. Além disso, para a mesma porosidade total, os BTC com porosidade mais refinada apresentaram uma condutibilidade térmica ligeiramente menor, devido à sua estrutura mais homogénea, que resultou em menores desvios de fluxo de calor. Assim, mesmo para porosidade total e resistência à compressão semelhante, a substituição de CEM por CRP ou incorporação de RCD teve tendência para melhorar o desempenho térmico dos BTC.

Em suma, os resultados demonstram os benefícios da incorporação de CRP e RCD para o desempenho térmico dos BTC, conduzindo a soluções mais eco-eficientes.

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

Adam, E., Jones, P., 1995. Thermophysical properties of stabilised soil building blocks. Build. Environ.



- 30, 245–253. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)00041-P](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00041-P)
- ASTM D5334, 2014. Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. American Society for Testing & Materials (ASTM).
- ASTM D5930, 2009. Thermal conductivity of plastics by means of a transient line-source technique. American Society for Testing & Materials (ASTM).
- 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).
- 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>
- Bogas, J., Silva, M., Gomes, M., 2019. Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *Int. J. Archit. Herit.* 13, 569–584. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>
- 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>
- 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).
- Gomes, M., Bogas, J., Real, S., Moret Rodrigues, A., Machete, R., 2023. Thermal Performance Assessment of Lightweight Aggregate Concrete by Different Test Methods. *Sustain.* 15. <https://doi.org/10.3390/su151411105>
- Hall, M., Allinson, D., 2009. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Build. Environ.* 44, 1935–1942. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.007>
- HB 195, 2012. The Australian earth building handbook. Standards Australia.
- ISO/FDIS 10456, 2007. Building materials and products – hygrothermal properties – tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. International Standards Organization (ISO).
- Lowell, S., Shields, J., Thomas, M., Thommes, M., 2005. Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size, and density. *Choice Rev. Online* 42, 42–5288. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.42-5288>



- Mansour, M., Jelidi, A., Cherif, A., Jabrallah, S., 2016. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Constr. Build. Mater.* 104, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- Narayanaswamy, A., Walker, P., Venkatarama Reddy, B., Heath, A., Maskell, D., 2020. Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. *Constr. Build. Mater.* 243, 118096. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118096>
- 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).
- Ouedraogo, K., Aubert, J., Tribout, C., Escadeillas, G., 2020. Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Constr. Build. Mater.* 236, 117578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>
- Real, S., Bogas, J., Carriço, A., Hu, S., 2021a. Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. *Appl. Sci.* 11, 2454. <https://doi.org/10.3390/app11062454>
- Real, S., Bogas, J., Gomes, M., Ferrer, B., 2015. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. *Mag. Concr. Res.* 68, 798–808. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00424>
- Real, S., Maia, C., Bogas, J., Gomes, M., 2021b. Thermal conductivity modelling of structural lightweight aggregate concrete. *Mag. Concr. Res.* 73, 798–809. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00320>
- 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>
- 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).
- Zhang, L., Gustavsen, A., Jelle, B., Yang, L., Gao, T., Wang, Y., 2017. Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. *Constr. Build. Mater.* 151, 504–511. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047>
- Zhang, L., Yang, L., Jelle, B., Wang, Y., Gustavsen, A., 2018. Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. *Constr. Build. Mater.* 162, 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.163>