

Resistência à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado

Ricardo Cruz^{1*}, Bruno Azevedo², José Alexandre Bogas¹ e Sofia Real¹

1: CERIS, Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1 1049-001 Lisboa

2: Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1 1049-001 Lisboa

E-mail: rjtomecruz@gmail.com

Resumo. A necessidade de uma construção mais sustentável, assente em materiais de menor energia incorporada, faz com que ressurgja o interesse na construção em terra. Os blocos de terra comprimida (BTC) são uma alternativa promissora, dado que permitem uma maior velocidade de processamento, menor variabilidade e maior resistência mecânica face a outras tecnologias de construção em terra. No entanto, a resistência à água é um dos maiores problemas dos BTC, sendo necessário proceder à sua estabilização. O cimento Portland (CP) é o estabilizante mais eficaz e mais utilizado, mas a sua incorporação na construção em terra é incompatível com a sua natureza ecológica e sustentável. Nesse sentido, no presente trabalho considerou-se a utilização alternativa de cimento reciclado (CR) de baixo carbono, obtido a partir da termoactivação de resíduos de materiais cimentícios, para estabilização dos BTC. Foram consideradas 7 composições, incluindo 3 misturas de referência (não estabilizada, e estabilizada com 5% ou 10% de CP, em massa), e BTCs com 20% 50% e 100% CR em substituição de CP, para 5% e 10% de ligante total. Os BTC foram caracterizados em termos da sua resistência à água, tendo em consideração ensaios de absorção por imersão, absorção capilar e de erosão acelerada por jato de água. Face aos BTC estabilizados com CP, a incorporação de CR reduziu a resistência à água. Porém, a estabilização dos BTC com CR foi adequada, conduzindo a uma melhoria significativa face aos BTC não estabilizados. Os BTC apresentaram elevada resistência à erosão acelerada, independentemente da composição do ligante.

Palavras-chave: Blocos de terra comprimido; estabilização; cimento reciclado; resistência à água; sustentabilidade

1. Introdução

Após a revolução industrial, a construção em Terra foi progressivamente substituída por outros materiais e técnicas de construção [1]. No entanto, mais recentemente, a falta de materiais e de técnicas de construção mais sustentáveis tem conduzido a um ressurgimento no seu interesse. Os principais pontos a favor da construção em Terra residem, principalmente, no facto de possuir um baixo impacto ambiental, reduzido custo, baixa energia incorporada e uma elevada disponibilidade da matéria-prima [2]. Porém, a elevada suscetibilidade à água da construção em Terra reduz significativamente as suas propriedades físicas e mecânicas e a sua durabilidade [3]. Os blocos de terra comprimida (BTC) quimicamente estabilizados assumem uma abordagem eficiente para mitigar a elevada suscetibilidade à água. Devido à estabilização e compactação, esta técnica de construção assegura uma maior velocidade de processamento [4], menor variabilidade [5], um melhor desempenho mecânico e uma maior durabilidade, quando comparada com outras técnicas de construção, tais como o adobe ou a taipa [6].

O cimento é um dos ligantes mais utilizados e eficientes para atuar como estabilizante [7], [8]. Walker & Stace [9] produziram BTC estabilizados com 5% e 10% de cimento com uma pressão de compactação de aproximadamente 2 MPa, confirmando que o aumento do teor de cimento conduziu a uma maior resistência mecânica e durabilidade (absorção por imersão e absorção por capilaridade). Por sua vez, Mahdad & Benidir [10] avaliaram o efeito da estabilização com cimento e da compactação na resistência e durabilidade de BTC. Os resultados mostraram a importância da pressão de compactação na resistência à compressão, atingindo mais de 8 MPa para uma percentagem de cimento de 8% e uma pressão de compactação de 7 MPa. A absorção à água por imersão reduziu drasticamente com a incorporação de cimento. Bogas et al [11] produziu BTC não estabilizados e estabilizados com 8% cimento e agregados reciclados. A resistência à compressão aos 28 dias dos BTC estabilizados foi cerca de duas vezes superior à dos BTC não estabilizados (5,37 MPa vs 2,37 MPa). Os blocos não estabilizados desintegraram-se quando submersos em água enquanto os BTC estabilizados apresentaram uma absorção por imersão de 14% às 48h e uma absorção por capilaridade de 20,8 g/cm².min^{1/2}. Quando expostos ao *drip test*, os BTC estabilizados não mostraram qualquer sinal de erosão, enquanto os não-estabilizados apresentaram uma profundidade de erosão de 4,3 mm e uma profundidade de penetração de humidade de 57,7 mm. Quando sujeitos ao *spray test* os blocos não estabilizados foram totalmente desintegrados, enquanto os blocos estabilizados não apresentaram danos assinaláveis. Foi assim concluído a necessidade de estabilizar os BTC com cimento.

No entanto, a libertação de enormes quantidades de CO₂ na produção de cimento faz com que a sua incorporação entre em conflito com os objetivos ecológicos e sustentáveis da construção em Terra. Desta forma, o desenvolvimento de estabilizantes alternativos que, sem comprometerem a qualidade da construção em Terra, mantenham a sua sustentabilidade e natureza ecológica é fundamental. Nesse sentido, no âmbito do projeto EcoHydb [12] conduzido no departamento de engenharia civil do IST, tem sido desenvolvido cimento reciclado (CR) de elevada eco-eficiência, cujo objetivo assenta na termoativação de cimento hidratado proveniente de resíduos de materiais de base cimentícia. Esta estratégia intervém em simultâneo na reutilização de resíduos, na conservação de recursos naturais e na redução de emissões de CO₂. Tendo em consideração baixas temperaturas de termoativação e a eliminação da etapa de decarbonatação na produção do clínquer, este novo tipo de ligante é capaz de conduzir a mais de 60% de redução nas emissões de CO₂. Bogas et al [13] verificaram que este novo ligante é capaz de desenvolver resistência semelhantes ao de um cimento Portland (CP). Por sua vez, Carriço et al [14] obteve um cimento reciclado de classe 32,5.

No presente trabalho avalia-se a utilização de CR na estabilização dos BTC, mitigando a sua elevada suscetibilidade à água. Como tal, os BTC foram analisados em termos de absorção por imersão,

absorção por capilaridade, absorção a baixa pressão, permeabilidade à água e erosão acelerada por jato de água (*spray test*). Até à data nenhum estudo que visa a incorporação de CR em BTC foi publicado.

2. Campanha experimental

2.1 Caracterização dos solos

Três solos diferentes foram avaliados para a produção de BTC. A distribuição granulométrica foi determinada de acordo com a especificação LNEC E-239 [15], após a desagregação dos torrões da amostra de solo num almofariz como indicado na especificação LNEC E-195 [16]. A matéria orgânica foi determinada através da reação entre uma amostra de solo com uma quantidade pré-definida de água oxigenada (H_2O_2) [6]. A massa de matéria orgânica é obtida pela subtração da massa da amostra de solo antes e após a reação (depois de colocada numa estufa ventilada a 105-110 °C até massa constante). Os limites de Atterberg foram determinados com base na norma NP-143 [17] e a massa volúmica seca pela norma NP-83 [18]. O teor ótimo de água foi estimado de acordo com a norma D-698 [19], seguindo o processo de compactação leve num molde pequeno, representando uma pressão de compactação mais compatível com a exercida pela prensa na produção dos blocos [20], [21].

O solo selecionado apresentava natureza argilosa, com 20,1% de gravilha, 48,4% de areia e 31,5% de silte/argila, com um teor de matéria orgânica inferior a 1%. Considera-se este último parâmetro como tendo uma influência pouco significativa nas propriedades dos BTC produzidos [22]. A massa volúmica seca foi de 2,85 g/cm³, superior ao obtido noutros estudos realizados pelos autores [6]. Relativamente aos limites de Atterberg, obteve-se um limite de liquidez de 30% e um limite de plasticidade de 22% o que corresponde a um índice de plasticidade de 8%. Este valores enquadram-se no intervalo recomendado para BTC estabilizados [6, 21]. O teor de água ótimo, que indica uma estimativa inicial da quantidade de água a adotar na produção dos BTC, foi de 16% para uma massa volúmica seca de aproximadamente 1,8 g/cm³.

2.2 Produção e caracterização do cimento reciclado (CR)

O cimento reciclado foi produzido a partir de pastas de cimento CEM I 42,5R com uma razão a/l de 0,45, e com pelo menos 120 dias de idade. A massa volúmica do cimento foi de 3,07 g/cm³ e a resistência à compressão a 1, 7 e 28 dias em argamassas de referência foi de 16,7 MPa, 43,60 MPa e 57 MPa, respetivamente. O tempo de presa inicial foi de 170 minutos e o final de 280 minutos. O processo de reciclagem da pasta de cimento envolveu a sua britagem, moagem, peneiração e termoativação. Os três primeiros passos consistiram na redução do tamanho das partículas, com o intuito de obter um grau de finura inferior a 250 µm. A fase de termoativação permitiu recuperar as propriedades ligantes do cimento hidratado [24]. Para o efeito, o material foi aquecido a uma taxa de 10°C/min até 650 °C, permanecendo a esta temperatura por 3 horas. O material arrefeceu dentro do forno durante 12h.

A caracterização do cimento reciclado envolveu as suas propriedades física e mecânicas no estado fresco e endurecido, nomeadamente o tempo de presa [25], a massa volúmica (através da medição por picnómetro de hélio), o espalhamento [26] e a resistência à flexão e à compressão em pastas de cimentos com razão água/cimento de 0,73 para uma consistência normal [27]. As pastas foram produzidas de acordo com a EN 1015-2 [27] numa misturadora de eixo vertical. Obteve-se uma massa volúmica para o CR de 3,00 g/cm³ e uma resistência à compressão a 3, 7 e 28 dias de 9,8 MPa, 13,7 MPa e 17,3 MPa, respetivamente. A resistência à flexão aos 3, 7 e 28 dias foi de 0,96 MPa, 1,17 MPa

e 1,22 MPa, respetivamente. Estas resistências foram ligeiramente inferiores às reportadas por Carvalho [28], tendo em conta pastas de igual a/l. No entanto, que a resistência à flexão e a resistência à compressão são semelhantes com outros estudos [10, 12, 25, 26]. Em geral, considera-se que foi possível produzir CR com boa capacidade de hidratação, atingindo resistências aos 28 dias de 65% das obtidas em pastas de CP com igual a/l. O tempo de presa inicial foi de 290 minutos e o final de 385 minutos. Tendo em conta a resistência obtida por Carvalho [28] é possível concluir que o cimento reciclado foi capaz de atingir uma capacidade de hidratação adequada, atingindo resistências aos 28 dias de 65% quando comparado com pastas de CP com a/l semelhante. O início do tempo de presa foi cerca de 1,7 vezes superior ao obtido para pastas de CP. Este retardamento é justificado pela menor finura e maior aglomeração do CR, bem como a reação mais lenta dos novos polimorfos de C_2S na sua constituição face ao C_3S no CP, conduzindo a um período de indução mais prolongado do que o cimento Portland [30]. Para a mesma razão a/l, as pastas com CP apresentaram uma consistência mais fluida para espalhamentos muito superiores aos obtidos nas pastas de CR de consistência normal. Este aumento da exigência de água está associado à elevada área superficial das partículas, bem como à sua natureza porosa e elevado teor de cal livre, sendo igualmente reportado por outros autores [31].

2.3 Produção, composição e caracterização dos blocos

No presente trabalho foram produzidos blocos com uma dimensão de 220x105x60 mm. O teor de água foi ajustado através do método da bola (*drop test*, [32]). A composição de cada mistura encontra-se na Tabela 1. Foram produzidos blocos de terra com 5 ou 10% de estabilizante, utilizando CP ou CR. Na designação dos blocos, o tipo de estabilizante é seguido do teor utilizado (CP5 e CP10 ou CR5 e CR10). Foram também produzidos blocos com diferentes percentagens de incorporação de CR (20%, 50%) em substituição de CP, para 10% de estabilizante – CR2CP8 e CR5CP5. Finalmente, foram ainda produzidos blocos não estabilizados (“T”) para efeitos de comparação.

Tabela 1: Composição dos blocos produzidos

Mistura	Solo ^a (%)	CP ^b (%)	CR ^b (%)	Água (%)	a/l
CP10	90	10	-	15,0	1,10
CR10	90	-	10	16,5	1,25
CP5	95	5	-	15,2	2,20
CR5	95	-	5	15,2	2,50
CR2CP8	90	2	8	15,0	1,10
CR5CP5	90	5	5	15,5	1,20
T	100	-	-	14,4	-

^a percentagem em massa de solo com 4% humidade; ^b percentagem em peso seco de estabilizante

Os blocos foram produzidos numa prensa manual com uma força de compactação de aproximadamente 150 kN. Para os blocos não estabilizados adotou-se cura seca e nos blocos estabilizados cura húmida. Neste último caso, os blocos foram cobertos com uma lona plástica e, nos primeiros 7 dias, humedecidos em intervalos de 1 em 1 hora, durante o período diurno. A caracterização dos BTC consistiu na determinação da sua massa volúmica no estado fresco e endurecido, absorção por imersão, absorção por capilaridade, absorção a baixa pressão, permeabilidade e erosão acelerada (*spray test*). Os blocos foram caracterizados aos 28 dias. A massa volúmica dos BTC foi determinada através da norma NP EN 772-13 [33]. Os blocos foram secos em estufa ventilada até massa constante, blocos imersos em água até à idade do ensaio e blocos colocados em ambiente laboratorial com temperatura de 19-26°C e humidade relativa de 55 a 75%. Para a determinação da absorção à água por imersão foi adotada a especificação LNEC E-394 [34] e a norma

NBR 8492 [35]. Neste ensaio foram avaliados blocos curados em condições laboratoriais. A absorção de água por capilaridade foi realizada de acordo com as normas NTC 5324 [36] e NP EN 772-11 [37] para blocos previamente secos em estufa ventilada até massa constante. Contrariamente ao indicado nestas normas, os blocos foram ensaiados na vertical e posicionados de modo a submergir a face lateral em aproximadamente 5 mm de altura. Para o ensaio de absorção de água a baixa pressão os blocos foram igualmente secos em estufa até massa constante. O ensaio seguiu a norma EN 16302 [38], tendo-se utilizado tubos de Karsten para superfícies verticais com uma abertura de 2,5 cm de diâmetro e capacidade de 4 cm³. A permeabilidade à água foi ensaiada em blocos colocados em ambiente de laboratório. Consistiu, em submeter metades de blocos a uma pressão de água constante de 100 kPa e registar o caudal de água escoado durante 5 minutos, como é explicado de forma detalhada por Silva [6]. Por fim, a determinação da resistência à erosão dos BTC teve como base a norma NZS 4298 [32] e consistiu em direccionar um jato de água horizontal com uma pressão de 0,5 bar durante 1 hora ou até à rotura do bloco, com paragens de 15 em 15 minutos. Contrariamente ao sugerido pelo documento normativo, e devido à reduzida dimensão dos blocos, a área de exposição ao jato de água foi de 100 mm de diâmetro. Complementarmente, o ensaio foi ainda realizado para uma pressão de 1 e de 2,5 bar (pressão máxima garantida pela rede de distribuição). Foram ensaiados provetes previamente condicionados em ambiente de laboratório.

3. Resultados e discussão

Os principais resultados médios obtidos para cada composição apresentam-se na Tabela 2. Foram avaliadas a massa volúmica fresca (MV_f), a massa volúmica seca (MV_{seca}), a massa volúmica em ambiente laboratorial (MV_{lab}), a massa volúmica saturada (MV_{sat}), a absorção por imersão (A), o coeficiente de absorção capilar (C_b), o coeficiente de absorção a baixa-pressão (C_{abs}), o coeficiente de permeabilidade (K_w) e a profundidade de erosão (PE) e a profundidade de humidade (PH) resultantes do spray test.

Tabela 2: Resultados médios para cada composição

Propriedades	CP10	CR10	CP5	CR5	CR2CP8	CR5CP5	T
MV_f (kg/m ³)	1990	1870	1950	1880	1950	1870	2030
MV_{seca} (kg/m ³)	1730	1630	-	-	1690	1650	1790
MV_{lab} (kg/m ³)	1860	1730	1780	1720	1800	1780	1820
MV_{sat} (kg/m ³)	2080	1910	-	-	1970	1950	-
A_{24h} (% massa)	18,8	21,5	-	-	19,3	21,0	-
A_{48h} (% massa)	19,0	22,0	-	-	19,9	21,5	-
A_{24h} (% volume)	32,6	35,1	-	-	32,5	34,5	-
A_{48h} (% volume)	32,9	35,8	-	-	33,5	35,3	-
C_b (g/cm ² .min ^{0.5})	6,38	10,75	-	-	9,41	7,87	-
$C_{abs,5min}$ (kg/m ² .s)	0,008	0,012	-	-	0,016	0,011	-
K_w (x10 ⁻⁷ m/s)	2,8	6,1	-	-	4,2	4,8	-
PE (mm)	0	0	-	-	-	0	Erosão total
PH (mm)	38	39	-	-	-	36	dos blocos

3.1 Massa volúmica e porosidade

Como a massa volúmica do CP foi aproximadamente 10% superior à da terra, seria expectável que os blocos estabilizados com CP apresentassem MV_f superior à dos blocos não estabilizados. No entanto, as misturas com CP foram produzidas com um maior teor de água do que os blocos não

estabilizados. No caso dos blocos estabilizados com CR, é possível observar que a ρ_f é 4-6% inferior à dos BTC estabilizados com CP. Os primeiros foram produzidos com uma maior razão a/l devido à maior exigência de água do CR, o que contribui para uma maior dificuldade de compactação das misturas.

A MV_{seca} variou entre 1630 e 1790 kg/m^3 . Os BTC não estabilizados apresentaram uma massa volúmica seca mais próxima dos BTC estabilizados com CP. De facto, nos blocos não estabilizados toda a água de mistura evapora, enquanto nos blocos com CP parte da água reage com o cimento, aumentando a massa volúmica. Os BTC com cimento reciclado apresentaram as menores MV_{seca} . A variação da massa volúmica fresca para a massa volúmica seca foi ligeiramente superior nos blocos com CP ($260 kg/m^3$) do que nos blocos com RC ($240 kg/m^3$). De facto, os silicatos de cálcio presentes no cimento reciclado encontram-se na forma de diferentes polimorfos do C_2S , enquanto no cimento Portland o principal componente é a alite (C_3S). Uma vez que a reação de hidratação do C_3S envolve uma maior incorporação de água quimicamente ligada [39], os BTC com CR vão reter menor quantidade de água de hidratação. Além disto, como o cimento reciclado foi produzido a partir de pastas de cimento antigas sujeitas a termoactivação, moagem e armazenamento, apresentará um maior teor de substâncias carbonatadas [13]. Como tal, seria expectável que a diferença entre a massa volúmica fresca e a massa volúmica seca de BTC com CR fosse maior.

Em condições de saturação, os blocos apresentaram um aumento da sua massa volúmica entre 16,8% e 20,1% enquanto em contacto directo com a água os blocos não estabilizados perderam a sua coesão. Sabendo a composição (Tabela 1) e a massa volúmica fresca (Tabela 2) foi possível estimar aproximadamente a porosidade total dos BTC no estado endurecido, a longo prazo. Para tal, a porosidade total dos blocos corresponde ao volume de vazios (V_v) equivalente à soma do volume de ar e do volume de água que não reage com o cimento. De acordo com Neville [39] a água de hidratação corresponde a cerca de 23% da massa de cimento, dependendo do tipo e composição do mesmo. Neste estudo foi considerado 22% para os BTC com CR, devido à presença maioritária de C_2S . Assumiu-se ainda que o nível de hidratação dos blocos correspondeu a cerca de 80% [6]. Na determinação do volume dos produtos hidratados, assume-se que este corresponde à soma do volume de cimento anidro com o volume de água combinada, reduzido de 0,254 [39]. Assim, a porosidade total foi de 36,4%, 41%, 39,2%, 41,7%, 37,5%, 40,2% e 37,9% para as misturas CP10, CR10, CP5, CR5, CR2CP8, CR5CP5 e T, respetivamente. Os valores estimados são superiores aos obtidos noutros estudos [6, 41] cuja porosidade foi de cerca de 30% em BTC com 8% CP e 35% em BTC não estabilizados.

A Figura 1 apresenta a relação obtida entre a massa volúmica em condições laboratoriais (MV_{28d}) e a porosidade total no estado endurecido, a longo prazo ($P_{T,Mvf}$).

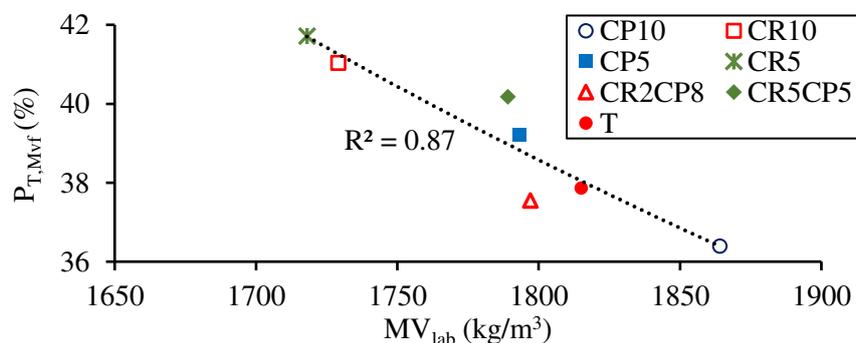


Figura 1: Relação entre a massa volúmica (MV_{lab}) e a porosidade total ($P_{T,Mvf}$)

Tal como seria expectável, existe uma elevada correlação entre estas duas propriedades. Verifica-se

que foram obtidos blocos com menor compacidade ao incorporar cimento reciclado como ligante. Isso resulta da maior dificuldade de produção associada à maior exigência de água do CR

3.2 Absorção de água por imersão

Esta propriedade foi apenas medida para BTC estabilizados com 10% de ligante. Os blocos não estabilizados perderam gradualmente a sua coesão após contacto com a água e os restantes não sofreram qualquer deterioração visível durante 48h.

A absorção ocorreu essencialmente durante as primeiras 24h, com um ligeiro aumento até às 48h (Tabela 2). De um modo geral, é possível observar uma tendência crescente da absorção com a incorporação de CR. A absorção em blocos com CR foi até 14% superior à dos blocos estabilizados apenas com CP. Estas diferenças são atenuadas caso a absorção seja considerada em percentagem de volume. Estes valores correspondem a cerca de 90% da porosidade total estimada em 3.1, ou seja, pelo menos 90% da porosidade dos BTC foi acessível à água num dado período. Já nas misturas com cimento reciclado a fração de porosidade acessível à água foi ligeiramente inferior (87-89%), o que sugere uma menor interconectividade da sua estrutura porosa. Este maior refinamento está de acordo com o reportado por Bogas et al. [13]

A maior absorção em blocos com CR está relacionada com a sua maior porosidade total e, conseqüentemente, menor compacidade. A Figura 2 mostra a relação entre a porosidade total ($P_{T,MVf}$) e a absorção às 48h para os blocos produzidos no presente trabalho.

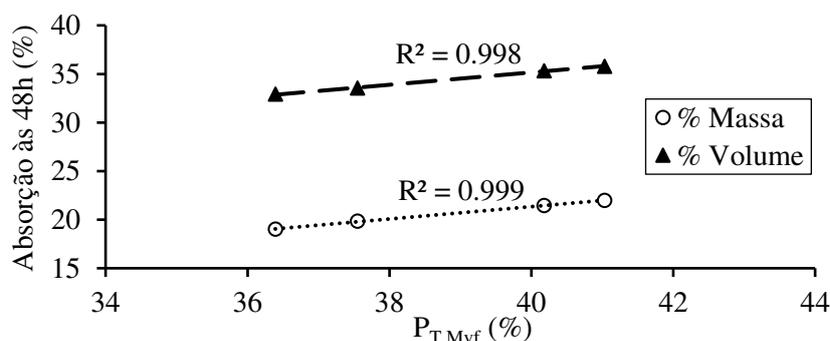


Figura 2: Relação entre a absorção e a porosidade total ($P_{T,MVf}$)

De acordo com Walker [41] os valores típicos de absorção para BTC podem variar entre os 10 e os 25%. Os resultados obtidos no presente trabalho estão enquadrados neste intervalo. Blocos com absorção (% massa) às 24h inferior a 20% são considerados adequados para aplicações em ambientes húmidos [35]. Apenas os BTC com até 20% de substituição de CP por CR cumprem este requisito. Silva [6] obteve absorções às 48h de apenas 13,3% para BTC estabilizados com 8% CP.

3.3 Absorção de água por capilaridade

A Figura 3 mostra a evolução até 72h da absorção capilar e a Figura 4 o coeficiente de absorção ao longo do tempo para blocos estabilizados com 10% de ligante.

Tal como observado na absorção por imersão, ocorreu um aumento na taxa de absorção e do volume de água absorvida às 72 horas nos BTC com 10% CR. Este aumento está relacionado com a maior porosidade dos blocos com CR (associada a uma maior razão a/l e maior volume de pasta), bem como com o maior refinamento da porosidade destas misturas, para um idêntico nível de porosidade [13]. A absorção às 72 horas para os blocos com 10% CR foi cerca de 70% superior à dos blocos com 10% CP.

Tal como referido em 2.3 os blocos foram ensaiados na vertical, perpendicularmente à direção de

compactação, o que aumenta as suas propriedades de absorção. No entanto, os valores obtidos para blocos com 10% de CP foram ligeiramente superiores ao reportado por Lopes [40] em blocos ensaiados na mesma direção com 8% CP.

Como a porosidade total foi superior nos blocos com substituição de CP por CR de 50% face aos blocos com 20% de substituição seria expectável uma maior absorção. No entanto, verifica-se que as diferenças não foram significativas entre estes BTC.

De acordo com a norma NTC 5324 [36] os blocos podem ser classificados tendo em consideração o coeficiente de absorção aos 10 minutos ($C_{b,10min}$): I - $C_{b,10min} \leq 20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ – “muito baixa absorção”; II – $40 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ – “baixa absorção”. Assim sendo, os BTC com 10% CP estão inseridos na classe I e os BTC com 10% CR na classe II.

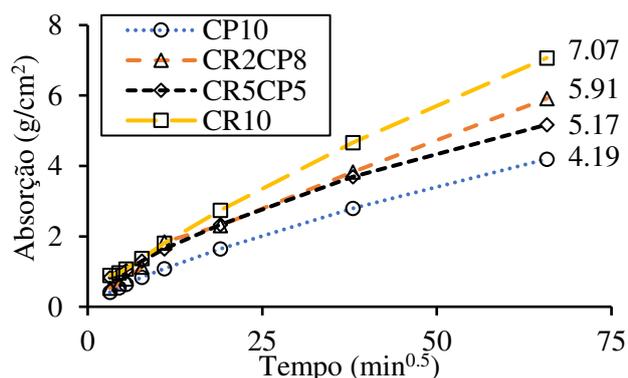


Figura 3: Evolução da absorção de água por capilaridade

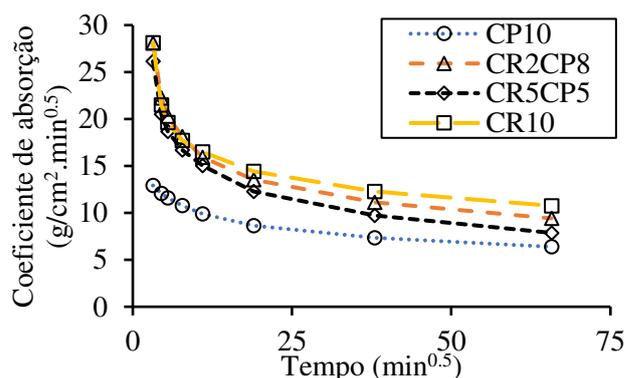


Figura 4: Evolução do coeficiente de absorção de água por capilaridade

3.4 Absorção a baixa pressão

Em concordância com os restantes ensaios de absorção, a mistura CP10 apresentou a menor taxa de absorção ao longo do tempo. Neste caso, o tempo de absorção dos blocos estabilizados com 10% CR (12 min) foi 56% inferior e o coeficiente de absorção aos 5 minutos ($0,012 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) 50% superior ao obtido para blocos estabilizados com 10% CP. Tal como verificado na absorção capilar, os blocos estabilizados com 8% CP e 2% CR apresentaram um pior desempenho do que os BTC com maior teor de incorporação de CR, inclusivamente 10%. Como tal, a absorção a baixa pressão apresentou uma fraca relação com a porosidade total. Tal pode ser justificado pelos diferentes teores de humidade dos provetes antes do ensaio. Lopes [40], para blocos estabilizados com 8% cimento Portland, reportou uma absorção de $0,7 \text{ g/cm}^2$ após 10 minutos, 64% superior ao obtido no presente estudo para blocos com 10% CP ($1,1 \text{ g/cm}^2$). As diferenças podem ser justificadas pela diferente compactidade atingida, mas também pelas condições de humidade na altura do ensaio.

3.5 Permeabilidade à água

Verifica-se que a permeabilidade à água dos blocos aumentou com a percentagem de incorporação de CR em substituição do CP (Tabela 2). O coeficiente de permeabilidade (K_w) variou de $2,8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ para blocos estabilizados com 10% CP e $6,1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ para blocos estabilizados com 10% CR. A mesma ordem de grandeza foi reportada em outros estudos para 8% CP [6, 41]. Bahar et al [20] atingiu um coeficiente de $7,8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ para cilindros de terra estabilizados com 10% cimento. Este valor mais baixo pode ser resultado da maior compactação utilizada na produção. Geralmente betões de qualidade baixa/média apresentam valores de K_w na ordem de grandeza de 10^{-16} a 10^{-10} m/s [42].

Por sua vez, Delgado & Guerrero [43] reportam valores na ordem de grandeza de 10^{-8} m/s para paredes de taipa. Conclui-se assim que a permeabilidade à água assume maior importância nos BTC, sendo comparáveis, em termos de desempenho, a betões muito pobres. A permeabilidade à água segue a tendência da porosidade total (Figura 5). No entanto, destaca-se, tal como na absorção capilar, a observação de semelhanças entre os blocos CR2CP8 e CR5CP5, apesar destes últimos apresentarem uma maior porosidade total.

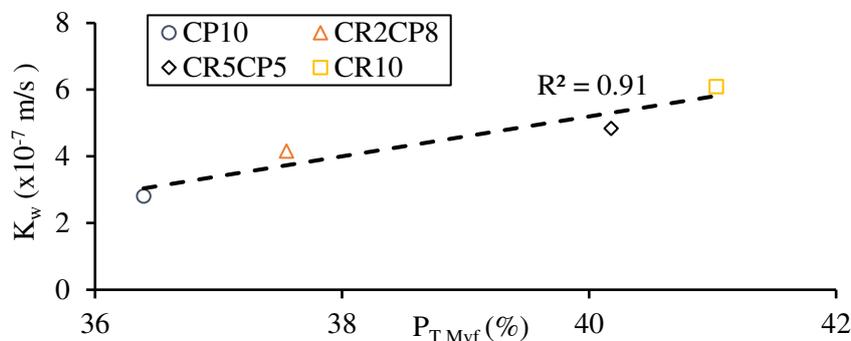


Figura 5: Relação entre o coeficiente de permeabilidade (K_w) e a porosidade total ($P_{T,MVf}$)

3.6 Erosão acelerada (*spray test*)

Independentemente do tipo de ligante, os blocos estabilizados mostraram uma boa durabilidade quando expostos ao *spray test* (Tabela 3). Tal como indicado na norma NZS 4298 [32] todos estes blocos apresentaram uma erosão desprezável quando sujeitos a uma pressão de 0,5 bar, podendo ser classificados como sendo da classe IE1 (IE- índice de erosão em mm, conforme as seguintes classes: $0 \leq PE < 10$ (IE1); $10 \leq PE < 25$ (IE 2); $25 \leq PE < 45$ (IE 3); $45 \leq PE < 60$ (IE4); $60 \leq PE$ (IE5)). Mesmo aumentando a pressão do jato de água para 1 bar e para 2,5 bar a erosão continuou desprezável após 1 hora de ensaio. A penetração da humidade foi muito similar nos BTC estabilizados, concluindo-se que o comportamento à ação da água foi elevado, independentemente do tipo de ligante. Resultados semelhantes para a penetração da humidade foram reportados por Silva [6] em BTC estabilizados com 8% cimento (40 mm). Em misturas com 4% cimento e 4% cal a penetração de humidade obtida foi 43% superior, revelando uma pior capacidade da cal e salientando a eficiência do CR. Ao fim de 7 minutos, e para uma pressão de 0,5 bar, os blocos não estabilizados foram totalmente erodidos. Como tal não é recomendada a sua utilização em aplicações desprotegidas da ação direta da água.

Tabela 3: Resultados do ensaio de erosão acelerada

Mistura	Pressão (bar)	Tempo de ensaio (min)	Profundidade da erosão, PE (mm)	Profundidade da humidade, PH, para 2,5 bar (mm)
CP10	0,5 2,5	60	-	38
CR5CP5	0,5 2,5	60	-	36
CR10	0,5 2,5	60	-	39
T	0,5	7	60	N/A

4. Conclusões

Os blocos produzidos apresentaram uma massa volúmica fresca entre 1870 e 2030 kg/m^3 , para porosidades totais de 36,4-41,7%. A elevada exigência de água por parte do cimento reciclado promove a diminuição da compactidade dos blocos. Deste modo, os blocos com cimento reciclado apresentaram uma menor massa volúmica e uma maior porosidade total. Como seria de esperar, foi

possível observar uma boa correlação entre a massa volúmica e a porosidade total.

Os blocos não estabilizados apresentaram uma grande sensibilidade à água, desagregando-se rapidamente após o seu contacto. Por outro lado, o cimento Portland (CP) e o cimento reciclado (CR) foram eficientes na estabilização dos BTC, permitindo manter a integridade dos blocos em contacto com a água.

De modo geral, a absorção aumentou com a incorporação de cimento reciclado. Mais de 90% da porosidade do BTC foi acessível à água, revelando a elevada interconectividade da sua estrutura porosa. Como esperado, verificou-se uma boa correlação entre a absorção ou a permeabilidade e a porosidade total dos BTC. Embora a absorção capilar tenha sido medida na vertical, ou seja, no sentido perpendicular ao de prensagem dos blocos, foram observadas taxas de absorção capilar até 70% superiores em blocos com 10% CR do que com 10% CP. Os BTC com CR apresentaram coeficientes de permeabilidade à água de até cerca de duas vezes superiores aos dos BTC com CP. Uma vez que a capacidade de hidratação do CR é elevada, é expectável que a resistência à ação da água dos blocos com CR seja mais próxima do obtido em blocos com CP, caso se promova uma maior otimização da compactação dos blocos.

Independentemente do tipo de ligante, os blocos estabilizados com 10% de estabilizante mostraram uma excelente resistência à erosão acelerada da água, que simulou o efeito de chuva intensa. Assim, a incorporação de cimento reciclado termoativado mostrou ser viável para a produção de BTC de maior sustentabilidade.

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/IST através do projeto UIDB/ECI/04625/2020 e a colaboração das Oficinas do convento, Montemor e SECIL pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental.

Referências bibliográficas

- [1] F. V. Riza, I. A. Rahman, and A. M. A. Zaidi, “A Brief Review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB),” Dec. 2010.
- [2] H. van Damme and H. Houben, “Earth concrete. Stabilization revisited,” *Cement and Concrete Research*, vol. 114. Elsevier Ltd, pp. 90–102, Dec. 01, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.035.
- [3] I. Alam, A. Naseer, and A. A. Shah, “Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas,” *Constr Build Mater*, vol. 77, pp. 154–159, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046.
- [4] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction,” *Construction and Building Materials*, vol. 29. pp. 512–519, Apr. 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [5] V. Rigassi and CRAterre-EAG, *Compressed Earth Blocks: Manual of Production*. Deutsche Development Agency, 1995.
- [6] M. F. Silva, “Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios,” Master Thesis, Instituto Superior Técnico, 2015.
- [7] S. Jegandan, M. Liska, A. A. M. Osman, and A. Al-Tabbaa, “Sustainable binders for soil stabilisation,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, vol. 163, no. 1, pp. 53–61, Feb. 2010, doi: 10.1680/grim.2010.163.1.53.

- [8] H. Miraki, N. Shariatmadari, P. Ghadir, S. Jahandari, Z. Tao, and R. Siddique, "Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 576–591, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2021.08.012.
- [9] P. Walker and T. Stace, "Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars," 1997.
- [10] M. Mahdad and A. Benidir, "Hydro-mechanical properties and durability of earth blocks: influence of different stabilisers and compaction levels," *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 9, no. 2, pp. 44–62, 2018.
- [11] J. A. Bogas, M. Silva, and M. Glória Gomes, "Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 13, no. 4, pp. 569–584, May 2019, doi: 10.1080/15583058.2018.1442891.
- [12] CDW Value, "Project EcoHydB," 2021. <https://cdwvalue.eu/project-ecohydb> (accessed Aug. 04, 2022).
- [13] J. A. Bogas, A. Carriço, and A. J. Tenza-Abril, "Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes," *Cem Concr Res*, vol. 138, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106226.
- [14] A. Carriço, S. Real, J. A. Bogas, and M. F. Costa Pereira, "Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation," *Constr Build Mater*, vol. 256, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119502.
- [15] LNEC E-239, "Análise granulométrica por peneiração húmida," 1970.
- [16] LNEC E-195, "Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação," 1966.
- [17] NP-143, "Determinação dos limites de consistência," Lisboa, 1969.
- [18] NP-83, "Determinação da densidade das partículas," Lisboa, 1965.
- [19] D 698, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort," West Conshohocken, 2000. [Online]. Available: www.astm.org,
- [20] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, "Performance of compacted cement-stabilised soil," *Cem Concr Compos*, vol. 26, no. 7, pp. 811–820, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.
- [21] Saul Sitati Namango, "Development of Cost-Effective Earthen Building Material for Housing Wall Construction: Investigations into the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sisal Vegetable Fibres, Cassava Powder and Cement Compositions," PhD Thesis, 2006.
- [22] ARS 1333, "Compressed stabilized earth blocks-Requirements, production and construction," Nairobi, 2018. [Online]. Available: www.arso-oran.org
- [23] S. Burroughs, "Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization," *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, vol. 20, no. 3, pp. 264–273, 2008, doi: 10.1061/ASCE0899-1561200820:3264.
- [24] J. Bandeira, "Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado," Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2020.
- [25] EN 196-3, "Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness," Lisboa, 2017.
- [26] EN 1015-3, "Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)," Lisboa, 2004.
- [27] EN 1015-2, "Methods of tests for mortar and masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and

- preparation of test mortars,” Lisboa, 1998.
- [28] M. Carvalho, “Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação,” Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2020.
- [29] J. A. Bogas, A. Carriço, and M. F. C. Pereira, “Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars,” *J Clean Prod*, vol. 218, pp. 377–389, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.325.
- [30] J. A. Bogas, S. Real, A. Carriço, J. C. C. Abrantes, and M. Guedes, “Hydration and phase development of recycled cement,” *Cem Concr Compos*, vol. 127, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104405.
- [31] R. Balducci, T. R. S. Nobre, S. C. Angulo, V. A. Quarcioni, and M. A. Cincotto, “Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 8, p. 04019132, Aug. 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002725.
- [32] NZS 4298, “Materials and workmanship for earth buildings,” 1998.
- [33] NP EN 772-13, “Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 13: Determinação da massa volúmica real seca e da massa volúmica aparente seca de blocos para alvenaria (excepto blocos de pedra natural),” 2002.
- [34] LNEC E394, “Absorção de água por imersão à pressão atmosférica,” Lisboa, 1993.
- [35] NBR 8492, “Solid soil-cement brick. Determination of compressive strength and water absorption,” 1984.
- [36] NTC 5324, “Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Metodos de ensayo. Condiciones de entrega,” 2004.
- [37] NP EN 772-11, “Unidades de alvenaria - Métodos experimentais - Parte 1: Agregado e natural - Determinação de absorção,” Lisboa, 2002.
- [38] EN 16302, “Conservation of cultural heritage - Test methods - Measurement of water absorption by pipe method,” 2013.
- [39] A. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed. Pearson Education Limited, 1995.
- [40] I. Lopes, “Eficiência de produtos hidrófugos no desempenho face à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento e não estabilizados,” Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2015.
- [41] P. Walker, *HB-195: The Australian earth building handbook*. Sydney: Standards Australia International Ltd, 2002.
- [42] N. Roussel, M. R. Geiker, F. Dufour, L. N. Thrane, and P. Szabo, “Computational modeling of concrete flow: General overview,” *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 9, pp. 1298–1307, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.007.
- [43] M. C. J. Delgado and I. C. Guerrero, “Earth building in Spain,” *Constr Build Mater*, vol. 20, no. 9, pp. 679–690, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006.