



DURABILIDADE DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM LIGANTES RECUPERADOS A PARTIR DA FRAÇÃO CIMENTÍCIA DE RESÍDUOS DE BETÃO

Ricardo Cruz^a; José Bogas^b; Sofia Real^c; José Rodrigues^d

^aCERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt

^bCERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt

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

^dIST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.frederico@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A estabilização química é essencial para garantir uma adequada durabilidade em ambiente externo dos blocos de terra comprimida (BTC). Embora o cimento Portland (CP) seja o estabilizante mais eficaz e utilizado, é incompatível com a natureza ecológica e sustentável desta técnica de construção. Como tal, é urgente procurar estabilizantes alternativos mais ecológicos, como o cimento reciclado (CR). Resumidamente este ligante resulta da termoativação de resíduos cimentícios recuperados de betão e argamassa. O objetivo é desenvolver soluções com materiais de baixa energia incorporada, como o CR e os resíduos de construção e demolição (RCD).

Assim, foi realizado um extenso trabalho experimental que teve por objetivo analisar a durabilidade de BTC produzidos com substituição parcial a total de CP por CR e solo por RCD. Consideraram-se várias composições, envolvendo diferentes tipos de estabilizante (CP42.5, CP32.5, CR proveniente de pasta de cimento (CRP) ou de betão (CRB)), teor de estabilizante (0, 4% e 8%), percentagens de substituição de CP por CR (0, 20, 50 e 100%), teor de RCD (0, 15 e 25%) e teor de humidade (seco, saturado, em equilíbrio com o ambiente laboratorial). O CRB foi obtido através do método de separação recentemente desenvolvido no Instituto Superior Técnico, alcançando purezas de cerca de 67% na fração cimentícia. Os blocos foram caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água por imersão e capilaridade, permeabilidade ao vapor, erosão por gotejamento (*drip test*) e erosão acelerada (*spray test*). Para efeitos de comparação foram considerados BTC de referência não estabilizados (NE) ou com incorporação de apenas CP.

Os BTC estabilizados com CR demonstraram resultados muito promissores, especialmente na redução da suscetibilidade à água. O comportamento dos BTC foi afetado pelo teor de ligante, teor de água de mistura e método de compactação. Os BTC com CP apresentaram melhor desempenho mecânico e menor absorção do que os BTC com CR, dado terem atingido maior compacidade. Porém, a erosão acelerada e a permeabilidade ao vapor não foram significativamente afetadas pelo tipo de ligante. A incorporação de RCD, até 25%, conduziu a soluções de maior compacidade e, como tal, melhores características mecânicas e durabilidade. Assim, a substituição parcial de solo por RCD é viável, conduzindo a soluções mais sustentáveis. Em contacto com água, os NE desintegraram-se totalmente após poucos minutos de imersão e erodiram-se em toda a sua espessura nos ensaios de erosão acelerada. No entanto, a estabilização dos BTC com CR permitiu que os blocos não sofressem dano após imersão, que atingissem a classe máxima de resistência à erosão e que triplicassem a resistência à compressão. Assim, conclui-se que o CR é uma alternativa viável ao CP.

Palavras-chave: Bloco de terra comprimida; cimento reciclado; durabilidade; agregado reciclado; resistência à água



1 INTRODUÇÃO

A técnica de blocos de terra comprimida (BTC) explora a estabilização mecânica para melhorar o desempenho da construção em terra, com ressurgido interesse em edificações de reduzido porte (Sujatha & Selsia Devi, 2018). No entanto, devido à sua fraca resistência à água, é indispensável proceder à estabilização química para garantir condições adequadas de durabilidade em ambiente exterior (Walker, 1995). O cimento Portland (CP) é o estabilizante mais eficaz e utilizado nos BTC (Kamwa et al., 2022). Durante o processo de hidratação do cimento, forma-se C-S-H, que se dispersa e promove a desaglomeração e ligação das partículas de solo, formando uma matriz solo-cimento estável e coesa (Kouamé et al., 2021). Porém, o uso de CP aumenta significativamente a energia incorporada dos BTC, sendo incompatível com a natureza ecológica e sustentável da construção em terra. De facto, estima-se que por cada tonelada de clínquer produzido, sejam libertados mais de 800 kg de CO₂ (Bogas et al., 2019). Porém, os vários estabilizantes alternativos estudados não têm tido o sucesso pretendido, quer por razões de reduzida viabilidade prática quer pelo facto de comprometerem a estabilidade dos BTCs quando expostos à água. Por exemplo, Sekhar & Nayak (2018) observaram a desintegração completa de blocos estabilizados com escória granulada de alto-forno, quando submersos em água.

Uma outra preocupação mundial é o aumento dos resíduos de construção e demolição (RCD) e a sua posterior eliminação. Desta forma, a possibilidade de incorporar estes resíduos na construção em terra, sem prejudicar de forma significativa as suas propriedades, tornou-se também um tema de interesse. A utilização direta de RCD em substituição parcial da terra tem sido a forma mais simples e a única explorada na produção de BTC. Narayanaswamy et al. (2020) verificaram que a incorporação de até 50% RCD não afetou significativamente a resistência à compressão saturada e a absorção de água de BTCs estabilizados com CP e cal. Por sua vez, Bogas et al. (2019) observaram que BTCs estabilizados com CP ou CP e cal, e com até 15% RCD apresentaram adequado desempenho em termos de resistência mecânica, absorção por imersão e capilaridade e erosão à água. Mais recentemente, tem sido também explorada a reutilização de resíduos de materiais de base cimentícia na produção de ligante reciclado, capaz de responder em simultâneo à necessidade de encontrar um ligante alternativo de mais baixo carbono e à reutilização efetiva dos RCD (Carriço et al., 2022). Basicamente, o cimento reciclado (CR) resulta da termoativação a baixa temperatura de resíduos cimentícios recuperados de resíduos de betão e argamassa, de modo a recuperar a capacidade de hidratação destes materiais (Bogas et al., 2020). Os mais recentes desenvolvimentos, mostram que é possível obter CR comparável a CP de baixa de resistência, mas associado a menos de 40% das emissões de CO₂ durante a produção (Sousa & Bogas, 2021) A utilização de CR proveniente de pasta cimentícia produzidas em laboratório (CRP) como estabilizante de BTC foi pela primeira vez explorada por Bogas et al. (2023), tendo-se verificado a sua adequabilidade na melhoria significativa do comportamento mecânico face a BTC não estabilizados. No entanto, a influência do CR na durabilidade dos BTC, e a sua incorporação simultânea com RCD em substituição parcial de solo não foi investigada.

O presente trabalho visa analisar a durabilidade de BTC estabilizados com CRP e CR recuperado de betão antigo (CRB), e com substituição parcial de solo por RCD. Para tal, o estudo envolve a consideração de vários tipos (CP de diferentes classes de resistência, CRP, CRB) e teores de estabilizante (0%, 4% ou 8%), percentagens de substituição de CP por CR (0, 20, 50 e 100%), teores de RCD (0, 15 e 25%) e teores de humidade. Os blocos foram caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão, absorção de água por imersão e capilaridade, erosão por gotejamento, erosão acelerada e permeabilidade ao vapor de água.



2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foi utilizado um solo pouco argiloso proveniente de Alcochete (S), que foi ajustado com pó de argila resultante do processo de fabrico de telhas cerâmicas (TV). Este resíduo, sem aproveitamento atual, permite compensar a escassez de material argiloso do solo. A distribuição granulométrica foi realizada de acordo com a LNEC E-239 (1970) e o teor de argila foi determinado por adsorção de raios-X. Os limites de Atterberg foram obtidos conforme a NP-143 (1969), enquanto a massa volúmica e a matéria orgânica foram determinadas de acordo com a NP-83 (1970) e a ARS 1333 (2018), respetivamente. O teor ótimo de água foi estimado de acordo com a ASTM D698 (2021). A absorção de água foi avaliada segundo a EN 1097-6 (2003). O solo S e TV eram compostos por 10,7% e 42,2% de argila e 2,3% e 49,3% de silte, respetivamente, com 8 mm e 1 mm de dimensão máxima, respetivamente. O índice de plasticidade (IP) de S foi 8%, justificando a correção com TV que apresentou um limite de liquidez de 47% e um IP de 21%. A massa volúmica e a absorção de água foram de 2633 kg/m³ e 1,4% para S, e 2630 kg/m³ e 1% para TV. O teor ótimo de água de S foi de 12,8%. Por análise de difração de raios-X não se observou a presença de argilas expansivas. O RCD, com máxima dimensão de 8 mm, continha 45,3% de resíduos de betão, 27,9% de pedra natural e 16,4% cerâmicos (EN 933-11, 2011), composto por 26,2% de gravilha, 64,3% de areia e 9,5% de material fino (EN 933-1, 2012), para uma massa volúmica de 2300 kg/m³ e absorção de água de 4,3% (EN 1097-6, 2003).

O CRB e o CRP foram obtidos a partir de betão e pasta de cimento com mais de 90 dias de idade, respetivamente, sendo produzidos com CEM I 42,5R e uma razão água/ligante (a/l) de 0,55. O processo de obtenção do CRP envolveu a britagem, moagem, peneiração e termoactivação da pasta de cimento. Para a obtenção do CRB, foi necessário realizar a separação prévia dos constituintes do betão, com base no método patenteado por Bogas et al. (2021). A partir de análises de termogravimetria aos resíduos de pasta de cimento e de betão de igual a/l verificou-se que o CRB apresentava um grau de pureza de 67%. A termoativação consistiu no aquecimento do material a uma taxa de 10°C/min até 650°C, onde se manteve por 3 horas. Foi ainda considerado um cimento CEM II B-L 32,5N (CP32,5), mais correntemente utilizado na construção. As propriedades dos ligantes encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos ligantes

Parâmetro	Norma	CP	CP32,5	CRP	CRB
Massa volúmica (g/cm ³)	LNEC E-64 (1979)	3,03		3,00	2,964
Superfície específica (cm ² /g)	EN 196-6 (2018)	4310		98123	78673
Resist. compressão aos 28 dias (MPa)	EN 12390-3 (2021)	56,3	≥32,5 e ≤52,5		
CaO livre (%)	EN 451-1 (2017)	2,7	18,5	17,90	
Consistência normal (a/l)	EN 196-3 (2016)	0,295		0,74	0,54
Tempo de presa inicial/final (min)	EN 196-3 (2016)	160/235	≥75	170/460	>720/<1440

2.2 PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS

Blocos com 295x140x90 mm foram produzidos utilizando uma prensa semiautomática com uma capacidade máxima de compactação de 5-6 MPa. Após a produção, os BTC foram cobertos com uma manga plástica durante 7 dias, seguido de cura ao ar em laboratório. Os BTC foram produzidos com vários tipos (CP, CP32.5, CRP, CRB) e teor de estabilizante (0, 4%, 8%), diferentes percentagens de substituição de CP por CRP (0, 20, 50, 100%) ou por CRB (20, 50%) e de terra por RCD (0, 15, 25%). A substituição de solo por RCD foi realizada de forma direta (8CP) ou mantendo a granulometria da mistura (8CPORCD, 8CP15RCD, 8CP25RCD). O teor e a composição do ligante nas misturas com CRB foi ajustado de modo a ter em conta a contaminação do CRB por 33% de agregado. Para efeitos de



comparação, foram produzidos blocos não estabilizados (NE) e BTC com 8% CP de igual teor em água (TH) dos BTC com 8% CRP (8CPTH). As composições dos BTC apresentam-se na Tabela 2.

Os BTC foram caracterizados aos 28 dias em termos de massa volúmica no estado fresco e endurecido, resistência à compressão, absorção por imersão, absorção por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, erosão por gotejamento (*drip test*) e erosão acelerada (*spray test*). A massa volúmica foi determinada em blocos em equilíbrio com o ambiente laboratorial ($T=20\pm 3^\circ\text{C}$ e $HR=65\pm 5\%$), segundo a EN 772-13 (2000). A resistência à compressão foi ensaiada numa prensa Controls, com uma capacidade até 3000 kN, segundo a EN 772-1 (2011) e NBR 8492 (2012), utilizando-se placas de contraplacado na base e no topo de meios blocos. Utilizou-se uma velocidade de 4 kN/s. Para determinar a resistência à compressão não confinada, independente da geometria do bloco, a resistência foi corrigida por um fator de 0,58 (HB-195, 2001). A absorção por imersão foi determinada de acordo com a especificação LNEC E-394 (1993) e a norma NBR 8492 (2012). A absorção de água por capilaridade foi realizada de acordo com as normas NTC 5324 (2004) e EN 772-11 (2011) em meio-blocos previamente secos a $70\pm 5^\circ\text{C}$. Os provetes foram ensaiados na direção perpendicular à de assentamento do bloco, sendo imersos numa lamina de 5 ± 1 mm. A permeabilidade ao vapor de água foi avaliada, segundo a ASTM E96 (1995) e EN 1015-19 (1998), em amostras em forma de disco previamente secas a $70\pm 5^\circ\text{C}$ e utilizando CaCl_2 para criar um ambiente seco e promover a transmissão de vapor com um ambiente exterior. A permeabilidade ao vapor foi corrigida considerando a resistência da camada de ar entre a amostra e o CaCl_2 (ISO 12572, 2016). Os ensaios de erosão à água foram realizados de acordo com a norma NZS 4298 (1998) em provetes inteiros condicionados em laboratório.

Tabela 2 - Composição dos blocos produzidos

Composição	Ligante	Ligante (%) ^a	Água (%) ^b	RCD (%) ^a	TV (%) ^c	a/l
8CP	CEM I 42,5R	8	9	25	11	1,22
8CPTH	CEM I 42,5R	8	12	25	11	1,62
8CP0RCD	CEM I 42,5R	8	9	0	11	1,22
8CP15RCD	CEM I 42,5R	8	9	15	11	1,22
8CP25RCD	CEM I 42,5R	8	9	25	11	1,22
4CP	CEM I 42,5R	4	9	25	14	2,34
8CP32,5	CEM II B/L 32,5N	8	9	25	11	1,22
8CRP	CRP	8	12	25	11	1,62
4CRP	CRP	4	10	25	14	2,60
80CP20CRP	80%CP+20%CRP	8	9	25	11	1,22
50CP50RCP	50%CP+50%CRP	8	10	25	11	1,35
80CP20CRB	73%CP+27%CRB	8,8	9	25	11	1,11
50CP50CRB	40%CP+60%CRB	10	9	25	11	0,99
NE	-	0	9	25	18	-

^a % em massa seca de S+TV; ^b % em massa seca de S+TV+RCD; ^c % de massa seca de S

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabela 3 e na Tabela 4 apresentam-se os valores médios de massa volúmica fresca (MV_f), porosidade total (P_T), massa volúmica no estado endurecido em ambiente laboratorial (MV_{lab}), resistência à compressão não confinada seca, saturada e em ambiente laboratorial ($f_{c,un,seca}$, $f_{c,un,sat}$, $f_{c,un,lab}$), absorção por imersão às 24h ($A_{i,24h}$), coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos e entre 10 minutos e 6 horas ($C_{abs,10min}$ e $C_{abs,10min-6h}$), permeabilidade ao vapor de água (P_{VP}), resistência à difusão do vapor de água (μ), taxa de erosão (PE/h) e profundidade de humidade (PH).



Tabela 3 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CP

Propriedades	8CP	8CP _{TH}	8CP _{0RCD}	8CP _{15RCD}	8CP _{25RCD}	4CP	8CP _{32,5}
MV _f (kg/m ³)	2160	2150	2170	2150	2160	2170	2160
P _T (%)	26,0	28,1	26,4	26,4	25,8	26,2	26,0
MV _{lab} (kg/m ³)	2020	1990	2080	2040	2060	2010	2040
f _{c,un,seca} (MPa)	10,9	10,9	-	-	-	-	-
f _{c,un,sat} (MPa)	3,8	3,3	-	-	-	-	-
f _{c,un,lab} (MPa)	7,9	7,3	7,9	6,9	8,2	5,5	6,4
A _{i,24h} (%)	10,1	11,9	8,7	9,7	10,2	10,2	10,3
C _{abs,10min} (g/cm ² .min ^{0,5})	11,6	19,0	7,4	10,1	10,5	17,1	11,0
C _{abs,10min-6h} (g/cm ² .min ^{0,5})	5,3	6,5	5,6	6,0	5,4	8,0	5,5
P _{VP} (x10 ⁻¹¹ kg/s.m.Pa)	1,16	1,71	1,39	1,27	1,17	1,93	1,35
μ	16,9	11,5	14,2	15,6	16,8	10,2	14,6
PE/h (mm/h)	0,0	0,0	-	-	-	-	-
PH (mm)	23,7	31,5	-	-	-	-	-
PE/h (mm/h)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PH (mm)	25,7	66,1	28,3	31,8	21,5	37,3	34,8

Tabela 4 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CR e BTC não estabilizados (NE)

Propriedades	8CRP	4CRP	80CP _{20CRP}	50CP _{50CRP}	80CP _{20CRB}	50CP _{50CRB}	NE
MV _f (kg/m ³)	2100	2110	2140	2110	2120	2120	2190
P _T (%)	29,8	28,8	26,6	28,3	27,0	27,0	26,2
MV _{lab} (kg/m ³)	1980	1960	2000	1960	2020	2010	2000
f _{c,un,seca} (MPa)	7,0	-	10,8	10,6	8,3	8,2	4,3
f _{c,un,sat} (MPa)	2,8	-	3,6	3,1	3,5	3,2	-
f _{c,un,lab} (MPa)	5,7	3,5	7,2	6,3	7,2	6,4	2,1
A _{i,24h} (%)	12,2	11,1	10,3	10,6	10,3	10,7	-
C _{abs,10min} (g/cm ² .min ^{0,5})	16,1	20,9	10,0	11,5	11,4	15,2	-
C _{abs,10min-6h} (g/cm ² .min ^{0,5})	9,3	11,9	5,4	6,2	5,3	6,1	-
P _{VP} (x10 ⁻¹¹ kg/s.m.Pa)	1,62	1,95	1,27	1,23	-	-	2,82
μ	12,1	10,1	15,4	16,0	-	-	7,0
PE/h (mm/h)	0,0	-	-	-	-	-	13,8
PH (mm)	39,4	-	-	-	-	-	76,7
PE/h (mm/h)	<1,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	207,0
PH (mm)	31,0	90	20,6	28,0	27,9	35,7	-

3.1 MASSA VOLÚMICA E POROSIDADE

A porosidade total dos BTCs no estado endurecido variou entre 25,8% e 29,8% (Tabela 3 e Tabela 4), estimada a partir da composição de MV_f e do nível de hidratação do estabilizante (Bogas et al., 2023). Como esperado, MV_f correlaciona-se com P_T (Figura 1), embora a correlação não seja elevada devido ao facto de MV_f considerar toda a água da mistura e P_T ser reduzida da água de hidratação. Daí o NE apresentar maior P_T para um dado MV_f. Os BTC com CR apresentaram menor MV_f e maior P_T do que os BTC com CP, devido à sua maior exigência de água e, como tal, maior a/l. Mesmo considerando composições com o mesmo a/l, P_T foi 6,5% superior nos BTC com CRP (8CRP vs 8CP_{TH}). Logo, para idêntico teor em água, a compactação foi mais difícil nos BTC com CRP. MV_{lab} seguiu a mesma tendência de MV_f, sendo maior nos BTC com CP do que com CR. Porém, MV_{lab} depende também da secagem dos BTC e do grau de hidratação do ligante. Por esse motivo, os BTC não estabilizados tiveram a maior redução de MV_f para MV_{lab}. No entanto, a redução de massa volúmica foi semelhante nos BTC com CP ou CR de igual teor ligante, o que sugere que os BTC com CR atingiram níveis de hidratação semelhante aos BTC com CP. A estabilização com 4% de ligante resultou em MV_{lab} intermédias face aos BTC não estabilizados ou com 8% de ligante. A variação de P_T com o teor de ligante foi pouco significativa. Foi possível produzir os BTC com incorporação parcial de CRB com o mesmo teor de água dos BTC com CP, apresentando exigência de água e relação a/l efetiva semelhante. De facto, tendo em conta a contaminação de 33% agregado, a relação a/l indicada na Tabela 2 para os BTC com CRB



corresponde a um a/l equivalente de 1,22, igual à dos BTC com CP. Assim, P_T foi semelhante nestes BTC. Visto que a substituição de solo por RCD não alterou a granulometria, P_T foi pouco afetada. A maior porosidade dos RCD foi compensada por uma eventual melhoria na compacidade da mistura. A ligeira diminuição de MV_{lab} resulta dos RCD apresentarem menor massa volúmica do que o solo. Devido às semelhanças entre as curvas granulométricas do solo e do RCD, P_T foi semelhante em 8CP e 8CP25RCD.

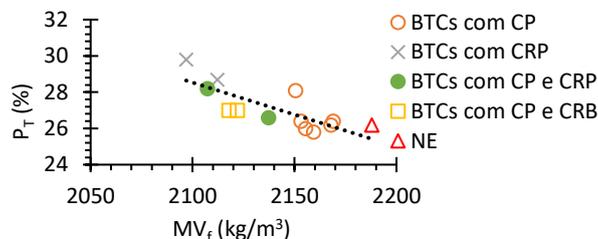


Figura 1 - Relação entre a massa volúmica fresca (MV_f) e a porosidade total (P_T)

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Apenas os BTC estabilizados mantiveram a sua integridade após imersão em água, atingindo $f_{c,sat}$ superiores ao mínimo de 1,5 MPa recomendado na ARS 1333 (2018). Por sua vez, a $f_{c,seco}$ variou entre 4,3 MPa e 10,9 MPa (Tabela 3 e Tabela 4), ultrapassando o mínimo de 3 MPa, recomendado pela mesma norma. A eficácia da estabilização dos BTCs está relacionada com o rácio $f_{c,un,sat}/f_{c,un,seco}$ (Riza et al., 2015). Este rácio foi de 0,29-0,42, com apenas o 8CPTH e o 50CP50CRP ligeiramente abaixo do limite recomendado para BTC com boa durabilidade em ambiente exterior (Heathcote, 1995). Salienta-se a redução de resistência ter sido idêntica a inferior nos BTC com CRP face aos BTC com CP, sugerindo que a eficiência destes estabilizantes foi semelhante.

A $f_{c,un,lab}$ variou entre 3,5 e 8,2 MPa nos BTC estabilizados, aumentando com o teor de ligante. A redução de $f_{c,un,lab}$ foi de 21% e 39% após se reduzir de 8% para 4% de CP e CRP, respetivamente. Ainda assim, mesmo com apenas 4% de ligante a resistência dos BTC com CP e CPR foi 2,6 e 1,7 vezes superior à dos BTC não estabilizados, respetivamente. A resistência foi menor nos BTC com CRP do que nos BTC com CP de igual teor de estabilizante, mesmo para igual a/l (27% superior no 8CPTH do que no 8CRP). Isto resulta de se ter atingido um maior P_T nos BTC com CRP. De facto, verifica-se uma boa relação entre P_T e $f_{c,un,lab}$ quando se tem em consideração diferentes teores de estabilizante (Figura 2), pois a resistência depende da capacidade ligante do estabilizante e da porosidade total. Salienta-se o facto desta relação ser independente do tipo de estabilizante, o que significa que o CP e o CR apresentam capacidade ligante e de hidratação semelhantes. Assim, conclui-se que caso seja possível garantir igual P_T , a resistência é idêntica nos BTC com CP e CRP. Os BTC não estabilizados ou com 4% ligante possuem menor capacidade de ligação para um dado P_T (Figura 2). Acrescente-se que os BTC com 8%CP32,5 tiveram um portamento próximo dos BTC com 4% estabilizante, indicando que o CRP foi mais eficiente do que o cimento menor classe de resistência.

A incorporação parcial de CRP ou CRB conduziu a resistências semelhantes, sendo intermédias da dos BTC com 100% CP ou CRP (Tabela 3 e Tabela 4). A perda de resistência foi inferior a 8 e 20% para 20 e 50% de CR, respetivamente (Tabela 3 e Tabela 4), e para igual a/l, a resistência foi idêntica no 8CPTH e nos BTC com 20% CR. Conclui-se que o CRB foi tão eficiente como o CRP e, conseqüentemente, o método de separação foi efetivo em produzir este ligante. A resistência não foi significativamente afetada pelo teor de RCD, mas foi ligeiramente superior para 25% RCD, associado a uma ligeira redução de P_T .

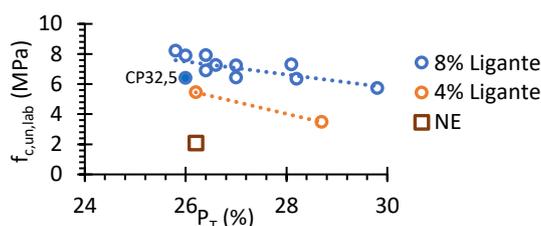


Figura 2 – Relação entre a porosidade total (P_T) e a resistência à compressão em ambiente laboratorial ($f_{c,un,lab}$)

3.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Os BTC NE desintegraram-se após poucos minutos de imersão, ao contrário dos BTC estabilizados, que se mantiveram intactos ao longo do ensaio, independentemente do tipo e teor de ligante. Todos os BTC estabilizados apresentaram $A_{i,24h}$ bastante inferior a 20%, conforme o recomendado na NBR 8491 (2012) para aplicações em ambientes húmidos. Segundo o ARS 1333 (2018), os BTC com 8% CP atingiram a classe mais baixa de absorção (8-10%) enquanto o 8CRP atingiu a classe mais alta (12-15%).

Apesar de $A_{i,24h}$ ter sido superior nos BTC com CRP do que com CP, esta foi pouco afetada pelo tipo e teor de ligante. A redução do teor de ligante nos BTC com CRP levou a uma diminuição de cerca de 10% na $A_{i,24h}$, enquanto para os BTC com CP foi idêntica (Tabela 3 e Tabela 4). Isto resulta de $A_{i,24h}$ depender mais da porosidade e interconectividade da microestrutura do que da capacidade ligante entre as partículas do solo. Porém, apesar do menor P_T , 8CPTH apresentou $A_{i,24h}$ semelhante a 8CRP. De facto, para igual porosidade, os BTC com CP tendem a apresentar maior absorção do que os BTC com CRP. Segundo Bogas et al. (2020), devido ao CR ser poroso, as pastas com este ligante exibem microestrutura bifásica, composta por porosidade interpartícula e intrapartícula. Como parte da água é absorvida no CR, existe uma redução do espaço interpartícula face às pastas com CP de igual a/l. Assim, para idêntica porosidade, a microestrutura fica mais refinada, diminuindo a interconectividade entre poros. Mais uma vez, os BTC com incorporação parcial de CRP e CRB em substituição de CP apresentaram igual desempenho (Tabela 3 e Tabela 4).

A substituição parcial de solo por RCD aumentou $A_{i,24h}$ (Tabela 3), que contraria a tendência de P_T . A imersão deverá ter permitido que a maior porosidade do RCD ficasse acessível à água, aumentando a absorção. Mais uma vez, as diferenças entre 8CP e 8CP25RCD não foram significativas (Tabela 3).

3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Nas Figura 3 e na Figura 4 apresenta-se a evolução da absorção capilar até 72 horas. Pelo menos nas primeiras 6 horas, a absorção evoluiu de forma aproximadamente linear com a raiz do tempo. Depois, ocorreu uma saturação progressiva dos poros de maior conectividade e a participação progressiva dos poros menos acessíveis. Nos primeiros 10 minutos ocorreu uma absorção rápida.

Os blocos estabilizados com CR apresentaram maior absorção às 72 horas (Figura 3 e Figura 4) e maior $C_{abs,10min-6h}$ (Tabela 3 e Tabela 4), em parte devido ao maior P_T e a/l. No entanto, o aumento de $C_{abs,10min-6h}$ nos BTC com 4-8% CRP (48-75%) foi maior do que o verificado na imersão (6-16%), (3.3). Por outro lado, o $C_{abs,10min-6h}$ no 8CPTH foi 31% inferior ao do 8CRP de igual a/l, enquanto a absorção por imersão foi igual. Logo a maior taxa de absorção nos BTC com CRP não se justifica apenas pelo diferente P_T , dependendo também da distribuição da porosidade. Como discutido em 3.3, para a matriz de CR tem uma microestrutura mais refinada, associada a uma maior quantidade de poros de menor dimensão, que promovem maiores forças capilares. Como esperado, ocorreu um aumento de $C_{abs,10min-6h}$ com a redução do teor de ligante e com a utilização de CP32,5. A substituição progressiva de CP por CR aumentou a taxa de absorção, especialmente para teores acima de 50% (Tabela 3 e Tabela 4). Mais



uma vez, os BTC com CRP e CRB tiveram igual desempenho. Não se verificou uma tendência clara de evolução de $C_{abs,10min-6h}$ com a substituição parcial de solo por RCD. Este parâmetro seguiu a tendência observada na resistência à compressão, sendo mais afetado pela matriz em volta do RCD.

Todos os BTC apresentaram “muito baixa absorção” segundo a NTC 5324 (2004) ($C_{abs,10min} < 20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$).

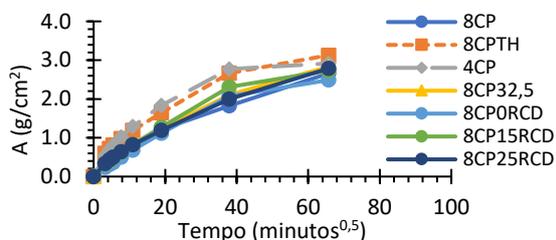


Figura 3 – Absorção capilar ao longo do tempo para BTCs com CP

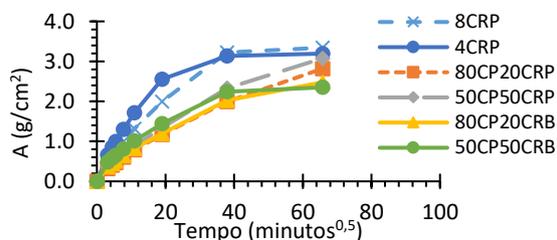


Figura 4 – Absorção capilar ao longo do tempo para BTCs com CR

3.5 EROSIÃO POR GOTEJAMENTO (DRIP TEST)

Verifica-se uma elevada eficiência dos estabilizantes na redução da erosão por gotejamento, que simula a ação de chuva ligeira. De facto, não se verificou qualquer dano na superfície dos BTC estabilizados, independentemente do tipo de ligante. Em contrapartida, o BTC NE apresentou uma taxa de erosão de 13,8 mm/h. Segundo a NZS 4298 (1998), os BTC estabilizados inserem-se no índice 2 de erodibilidade (<5 mm erosão) e o NE insere-se no índice 3 (5-10 mm erosão).

Os BTC estabilizados diferiram apenas na penetração de humidade, tendo sido 66% e 25% superior nos BTC com CRP do que no 8CP e 8CPTH, respetivamente, seguindo a tendência dos ensaios de absorção. De facto, este parâmetro avalia apenas a absorvidade do bloco sobre condições de baixa pressão, sugerindo que o seu comportamento foi semelhante ao identificado na absorção capilar. Segundo a NZS 4298 (1998), os BTC apresentam desempenho aceitável face à ação de gotejamento caso possuam PH inferior a 120 mm, o que é respeitado por todas composições, incluindo o NE.

3.6 EROSIÃO ACELERADA (SPRAY TEST)

Apesar do *spray test* simular a ação de chuva intensa, verificou-se que, para 0,5 bar apenas os BTC NE sofreram erosão significativa. Assim, segundo a norma NZS 4298 (1998), todos os BTC estabilizados enquadram-se no índice de erodibilidade mais baixo (erosão <10 mm). Para permitir uma maior diferenciação, aumentou-se a pressão para 2,5 bar. Mesmo nestas condições a erosão foi desprezável. Apenas os blocos com 100% CRP apresentaram ligeira erosão superficial, inferior a 1mm/h nos BTC com 8%CRP e 1,8mm/h nos BTC com 4% CRP. Taxas de erosão inferiores a 1mm/h também foram reportadas por Cruz et al. (2022) em BTC com 10% CRP. A maior P_T e maior a/l dos BTC com CR terão reduzido a coesão entre partículas. De qualquer forma, mesmo nos BTC com 4% CRP a resistência à erosão da água foi muito superior à dos BTC NE, que para apenas 0,5 bar foram totalmente erodidos em menos de 30 minutos. Segundo a NZS 4298 (1998), o NE seria considerado “não aceite”. Assim, fica demonstrado a importância da estabilização nos BTC, bem como a viabilidade do CR.

Tal como no *drip test*, apenas o PH permitiu distinguir o desempenho dos BTC. Dado que PH está relacionado com a absorvidade e permeabilidade, esperava-se que os BTC com maior P_T apresentassem maior PH. Porém, a relação entre estes parâmetros foi fraca. Neste caso, PH também é afetado pela qualidade do ligante. Note-se que a entrada de água sob pressão está relacionada com a permeabilidade dos BTC. Assim, visto que esta propriedade é mais afetada pelo diâmetro crítico dos



poros do que a absorção (Garboczi, 1995), torna-se mais relevante o refinamento e interconectividade da microestrutura. Desse modo, os BTC com menor teor de ligante ou com ligante de menor classe de resistência apresentaram maior PH (Tabela 3 e Tabela 4). Também os BTC com 8% CRP apresentaram PH semelhante ao 8CP e 2 vezes inferior ao do 8CPTH, o que confirma a possibilidade de maior refinamento da sua microestrutura. Inclusivamente, os BTC com até 20% CRP ou CRB apresentaram desempenho idêntico a superior ao do 8CP. Finalmente, a substituição parcial de solo por RCD resultou numa tendência de evolução do PH semelhante ao observado em 3.2.

3.7 PERMEABILIDADE AO VAPOR

A permeabilidade ao vapor, P_{VP} , e a resistência à difusão, μ , variaram entre $1,16-2,82 \times 10^{-11}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ e 7,0-16,9, respetivamente (Tabela 3 e Tabela 4). Cagnon et al. (2014) reportam valores de μ entre 7 e 14 para BTC NE, tendendo a aumentar após estabilização. Note-se que na construção em terra é desejável que μ seja baixa, pois aumenta a capacidade higroscópica e de transmissão de vapor, e consequentemente, a capacidade reguladora da humidade (McGregor et al., 2014).

Como expectável, os BTC NE apresentaram a maior P_{VP} , sendo aproximadamente 2,5 vezes e 1,7 vezes superior à de 8CP e 8CRP, respetivamente (Tabela 3 e Tabela 4). Entre os BTC estabilizados, o 4CP e o 4CRP apresentaram os valores mais elevados de P_{VP} , uma vez que estas composições estão associadas a porosidades mais grosseiras e de maior interconectividade. Em seguida, o 8CRP e o 8CPTH (de maior a/l) apresentaram maior permeabilidade, cerca de 40-47% superior à do 8CP (Tabela 3 e Tabela 4). A maior P_T justifica em parte os valores mais elevados de permeabilidade. No entanto, apesar de 8CPTH ter P_T 6% mais baixa, P_{VP} foi ligeiramente superior à de 8CRP com o mesmo a/l (Tabela 3 e Tabela 4). Isso sugere, mais uma vez, que, para o mesmo nível de porosidade, o CRP conduz a matrizes mais refinadas e menos interconectadas, reduzindo a permeabilidade. A substituição parcial de CP por CRP resultou em valores intermediários de permeabilidade face a 8CP e 8CRP. No entanto, até 50% de substituição, a permeabilidade sofreu alteração pouco significativa e foi sempre inferior à de 8CPTH (Tabela 3 e Tabela 4). Conclui-se que a substituição de CP por CRP tende a aumentar ligeiramente a resistência à difusão, para igual P_T . Porém, como a utilização de CRP conduz a maiores porosidades, o CRP e o CP deverão ter um impacto semelhante na capacidade de regularização de humidade. A P_{VP} diminuiu com o aumento do teor de RCD (Tabela 3). Neste caso, conforme discutido para as restantes propriedades, terá ocorrido uma densificação da matriz, aumentando a resistência à passagem de vapor.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliada a durabilidade de BTC estabilizados com diferentes teores de cimento reciclado (CR), recuperado de pasta (CRP) ou de betão (CRB), e adição de até 25% RCD em substituição de solo. A maior exigência de água do CR dificultou a compactação e reduziu a massa volúmica e compacidade dos BTC, afetando negativamente a resistência mecânica e absorção de água. No entanto, para uma mesma porosidade total, o CR permite atingir BTC de desempenho semelhante aos BTC com CP de idêntico a/l . O CR demonstrou capacidade ligante e de hidratação semelhante ao CP e superior à do CP32.5 de menor classe de resistência. A incorporação de CR foi ainda capaz de aumentar em 3 vezes a resistência à compressão dos BTC não estabilizados e permitir que estes não se desintegrassem na água. Os BTC estabilizados, mesmo para baixos teores de estabilizante, apresentaram elevada resistência à erosão, um dos principais mecanismos de deterioração das construções em terra, independentemente do tipo de ligante utilizado. Para igual porosidade total, a substituição de CP por CR tendeu a aumentar a resistência à difusão. Porém, devido à menor compacidade dos BTC com CR, a permeabilidade ao vapor de água não foi significativamente afetada.



Como tal, conclui-se que a estabilização dos BTC é fundamental para garantir a sua durabilidade à ação da água, com o CR a mostrar ser uma alternativa viável ao CP. Além disto, o CRB manifestou desempenho idêntico ao CRP nas propriedades analisadas, demonstrando-se a viabilidade do método de separação desenvolvido e a adequada eficiência da fração cimentícia recuperada. A substituição de solo por RCD não afetou negativamente a porosidade e compacidade global dos BTC, tendo reduzida influência na resistência e durabilidade dos BTC. Por fim, conclui-se ser viável a incorporação de pelo menos 25% RCD, melhorando ainda mais a natureza sustentável dos BTC.

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, Vimajas, Força Aérea Portuguesa e Cobert pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental, e das Oficinas do convento, Montemor-o-Novo, no apoio à produção dos BTC. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento 2023.05651.BD.

REFERÊNCIAS

- ARS 1333. (2018). *Compressed stabilized earth blocks — Requirements, production and construction, African Organization for Standardization (ARSO)*.
- 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).
- ASTM E96. (1995). *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*, American Society for Testing & Materials (ASTM).
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 218, 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- Bogas, J., Manuel, P., Ana, G., Ana, C., Susana, H., & Rui, S. (2021). *Process for separating the components of hardened concrete waste for producing recycled cement*. Portuguese Patent Office. PT116130A, 2021-08-24. European Patent Office. EP4112577A1, 2023-01-04.
- Bogas, J., Real, S., Cruz, R., & Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, 79, 107892. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107892>
- Bogas, J., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2019). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569–584. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>
- C. Sekhar, D., & Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 166, 531–536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>
- Cagnon, H., Aubert, J. E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>



- Carricho, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Construction and Building Materials*, 333, 127392. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127392>
- Cruz, R., Azevedo, B., Bogas, J. A., & Real, S. (2022). Resistência à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado. *Congresso Construção 2022*.
- EN 196-3. (2016). *Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness, European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 196-6. (2018). *Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness, European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 451-1. (2017). *Method of testing fly ash - Part 1: Determination of free calcium oxide content, European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 772-1. (2011). *Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength, European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 772-11. (2011). *Methods of test for masonry units - Part 11: 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 units, 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 933-1. (2012). *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 933-11. (2011). *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate, European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 1015-19. (1998). *Methods of test for mortar for masonry - Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars, European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 1097-6. (2003). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption, European Committee for Standardization (CEN)*.
- Garboczi, E. (1995). Microstructure and transport properties of concrete. In J. Kropp & H. Hilsdorf (Eds.), *Performance Criteria for Concrete Durability (Rilem Report, No 12)* (1st ed., pp. 126–134). E & FN Spon.
- HB-195. (2001). *The Australian earth building handbook*. Standards Australia.
- Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Buildings Materials*, Vol 9(3), 185–189.
- ISO 12572. (2016). *Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties — Cup method, International Organization for Standardization (ISO)*.
- LNEC E-64. (1979). *Cimentos - Determinação da massa volúmica, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.



- LNEC E-239. (1970). *Solos - Análise Granulométrica por Peneiração Húmida, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).*
- LNEC E-394. (1993). *Betões - Determinação Da Absorção de Água Por Imersão, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).*
- McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment*, 75, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009>
- Narayanaswamy, A. H., Walker, P., Venkatarama Reddy, B. V., Heath, A., & Maskell, D. (2020). Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. *Construction and Building Materials*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118096>
- NBR 8491. (2012). *Tijolo de solo-cimento - Requisitos, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).*
- NBR 8492. (2012). *Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio.*
- Niamien Kouamé, A., Koffi Konan, L., & Irié Hervé Gouré Doubi, B. (2021). Microstructure and Mineralogy of Compressed Earth Bricks Incorporating Shea Butter Wastes Stabilized with Cement. *Advances in Materials*, 10(4), 67. <https://doi.org/10.11648/j.am.20211004.13>
- NP EN 12390-3. (2021). *Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes.*
- NP-83. (1970). *Solos - Determinação da densidade das partículas, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).*
- NP-143. (1969). *Solos - Determinação dos limites de consistência, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).*
- NTC 5324. (2004). *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones.*
- NZS 4298. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings.*
- Riza, F. V., & Rahman, I. A. (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks: Design, Properties and Durability* (pp. 379–392). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00017-6>
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
- Sujatha, E. R., & Selsia Devi, S. (2018). Reinforced soil blocks: Viable option for low cost building units. *Construction and Building Materials*, 189, 1124–1133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.077>
- Tchouateu Kamwa, R. A., Tome, S., Chongouang, J., Eguekeng, I., Spieß, A., Fetzter, M. N. A., Elie, K., Janiak, C., & Etoh, M. A. (2022). Stabilization of compressed earth blocks (CEB) by pozzolana based phosphate geopolymer binder: Physico-mechanical and microstructural investigations. *Cleaner Materials*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100062>
- Walker, P. J. (1995). Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. *Cement & Concrete Composites*, 17, 301–310.