

Caracterização mecânica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado

Sofia Real¹, Bruno Azevedo², José Alexandre Bogas¹, Ricardo Cruz^{1*}e Ana Carriço¹

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 tendência atual de procura por materiais mais sustentáveis, reavivou o potencial de materiais de construção em terra. Por outro lado, dada necessidade de encontrar alternativas mais ecológicas aos atuais estabilizantes da terra, mais intensivos em carbono, como o cimento Portland (CP), têm-se procurado soluções alternativas de baixo carbono, como o cimento reciclado termoativado (CR). No presente estudo, pretende-se analisar o desenvolvimento de blocos de terra comprimidos (BTC) mais eco-eficientes, explorando a sua estabilização com a incorporação total ou parcial de CR em substituição de CP. Para tal, foram produzidos BTC com 5 a 10% de estabilizante e diferentes percentagens de incorporação de CR (20%, 50%, 100%) e caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassons. Em paralelo, foram também ensaiadas misturas de referência não estabilizadas ou estabilizadas com igual teor de CP. Os BTC foram ensaiados tendo em consideração diferentes condições de cura e de humidade, de modo a avaliar a eficiência das soluções estabilizantes preconizadas. Apesar de se verificar uma redução esperada das propriedades mecânicas face aos BTC com CP, verifica-se uma melhoria significativa face aos BTC não estabilizados, nomeadamente em condições de adversas de humidade. Assim, demonstra-se a viabilidade da produção de BTC estabilizados com CR, atingindo soluções mais sustentáveis.

Palavras-chave: Blocos de terra comprimida, cimento reciclado termoativado, caracterização física, caracterização mecânica

1. Introdução

A mais recente procura por materiais e técnicas de construção mais sustentáveis, reavivou o interesse pela construção em terra. Além do seu baixo impacto ambiental e energia incorporada, algumas das suas principais vantagens são a existência de matéria-prima em abundância, a sua reciclabilidade e as suas características higrotérmicas. Adicionalmente, o aparecimento da estabilização com materiais cimentícios proporcionou uma melhoria relevante das propriedades de diferentes técnicas de construção em terra, dos quais se destacam-se os blocos de terra comprimida (BTC).

Por outro lado, dada a necessidade de encontrar alternativas mais ecológicas aos atuais estabilizantes da terra, mais intensivos em carbono, como o cimento Portland (CP), têm-se procurado soluções alternativas de baixo carbono, como o cimento reciclado termoativado (CR). Para além de reduzir o consumo de recursos naturais e as emissões de CO₂ durante a fase de produção, este novo material eco-eficiente permite a reciclagem de resíduos de construção e demolição. Com base em estudos anteriores em outros materiais de construção [1–4], o cimento reciclado termoativado poderá ser uma opção de estabilizante mais sustentável do ponto de vista ecológico, enquanto tecnicamente viável.

No presente estudo, pretende-se analisar o desenvolvimento de blocos de terra comprimidos (BTC) mais eco-eficientes, explorando a sua estabilização com a incorporação total ou parcial de CR em substituição de CP. Para tal, foram produzidos BTC com 5 a 10% de estabilizante e diferentes percentagens de incorporação de CR (20%, 50%, 100%) e caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassons. Em paralelo, foram também ensaiadas misturas de referência não estabilizadas ou estabilizadas com igual teor de PC. Os BTC foram ensaiados tendo em consideração diferentes condições de cura e de humidade, de modo a avaliar a eficiência das soluções estabilizantes preconizadas.

2. Programa Experimental

2.1 Materiais

Para a produção dos BTC, foram selecionados os seguintes materiais: um tipo de terra proveniente de Montemor-o-Novo, cimento CEM I 42,5 R da SECIL e CR produzido em laboratório. A terra foi caracterizada através da sua massa volúmica (NP 83 [5]), granulometria (LNEC E 293 [6]), limites de Atterberg (NP 143 [7]), teor ótimo de água (TOA) (ASTM D698 [8]) e teor de matéria orgânica. A terra é composta por cerca de 20,1% de seixo fino, 48,4% de areia e 31,5% de material fino, com um teor de matéria orgânica inferior a 1% e uma massa volúmica de cerca de 2,85 g/cm³. Esta apresentou um teor ótimo de água de 16% e limites de liquidez e de plasticidade de 30% e 22%, respetivamente, correspondendo a um índice de plasticidade de 8%. Antes da produção dos BTC, a terra foi seca ao ar, pulverizada e peneirada (1mm).

O CR foi produzido a partir de pasta de cimento (CEM I 42,5R) com uma relação água/cimento (a/c) de 0,45 e uma resistência à compressão aos 28 dias de 57 MPa. Após mais de 3 meses em ambiente de laboratório, a pasta foi submetida a processos de britagem e moagem, de forma a reduzir a dimensão das partículas até menos de 250 µm. De seguida, estas partículas foram submetidas a um tratamento térmico em forno rotativo, tendo sido aquecidas a 10°C/min até 650°C, com um período de residência de 3 horas, seguido de arrefecimento dentro do forno até temperatura ambiente. A caracterização dos estabilizantes encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos estabilizantes

Parâmetro	Norma	Designação	
		CEM I 42,5 R	CR
Massa volúmica (g/cm ³)		3,07 ^{a)}	3,00 ^{b)}
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +FeO ₃ (%)		19,64+5,34+3,05	19,14+5,13+3,00
CaO+MgO (%)		62,80+1,80	60,79+1,77
CaO livre (%)		0,7	13,94
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	NP EN 196-1 [9]	57,0	17,3
Consistência normal (a/l)	NP EN 196-3 [10]	0,31	0,73
Tempo de presa inicial/final (mins)	NP EN 196-3 [10]	170/280	290/385

^{a)} De acordo com LNEC E 64 [11]; ^{b)} de acordo com picnómetro de hélio

2.2 Composição e produção das misturas

Os BTC foram produzidos manualmente com uma dimensão de 220x105x60 mm com recurso a uma prensa *Terstaram* e uma força de compactação de cerca de 150kN. Foram seleccionadas 7 composições, designadas consoante o tipo (CP e CR) e percentagem (5-10%) de estabilizante usado (Tabela 2). Após a produção, os BTC estabilizados com CP ou CR foram sujeitos a 7 dias de cura húmida, enquanto os BTC não estabilizados (NE) foram submetidos a cura seca (7 dias sob película).

Tabela 2. Composição dos blocos de terra comprimida

Composição	Terra (%)	CP (%)	CR (%)	a/l	TOA (%)
CP10	90	10	-	1,10	15,0
CR10	90	-	10	1,25	16,5
CP5	95	5	-	2,20	15,2
CR5	95	-	5	2,20	15,2
CR2CP8	90	8	2	1,10	15,0
CR5CP5	90	5	5	1,15	15,5
NE	100	-	-	-	14,4

2.3 Preparação dos blocos e métodos de ensaio

Os BTC foram caracterizados segundo a sua massa volúmica (NP EN 772-13 [12]), resistência à compressão (NP EN 772-1 [13], NBR 8492 [14]), resistência à tração por flexão (NP EN 772-6 [15]), resistência à tração por compressão diametral (NP EN 12390-6 [16]), módulo de elasticidade (LNEC E397 [17]) e velocidade de propagação de ultrassons (NP EN 12504-4 [18]). Os ensaios de resistência mecânica foram realizados com recurso a uma prensa hidráulica *Tonipact* com uma capacidade de 3000kN e células de carga com capacidades de 100kN e 200kN. Para o ensaio de resistência à compressão, cada provete foi seccionado em duas partes. De seguida, as duas partes do bloco foram sobrepostas sem aplicação de argamassa e ensaiadas a uma velocidade constante de 0,5 kN/s. Os ensaios foram realizados a diferentes idades (3,7 e 28 dias) em provetes com várias condições de humidade (seco, saturado, em ambiente de laboratório (19-26°C e 55-75%HR)). A resistência à tração por flexão foi determinada com base no ensaio de flexão a três pontos a uma velocidade constante de 0,1 kN/s. Da mesma forma, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado a uma velocidade constante de 0,1 kN/s. Estes ensaios foram realizados aos 28 dias em provetes em

ambiente de laboratório. O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi realizado aos 28 dias em provetes com diferentes condições de humidade.

3. Análise e discussão de resultados

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânicas dos BTC em estudo, bem como o seu coeficiente de variação (CV). Foram avaliadas a massa volúmica fresca (MV_f), a massa volúmica seca (MV_{seco}), a massa volúmica em ambiente laboratorial (MV_{AL}), a massa volúmica saturada (MV_{sat}), a resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias (f_c), a resistência à tração por flexão aos 28 dias (f_{ctr}), a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (f_{ctsp}), o módulo de elasticidade (E_c) e a velocidade de propagação de sons (VUS). A porosidade total (PT) foi estimada tendo como base a massa volúmica fresca.

Tabela 3. Resultados da caracterização física e mecânica

Propriedades	CP10	CR10	CP5	CR5	CR2CP8	CR5CP5	T
MV_f (kg/m ³)	1990	1870	1950	1880	1950	1870	2030
PT (%)	36,4	41,0	39,2	41,7	37,5	40,2	37,9
MV_{AL} (kg/m ³)	1860	1730	1780	1720	1800	1780	1820
MV_{seco} (kg/m ³)	1730	1630	-	-	1690	1650	1790
MV_{sat} (kg/m ³)	2080	1910	-	-	1970	1950	-
$f_{c,3d AL}$ (MPa)	3,38	1,77	1,47	0,97	2,61	2,01	0,83
CV _{$f_{c,3d AL}$} (%)	15	3	15	8	5	19	14
$f_{c,7d AL}$ (MPa)	3,54	2,52	1,82	1,05	3,14	2,51	1,79
CV _{$f_{c,7d AL}$} (%)	11	3	6	7	6	21	2
$f_{c,28d AL}$ (MPa)	5,92	4,44	3,34	2,45	5,12	4,99	2,33
$f_{c,28d seco}$ (MPa)	7,43	6,53	-	-	-	-	4,25
$f_{c,28d sat}$ (MPa)	4,32	2,45	-	-	-	-	-
CV _{$f_{c,28d AL}$} (%)	8	5	9	5	6	2	8
CV _{$f_{c,28d seco}$} (%)	34	15	-	-	-	-	8
CV _{$f_{c,28d sat}$} (%)	21	4	-	-	-	-	-
$f_{ctr,28d AL}$ (MPa)	0,97	0,93	0,69	0,52	1,02	1,17	0,41
CV _{$f_{ctr,28d AL}$} (%)	9	15	7	13	3	6	12
$f_{ctsp,28d AL}$ (MPa)	0,51	0,44	0,36	0,20	0,44	0,56	0,25
$f_{ctsp,28d sat}$ (MPa)	0,45	0,33	-	-	-	-	-
CV _{$f_{ctsp,28d AL}$} (%)	14	12	11	12	7	5	20
CV _{$f_{ctsp,28d sat}$} (%)	25	33	-	-	-	-	-
$E_{c,28d AL}$ (GPa)	2,77	2,10	-	-	-	-	-
VUS _{AL} (m/s)	1741	1414	1147	1094	1584	1472	1104
VUS _{seco} (m/s)	1247	1307	-	-	-	-	1338
VUS _{sat} (m/s)	2069	1934	-	-	-	-	-

3.1 Propriedades no estado fresco

O TOA das misturas variou entre 14,4 e 16,5%, tendo sido superior ao recomendado por Rigassi [19]. O elevada exigência de água do CR, associada ao TOA da terra maior do que o usual, justifica os resultados elevados (Tabela 2). Como consequência destes valores, as relações a/l dos BTC com CR/CP variaram entre 1,10 e 2,20 (Tabela 2), tendo sido superiores quando o CR foi usado com

estabilizante.

A massa volúmica fresca (MV_f) dos BTC variou entre 1870 e 2030 kg/m^3 (Tabela 3), encontrando-se dentro dos valores recomendados por Rigassi [19]. Apesar de a massa volúmica dos estabilizantes utilizados ser superior à da terra, o maior TOA dos BTC estabilizados terá compensado este aspeto, pelo que os BTC NE e BTC CR apresentaram a maior e menor massa volúmica fresca, respetivamente.

Com base na massa volúmica fresca dos BTC, estimou-se a sua porosidade total (PT) (Tabela 3), correspondendo à soma do volume de ar e do de água que não consumida durante a hidratação do estabilizante. Esta variou entre 36,4 e 41,7%, tendo sido superior nos BTC CR, demonstrando a sua menor compactidade

3.2 Massa volúmica no estado endurecido

A Figura 1 apresenta a massa volúmica no estado endurecido dos BTC com diferentes tipos e percentagens de estabilizante em diferentes condições de humidade. Conforme seria espectável, a massa volúmica aumentou com a humidade dos BTC. A massa volúmica seca dos BTC variou entre 1630 e 1790 kg/m^3 (Tabela 3).

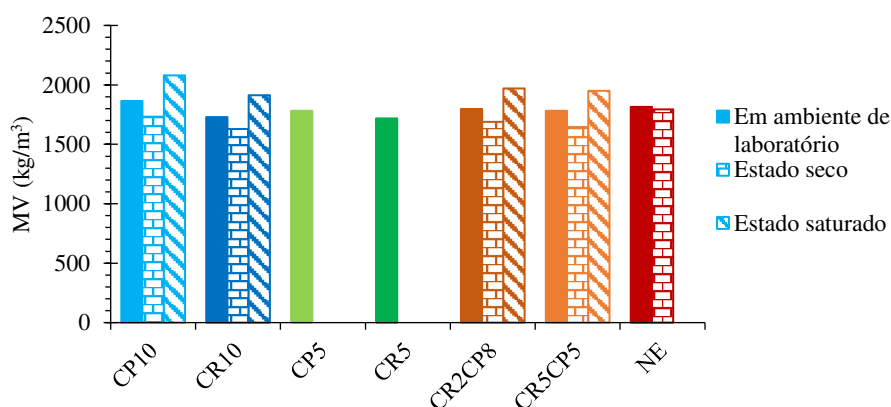


Figura 1. Massa volúmica (MV) em diferentes condições de humidade

À semelhança da massa volúmica fresca, os BTC CR apresentaram as menores massas volúmica secas, essencialmente devido ao elevado a/l destes BTC. No entanto, destaca-se o facto de a diferença entre a massa volúmica fresca e a seca ter sido ligeiramente inferior nos BTC CR do que nos BTC CP, o que sugere que os BTC CP terão consumido maior quantidade de água de hidratação. De facto, o CR tende a desenvolver menor quantidade de produtos de hidratação ao longo do tempo [20,21]. A massa volúmica saturada dos BTC estabilizados foi cerca de 16,8-20,1% superior à seca. No entanto, não foi possível determinar a massa volúmica saturada do BTC NE, dado que perdeu a sua coesão em contacto com a água, demonstrando o potencial da utilização de estabilizantes nas propriedades dos BTC.

3.3 Resistência à compressão

As Figuras 2 e 3 apresentam a resistência à compressão de BTC com diferentes tipos e percentagens de estabilizante aos 28 dias para várias condições de humidade e em ambiente de laboratório a diferentes idades, respetivamente. A resistência à compressão dos BTC em ambiente de laboratório

variou entre 0,83 e 5,92 MPa, dependendo da sua composição e idade (Figura 2 e Tabela 3). Esta propriedade foi até 154 % superior nos BTC estabilizados do que no BTC NE em ambiente de laboratório, tendo aumentado com a percentagem de estabilizante. Estes resultados demonstram o contributo dos estabilizantes para o comportamento mecânico dos BTC. No entanto, a incorporação de apenas 5% de estabilizante nos BTC teve pouca influência na resistência à compressão, em especial no caso dos BTC CR, tendo sido apenas até 5% superior.

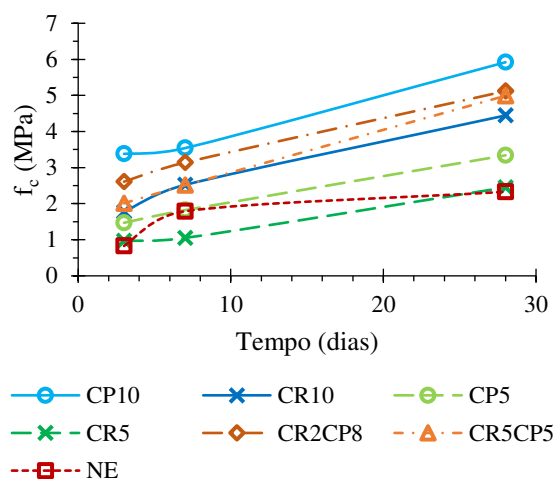


Figura 2. Resistência à compressão (f_c) ao longo do tempo em ambiente de laboratório

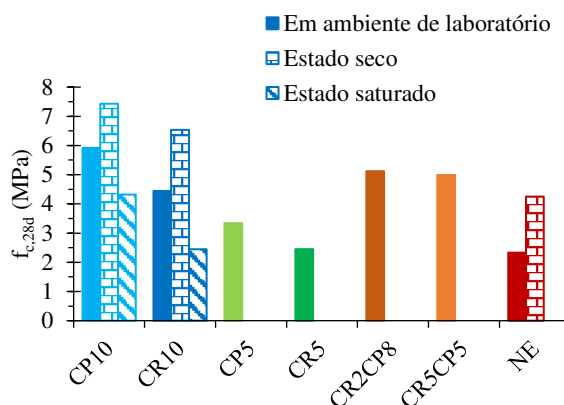


Figura 3. Resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28d}$) em diferentes condições de humidade

Exceto o BTC NE, a resistência à compressão dos BTC estabilizados aumentou ao longo do tempo, associado ao desenvolvimento de produtos de hidratação por parte do estabilizante, promovendo a coesão entre as partículas de terra. A resistência à compressão aos 28 dias em ambiente de laboratório dos BTC CR foi apenas cerca de 25% inferior à dos BTC CP, independentemente da percentagem de incorporação, essencialmente devido à sua maior relação a/l, e consequente, maior porosidade total, bem como o facto de, aos 28 dias, o CR tender a apresentar menor quantidade de produtos de hidratação do que o CP [20]. Contrariamente ao que seria expectável, essa diferença foi superior em idades iniciais. De facto, vários autores [20,22] referem que em idades jovens, o CR tende a apresentar melhor desempenho do que o CP associado à maior reatividade do polimorfo de C_2S presente no CR. O facto de a terra se encontrar mais húmida em idades iniciais poderá justificar os resultados.

A resistência à compressão aos 28 dias variou entre 2,33 e 7,43 MPa, dependendo da composição dos BTC e das condições de cura (Figura 3 e Tabela 3). Conforme seria expectável, esta propriedade mecânica diminuiu com o aumento da humidade dos BTC, tendo sido até 2,7 vezes inferior no estado saturado do que no seco. Tal deve-se ao desenvolvimento de pressões de água nos poros e liquefação da porção não estabilizada das partículas de solo argiloso [23,24]. Independentemente das condições de humidade, a utilização de estabilizante resultou numa melhoria significativa da resistência à compressão dos BTC. Destaca-se ainda o facto de a diferença entre a resistência à compressão aos 28 dias dos BTC CP e os BTC CR com a mesma quantidade de estabilizante ter aumentado com a humidade dos BTC, tendo variado entre 12 e 43%, o que demonstra a maior sensibilidade dos BTC CR às condições de humidade.

A Figura 4 apresenta a eficiência estrutural aos 28 dias dos BTC em diferentes condições de humidade. Conforme seria expectável, a eficiência estrutural foi até 2 vezes superior em BTC no

estado seco do que para as restantes condições de humidade, devido à redução da massa volúmica e ao aumento da resistência à compressão. Tal demonstra a sensibilidade dos BTC às condições de humidade. Por outro lado, a incorporação de estabilizante, influenciou significativamente a eficiência estrutural, tendo-se obtido eficiências estruturais até cerca de 2 vezes superior dos que nos BTC NE.

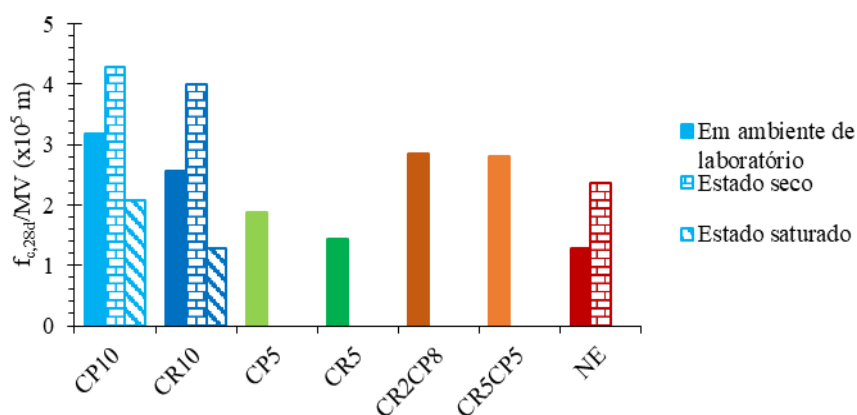


Figura 4. Eficiência estrutural aos 28 dias ($f_{c,28d}/MV$) em diferentes condições de humidade

3.4 Resistência à tração

As Figuras 5 e 6 mostram a resistência à tração por compressão diametral e por flexão aos 28 dias dos BTC produzidos. Dependendo do tipo e percentagem de estabilizante e das condições de humidade, as resistências à tração por compressão diametral e por flexão variaram entre 0,25-0,56 e 0,41-1,17 MPa (Tabela 3), respetivamente. Estes ensaios apresentaram coeficientes de variação relevantes, facto que associado aos reduzidos valores obtidos para estas propriedades, dificultou a análise de resultados. A resistência à tração por flexão dos BTC foi cerca de 2 vezes superior à por compressão diametral. Tal deve-se ao facto de a resistência à tração por flexão beneficiar do efeito de uma maior plasticidade e redistribuição de tensões na região tracionada [25].

À semelhança da resistência à compressão, a percentagem de estabilizante influenciou mais a resistência à tração do que o tipo de estabilizante. De facto, para uma percentagem de estabilizante de 10%, a diferença entre a resistência à tração por flexão dos BTC CP e CR foi inferior a 15%. Por outro lado, à semelhança da resistência à compressão, a diferença entre a resistência à tração por compressão diametral no estado saturado dos BTC CR e CP foi superior à diferença observada em ensaios em condições de humidade inferiores.

Em relação ao BTC NE, a incorporação de 5% de estabilizante foi pouco eficiente na melhoria da resistência à tração dos BTC, em especial no caso do CR. No entanto, para 10% CR, a resistência à tração por compressão diametral e por flexão atingiram valores cerca de 2,3 e 1,8 vezes superiores ao BTC NE, respetivamente.

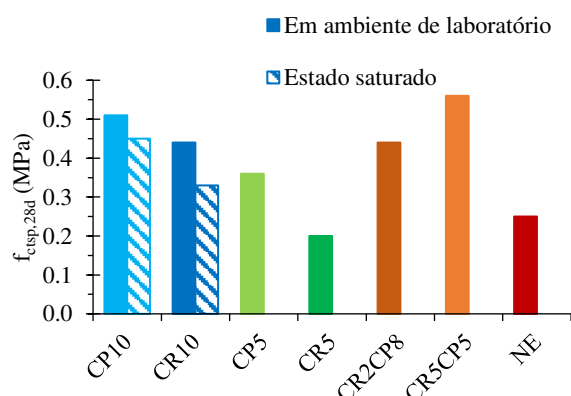


Figura 5. Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias ($f_{ctsp,28d}$) em diferentes condições de humidade

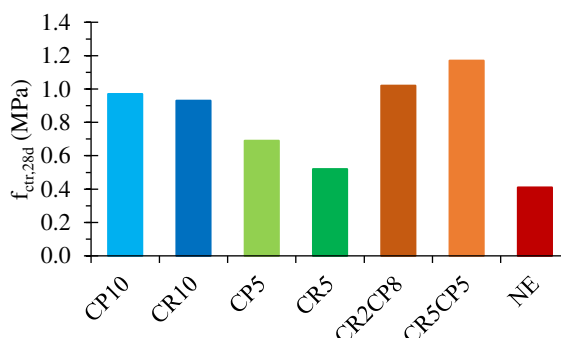


Figura 6. Resistência à tração por flexão aos 28 dias ($f_{ctr,28d}$) em ambiente de laboratório

3.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado apenas para os BTC CP10 e CR10, tendo-se obtido 2,77 e 2,10 GPa (Tabela 3), respetivamente. A reduzida rigidez destes BTC deve-se essencialmente à elevada porosidade e fraca consolidação das partículas de terra. O módulo de elasticidade do BTC CP foi cerca de 32% superior ao do BTC CR, dada a sua menor porosidade total e maior resistência mecânica. A menor rigidez do BTC CR encontra-se demonstrada na Figura 7, onde é apresentada relação entre a tensão e a deformação dos provetes ensaiados.

3.6 Velocidade de propagação de sons

A Figura 8 apresenta a velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias dos BTC em diferentes condições de humidade. A velocidade de propagação de ultrassons variou entre 1104 e 2069 m/s, dependendo da composição e das condições de humidade dos BTC (Tabela 3). À semelhança das outras propriedades, a velocidade de propagação de ultrassons foi mais influenciada pelas condições de humidade do que pelo tipo de estabilizante. Esta propriedade foi até cerca de 1,7 vezes superior em BTC no estado saturado do que no estado seco.

A velocidade de propagação de ultrassons decresceu com a percentagem de incorporação de estabilizante, devido à redução de porosidade nestes BTC. Da mesma forma, os BTC CR apresentaram velocidades de propagação de ultrassons cerca de 5 a 17% inferiores aos BTC CP com a mesma percentagem de incorporação.

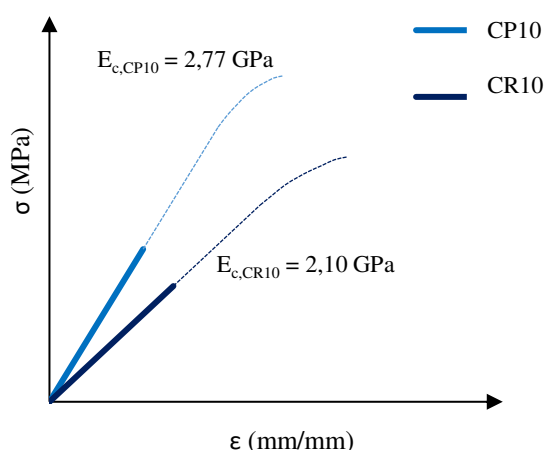


Figura 7 – Relação tensão-deformação dos BTC CP10 e CR10

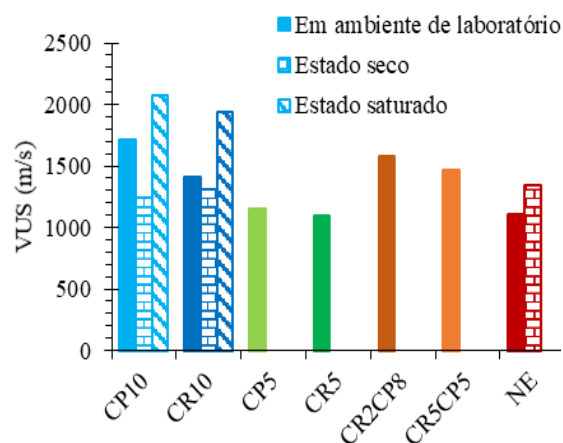


Figura 8 – Velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias (VUS) em diferentes condições de humidade

4. Conclusões

No presente estudo, analisou-se o comportamento mecânico de BTC mais eco-eficientes, estabilizados com CR. Em geral, a incorporação de CR originou uma melhor resistência mecânica dos BTC até cerca de 2 vezes em relação ao BTC NE. No entanto, esta foi inferior à obtida nos BTC CP com igual percentagem de incorporação de estabilizante. A maior exigência de água do CR e a menor compacidade dos BTC CR contribuiu o menor desempenho em relação aos BTC CP. As condições de humidade influenciaram as propriedades dos BTC de forma mais relevante do que o tipo de estabilizante. No entanto, os BTC CR foram mais sensíveis às condições de humidade do que os BTC CP. Apesar disto, e ao contrário dos BTC NE, a incorporação de estabilizante permitiu aos BTC manter a integridade física em condições saturadas.

Em suma, apesar de se verificar uma redução esperada das propriedades mecânicas face aos BTC CP, verifica-se uma melhoria significativa face aos BTC NE, nomeadamente em condições adversas de humidade. Assim, demonstra-se a viabilidade da produção de BTC CR, atingindo soluções mais sustentáveis.

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] A. Carriço, S. Real, J. Bogas, M. Pereira, Mortars with thermoactivated recycled cement: fresh and mechanical characterisation, *Constr. Build. Mater.* 256 (2020) 119502.
- [2] S. Real, J. Bogas, A. Carriço, S. Hu, Mechanical characterisation and shrinkage of

- thermoactivated recycled cement concrete, *Appl. Sci.* 11 (2021) 2454. <https://doi.org/10.3390/app11062454>.
- [3] A. Carriço, S. Real, J. Bogas, Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete, *Cem. Concr. Compos.* 124 (2021) 104270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>.
- [4] A. Carriço, J. Bogas, S. Real, M. Pereira, Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement, *Constr. Build. Mater.* 333 (2022) 127392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>.
- [5] NP 83, Solos. Determinação da densidade das partículas, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1965.
- [6] E 293, Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida., Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1970.
- [7] NP 143, Solos. Determinação dos limites de consistência, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1969.
- [8] ASTM D698, 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), 2021.
- [9] NP EN 196-1, Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2006.
- [10] NP EN 196-3, Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2017.
- [11] E 64, Cimentos. Determinação da massa volúmica, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1979.
- [12] 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), Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.
- [13] NP EN 772-1, Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.
- [14] NBR 8492, Tijolo maciço de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água, Associação brasileira de normas técnicas (ABNT), 1984.
- [15] NP EN 772-6, Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 6: Determinação da resistência à tracção por flexão de blocos para alvenaria de betão de agregados, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.
- [16] NP EN 12390-6, Ensaios do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes de ensaio, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003.
- [17] E 397, Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1993.
- [18] NP EN 12504-4, Ensaios de betão nas estruturas. Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2007.
- [19] V. Rigassi, Compressed earth blocks : Manual of production, Vol. I. Eschborn, Germany: CRAterre-EAG, 1985.
- [20] J. Bogas, S. Real, A. Carriço, J. Abrantes, M. Guedes, Hydration and phase development of recycled cement, *Cem. Concr. Compos.* 127 (2022) 104405. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>.
- [21] J. Bogas, A. Carriço, A. Tenza-Abril, Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 138 (2020) 106226.

- <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>.
- [22] Z. Shui, D. Xuan, W. Chen, R. Yu, R. Zhang, Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>.
- [23] P. Walker, Strength , Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks, *Cem. Concr. Compos.* 17 (1995) 301–310.
- [24] F. Riza, I. Rahman, The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks, In *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks, Design, Properties and Durability*. Edited by Fernando Pacheco-Torgal, P. B. Lourenço, J. A. Labrincha, P. Chindaprisirt and S Kumar, 2015.
- [25] J. Bogas, Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2011.