



## CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E RETRAÇÃO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM LIGANTES RECUPERADOS A PARTIR DA FRAÇÃO CIMENTÍCIA DE RESÍDUOS DE BETÃO

Ricardo Cruz<sup>a</sup>; José Bogas<sup>b</sup>; Martim Nabais<sup>c</sup>; Sofia Real<sup>d</sup>

<sup>a</sup>CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt

<sup>b</sup>CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt

<sup>c</sup>CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, martimnabais@tecnico.ulisboa.pt

<sup>d</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, sreal@lnec.pt

### RESUMO

A construção em Terra, mais concretamente os blocos de terra comprimida (BTC), ressurgiu nos últimos anos no sentido de atender à crescente preocupação ambiental por parte da sociedade. A estabilização dos BTC com cimento Portland (CP) é essencial para garantir o seu adequado desempenho a longo prazo, em especial na presença da água, porém é incompatível com a natureza ecológica e sustentável da construção em Terra. Como tal, tem existido um esforço de investigação relevante na procura de ligantes alternativos de baixo impacto ambiental para a estabilização química dos BTC. Neste sentido, no Instituto Superior Técnico (IST) tem sido explorada a utilização de cimento reciclado (CR) nos BTC. Para tal, foi realizada uma extensa campanha experimental que visou a produção e caracterização mecânica de BTC com diferentes teores e tipos de estabilizante, incluindo CR proveniente diretamente de pasta (CRP), CR a partir de resíduos de betão (CRB) e ainda CP, como referência. O CRB foi produzido tendo em conta um método recentemente desenvolvido e patenteado no IST. De modo a atingir soluções de maior eficiência foi ainda considerada a incorporação de até 25% de agregado reciclado resultante de resíduos de construção e demolição (RCD). Para efeitos de comparação foram também produzidos e caracterizados BTC não estabilizados (NE), permitindo avaliar a eficiência do CR como agente estabilizante. No total, foram avaliadas 14 composições diferentes, incluindo a variação de diferentes parâmetros: teor de ligante (5%, 8%), taxa de substituição de CP por CRP ou CRB (20%, 50% ou 100%), percentagem de agregado reciclado (0%, 15%, 25%), e teor de humidade (em equilíbrio com ambiente de laboratório, saturado, seco em estufa). Os blocos foram caracterizados em termos de massa volúmica no estado fresco e endurecido, resistência à compressão, resistência à tração por flexão e compressão diametral, dureza superficial por esclerómetro pendular, módulo de elasticidade, retração por secagem e velocidade de propagação dos ultrassons.

Em geral, os BTC estabilizados com CP apresentaram melhor desempenho do que os BTC com CR. Isso justifica-se pela menor compacidade atingida pelos BTC com CR. Porém, para igual compacidade, os resultados indicam que o CR pode ser tão eficiente na estabilização dos BTC como o CP. A retração foi ligeiramente inferior nos BTC com CR do que com CP. Acrescenta-se que face aos BTC NE, a estabilização dos BTC com CR conduziu a resistências mecânicas até mais de 2 vezes superiores. Assim, conclui-se que a adição de CR é eficaz na estabilização química dos BTC, resultando na produção de blocos mais eco-eficientes sem grande prejuízo no desempenho técnico destes materiais. O CRB, recuperado de betão, foi igualmente eficiente, quando comparado com o CRP, demonstrando a boa eficiência do método de separação adotado no presente trabalho. A substituição parcial de solo por RCD teve uma influência pouco significativa na resistência mecânica dos BTC.

**Palavras-chave:** Bloco de terra comprimida; cimento reciclado; caracterização mecânica; agregado reciclado; retração



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos ressurgiu o interesse na construção em terra, devido à necessidade de encontrar soluções mais sustentáveis do ponto de vista económico e ambiental. Das várias técnicas de construção em terra, destaca-se os blocos de terra comprimida (BTC), que beneficiam da estabilização mecânica para melhorar o seu desempenho mecânico e de durabilidade (Mansour et al., 2016). Ainda assim, devido à sua baixa resistência à água e elevada variação dimensional, também é essencial recorrer à estabilização química da terra, sendo o cimento Portland comum (CP) o ligante mais utilizado na estabilização dos BTC (Bogas et al., 2019). Porém, apesar dos seus benefícios, a estabilização com CP é criticada por aumentar significativamente a pegada ecológica e diminuir a reciclabilidade dos BTC (Keefe, 2005). Desse modo, tem sido explorada a aplicação de estabilizantes alternativos de baixo carbono, capazes de suprimir ou reduzir a utilização de CP. Neste contexto, recentemente tem sido explorado o desenvolvimento de cimento reciclado (CR) recuperado a partir de resíduos de material cimentício termoactivado a elevada temperatura (Bogas et al., 2022; Carriço et al., 2020). Num estudo realizado por Real et al. (2022) concluiu-se que, em comparação com o CP, a produção de CR pode conduzir a uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> superior a 70%, dado que não ocorre descarbonatação durante a sua termoactivação. Tem sido explorada, com sucesso, a incorporação de RC em materiais cimentícios, destacando-se a variação pouco significativa da resistência mecânica de betões com até 40% de substituição de CP por CR (Real et al., 2021). Apenas muito recentemente, foi explorado pela primeira vez a utilização de CR como estabilizante de BTC, confirmando-se a sua capacidade de reidratação e contribuição para a melhoria do comportamento mecânico dos BTC (Bogas et al., 2023). Neste estudo apenas foi utilizado CR diretamente obtido de pastas de cimento produzidas em laboratório (CRP). Por sua vez, a incorporação parcial de agregados reciclados pode melhorar a compacidade granular dos BTC, para além de aumentar a sua sustentabilidade. Malkanthi et al. (2021) modificaram a granulometria da mistura de solo com resíduos de construção e demolição (RCD), tendo por base a sua otimização à curva de referência de Fuller, o que permitiu aumentar a compacidade dos BTC.

No presente estudo pretende-se caracterizar pela primeira vez o desempenho mecânico de BTC estabilizados com cimento reciclado recuperado de resíduos de betão (CRB). Além disso, procedeu-se à substituição parcial de terra por RCD, melhorando ainda mais a natureza ecológica e sustentável da construção em Terra. Os BTC foram produzidos com vários tipos de ligantes (CP, CRP e CRB), variando o teor de ligante (5% ou 8%) e de RCD (0%, 15% e 25%). De modo a avaliar melhor a capacidade estabilizante do CR, foram também produzidos BTC não estabilizados. Os BTC foram caracterizados em termos das suas principais propriedades físicas e mecânicas, nomeadamente massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por flexão e por compressão diametral, módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ultrassons, esclerómetro pendular e retração por secagem.

## 2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 2.1 MATERIAIS

Para a produção dos blocos foram selecionados os seguintes materiais: solo proveniente de Montemor-o-Novo, RCD, cimento CEM I 42,5R, cimento CEM II B-L 32,5N, CRP e CRB. O solo foi caracterizado em termos de granulometria (LNEC E-239, 1970), limites de Atterberg (NP-143, 1969), massa volúmica (NP-83, 1970), teor ótimo de água (ASTM D698, 2021) e matéria orgânica (Cruz et al., 2022). O teor de argila no solo foi determinado através de ensaios de sedimentação (HB-195, 2001). O solo, com cerca de 8 mm de dimensão máxima, apresentava na sua composição cerca de 5,0% de gravilha, 69,8% de areia, 21% de silte e 4,2% de argila, para um teor de matéria orgânica de 1,5% e



uma massa volúmica de 2590 kg/m<sup>3</sup>. O teor ótimo de água foi de 10,9% e os limites de liquidez e de plasticidade foram de 23,7% e 18,9%, respetivamente, correspondendo a um índice de plasticidade de 4,7%. Conforme a norma ASTM D2487-11 (2011), o solo foi classificado como SC-SM (*silty-clayey sand*). Por difração de raio-X verificou-se a presença de argila expansiva, dificultando a estabilização do solo. O RCD, também com dimensão máxima de 8 mm, era composto por resíduos de betão (40,3%), pedra natural (32,1%), cerâmicos (16,5%), e outros constituintes (EN 933-11, 2011), possuindo 32,9% de gravilha, 63% de areia e 4,1% de material fino (EN 933-1, 2012), aproximadamente 2300 kg/m<sup>3</sup> de massa volúmica e 4,8% de absorção de água (EN 1097-6, 2003).

O CRP e o CRB foram produzidos a partir de pasta de cimento e de betão, respetivamente, com uma razão água/ligante (a/l) de 0,55. Para ambos foi utilizado CEM I 42,5R. Após mais de 3 meses em ambiente de laboratório a pasta de cimento foi sujeita a britagem, moagem, peneiração e termoativação. Para a obtenção do CRB, foi necessário realizar uma etapa prévia de separação dos constituintes do betão, de acordo com o método patenteado por Bogas et al. (2021). A partir de termogravimetria de resíduos de pasta de cimento e de betão de igual a/l verificou-se que o CRB apresentava um grau de pureza de 68%. A termoativação envolveu o aquecimento do material a uma taxa de 10°C/min até 650°C, mantendo-se nesta temperatura por 3 horas. Foi ainda considerado um cimento de baixa resistência (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 <sup>3</sup> )	LNEC E-64 (1979)	3,02		3,005	2,964
Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)	EN 196-6 (2018)			156553	78673
Resist. à compressão aos 28 dias (MPa)	EN 196-1 (2016)	53,3	≥32,5		
CaO livre (%)	EN 451-1 (2017)	1,02	18,5	13,94	
Consistência normal (a/l)	EN 196-3 (2016)	0,295		0,74	0,54
Tempo de presa inicial/final (min)	EN 196-3 (2016)	190/310	≥75	290/384	>720/<1440

## 2.2 PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO DOS BLOCOS E MÉTODOS DE ENSAIO

Os BTC, com 220x105x70 mm, foram produzidos com recurso a uma prensa manual, com uma força de compactação de cerca de 150 kN. Selecionaram-se 14 composições, variando o tipo de ligante (CP, CP32,5, CRP e CRB), teor de ligante (5 e 8%) e de RCD (0, 15 e 25%). Para os blocos estabilizados com 8% de ligante, o CP também foi substituído por CRP em percentagens de 20 e 50%. Para compensar os 32% de contaminação por agregado, o teor de CRB foi aumentado para 12% (12CRB). Uma composição sem esta compensação também foi produzida (8CRB). Finalmente, foram ainda produzidos, para efeitos de comparação, blocos não estabilizados (NE) e BTC com 8% CRP com o mesmo teor de água dos BTC com 8% CP (8CRPTH). As composições apresentam-se na Tabela 2. A substituição parcial de solo por RCD foi realizada de forma direta. A percentagem de substituição de solo por RCD selecionada teve por base a comparação da curva granulométrica da mistura (solo+0-50%RCD) com a curva de referência de Fuller (Malkanthei et al., 2021). O menor valor da soma dos desvios quadrados entre estas curvas foi obtido para 25% RCD. Após a produção, os BTC foram cobertos com uma película plástica durante 7 dias, assegurando uma humidade relativa (HR) de, aproximadamente 100%, seguido de cura ao ar em laboratório (HR= 60 ± 5% HR e T= 22 ± 3°C).

Os BTC foram caracterizados segundo a sua massa volúmica (EN 772-13, 2000), resistência à compressão (EN 772-1, 2011; NBR 8492, 2012), resistência à tração por flexão (EN 772-6, 2001), resistência à tração por compressão diametral (EN 12390-6, 2022), velocidade de propagação de ultrassons (EN 12504-4, 2021), módulo de elasticidade (LNEC E-397, 1993), índice esclerométrico (EN



12504-2, 2021) e retração (LNEC E-398, 1993). A massa volúmica foi medida no estado fresco, logo após a produção e compactação dos blocos, e no estado endurecido. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados com uma prensa hidráulica Tonipact, com capacidade de 3000 kN e células de carga de 400 kN. Para a resistência à compressão, uma placa de contraplacado foi colocada na base e no topo de cada bloco, e os blocos foram testados a uma velocidade constante de 4 kN/s em diferentes idades (3, 7 e 28 dias) e condições de humidade (seco, saturado e em ambiente de laboratório - AL). Para a determinação da resistência à compressão não confinada, os valores foram corrigidos por um fator de 0,6 (HB-195, 2001). 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. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com a mesma velocidade, aos 28 dias. Ambos ensaios foram realizados na condição AL. A velocidade de propagação de ultrassons foi medida aos 28 dias em provetes com diferentes condições de humidade. Para o módulo de elasticidade, foi utilizada uma câmara de vídeo de alta precisão para quantificar o deslocamento entre pontos previamente marcados nos blocos, com uma separação inicial predeterminada. O teste foi realizado com recurso a uma prensa INSTRON com uma capacidade máxima de 250 kN e envolveu um mínimo de três ciclos de carga e descarga, aumentando incrementalmente a tensão em 0,5 MPa, até atingir um terço da resistência à compressão. O índice esclerométrico foi determinado aos 28 dias em provetes na condição AL. O ensaio de retração foi realizado com recurso a um medidor DEMEC Mitutoyo com precisão de 1 µm e envolveu a fixação de duas pastilhas metálicas, uma em cada extremidade do provete, espaçadas de 200 mm. A monitorização iniciou-se aos 3 dias de idade, expondo os provetes durante 55 dias em câmara condicionada ( $T = 21 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $HR = 65 \pm 5\%$ ).

Tabela 2 - Composição dos blocos produzidos

Composição	Ligante	Ligante (%) <sup>a</sup>	Água (%) <sup>b</sup>	RCD (%) <sup>c</sup>	a/l
8CP	CEM I 42,5R	8	14	25	1,91
8CP15RCD	CEM I 42,5R	8	14	15	1,87
8CP0RCD	CEM I 42,5R	8	14	0	1,89
5CP	CEM I 42,5R	5	14	25	2,97
8CP32,5	CEM II B/L 32,5N	8	14	25	1,97
8CRP	CRP	8	20	25	2,72
8CRPTH	CRP	8	14	25	1,91
5CRP	CRP	5	20	25	4,13
80CP20CRP	50%CP+50%CRP	8	14	25	1,91
50CP50CRP	80%CP+20%CRP	8	14	25	1,91
8CRB	CRB	8	20	25	2,69
8CRB0RCD	CRB	8	20	0	2,70
12CRB	CRB	12	20	25	1,82
NE	-	0	12	25	-

<sup>a</sup> % em massa seca de solo; <sup>b</sup> % em massa seca de solo+RCD+ligante; <sup>c</sup> % de massa seca de solo+RCD

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados médios obtidos para cada composição encontram-se nas Tabelas 3 e 4, nomeadamente de massa volúmica fresca ( $MV_f$ ), massa volúmica em ambiente laboratorial ( $MV_{lab}$ ), massa volúmica seca ( $MV_{seco}$ ), massa volúmica saturada ( $MV_{sat}$ ), resistência à compressão não confinada aos 3-28 dias ( $f_{c,un3d}$ ,  $f_{c,un7d}$ ,  $f_{c,un28d}$ ), resistência à tração por flexão e por compressão diametral ( $f_{ctr}$  e  $f_{ctsp}$ ), módulo de elasticidade ( $E_c$ ), velocidade de propagação de ultrassons para diferentes condições de humidade ( $V_{US,lab}$ ,  $V_{US,seco}$ ,  $V_{US,sat}$ ), índice esclerométrico (IE) e retração aos 3 e 55 dias ( $\epsilon_{cst,3d}$  e  $\epsilon_{cst,55d}$ ).



Tabela 3 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CP e BTC não estabilizados (NE)

Propriedades	8CP	8CP15RCD	8CP0RCD	5CP	8CP32,5	NE
MV <sub>f</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2230	2210	2230	2220	2140	2100
P <sub>T</sub> (%)	28,6	28,0	28,2	29,2	30,9	32,1
MV <sub>lab</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2050	2030	2040	2010	1960	1940
MV <sub>sat</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2160	-	-	2170	-	-
MV <sub>seco</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1910	-	-	1970	-	-
f <sub>c,un3d,lab</sub> (MPa)	2,71	3,46	2,51	2,00	-	0,24
f <sub>c,un7d,lab</sub> (MPa)	3,56	-	-	-	-	0,39
f <sub>c,un28d,lab</sub> (MPa)	5,44	6,03	5,65	3,93	4,11	1,26
f <sub>c,un28d,seco</sub> (MPa)	7,37	-	-	5,25	-	-
f <sub>c,un28d,sat</sub> (MPa)	3,74	-	-	2,36	-	-
f <sub>ctr</sub> (MPa)	1,16	-	-	0,88	1,04	0,29
f <sub>ctsp</sub> (MPa)	0,49	0,51	0,50	0,37	-	0,07
E <sub>c</sub> (GPa)	3,60	-	3,62	2,79	-	0,78
V <sub>US,lab</sub> (m/s)	2304	2209	2076	1852	2085	1298
V <sub>US,seco</sub> (m/s)	1776	-	-	1429	-	-
V <sub>US,sat</sub> (m/s)	2494	-	-	1950	-	-
IE	32	33	36	19	-	16
ε <sub>cst,3d</sub> (x10 <sup>-6</sup> m/m)	426	-	589	579	-	1347
ε <sub>cst,50d</sub> (x10 <sup>-6</sup> m/m)	1705	-	2183	1916	-	3045

Tabela 4 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CR

Propriedades	8CRP	8CRPTH	5CRP	80CP20CRP	50CP50CRP	8CRB	8CRB0RCD	12CRB
MV <sub>f</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2040	2070	2040	2190	2120	2100	2130	2080
P <sub>T</sub> (%)	37,1	32,8	37,5	28,1	30,3	35,5	35,2	35,3
MV <sub>lab</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1880	1970	1870	2030	2010	1930	1890	1920
MV <sub>sat</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2060	2090	2040	-	-	-	-	2160
MV <sub>seco</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1770	1800	1740	-	-	-	-	-
f <sub>c,un3d,lab</sub> (MPa)	0,42	1,33	0,36	-	-	0,62	0,36	0,71
f <sub>c,un7d,lab</sub> (MPa)	0,60	1,63	-	-	-	0,75	0,53	0,82
f <sub>c,un28d,lab</sub> (MPa)	1,81	3,32	1,09	6,28	5,07	1,42	1,41	1,87
f <sub>c,un28d,seco</sub> (MPa)	2,96	4,77	1,57	-	-	-	-	-
f <sub>c,un28d,sat</sub> (MPa)	0,97	1,51	0,42	-	-	-	-	-
f <sub>ctr</sub> (MPa)	0,46	0,63	0,28	1,25	0,96	0,28	0,28	-
f <sub>ctsp</sub> (MPa)	0,19	0,23	0,07	0,42	0,34	0,07	0,07	-
E <sub>c</sub> (GPa)	-	2,50	1,38	4,55	-	-	-	-
V <sub>US,lab</sub> (m/s)	1509	1668	1200	2185	2041	1303	1239	1353
V <sub>US,seco</sub> (m/s)	949	1358	878	1776	-	1429	-	-
V <sub>US,sat</sub> (m/s)	1516	1767	1319	2494	-	1950	-	-
IE	14	30	10	42,5	34,5	12	11	20
ε <sub>cst,3d</sub> (x10 <sup>-6</sup> m/m)	-	553	600	463	443	-	-	-
ε <sub>cst,50d</sub> (x10 <sup>-6</sup> m/m)	-	1373	2093	1817	1598	-	-	-

### 3.1 MASSA VOLÚMICA E POROSIDADE

A MV<sub>f</sub> dos BTC variou entre 2040 e 2230 kg/m<sup>3</sup> (Tabelas 3 e 4). Para uma mesma pressão de compactação e teor de ligante, Cruz et al. (2022) obteve valores inferiores. Esta melhoria deve-se à otimização da compactidade granular, com aproximação da distribuição granulométrica das misturas à curva de referência de Fuller, e ao enquadramento no fuso granulométrico proposto na XP P 13-901 (2001). Com base na MV<sub>f</sub>, foi possível estimar a porosidade total, P<sub>T</sub>, dos BTCs, correspondendo à soma do volume de vazios e o volume de água não consumida durante as reações de hidratação dos ligantes.

Os valores de P<sub>T</sub> variaram entre 28,0% e 37,1% (Tabelas 3 e 4), tendo sido superior nos BTC com CRP ou CRB, demonstrando a sua menor compactidade, que está relacionada com a maior exigência de água destes ligantes (Tabela 2). Mesmo no caso em que se forçou a produção de BTC com CRP de igual teor





em água (8CRPTH), verificou-se um aumento de 18% na  $P_T$ , o que resulta da maior dificuldade de aplicação e compactação das misturas. O ligeiro aumento de massa volúmica e diminuição de  $P_T$  nos BTC com CRB face aos BTC com CRP de igual teor de água, resulta da menor exigência de água e facilidade de aplicação do CRB. Confirma-se a obtenção de blocos de maior compacidade para uma substituição parcial de solo por RCD de 25%, sendo possível confirmar que a curva de Fuller reflete condições de maior compacidade. Na Figura 1 observa-se uma elevada correlação entre a  $MV_f$  e a  $P_T$ , quando se tem em consideração BTC produzidos com igual TH. Isso justifica-se pelo facto do TH apresentar maior impacto na  $MV_f$  do que na  $P_T$ . A relação foi independente do tipo de ligante. Em média, a  $MV_{sat}$  dos BTC estabilizados foi 16% superior à seca. Não foi possível determinar a massa volúmica saturada do NE, dado que perdeu a sua coesão em contacto com a água.

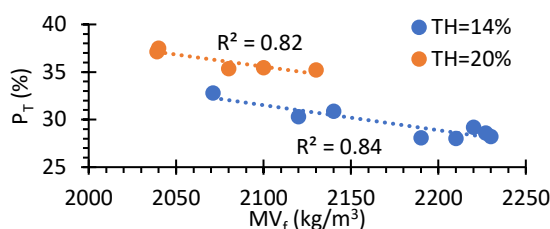


Figura 1 - Relação entre a porosidade total ( $P_T$ ) e massa volúmica fresca ( $MV_f$ ) para valores diferentes de TH

### 3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nas Figuras 2 e 3 apresenta-se a resistência à compressão dos BTC de referência ao longo do tempo, em condição AL e a resistência aos 28 dias para diferentes condições de humidade, respetivamente.

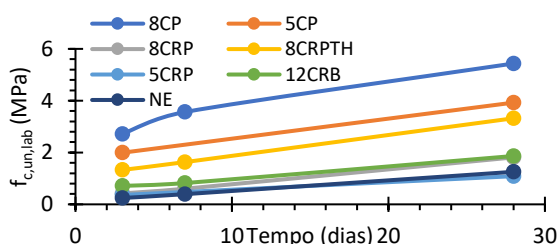


Figura 2 - Resistência à compressão em ambiente laboratorial ( $f_{c,un,lab}$ ) ao longo do tempo

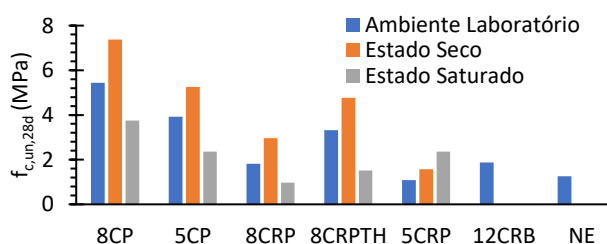


Figura 3 - Resistência à compressão aos 28 dias ( $f_{c,un,28d}$ ) em diferentes condições de humidade

A  $f_{c,un,28d,lab}$  foi até 5x superior nos BTC estabilizados do que no NE, tendo aumentado essa diferença com o teor de ligante. Seria esperada uma maior resistência inicial nos BTC com CR, resultante de 2 factores: presença de  $\alpha'_H-C_2S$ , cuja reatividade ocorre predominantemente entre 1 e 3 dias; devido à natureza porosa do CR, parte da água da mistura é absorvida, reduzindo a distância entre partículas, o que conduz a uma microestrutura mais refinada nas idades iniciais (Bogas et al., 2022). Porém, verifica-se que os BTC CRP exibiram resistência inferior aos BTC CP aos 3 dias de idade, tendo-se inclusive, observado que, para um mesmo a/l, a perda relativa de resistência foi menor aos 28 dias (39%) do que aos 3 dias (51%) (Tabelas 3 e 4 e Figura 2). Isso justifica-se pela cura húmida dos BTC até 7 dias. De facto, os BTC CR apresentam uma maior sensibilidade às condições de humidade, verificando-se que a resistência seca aumentou cerca de 2 e 3 vezes face à saturada nos BTC com 8% CP e 8% CRP, respetivamente (Tabelas 3 e 4 e Figura 3). Isso sugere uma menor eficiência do CR na estabilização.

A resistência do BTC com CR foi 39% inferior à do BTC com CP de igual teor de água (8CRPTH). Isso resulta essencialmente da maior exigência de água do CR, conduzindo a BTC de menor compacidade (maior  $P_T$ , Tabela 4). A importância da compacidade é confirmada na Figura 4, onde se confirma uma correlação elevada entre  $P_T$  e a resistência mecânica, quando separada por teor de estabilizante. De



facto, a resistência não depende apenas da porosidade total, mas também da capacidade de ligação promovida pelo ligante. Neste caso, a relação foi independente do tipo de ligante, sugerindo-se que para igual compacidade, os BTC com CR podem atingir resistência similar aos BTC com CP. Assim, a resistência foi essencialmente afetada pelo  $P_T$  e teor de estabilizante.

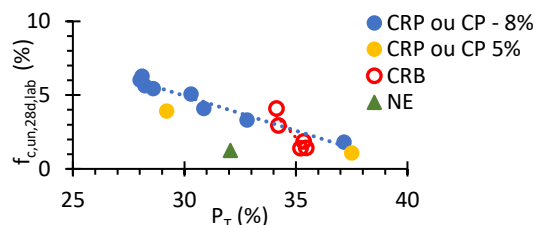


Figura 4 - Relação entre a porosidade total ( $P_T$ ) e a resistência à compressão em ambiente laboratorial aos 28 dias ( $f_{c,un,28d,lab}$ )

Os BTC com CRB fogem à tendência de evolução de  $f_c$  em função de  $P_T$ , sugerindo uma perda de eficiência do ligante para 100% CRB, que se aproxima do comportamento observado para 5% ligante. De facto, para o mesmo a/l, a substituição de CRP por igual teor de CRB conduziu a uma redução de 22% na resistência aos 28 dias (Tabela 4). Ou seja, o CRB foi menos eficiente do que o CRP. Conforme discutido, o CRB contém cerca de 32% de agregado, resultando em BTC com apenas 5,4% de ligante, próximo de 5% estabilizante. Quando se aumentou o teor de ligante para compensar a contaminação (12CRB), a resistência foi idêntica à de 8CRP (Tabela 4), indicando que o CRB pode apresentar uma capacidade de reidratação semelhante à do CRP.

Em geral, a resistência à compressão diminuiu com a substituição progressiva de CP por CR, visto que aumentou a  $P_T$ , estando de acordo com a tendência da Figura 4. Porém, até uma substituição de 20% de CP por CRP, ocorreu um ligeiro aumento na  $f_c$ . Neste caso, e uma vez que  $P_T$  não foi significativamente alterada, a incorporação de CRP foi benéfica. Confirma-se a hipótese de se obterem resistências pelo menos semelhantes nos BTC com CRP, caso se atinja igual compacidade. Mesmo para 50% CRP, a redução de resistência nos BTC foi de apenas 7%. A resistência desta mistura foi 29% superior à 5CP, demonstrando a atividade do CRP. Por outro lado, a resistência do 8CRPTH foi 2,7 vezes superior à do NE, demonstrando a elevada capacidade de estabilização do CR, mesmo tendo em conta que  $P_T$  foi 8% inferior (Tabelas 3 e 4). Acrescente-se que a resistência foi apenas 19% inferior à do 8CP32,5, para uma compacidade 7% menor.

Por fim, a resistência à compressão foi pouco afectada pela substituição parcial de solo por RCD. Conclui-se que a substituição parcial de solo por RCD permite alcançar soluções mais sustentáveis sem comprometer o desempenho mecânico dos BTC.

### 3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

No HB-195 (2001) são recomendados valores mínimos de 0,35 MPa para  $f_{ctr}$ . Estes requisitos não foram cumpridos no NE e nos BTC 5CRP, 8CRB e 8CRBORCD (Tabelas 3 e 4). Dado que a resistência à tração depende da porosidade e das características da matriz ligante, a influência do tipo de estabilizante e do teor de RCD segue a mesma tendência verificada na resistência à compressão. A  $f_{ctsp}$  e a  $f_{ctr}$  foram, aproximadamente, 54% e 47% inferiores nos BTC com CRP do que nos BTC com CP de igual a/l. Como discutido, isto deve-se essencialmente à menor compacidade. Ainda assim,  $f_{ctsp}$  e a  $f_{ctr}$  nos BTC com CRP foram 3,2 e 2,2 vezes superiores às do NE, demonstrando mais uma vez a boa eficiência do CR. Nos BTC com CRB, a resistência à tração foi 39% ( $f_{ctsp}$ ) e 63% ( $f_{ctr}$ ) inferior à do 8CRP e semelhante à do NE, embora para estes níveis de resistência, os ensaios tenham fraca precisão. A melhor capacidade ligante do CRB face à fração argilosa do NE, terá sido compensada pelo elevado aumento de  $P_T$ .



A  $f_{ctr}$  dos BTC foi 2,4-4,3 vezes superior à  $f_{ctsp}$ , dependendo da composição. Isso era esperado, visto que a tração na compressão diametral se aproxima mais do estado de tensão axial, enquanto  $f_{ctr}$  é sobrestimada (Bogas, 2011). A diferença foi maior nos BTC com CRB e no NE e foi idêntica nos BTC com CP e CRP. A mesma tendência foi observada por Bogas et al. (2019), com rácios  $f_{ctr}/f_{ctsp}$  de 2 para BTC com CP e 3,1 para NE.

### 3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade variou entre 0,78 GPa e 4,60 GPa (Tabelas 3 e 4), dependendo das condições de estabilização, o que salienta a sua importância nesta propriedade. Como expectável, o módulo de elasticidade aumentou com o teor de ligante e com a redução de  $P_T$ . Porém, o valor bastante superior de  $E_c$  nos BTC estabilizados face ao NE, salienta a maior importância da capacidade ligante face a  $P_T$ . Bogas et al. (2023), considerando um teor de 10% CP, obteve um valor médio de 2,8 GPa, cerca de 22% inferior ao obtido neste estudo para o BTC com 8% CP.

O módulo de elasticidade do 8CRPTH foi 31% inferior ao do 8CP, o que está de acordo com a sua maior  $P_T$  e menor  $f_c$  (Tabelas 3 e 4). Para além disto, a matriz cimentícia com CR está associada a menor rigidez, devido à natureza porosa e menor dureza deste ligante (Carriço et al., 2020). Ainda assim, o módulo de elasticidade do 8CRPTH foi 3,2 vezes superior ao do NE, confirmando a importância do CR na estabilização dos BTC. A substituição de 20% CP por CRP conduziu a um aumento de 26% no módulo de elasticidade (Tabelas 3 e 4). Mais uma vez, a substituição de solo até 25% RCD teve pouca influência no módulo de elasticidade (Tabela 3).

### 3.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

A  $V_{US}$  variou entre 878-2494 m/s, dependendo da composição e das condições de humidade (Tabelas 3 e 4). Em média,  $V_{US}$  foi cerca de 1,4 vezes maior no estado saturado do que no estado seco e apenas 5% maior do que na condição AL (Tabelas 3 e 4). Dado que  $V_{US}$  se relaciona com a raiz quadrada do quociente entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica (Bogas et al., 2013), espera-se que os BTC de menor rigidez e maior  $P_T$  apresentem menor  $V_{US}$ . Assim,  $V_{US}$  decresceu com o teor de ligante e nos BTC com CRP e CRB, ou seja, foi capaz de distinguir BTC de diferente qualidade. Para um aumento de 18% em  $P_T$ , ocorreu uma redução de 28% na  $V_{US}$  e 39% na  $f_c$ , quando se substituiu 8% CP por 8% CRP, para um mesmo a/l (Tabelas 3 e 4)). Esta menor redução de  $V_{US}$  face a  $f_c$  seria esperada, pois  $V_{US}$  relaciona-se aproximadamente com a raiz quarta de  $f_c$  (Bogas et al., 2013).

A consideração de 12% CRB (12CRB) conduziu apenas a um ligeiro aumento de  $V_{US}$ , que é compatível com o aumento observado em  $f_c$  (3.2).  $V_{US}$  foi ligeiramente maior no 12CRB do que no NE, apesar da porosidade ter sido 10% superior, o que significa que se terá atingido uma melhor coesão entre partículas e uma maior rigidez após a incorporação de CRB. Ao contrário do observado em outras propriedades,  $V_{US}$  aumentou com a substituição parcial de solo por RCD (Tabela 3), mesmo tendo em conta variações pouco significativas de  $E_c$  e  $P_T$  (Tabela 3). Isso pode estar relacionado com o maior teor de água inicial nas misturas com RCD e com a sua maior lentidão de secagem. De facto, durante a cura em laboratório, os RCD têm capacidade de restituir parte da água de absorção para a matriz circundante atrasando a sua secagem e aumentando o teor em água dos BTC. Porém, nos BTC com CRB, o aumento de  $V_{US}$  foi pouco significativo com o aumento de RCD.

### 3.6 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO

Como esperado, o índice esclerométrico, que é uma medida da dureza superficial dos BTC, aumentou com o teor de estabilizante (Tabelas 3 e 4). Isto está de acordo com a maior coesão e rigidez destas





misturas. A exceção ocorreu nos BTC 8CRP, 5CRP e 8CRB, associados a maior porosidade. Ainda assim, seria esperado que estas misturas apresentassem maior IE do que NE, assim como não era esperado que os BTC com 50% CRP tivessem maior IE do que o 8CP. De facto, a dureza superficial é influenciada por outros factores como a dureza dos agregados junto à superfície e o teor de humidade da superfície na altura do ensaio. Isso justifica o aumento de IE com a redução do teor de RCD, que na superfície pode reduzir a resistência ao impacto devido à sua natureza porosa. Assim, este ensaio não foi adequado para distinguir BTC com pequenas diferenças de qualidade. Salienta-se o IE cerca de 2 vezes superior do 8CRPTH face a NE. Destaca-se ainda o IE 45% superior no 12CRB face 8CRP.

### 3.7 RETRAÇÃO

A Figura 5 mostra a evolução da retração ao longo do tempo. A maior taxa de retração ocorreu durante os primeiros dias, estabilizando-se após um mês de exposição. Dependendo da composição, entre 20 e 40% da retração final ocorreu nos primeiros 3 dias. As retrações finais variaram entre 1,4-2,2 mm/m nos BTCs estabilizados, atingindo 3 mm/m no NE. Estes valores excederam significativamente os limites estabelecidos pelas normas NZS 4298 (1998) e NTC 5324 (2004), que são 0,5 mm/h e 0,45 mm/h respetivamente, para construções em taipa e BTC estabilizados sujeitos a 50% HR e 33-45 °C. Os valores elevados deverão estar relacionados com a presença de argilas expansivas no solo.

A elevada retração do NE, resultou essencialmente da variação dimensional ocorrida nas idades iniciais, atribuída à contração da fração argilosa do solo e à fraca restrição imposta pela matriz de rigidez 3-4 vezes inferior à dos BTC estabilizados (3.4). Por sua vez, e apesar da menor compactidade e menor rigidez, a menor retração aos 50 dias foi atingida no 8CRPTH, tendo sido cerca de 24% inferior à do 8CP de igual a/l. Isso poderá estar relacionado com o maior refinamento atingido na microestrutura das matrizes de RCP, desde as idades iniciais (Bogas et al., 2020). Neste caso, a absorção de água nas partículas porosas do RCP faz com que o espaço interpartícula diminua. Assim, por um lado aumenta a rigidez inicial da matriz e reduz a quantidade de água livre. Por outro lado, a ação capilar promovida pelos poros de menor dimensão tende a ser maior. Logo, para a mesma porosidade total, estas matrizes mais refinadas podem conduzir a maiores taxas de retração inicial (Carricho et al., 2022), conforme observado nas Tabelas 3 e 4 e na Figura 5. Porém, conforme observado em BTC (Bogas et al., 2023), ou em betões (Real et al., 2021), esperava-se uma menor retração final nos BTC com CP.

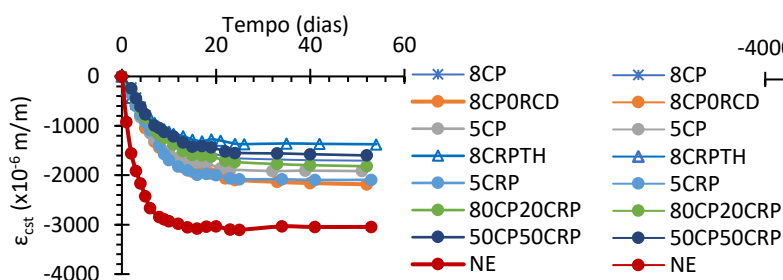


Figura 5 – Evolução da retração ( $\epsilon$ ) ao longo do tempo

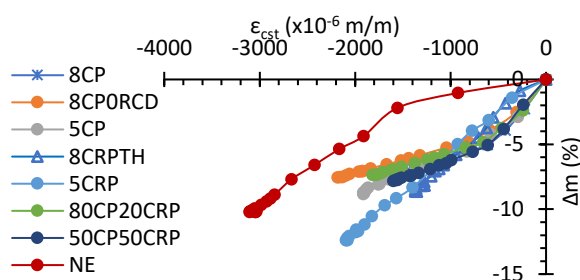


Figura 6 - Perda de massa ( $\Delta m$ ) versus retração ( $\epsilon_{cst}$ )

Na Figura 6 verifica-se que a perda de massa foi superior no NE e nos BTC com CRP ou com menor teor de estabilizante, associados a maior  $P_T$ . O BTC 5CRP apresentou a maior perda de água. No caso do NE, a água encontra-se num estado livre não combinado, estando associados a maiores taxas e volumes de evaporação de água. Após um período inicial, a taxa de retração por variação de perda de massa aumentou nos BTC com CP, associados a menor  $P_T$  (Figura 6). O declive da curva começou por ser mais acentuado, associado à perda de água livre dos poros de maior dimensão, alterando depois para um menor declive, em que a perda de água promove uma maior retração (capilares mais refinados). Assim, num período inicial a retracção foi dominada pela contracção da fracção não estabilizada do solo,



sendo mais relevante nos BTC menos estabilizados. Depois, foi afectada pelo ligante, sendo mais efectiva nas misturas que desenvolveram microestrutura mais densa ao longo do tempo. A longo prazo, os BTC com 8%CRP possuem menores taxas de retração por variação de massa (Figura 6), estando de acordo com a formação de uma porosidade mais grosseira (maior  $P_T$ ). Até 20% CRP, a retração foi ligeiramente superior à de 8CP, estando alinhado com  $f_c$ . Por sua vez, a retração para 50% CRP foi menor e mais próxima de 8CRPTH. Em suma, confirma-se que o CR foi eficaz na estabilização do solo e a variação dimensional foi menos relevante do que nos BTC com CP.

A substituição parcial de solo por RCD reduziu a retração a curto e a longo prazo (Tabela 3), possivelmente devido à capacidade do RCD de restituir parte da sua água de absorção para a matriz cimentícia, retardando a secagem. Além disto, parte do solo, constituído por argilas expansivas (2.1), é substituído por RCD de baixa retratibilidade.

#### 4 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar pela primeira vez a utilização de cimento reciclado de betão na caracterização mecânica e retração de BTC. A substituição parcial de solo por RCD também foi analisada. Devido à elevada exigência de água do CR, os BTC apresentaram menor compacidade e menor massa volúmica, o que prejudicou a sua resistência mecânica. Porém, para igual compacidade, o CP pode ser substituído por CR, sem afectar a resistência mecânica dos BTC. Verifica-se que a resistência é essencialmente afectada pela porosidade e teor de estabilizante. Por outro lado, face aos BTC NE, a incorporação de CRP aumentou até cerca de 3 vezes a resistência mecânica. Acrescente-se que até 20% CRP o desempenho foi melhorado face aos BTC com CP e até 50% CRP a redução de resistência mecânica foi pouco significativa. Os BTC estabilizados com CR foram ainda capazes de manter a sua integridade após saturação, ao contrário dos NE. Assim, demonstra-se a adequada capacidade de hidratação e estabilização do CR, sendo viável a sua utilização nos BTC. O módulo de elasticidade, a velocidade de ultrassons e o índice esclerométrico tendem a ser inferiores nos BTC com CR, devido à menor compacidade dos BTC e à natureza porosa do CR. Devido à natureza expansiva do solo foram observadas retrações elevadas. Porém, a estabilização do solo com CR conduziu a menores retrações a longo prazo. A incorporação de CRB, desde que se compense a contaminação do CR, mostrou ser tão efectiva como a utilização de CRP. Conclui-se que o CRB pode apresentar uma capacidade de reidratação semelhante à do CRP. Finalmente, a incorporação de até 25% de RCD teve pouca influência nas propriedades mecânicas 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 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

- ASTM D698. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 Ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*, American Society for Testing & Materials (ASTM).
- Bogas, J. (2011). *Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida* [Tese de doutoramento em Engenharia Civil]. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.



- 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. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, 53(5), 962–972. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>
- Bogas, J., Gomes, M., & Gomes, A. (2013). A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. In *Ultrasonics* (Vol. 53, pp. 962–972).
- 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., Carriço, A., Abrantes, J. C. C., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. *Cement and Concrete Composites*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>
- Bogas, J., Real, S., Cruz, R., & Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *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>
- Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Thermoactivated cementitious materials – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- Carriço, 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 196-1. (2016). *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength*, European Committee for Standardization (CEN).
- 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 772-6. (2001). *Methods of test for masonry units - Part 6: Determination of bending tensile strength of aggregate concrete 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). *ests 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 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).
- EN 12390-6. (2022). *Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens*, European Committee for Standardization (CEN).
- EN 12504-2. (2021). *Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number*, European Committee for Standardization (CEN).
- EN 12504-4. (2021). *Testing concrete in structures - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*, European Committee for Standardization (CEN).
- HB-195. (2001). *The Australian earth building handbook*. Standards Australia.
- Keefe, L. (2005). *Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation* (1st ed.). Routledge.
- 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-397. (1993). *Betões - Determinação do módulo de elasticidade em compressão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.
- LNEC E-398. (1993). *Betões - Determinação da retracção e da expansão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.
- Malkanthi, S. N., Wickramasinghe, W. G. S., & Perera, A. A. D. A. J. (2021). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00717>
- Mansour, M. Ben, Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. Ben. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- NBR 8492. (2012). *Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio*.
- 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*.
- Real, S., Bogas, J. A., Carriço, A., & Hu, S. (2021). Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/app11062454>
- Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J. A., & Carriço, A. (2022). Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production. *Materials*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/ma15196766>
- XP P 13-901. (2001). *Compressed Earth Blocks for Walls and Partitions. Definitions. Specifications. Test Methods. Delivery Acceptance Conditions*, Association Française de Normalisation (AFNOR).