



Sustentabilidade, Desempenho e Durabilidade

Comportamento a altas temperaturas de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado

CRUZ, Ricardo¹; BOGAS, José²; RANESI, Alessandra³

¹ CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt, 0000-0003-0614-1405

² CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt, 0000-0002-0994-4417

³ CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, alessandra.ranesi@tecnico.ulisboa.pt, 0000-0002-6479-8678

RESUMO

A eficiência do cimento reciclado (CR) na estabilização de blocos de terra comprimida (BTC) já foi demonstrada em estudos anteriores, mas o seu comportamento a altas temperaturas permanece inexplorado. Desse modo, o presente estudo visa avaliar o desempenho dos BTC CR após exposição a temperaturas elevadas (200-1000 °C) durante uma hora. Para se atingir soluções ainda mais sustentáveis foi considerada a incorporação de 25% de resíduos de construção e demolição (RCD). Os blocos foram caracterizados quanto à sua massa volúmica, resistência à compressão, absorção de água por imersão, capilaridade e resistência à abrasão. Para efeitos comparativos foram considerados BTC não estabilizados (NE) ou estabilizados com cimento Portland (CP). Os resultados demonstraram que, até aos 600 °C, os BTC CR mantiveram a sua estabilidade física e bom desempenho técnico. Acima desta temperatura, as diferenças de comportamento em relação aos BTC CP deveram-se à menor formação de produtos de hidratação e ao maior teor de material carbonatado do CR. Aos 1000 °C, todos os blocos perderam a coesão independentemente da composição. Conclui-se que o uso de CR na estabilização dos BTC é tecnicamente viável, permitindo a substituição do CP sem comprometer significativamente o desempenho térmico e contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis.

Palavras-chave: blocos de terra comprimida; cimento reciclado; sustentabilidade; altas temperaturas

ABSTRACT

The effectiveness of recycled cement (RC) in stabilizing compressed earth blocks (CEB) has been demonstrated in previous studies; however, its behaviour when subjected to high temperatures remains unexplored. This study investigates the performance of RC stabilized CEB after being exposed to high temperatures (200–1000 °C) for one hour. To enhance sustainability, 25% of construction and demolition waste (CDW) was also incorporated. The blocks were tested for bulk density, compressive strength, water absorption (immersion and capillarity), and abrasion resistance. For comparison, unstabilized CEB and those stabilized with Portland cement (PC) were also evaluated. Results showed that up to 600 °C, RC stabilized blocks maintained physical integrity and satisfactory technical performance. Beyond this point, differences compared to PC stabilized blocks were attributed to RC's lower formation of hydration products and higher carbonated compounds content. At 1000 °C, all blocks, regardless of composition, lost cohesion. Overall, the use of RC in CEB stabilization is technically viable, allowing for the replacement of PC without significantly compromising performance, while supporting more sustainable construction practices.

Keywords: compressed earth blocs; recycled cement; sustainability; high temperatures



1. INTRODUÇÃO

Embora o interesse nos blocos de terra comprimida (BTC) tenha aumentado nos últimos anos, o seu comportamento a altas temperaturas continua a ser um tema pouco explorado. Em materiais argilosos, como os utilizados na produção de BTC, as temperaturas elevadas desencadeiam a desidratação, desidroxilação e eventual vitrificação da matriz argilosa [1]. Em tijolos cozidos, esses mecanismos tendem a melhorar a resistência mecânica do material. No entanto, em caso de incêndio, as taxas de aquecimento são significativamente superiores. Além disso, a distribuição granulométrica típica de uma mistura utilizada para a produção de BTC é caracterizada por uma maior proporção de areia. O tipo de minerais argilosos presentes no solo e a umidade relativa (HR) do material antes do aquecimento são ainda outros fatores a ter em consideração. Por exemplo, misturas areia-cimento com 10-25% de caulino mantiveram a resistência mecânica até 300 °C [2], enquanto misturas solo-cimento apresentaram uma redução acentuada a partir de 200 °C [3]. Este último resultado deveu-se à presença de minerais argilosos expansivos, como a montmorilonite. A influência da HR na estabilidade física dos BTC em caso de incêndio foi avaliada por Abdallah *et al.* [4], seguindo a curva-padrão ISO-834 [5]. Blocos não estabilizados (NE) com 50% ou 75% de HR apresentaram fenômenos de *spalling*: a condensação do vapor de água formou uma barreira na superfície dos BTC que dificultou a libertação de gases. A pressão de compactação também é um fator relevante. Por exemplo, segundo Abdallah *et al.* [6], BTC NE compactados a 5 MPa mantiveram a estabilidade física enquanto aqueles compactados a 15-50 MPa sofreram *spalling*. Segundo Bruno *et al.* [7], pressões de compactação elevadas conduzem a uma redução do volume de poros intergranulares, o que limita a capacidade de acomodar a alteração de volume causada pela evaporação de água. Apesar dos avanços recentes da comunidade científica, ainda existe uma lacuna significativa na compreensão da evolução das propriedades dos BTC com a temperatura. O estudo mais relevante, conduzido por Nshimiyimana *et al.* [8], concluiu que o desempenho dos BTC estabilizados com cimento Portland (CP) manteve-se estável até aos 600 °C.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar, pela primeira vez, a evolução do desempenho de BTC estabilizados com cimento reciclado (CR) e com incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD), em função da temperatura. O CR tem apresentado resultados promissores [9–12] sendo capaz de substituir totalmente o CP na estabilização dos BTC. Os blocos foram submetidos a temperaturas de 200-1000 °C durante uma hora. Foram também avaliados BTC NE e BTC CP para efeitos comparativos.

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Foi utilizado um solo (Figura 1a) de baixa plasticidade (FA) ao qual foi adicionado um pó de argila (TV) resultante do fabrico de telhas cerâmicas (Figura 1b). De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o FA é classificado como areia siltosa-argilosa, enquanto o TV é classificado como uma argila de baixa a média plasticidade [13]. A mistura FA+TV foi substituída parcialmente por um RCD (Figura 1c). A caracterização destes materiais foi realizada em campanhas experimentais anteriores [11]. Ensaios de difração de raios-X e termogravimetria identificaram a presença de minerais argilosos não expansivos (ilite e caulinite) na mistura FA+TV. A distribuição granulométrica do RCD é semelhante à de FA, o que facilitou a sua incorporação sem comprometer a compacidade das misturas. Este material é classificado como um agregado reciclado misto, de acordo com as definições da norma NBR 15116 [14], sendo constituído por 45 % de resíduos cimentícios, 28 % de agregados naturais e pedra, 16 % de materiais cerâmicos e 10 % de outros materiais, conforme determinado pela norma EN 933-11 [15]. A sua absorção de água foi de 4,3 %, tendo sido determinada segundo as especificações da norma NBR 16916 [16].

Os ligantes utilizados para a estabilização foram um cimento Portland CEM I 42,5R (CP) e um cimento reciclado (CR). O CR foi obtido a partir de resíduos de pasta antigos produzidos com CP e uma razão água/ligante de 0,55. Após britagem e moagem, o material resultante foi termoativado a 650 °C durante 3 horas. O CR apresentou maior exigência de água em comparação com o CP, devido à sua elevada porosidade, superfície específica e teor de cal livre [11].



Figura 1 – Figura ilustrativa: a) FA; b) TV; c) RCD.

2.2 Produção e cura dos BTC

Os BTC foram produzidos com 25% de RCD (% volume) e com diferentes tipos (CP e CR) e percentagens de ligante (0 e 8%), em conformidade com as composições previamente estudadas pelos autores [11]. As composições estão listadas na Tabela 1. Nos BTC NE, a quantidade de TV foi superior à utilizada nos blocos estabilizados, dado que a argila constituiu o único elemento ligante. As misturas estabilizadas com 8% ligante (CP8 e CR8) foram produzidas com 12% de água (% massa). Nos BTC NE, o teor de água foi de 9%.

Primeiro, todos os ingredientes secos foram misturados e homogeneizados. Somente depois a água foi adicionada e a mistura foi novamente agitada. As misturas húmidas foram colocadas no molde prismático de 295x140x95 mm³ de uma prensa hidráulica semiautomática OSKAM V/F e compactadas a 5–6 MPa. Os BTC produzidos foram cobertos com uma lona plástica e humedecidos diariamente com água durante 7 dias. Finalizada a cura húmida, os BTC foram armazenados a 23 ± 3 °C e 65 ± 10% HR.

Tabela 1 – Composição dos BTC.

Designação	Ligante (%) ^a	Teor de água (%) ^a	RCD (%) ^b	TV (%) ^c
NE	0	9	25	18
CP8	8	12	25	11
CR8	8	12	25	11

a: % em massa seca de todos os sólidos; b: % em volume de FA+TV+RCD; c: % em volume de FA+TV

2.3 Exposição a altas temperaturas

Aos 90 dias de idade, os BTC foram colocados num forno elétrico e submetidos a uma taxa de aquecimento de 2 °C/min, permanecendo a 200, 400, 600, 800 ou 1000 °C durante aproximadamente 1 hora (Figura 2). Depois, os blocos foram sujeitos a uma taxa de arrefecimento de 10 °C/min até à temperatura ambiente. Foram utilizados 4 CP8, 4 CR8 e 2 NE para cada temperatura de exposição (5 no total), perfazendo um total de 50 blocos.

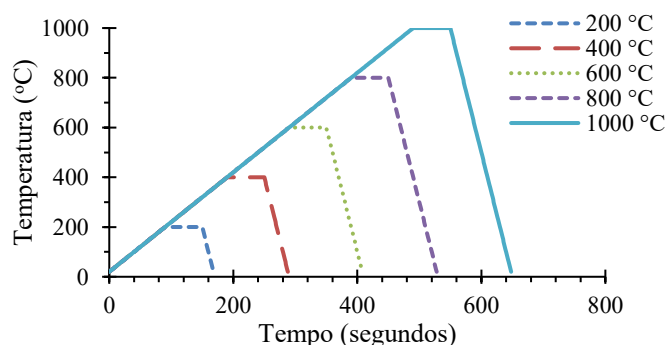


Figura 2 – Perfil de aquecimento e arrefecimento dos BTC ao longo do tempo.



2.4 Caracterização dos BTC

As propriedades dos BTC foram avaliadas antes e após a sua exposição a altas temperaturas. A massa volúmica dos BTC foi determinada como o quociente entre a sua massa e o seu volume [17]. Nos BTC estabilizados, o volume foi determinado por pesagem hidrostática, em conformidade com a EN 772-3 [18], enquanto nos BTC NE foi obtido a partir das dimensões geométricas. A absorção por capilaridade foi avaliada em meio-blocos, de acordo com a NTC 5324 [19], com a imersão dos provetes numa lâmina de água de 5 ± 1 mm, perpendicularmente à direção de compactação. A absorção de água por imersão até massa constante seguiu as recomendações da NBR 8492 [20]. A resistência à compressão foi determinada utilizando uma prensa *Controls*, segundo a EN 772-1 [21] e a NBR 8492 [20]. Os ensaios foram realizados em meios blocos, com placas de contraplacado na base e no topo, a uma velocidade de 4 kN/s. A resistência foi corrigida por um fator de 0,58 [22], que tem em consideração a razão altura/largura do provete. A resistência à abrasão foi avaliada conforme a XP P13-901 [23], executando-se movimentos horizontais com uma escova de aço, com uma carga acoplada de 3 kg, durante 1 minuto. O coeficiente de abrasão (C_a) foi determinado através da Equação 1, que relaciona a área (A) com a massa abradada (M_a). A aparência exterior e interior dos BTC foi também avaliada.

$$C_a = \frac{A}{M_a} \quad (1)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise visual

Aos 400 °C observou-se o aparecimento de um tom alaranjado (Figura 3), associado à oxidação do ferro [24]. Esta tonalidade foi mais intensa nos BTC NE, devido ao seu maior teor de TV+FA. O aparecimento de alguma fissuração superficial deu-se aos 600 °C, o que pode ser parcialmente explicado pela desidroxilação dos minerais argilosos que leva à libertação de vapor de água e que pode consequentemente levar à retração e fissuração do BTC. Para além disto, ocorreu também a pela transformação de fase do quartzo, aproximadamente aos 573 °C [25], provocando uma expansão volumétrica súbita de cerca de 0,79% [25], com potencial de causar fissuração [26].

Nos BTC estabilizados, ocorreu ainda a decomposição térmica dos produtos de hidratação do cimento, nomeadamente do C-S-H, dos aluminatos de cálcio hidratados e da portlandite (Equação 2). Estes fenómenos ocorrem predominantemente entre 400-600 °C [27]. Aos 800 °C, verificou-se alguma perda de coesão acompanhada por um aumento significativo da fissuração (Figura 3). Neste patamar deu-se a decomposição da calcite em cal livre [28] (Equação 3).



Durante o arrefecimento, a reidratação da calcite poderá ter ocorrido, o que favorece a ocorrência de fissuração [29]. Nos BTC NE, a decomposição e posterior reidratação da calcite devem também ser consideradas, dada a presença de resíduos cimentícios antigos no RCD. Aos 1000 °C deu-se a perda quase total de coesão dos BTC (Figura 3). Este fenómeno está associado a uma vitrificação rápida da superfície, dificultando a libertação do vapor de água e do CO_2 resultantes da decomposição da portlandite e da calcite, respetivamente [1]. Este processo favorece a formação de poros de grandes dimensões e irregulares [1]. Salienta-se também a mudança de cor para uma tonalidade mais escura.

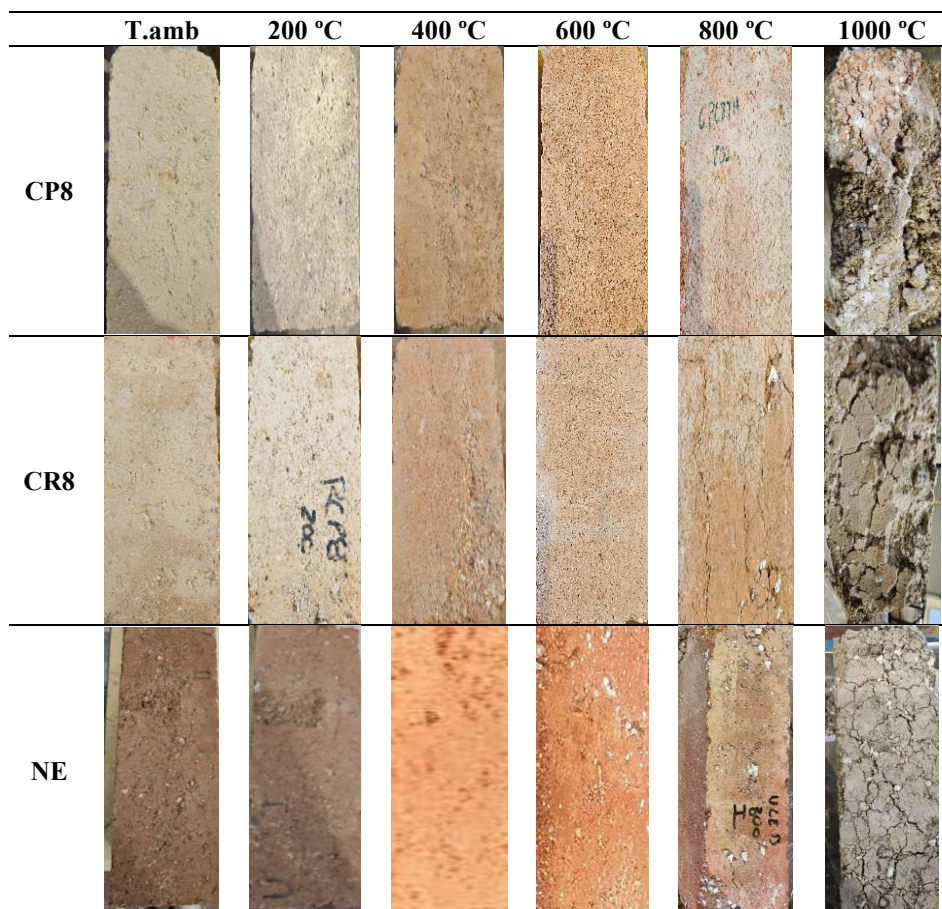


Figura 3 – Efeito da exposição a altas temperaturas no exterior dos BTC CP8, CR8 e NE.

Verificou-se uma diferença de tonalidade entre o interior e as zonas mais perto da superfície do bloco (Figura 4). Isto deveu-se ao facto de o interior do BTC ter ficado menos exposto ao oxigénio. Consequentemente, os compostos de ferro tiveram uma menor oxidação. Isto conferiu ao interior dos BTC uma tonalidade mais escura (Figura 4). Além disso, a evaporação de água pode impedir a penetração de oxigénio no interior dos BTC [30]. O carbono presente no BTC reage com o vapor de água, originando gases fortemente redutores (H_2 e CO), que, a temperaturas elevadas podem alterar de forma permanente o estado de oxidação do ferro, originando as variações de tonalidade no interior dos blocos.



Figura 4 – Interior dos BTC CP8 e CR8.

3.2 Massa volúmica

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios para cada propriedade avaliada. Os BTC NE desintegraram-se completamente após alguns minutos de imersão em água, o que impossibilitou a realização dos ensaios de absorção de água e de resistência à compressão saturada. A perda de coesão dos BTC aos 1000 °C impossibilitou a sua caracterização (3.1).



Tabela 2 – Evolução das propriedades dos BTC com a temperatura.

BTC	Temperatura	MV (kg/m ³)	C _{abs,10min} (x10 ⁻² g/(cm ² ·min ^{0.5}))	A _{i,m} (%)	f _{c,un,seca} (MPa)	f _{c,un,sat} (MPa)	C _a (cm ² /g)
CP8	Ambiente	1988	15,4	9,2	7,4	3,3	22,7
	200 °C	1905	18,9	13,0	10,3	4,7	36,9
	400 °C	1888	28,1	14,1	10,6	5,8	39,1
	600 °C	1815	52,9	15,8	8,6	7,3	15,6
	800 °C	1713	104,2	17,9	7,0	3,7	4,4
CR8	Ambiente	1960	11,4	9,0	6,4	2,9	20,0
	200 °C	1887	16,2	13,0	9,4	4,1	31,1
	400 °C	1857	39,5	14,4	9,5	4,9	32,0
	600 °C	1792	76,2	16,1	7,8	5,6	11,7
	800 °C	1669	112,0	19,4	5,4	3,5	2,9
NE	Ambiente	1988	-	-	1,8	-	3,9
	200 °C	1958	-	-	4,3	-	4,8
	400 °C	1936	-	-	4,5	-	5,2
	600 °C	1869	-	-	6,2	-	3,1
	800 °C	1812	-	-	7,1	-	2,6

MV: massa volumica; C_{abs,10min}: coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos; A_{i,m}: absorção de água por imersão; f_{c,un}: resistência à compressão não confinada; C_a: coeficiente de abrasão.

Entre a temperatura ambiente e os 200 °C, a redução da MV foi superior para os BTC CP8 comparativamente com os CR8 (Tabela 2). Este intervalo está associado à evaporação de água livre e à degradação térmica da etringite. De facto, segundo Bogas *et al.* [27], para igual a/l, pastas de CR apresentam menor quantidade de etringite. Para além disto, como o CR apresenta uma maior exigência de água (2.1) e os BTC CP8 foram produzidos com o mesmo teor de água dos CP8 (2.2), é natural que os BTC CP8 contenham uma maior quantidade de água livre. No intervalo 200-400 °C, a maior redução foi observada para os BTC CR8, o que pode ser atribuído à formação de quantidades ligeiramente superiores de monossulfoaluminato de cálcio hidratado (Afm) [31]. Já entre 400-600 °C, os BTC CP8 apresentaram uma redução de 3,9%, enquanto no CR8 foi de 3,5% (Tabela 2). Esta diferença pode ser explicada pelo maior volume de compostos C-S-H e CH em pastas de CP [28]. Por fim, no intervalo 600-800 °C, os BTC CR8 tiveram uma redução de 5,6%, enquanto no CP8 foi de 6,9% (Tabela 2). Esta diferença está associada à maior presença de calcite [27,28,31], devido à carbonatação dos resíduos de pasta de cimento e à possível carbonatação do CR após o processo de termoativação [32].

Para os BTC NE, a redução de MV deve-se exclusivamente à perda de água livre, à remoção de água fisicamente adsorvida na superfície das partículas, à desidroxilação dos minerais argilosos e à decarbonatação dos compostos carbonatados. Como expectável, a maior redução ocorreu entre 400-600 °C (3,4%). Entre os 600-800 °C a redução foi de 3,1%, podendo ser explicada pela decomposição da calcite presente nos resíduos cimentícios antigos do RCD.

3.3 Absorção de água

Na Figura 5a e Figura 5b apresentam-se a evolução da absorção capilar até 72 horas, para os BTC CP8 e CR8, respetivamente. Para os blocos em ambiente laboratorial, nas primeiras 6 horas ($\approx 20 \text{ min}^{0.5}$) a absorção evoluiu de forma aproximadamente linear com $\sqrt{t}$. Depois, os poros de maiores dimensões e com maior interconectividade ficaram saturados, ocorrendo uma participação progressiva dos poros menos acessíveis à água. Para os blocos sujeitos a temperaturas mais elevadas, o aumento de porosidade e conectividade levou ao incremento significativo da taxa de absorção inicial e à redução do período até à ocorrência de saturação. Por exemplo, para o CR8, essa transição na taxa de absorção ocorreu a partir dos 120 minutos, 60 minutos, 30 minutos e 10-20 minutos, para 200°C, 400 °C, 600 °C e 800 °C respetivamente. Como tal, optou-se por determinar o coeficiente de absorção capilar correspondente aos primeiros 10 minutos (C_{abs,10min}). Este parâmetro, apesar de depender das características superficiais do provete, é usualmente considerado na literatura.

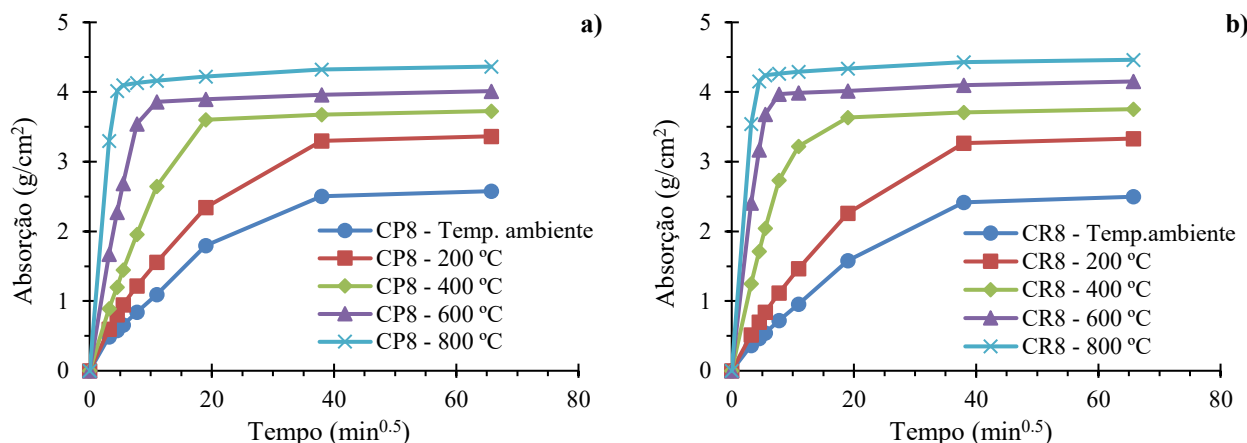


Figura 5 – Absorção capilar ao longo do tempo para as diferentes temperaturas: a) CP8; b) CR8.

O $C_{abs,10min}$ dos BTC CR8 e CP8 expostos a temperatura de 800 °C aumentou 9,8 e 6,8 vezes, respectivamente, comparativamente com o seu valor inicial a temperatura ambiente (Tabela 2). De acordo com a norma NTC 5324 [19], os BTC CP8 e CR8 foram classificados como materiais muito pouco capilares até 200 °C ($C_{abs,10min} < 20 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$) passando a ser materiais pouco capilares aos 400 °C ($C_{abs,10min} < 40 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$). Acima desta temperatura, ocorreu um aumento significativo de $C_{abs,10min}$ o que está associado a um aumento da macroporosidade ($> 50 \text{ nm}$) [33].

A absorção de água por imersão total aumentou 1,9 e 2,2 vezes para os BTC CP8 e CR8, respectivamente, comparativamente com o seu valor inicial (Tabela 2). O valor foi sempre inferior ao máximo estipulado de 20% pela norma NBR 8491 [34].

3.4 Resistência à compressão

A Figura 6a apresenta a evolução da $f_{c,un,seca}$ em função da temperatura. Conforme reportado por Bruno *et al.* [1], no caso dos BTC NE, a $f_{c,un,seca}$ aumentou em função da temperatura de exposição. No entanto, para os BTC estabilizados, esta propriedade teve um decréscimo aos 600 °C, o que pode ser explicado, principalmente, pela decomposição dos produtos de hidratação do cimento. No entanto, a tendência observada diverge daquela reportada por Nshimiyimana *et al.* [8]. No presente estudo, os BTC foram produzidos com uma substituição parcial de solo por 25% RCD, tornando a decomposição dos produtos de hidratação do cimento um fator mais preponderante. Apesar disto, a $f_{c,un,seca}$ manteve-se amplamente superior ao mínimo de 2,0 MPa estabelecidos pela HB-195 [22].

A evolução da $f_{c,un,seca}$ entre os BTC CP8 e CR8 foi semelhante (Figura 6). A principal diferença ocorreu aos 800 °C, o que está de acordo o maior teor de material carbonatado do CR. No entanto, os BTC CR8 tiveram uma redução de apenas 17% na $f_{c,un,seca}$ e de 3% no seu coeficiente de eficiência estrutural, CES (razão entre $f_{c,un,seca}$ e MV), comparativamente com o seu valor inicial. Estes resultados comprovam que os BTC estabilizados com CR têm capacidade de suportar uma exposição até 800 °C durante uma hora.

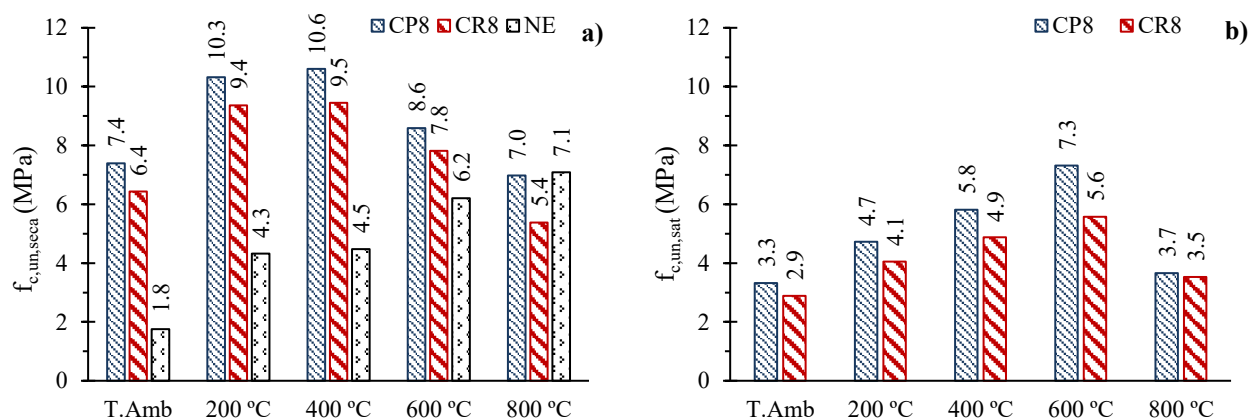


Figura 6 – Evolução da resistência à compressão não confinada: a) seca; b) saturada.

Em condições saturadas, a resistência aumentou continuamente até aos 600 °C (Figura 6b), o que pode ser explicado pela reidratação dos produtos de hidratação dos ligantes. No entanto, aos 800 °C verificou-se um decréscimo abrupto da $f_{c,un,sat}$. Como referido anteriormente, entre os 600-800 °C, iniciou-se a descarbonatação da calcite, dando origem à cal livre, que em contacto com a água forma portlandite. Esta é uma reação exotérmica frequentemente associada à ocorrência de fissuração, com consequente diminuição da resistência. Apesar disto, a $f_{c,un,sat}$ manteve-se acima do limite mínimo de 1,0 MPa recomendado pela HB-195 [22].

É possível que após o segundo ciclo de reidratação do CR, este possa ter desenvolvido menor quantidade de produtos de hidratação do que o CP reidratado. Porém, entre os 600-800 °C o decréscimo de resistência nos BTC CP8 (50%) foi superior ao dos BTC CR8 (37%). Neste caso, o elevado teor de material carbonatado nos BTC CR8 revelou-se uma vantagem. Durante o aquecimento, ocorreu a desidroxilação do caulino [35,36] e outros processos de reorganização estrutural [36,37], culminando na formação de metacaulino, uma estrutura amorfa [35,38] de elevada reatividade pozolânica [39,40]. A sua interação com a água e com a portlandite, proveniente maioritariamente da descarbonatação e reidratação da calcite, desencadeou reações pozolânicas e formou produtos de hidratação.

3.5 Resistência à abrasão

Independentemente da composição, a resistência à abrasão aumentou progressivamente com a temperatura até aos 400 °C, (Tabela 2). Acima desta temperatura observou-se uma perda da coesão superficial. O coeficiente de abrasão do BTC CP8 foi, em média, 28% superior à do CR8, sugerindo uma degradação mais acentuada da sua superfície. No entanto, importa salientar que, devido à sua natureza porosa, a dureza das partículas de CR pode ser até 11x inferior à das partículas de CP [41].

De acordo com o documento normativo XP P13-901 [23] os BTC CP8 e CR8 mantiveram-se na classe mais elevada de resistência à abrasão ($C_a > 7 \text{ cm}^2/\text{g}$) até aos 600 °C. A partir deste patamar ambos passaram para a classe mais baixa ($2 \text{ cm}^2/\text{g} < C_a < 5 \text{ cm}^2/\text{g}$). Já os BTC NE mantiveram-se sempre na classe mais baixa.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar a evolução do desempenho de BTC CR, BTC CP e BTC NE após exposição a elevadas temperaturas (200, 400, 600, 800 e 1000 °C). Os resultados obtidos demonstraram que a exposição dos BTC CR8, assim como dos BTC CP8, até 600 °C durante uma hora não compromete significativamente a estabilidade física, nem as suas propriedades. A partir desta temperatura a diferença de comportamento entre os BTC CP8 e CR8 deveu-se essencialmente ao menor desenvolvimento de produtos de hidratação no CR e ao maior teor de material carbonatado deste ligante. Apesar disto, aos 800 °C, os BTC CR8 apresentaram uma redução de apenas 17% na $f_{c,un,seca}$ e de 3% no CES, relativamente ao valor inicial. Para ambas composições estabilizadas verificou-se um aumento significativo do coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos ($C_{abs,10min}$) e da absorção de água por imersão ($A_{i,m}$) e uma redução expressiva da massa volúmica. Para além disto, importa salientar que, até aos 600 °C, o coeficiente de abrasão (C_a) permaneceu acima do limite de $7 \text{ cm}^2/\text{g}$, exigido para a classe mais elevada de resistência à abrasão. Por outro lado, os BTC não estabilizados



apresentaram uma diminuição da massa volúmica e do C_a , em 9% e 33%, respetivamente e um aumento da $f_{c,un,seca}$ em 294%, resultante da exposição a 800 °C durante uma hora. Aos 1000 °C, devido a uma rápida vitrificação da superfície, todos os blocos perderam totalmente a coesão.

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 com a referência 2023.05651.BD e com o identificador DOI <https://doi.org/10.54499/2023.05651.BD>.

REFERÊNCIAS

- [1] A.W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, J. Mendes, Optimization of bricks production by earth hypercompaction prior to firing, *J Clean Prod* 214 (2019) 475–482. <https://doi.org/10.1016/J.CLEPRO.2018.12.302>.
- [2] O. Helson, Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol : influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition, PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise, 2017.
- [3] J. Hessouh, Caractérisations physique et mécanique, et durabilité des bétons de sol : matériaux de laboratoire et matériaux de chantiers, PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise, 2021.
- [4] R. Abdallah, H. Carré, C. Perlot, C. La Borderie, H. El Ghoche, Study of the risk of instability in earthen bricks subjected to fire, *Mater Struct* 57 (2024) 16. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02284-9>.
- [5] ISO 834-1, Fire resistance tests—elements of building construction. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 1999.
- [6] R. Abdallah, H. Carré, F. McGregor, Effect of compaction pressure on the risk of thermal instability of compressed earth bricks, *Mater Struct* 57 (2024) 84. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02348-4>.
- [7] A.W. Bruno, C. Perlot, J. Mendes, D. Gallipoli, A microstructural insight into the hygro-mechanical behaviour of a stabilised hypercompacted earth, *Mater Struct* 51 (2018) 32. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1160-9>.
- [8] P. Nshimiyimana, K. Banaou, S. Omar, Y. Coulibaly, E. Pru'Homme, Z. Zhao, A. Messan, L. Courard, High-Temperature Performances of Compressed Earth Blocks Stabilized with Cementitious Binders, in: *Second RILEM International Conference on Earthen Construction*, Springer, 2024: pp. 376–386. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62690-6_39.
- [9] R. Cruz, B. Azevedo, J.A. Bogas, S. Real, Resistência à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado, in: *Congresso Construção 2022*, Guimarães, Portugal, 2022: pp. 186–196.
- [10] S. Real, B. Azevedo, J. Bogas, R. Cruz, A. Carriço, Caracterização mecânica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado, in: *Congresso Construção 2022*, Guimarães, Portugal, 2022: pp. 177–185.
- [11] R. Cruz, J. Bogas, S. Real, J. Rodrigues, Durabilidade de blocos de terra comprimida estabilizados com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão, in: *5º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, Lisboa, Portugal, 2024: pp. 286–297.
- [12] R. Cruz, J. Bogas, M. Nabais, S. Real, Caracterização mecânica e retração de blocos de terra comprimida estabilizados com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão., in: *5º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, Lisbon, Portugal, 2024: pp. 298–309.
- [13] ASTM D2497-17, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System, American Society for Testing & Materials (ASTM), 2020.
- [14] NBR 15116, Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaio, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- [15] EN 933-11, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate, European Committee for Standardization (CEN), 2011.
- [16] NBR 16916, Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- [17] EN 772-13, 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), 2000.
- [18] EN 772-3, Methods of test for masonry units - Part 3: Determination of net volume and percentage of voids of clay masonry units by hydrostatic weighing, European Committee for Standardization (CEN), 1998.



- [19] NTC 5324, Bloques de suelo cemento para muros y divisiones, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), Bogotá, Colombia, 2004.
- [20] NBR 8492, Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [21] EN 772-1, Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength, European Committee for Standardization (CEN), 2011.
- [22] HB 195, The Australian Earth Building Handbook, Standards Australia, Sydney, Australia, 2002.
- [23] XP P13-901, Compressed Earth Blocks for Walls and Partitions. Definitions. Specifications. Test Methods. Delivery Acceptance Conditions, Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France, 2001.
- [24] A.L. Ulery, R.C. Graham, Forest Fire Effects on Soil Color and Texture, *Soil Science Society of America Journal* 57 (1993) 135–140. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010026x>.
- [25] B.J. Skinner, Section 6: Thermal expansion, in: S.P. Clark Jr. (Ed.), *Handbook of Physical Constants*, Geological Society of America, 1966: pp. 97–175. <https://doi.org/10.1130/MEM97-p75>.
- [26] I. Hager, Behaviour of cement concrete at high temperature, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 61 (2013) 145–154. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013>.
- [27] J.A. Bogas, S. Real, A. Carriço, J.C.C. Abrantes, M. Guedes, Hydration and phase development of recycled cement, *Cem Concr Compos* 127 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>.
- [28] J.A. Bogas, A. Carriço, A.J. Tenza-Abril, Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes, *Cem Concr Res* 138 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>.
- [29] M. Tantawy, Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* 05 (2017) 33–48. <https://doi.org/10.4236/msce.2017.511004>.
- [30] O. Akinshipe, G. Kornelius, Chemical and Thermodynamic Processes in Clay Brick Firing Technologies and Associated Atmospheric Emissions Metrics-A Review, *Journal of Pollution Effects & Control* 05 (2017). <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000190>.
- [31] S. Real, A. Carriço, J.A. Bogas, M. Guedes, Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement, *Materials* 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13183937>.
- [32] J. Bogas, A. Carriço, S. Real, Thermoactivated Recycled Cement, in: H.M. Saleh (Ed.), *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*, IntechOpen, Rijeka, Croatia, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98488>.
- [33] P. Nshimiymana, A. Messan, L. Courard, Hydric and durability performances of compressed earth blocks stabilized with industrial and agro by-product cinders: calcium carbide residue and rice husk ash, *Journal of Materials in Civil Engineering* 33 (2021) 4021121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003745).
- [34] NBR 8491, Tijolo de solo-cimento - Requisitos, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [35] R. Fernandez, F. Martirena, K.L. Scrivener, The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, *Cem Concr Res* 41 (2011) 113–122. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.09.013>.
- [36] S. Sperinck, P. Raiteri, N. Marks, K. Wright, Dehydroxylation of Kaolinite to Metakaolin - A Molecular Dynamics Study, *J Mater Chem* 21 (2011). <https://doi.org/10.1039/C0JM01748E>.
- [37] M. Izadifar, P. Thissen, A. Steudel, R. Kleeberg, S. Kaufhold, J. Kaltenbach, R. Schuhmann, F. Dehn, K. Emmerich, Comprehensive examination of dehydroxylation of kaolinite, disordered kaolinite, and dickite: experimental studies and density functional theory, *Clays Clay Miner* 68 (2020) 319–333. <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00082-w>.
- [38] N. Garg, J. Skibsted, Dissolution kinetics of calcined kaolinite and montmorillonite in alkaline conditions: Evidence for reactive Al(V) sites, *Journal of the American Ceramic Society* 102 (2019). <https://doi.org/10.1111/jace.16663>.
- [39] C. Li, H. Sun, L. Li, A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements, *Cem Concr Res* 40 (2010) 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.03.020>.
- [40] F. Moodi, A.A. Ramezaniapour, A.S. Safavizadeh, Evaluation of the optimal process of thermal activation of kaolins, *Scientia Iranica* 18 (2011) 906–912. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENT.2011.07.011>.
- [41] L. Zhang, Y. Ji, G. Huang, J. Li, Y. Hu, Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag, *Constr Build Mater* 164 (2018) 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>.