

Blocos de Terra Compactada aditivados com Material de Mudança de Fase

Compacted Earth Blocks Additivated with Phase Change Material

Sandra Cunha¹, André Campos¹, José Aguiar¹, Francisco Martins²

¹Centro de Território, Ambiente e Construção, C-TAC, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

²Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas, ISISE, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
e-mail: sandracunha@civil.uminho.pt, andrecampos09@hotmail.com, aguiar@civil.uminho.pt, ffm@civil.uminho.pt

RESUMO

A construção em terra é uma técnica ancestral, que nos últimos anos tem atraído muita atenção devido à sua sustentabilidade, facilidade de execução e baixo custo produtivo. Os blocos de terra compactada (BTCs) são uma técnica de construção moderna e atual, baseada nas antigas técnicas construtivas de adobe e taipa. Por sua vez, os materiais de mudança de fase (PCM) têm vindo a ser aplicados com sucesso em diferentes materiais de construção, devido à sua capacidade de regulação da temperatura no interior de edifícios por meio da sua capacidade de armazenamento térmico. Desta forma, a associação dos blocos de terra compactada e dos materiais de mudança de fase, permite obter uma solução construtiva com todas as vantagens associadas à construção em terra, mas também com impacto benéfico na eficiência energética dos edifícios. Atualmente, são várias as investigações desenvolvidas em construção em terra e em materiais aditivados com PCM, no entanto a combinação destas duas técnicas é ainda uma área subdesenvolvida, com elevado potencial e grande necessidade de investigação. Nesta investigação foram desenvolvidos e caracterizados BTCs com incorporação direta de PCM não encapsulado, tendo sido avaliadas diferentes composições no estado fresco e endurecido. As composições desenvolvidas foram aditivadas com 25%, 50% e 75% de PCM em relação à quantidade de cimento utilizada para a estabilização dos BTCs. Foi possível concluir que a incorporação do PCM em BTCs pode ser realizada com sucesso, apresentando o teor de incorporação de 25% de PCM e 10% de cimento Portland um desempenho satisfatório sob o ponto de vista do comportamento físico, mecânico e de durabilidade.

Palavras-chave: Construção em terra. Blocos de terra compactados. Material de mudança de Fase.

ABSTRACT

Earth construction is an ancestral technique, which in recent years has attracted a lot of attention due to its sustainability, ease of execution and low-cost production. Compacted earth blocks (CEBs) are a current and modern construction technique based on ancient adobe and rammed earth construction techniques. On the other hand, phase change materials (PCM) have been successfully applied in different building materials, due to their ability to regulate the temperature inside buildings through their thermal storage capacity. In this way, the combination of compacted earth blocks and phase change materials allows for a constructive solution with all the advantages associated with earth construction, but also with a beneficial impact on the energy efficiency of buildings. Currently, there are several studies developed in earth construction and in materials with PCM incorporation, however the combination of these two techniques is still an underdeveloped area with high potential and research needs. In this research, different compositions of CEBs with direct incorporation of non-encapsulated PCM were developed and evaluated in the fresh and hardened state. The developed compositions were added with 25%, 50% and 75% of PCM in relation to the Portland cement content used to stabilize the BTCs. It was possible to conclude that the incorporation of PCM in BTCs can be performed successfully, with the incorporation 25% of PCM and 10% of Portland cement presenting a satisfactory performance from the point of view of physical, mechanical behavior and durability.

Keywords: Earth construction. Compressed earth blocks. Phase change materials.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma enorme preocupação e pressão relacionada com a construção sustentável de novos edifícios em todo o mundo. Esta situação justifica-se em parte pela crescente consciencialização pública e também pela crescente preocupação da comunidade científica, no caminho de uma construção mais consciente, eficiente e sustentável. Assim, torna-se muito interessante o desenvolvimento de novas soluções construtivas baseadas em soluções construtivas ancestrais, tais como a construção em terra.

Há mais de mil anos, que a terra tem vindo a ser utilizada como material de construção em diferentes civilizações em todo o mundo. Na Índia estima-se que existam cerca de 80 milhões de habitações em terra, sendo que na China esse número ronda os 100 milhões. Em França cerca de 15% dos edifícios rurais são construídos em terra batida, enquanto no Peru as casas construídas em terra representam 40% do número total de habitações existentes. Assim, estima-se que mais de um terço da população mundial viva em edifícios construídos em terra, aproximadamente três biliões de pessoas, com particular incidência nos países em desenvolvimento, onde este número pode ascender a 50% das habitações existentes. A construção em terra é largamente utilizada em inúmeras partes do mundo, estando em geral, mas nem sempre, diretamente relacionada com a escassez de recursos financeiros das populações como na América Latina, África, Índia, Médio Oriente e o Sul da Europa [1].

Desde a antiguidade que a terra é utilizada como material de construção devido à sua abundância e facilidade de obtenção. A construção em terra apresenta diversas vantagens, do ponto de vista económico, energético, ambiental, social e cultural. Os seus benefícios são amplamente investigados e conhecidos por oferecerem uma solução construtiva de baixo custo, ausência da necessidade de equipamentos específicos para a construção, baixo impacto ambiental, totalmente reutilizável, bom isolamento acústico, boa permeabilidade ao vapor de água, elevada resistência ao fogo e bom desempenho térmico [1-2]. Contudo, apresenta também algumas desvantagens tais como baixa resistência mecânica, maior vulnerabilidade a sismos, elevada retração e heterogeneidade da matéria-prima.

Os blocos de terra compactada (BTCs) são uma técnica construtiva, desenvolvida nos tempos modernos, que combina as técnicas milenares do adobe e da taipa. A contrário dos adobes que são moldados ou compactados manualmente, os blocos de terra compactada são formados pela compressão de uma quantidade de solo levemente humedecida com recurso a uma prensa mecânica. Esta técnica é datada do século XVIII, com o aparecimento da primeira prensa manual [1]. Em comparação com adobes e outros blocos compactados manualmente, os BTCs são completamente regulares em tamanho e forma e muito mais densos. Estes blocos de terra são conhecidos como tijolos ecológicos, pelo facto de serem uma alternativa sustentável em comparação a outras técnicas de construção.

Os BTCs podem apresentar características muito diferentes de acordo com o seu método de estabilização, sendo que a resistência à compressão dos BTCs não estabilizados é muito inferior comparativamente com a resistência à compressão dos BTCs estabilizados quimicamente, com a incorporação de cimento ou cal [3, 4]. Vários autores têm desenvolvido estudos em blocos de argila estabilizados com cimento Portland enfatizando a sua eficácia e benefícios ambientais [5-7]. Algumas investigações têm sido desenvolvidas com o objetivo de avaliar as propriedades térmicas dos materiais de construção com base em terra, tendo vindo a ser estudado o impacto da densidade nas propriedades higrotérmicas [8-11].

É do conhecimento geral que atualmente existe uma grande preocupação relacionada com o consumo energético dos edifícios. Sabe-se que o consumo de energia nos edifícios referentes às necessidades de aquecimento e arrefecimento é cerca de 30% do consumo total de energia na União Europeia e cerca de 75% do consumo total de energia no setor da construção [13]. Nos últimos anos, novos métodos têm vindo a ser desenvolvidos para melhorar o comportamento térmico dos edifícios, tais como a possibilidade de incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) em soluções construtivas [13-16].

Os materiais de mudança de fase possuem a capacidade de reduzir as necessidades de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, através da sua capacidade de armazenamento térmico [13, 14, 17]. A sua incorporação em soluções construtivas tem revelado resultados muito interessantes no aumento da eficiência energética dos edifícios. Em alguns estudos, a incorporação de PCM não só permite uma diminuição das necessidades de climatização em todas as estações do ano, como também permite a eliminação das necessidades de aquecimento ou arrefecimento, na primavera e no outono [14, 17].

O PCM pode ser incorporado nas mais diversas soluções construtivas para aplicação em pavimentos [18, 19], paredes [20, 21], tetos [22, 23], envidraçados [24, 25] e pode também fazer parte de sistemas térmicos mais complexos, como bombas de calor e painéis solares [26-28]. Contudo, a sua aplicação em materiais para a execução de paredes constitui a solução preferencial da utilização destes materiais, devido à grande área de aplicação disponível no edifício [13]. Desta forma, o PCM tem vindo a ser bastante aplicado em argamassas [29], placas de gesso cartonado [30], tijolos [31] e concreto [32].

Atualmente, existem diferentes técnicas de incorporação de PCM em materiais de construção, sendo estas o encapsulamento (microencapsulamento [14, 32-35] e macroencapsulamento [23, 31, 36-38]), imersão [21, 39], estabilização [26, 40] e incorporação direta [15, 17]. Porém, até aos dias de hoje a técnica de incorporação de PCM mais utilizada é o encapsulamento, que apresenta elevados custos devido ao processo de encapsulamento do PCM, representando um obstáculo para a disseminação da tecnologia. Por outro lado, recentemente alguns trabalhos têm vindo a identificar a incorporação direta, como uma técnica fiável e eficaz na incorporação de materiais de mudança de fase em argamassas. Esta técnica encontra-se ainda subdesenvolvida, mas apresenta resultados muito promissores do ponto de vista energético e também económico, devido ao baixo custo de aquisição do material [15, 17].

Recentemente, a incorporação de microcápsulas de PCM em técnicas construtivas baseadas na construção em terra também despertou o interesse de alguns investigadores [16]. No entanto, esta é ainda uma área com grandes lacunas de conhecimento e elevada necessidade de investigação. Este estudo é uma das primeiras tentativas de combinar tecnologias de construção ancestrais, tais como a construção em terra, e técnicas construtivas avançadas baseadas em materiais funcionais, tais como a incorporação direta de materiais de mudança de fase não encapsulados, com o intuito de melhorar a eficiência energética e sustentabilidade dos edifícios. O principal objetivo deste estudo consistiu no desenvolvimento e caracterização de blocos de terra compactada com incorporação direta de material de mudança de fase. Foram desenvolvidos blocos com incorporação de 25%, 50% e 75% de PCM, tendo sido avaliadas diferentes propriedades dos BTCs, tais como a resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, degradação face à ação das chuvas e termogravimetria.

2. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os blocos de terra compactada são compostos por solo, cimento Portland, água e PCM.

O cimento utilizado nesta investigação foi um CEM I 42,5 R com densidade de 3150 kg/m³. O PCM selecionado é puro, não encapsulado, composto por parafina com temperatura de transição compreendida entre 20-23 °C, entalpia de 200 kJ/kg, densidade no estado sólido de 760 kg/m³ e no estado líquido de 700 kg/m³.

O solo utilizado foi recolhido no Norte de Portugal (Barcelos), com recurso a equipamentos mecânicos para extrair o material a uma profundidade superior a 1 metro. A sua classificação foi feita utilizando a caracterização geotécnica convencional e respeitando as normas aplicáveis.

A Figura 1 e a Tabela 1 mostram a distribuição do tamanho de partícula do solo utilizado [41]. Tendo sido possível concluir que o solo possui uma granulometria contínua, apresentando cascalho, areia, silte e argila, sendo maioritariamente composto por areia, com uma massa específica de 2750 kg/m³ [42].

Além disso, o limite de liquidez foi determinado com base na norma portuguesa NP-143 [43]. Os resultados deste ensaio indicam um solo não plástico, o que está de acordo com o esperado devido à predominância de finos (Tabela 1).

A composição química do solo foi determinada através de ensaios de fluorescência de raios X (FRX), com recurso a um analisador EA1000VX. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos, sendo possível observar que o solo é composto principalmente por dióxido de silício, possuindo teores consideráveis de óxido de alumínio e óxido de ferro, podendo ser classificado como um solo silicioso.

2.1 Composições

Para a realização desta investigação diferentes composições de blocos de terra compactada foram desenvolvidas (Tabela 3). Tendo em consideração a composição do solo selecionado, optou-se pela estabilização química do mesmo. A especificação HB 195-2002 recomenda um teor mínimo de argila entre 5% e 10% para blocos de terra compactada estabilizados e não estabilizados, respectivamente [44]. Tendo em consideração que o teor de argila obtido para o solo em análise foi de apenas 4%, encontrando-se assim ligeiramente abaixo do valor recomendado para solos estabilizados e significativamente inferior aos 10% recomendados para solos não estabilizados, foi incorporado um teor de 10% de cimento Portland. A incorporação de cimento teve como objetivo a estabilização química do solo e o aumento do desempenho mecânico e durabilidade dos BTCs.

Desta forma, foi desenvolvida uma composição de referência à base de solo, água e 10% de cimento Portland em substituição da massa de solo utilizada (S10C). Foram ainda analisadas três composições distintas para avaliar a influência da incorporação de PCM, tendo sido desenvolvidas composições com incorpora-

ção de 25%, 50% e 75% de PCM relativamente à quantidade de cimento (S10C25PCM, S10C50PCM e S10C75PCM).

O teor de água utilizado nas diferentes composições foi fixado em 16,2% da quantidade do solo, com base no método empírico do ensaio da bola.

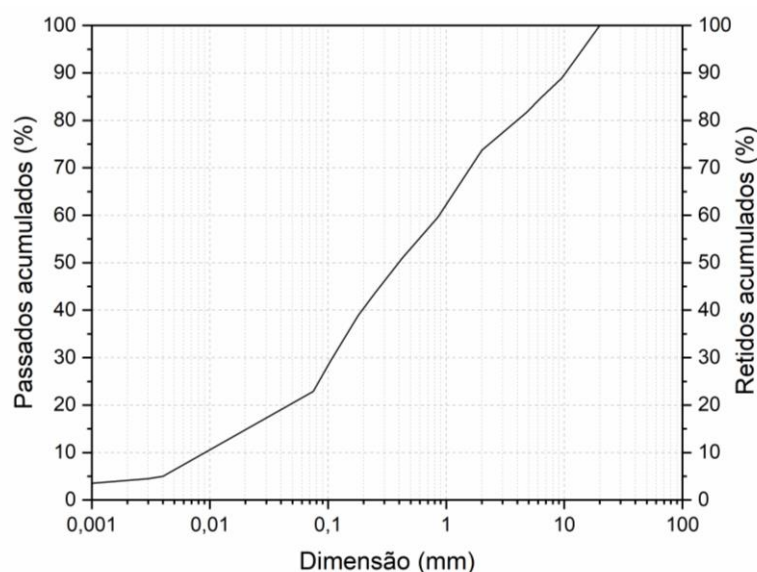


Figura 1: Análise granulométrica do solo.

Tabela 1: Dimensões das partículas do solo.

	DIMENSÃO (MM)	QUANTIDADE DE MATERIAL (%)
Cascalho	> 2	26.0
Areia	0.06 a 2	54.5
Silte	0.002 a 0.06	15.5
Argila	< 0.002	4.0

Tabela 2: Composição química do solo.

COMPOSTO QUIMICO	TEOR (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	58.0
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	25.7
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	11.5
Óxido de potássio (K ₂ O)	3.13
Dióxido de titânio (TiO ₂)	1.35
Pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0.17
Óxido de cálcio (CaO)	0.12
Óxido de manganês (MnO)	0.04

Tabela 3: Formulação dos blocos de terra compactada (kg/m³).

COMPOSIÇÃO	SOLO	CIMENTO	PCM	ÁGUA
S10C	1743	174	0	311
S10C25PCM	1707	174	44	261
S10C50PCM	1671	174	87	212
S10C75PCM	1636	174	131	163

2.2 Preparação dos corpos de prova

O processo de fabrico dos BTCs foi dividido em quatro fases distintas: preparação das matérias-primas, mistura, prensagem e cura.

O processo de preparação da matéria-prima consistiu na secagem do solo em estufa ventilada a 105°C e na obtenção das partículas com dimensões inferiores a 4 mm. Posteriormente, para a obtenção da mistura das matérias-primas, foi utilizada uma misturadora mecânica de eixo vertical, com o objetivo de obter uma mistura mais homogênea. A prensagem dos blocos foi realizada com recurso a uma prensa manual, num molde com dimensões de 220x105x135 mm³. Por último, o processo de cura foi realizado em ambiente de laboratório a uma temperatura ambiente de cerca de 20°C e humidade relativa de cerca de 60% durante 28 dias.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE TERRA COMPACTADA

3.1 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é um dos principais mecanismos utilizados pela água para penetrar nos blocos em condições normais de utilização. A absorção de água pelos fenómenos de capilaridade é causada pela chuva de forma cíclica ou pela elevação capilar da água do solo de fundação.

Este ensaio permitiu determinar a capacidade de absorção de água pelos vasos capilares existentes no interior dos BTCs, fenómeno que ocorre devido à diferença de pressão entre a superfície da água livre em contacto com o bloco e a superfície da água no interior dos vasos capilares [7]. O ensaio foi realizado tendo em consideração a especificação E393 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal [45].

O comportamento da absorção de água por capilaridade (Figura 2) é representado por um gráfico com duas fases distintas. A primeira fase é referente ao mecanismo de transporte em materiais porosos, na qual, a penetração depende da taxa de absorção da superfície em contacto com a água. Este troço é definido até que haja uma alteração brusca do andamento do gráfico. A segunda fase inicia-se nesta alteração brusca de andamento do gráfico, onde o declive da reta tangente passa a ser menos acentuado, refletindo o cessar da absorção rápida e iniciando-se a absorção lenta.

Foi possível observar que a absorção de água por capilaridade foi mais rápida para a composição com incorporação de 75% de PCM (S10C75PCM) e mais lenta para a composição com 25% de PCM (S10C25PCM). Pode-se verificar também que a composição sem incorporação de PCM (S10C) apresenta uma absorção de água mais rápida em relação à composição com 25% e 50% de incorporação de PCM, bem como uma maior capacidade global de absorção de água, quando comparada a todas as argamassas dopadas com PCM. Este comportamento pode ser justificado pelo fato dos blocos de terra compactada sem incorporação de PCM possuírem maior quantidade de poros livres. Por outro lado, composições com maiores teores de PCM apresentam maior coeficiente de absorção capilar (Figura 3), devido à diminuição do tamanho dos poros da microestrutura do bloco, desde a ocupação parcial ou total dos poros dos CEBs pelo PCM e também pelo fato do PCM revestir a microestrutura de misturas de solo-cimento. Este comportamento já foi estudado e identificado em outros tipos de materiais, tais como em argamassas de cimento [15, 17].

De acordo com a Figura 3 foi possível verificar que a incorporação de 50% e 75% da PCM leva a um aumento no coeficiente de absorção da capilaridade da água em cerca de 46% e 236 %, respectivamente. Esse comportamento pode ser justificado pela diminuição da quantidade de água com a incorporação de um maior teor de PCM (Tabela 2). A presença de um menor teor de água prejudica o processo de hidratação do cimento, devido à maior dificuldade de contato da água com as partículas de cimento, que aumenta a porosidade do BTC.

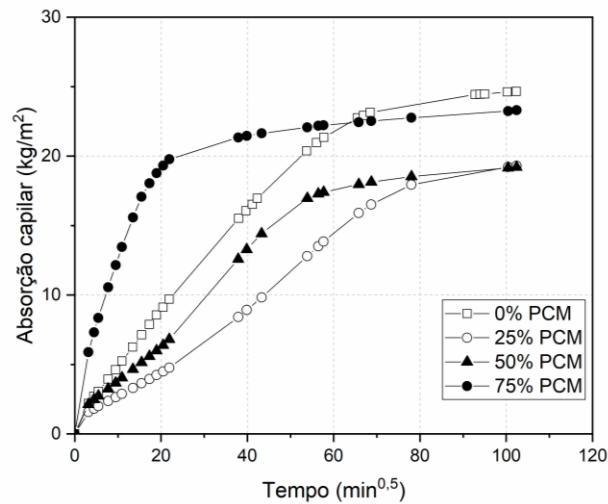


Figura 2: Absorção de água por capilaridade dos blocos de terra compactada.

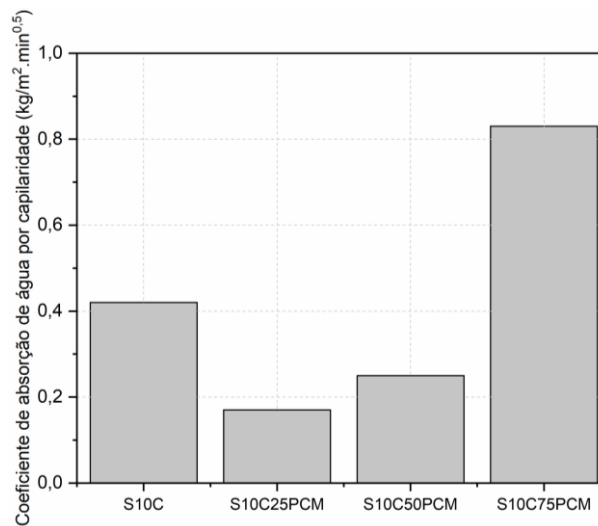


Figura 3: Coeficiente de absorção de água por capilaridade dos blocos de terra compactada.

3.2 Absorção de água por imersão

Outra forma de absorção de água nos BTCs deriva da sua imersão, o que influencia diretamente a sua durabilidade. Este ensaio permite a quantificação do volume de vazios acessíveis e é realizado com base na especificação LNEC E-394 [46].

De acordo com a Figura 4, pode verificar-se que as composições com incorporação de PCM possuem uma capacidade de absorção de água por imersão inferior à composição de referência (S10C). A incorporação do PCM resultou numa diminuição da absorção de água por imersão de mais de 24%. Esse comportamento pode ser justificado pela presença de PCM na microestrutura das misturas solo-cimento, uma vez que o PCM ocupará total ou parcialmente os poros da mistura e também pela natureza hidrofóbica do PCM.

Este comportamento encontra-se de acordo com a diminuição da porosidade observada para materiais cimentícios com incorporação de PCM não encapsulado [15, 17]. Por outro lado, é importante ressaltar que para composições com incorporação de PCM, foi verificado um aumento na absorção de água por imersão. Esse comportamento encontra-se relacionado com a diminuição da quantidade de água e com o aumento da incorporação de PCM (Tabela 2), visto que uma menor quantidade de água afeta a hidratação do cimento, devido à maior dificuldade no contato da água com as partículas de cimento, o que resulta numa porosidade maior.

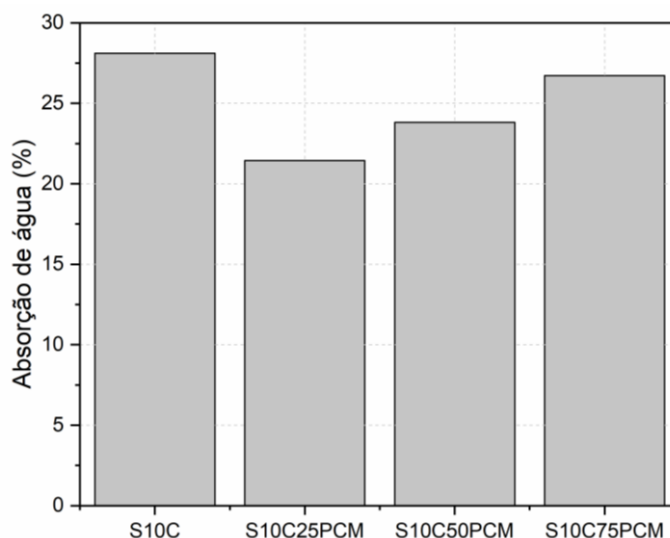


Figura 4: Absorção de água por imersão dos blocos de terra compactada.

3.3 Resistência à compressão

Para analisar o comportamento mecânico dos blocos de terra compactada, foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão. A realização destes ensaios teve por base as recomendações estipuladas na especificação NP EN 772-1 [47]. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento a uma velocidade de 500 N/s.

A Figura 5 apresenta a resistência à compressão dos blocos de terra compactada. Foi possível observar que a incorporação de 25% de PCM resultou num aumento da resistência à compressão de cerca de 10%. No entanto, a incorporação de teores mais elevados de PCM (50% e 75%), demonstrou contribuir para uma diminuição da resistência à compressão em cerca de 11% e 51%, respectivamente. Desta forma, foi ainda possível verificar que a incorporação de PCM em grandes quantidades (S10C50PCM e S10C75 PCM) é desfavorável para a resistência à compressão, uma vez que nestas composições se verifica a existência de uma menor quantidade de água, visto que o PCM é adicionado no estado líquido e contribui para a trabalhabilidade da mistura, contudo sem contribuir para a hidratação do cimento. Por outro lado, verificou-se uma maior porosidade nestas composições (Figura 4), o que também contribui para a diminuição do seu desempenho mecânico. No sentido contrário, para composições com baixos teores de PCM (S10C25PCM), verificou-se um ligeiro aumento da resistência à compressão, que pode ser justificado pelo fato de a quantidade de água presente ser suficiente para a hidratação do cimento. A diminuição da resistência à compressão de argamassas cimentícias com incorporação direta de PCM também foi identificada em outros trabalhos [15].

A resistência à compressão dos BTCs varia de acordo com o tipo de solo e a utilização de ligantes ou adjuvantes. Atualmente, não existe um valor mínimo regulamentado para esta característica. No entanto, vários autores apresentam valores indicativos que os BTCs devem cumprir (Tabela 4) [48-51]. Assim, foi possível concluir que todas as composições apresentadas apresentam uma resistência à compressão superior aos padrões mínimos estabelecidos em diversos países. Desta forma e mesmo tendo em consideração a diminuição da resistência à compressão observada com a incorporação do PCM foi possível verificar a viabilidade de utilização destes BTCs. Por outro lado, a resistência à compressão apresentada pelos blocos de terra compactada aditivados com PCM é mais elevada comparativamente à resistência à compressão dos tijolos convencionais, cujos valores se encontram compreendidos entre 1,5 a 1,9 MPa [52].

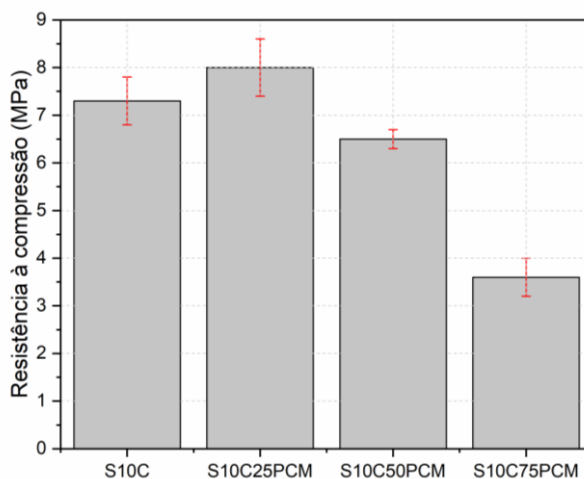


Figura 5: Resistência à compressão dos blocos de terra compactada.

Tabela 4: Resistência à compressão mínima (MPa).

AUTOR	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
NTC-ISO-TS 17234	2.0
NBR 8491	1.7
UNE 41410	1.3
DIN 18945	2.5

3.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é a propriedade que determina a rigidez dos BTCs. Para sua determinação foram utilizados LVDTs, que permitiram registrar os valores de deformação do bloco de acordo com o carregamento da célula de carga a uma força de 500 N/s.

A Figura 6 apresenta as curvas tensão-deformação das diferentes composições testadas. A determinação do módulo de elasticidade secante em compressão foi realizada com base na especificação EN 12390-13: 2013 [53].

A Figura 7 apresenta o módulo de elasticidade secante dos blocos de terra compactada. A incorporação de 25% PCM não causou alteração significativa no módulo de elasticidade. Porém, a incorporação de teores de 50% e 75% da PCM resultou numa redução de 41% e 72%, respectivamente. Este comportamento pode ser justificado pelo fato do PCM possuir um módulo de elasticidade inferior aos demais constituintes da mistura, sendo que se trata de um material polimérico e os demais constituintes de materiais minerais. A existência de um menor módulo de elasticidade indica uma maior ductilidade do material, o que se torna mais vantajoso do ponto de vista da execução de edifícios com esta técnica construtiva.

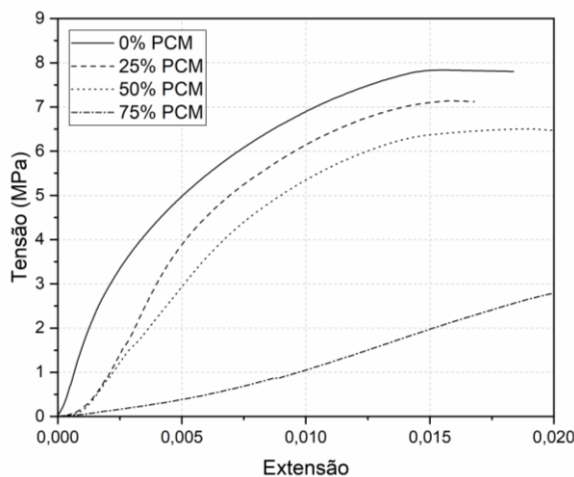


Figura 6: Curvas de tensão - extensão dos blocos de terra compactada.

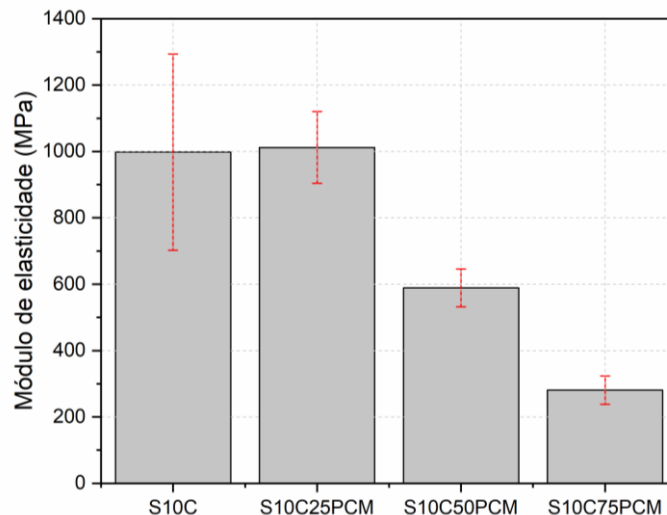


Figura 7: Módulo de elasticidade dos blocos de terra compactada.

3.5 Degradação face à ação da chuva

O ensaio de desgaste face à ação da chuva consiste em avaliar o comportamento dos BTCs em relação à degradação causada pela queda da água em suas faces.

Para a execução do ensaio foi adoptada a metodologia proposta por REZENDE *et al.* [54], que avalia a erosão pela chuva ocorrida na alvenaria exterior durante 50 anos de exposição, em condições climáticas de Portugal.

Inicialmente os blocos de terra compactada foram colocados numa estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até a massa constante. Posteriormente, os BTCs foram colocados sob a malha metálica do simulador da água da chuva, expondo os BTCs durante 120 minutos a um jato de água cônico com um caudal de 14,26 l/min a uma pressão de saída de 45 kPa. Após a realização do ensaio, os BTCs foram colocados numa superfície não absorvente durante 30 minutos, sendo registada a sua massa húmida. Por último, os BTCs foram colocados novamente na estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem a massa constante. Este processo foi repetido três vezes de forma a completar e simular três ciclos de teste.

Para determinar a degradação e absorção de água da chuva, foram utilizadas as equações (1) e (2).

$$P_M = (m_i - m_f) \times m_i^{-1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

P_M - Perda de massa por degradação face à ação da chuva (%),

m_i - Massa seca antes da realização do ensaio (g),

m_f - Massa seca após a realização do ensaio (g).

$$A = (m_h - m_f) \times m_h^{-1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

A - Absorção da água da chuva (%),

m_h - Massa húmida após a realização do ensaio (g),

m_f - Massa seca após a realização do ensaio (g).

De acordo com a Tabela 5 foi possível observar um aumento na perda de massa por degradação face à ação da chuva com a incorporação de PCM. A incorporação de 25% de PCM originou um aumento de cerca de 150% na perda de massa por degradação. Este aumento é mais expressivo com a incorporação de maiores teores de PCM. Este comportamento encontra-se associado ao fato da incorporação do PCM originar uma diminuição da resistência à compressão dos BTCs (Figura 5) e devido ao seu aumento na porosidade, indicado pelo aumento da absorção de água por imersão (Figura 4).

Tabela 5: Perda de massa e absorção de água face à ação da água da chuva nos blocos de terra compactada.

COMPOSIÇÃO	PERDA DE MASSA POR DEGRADAÇÃO FACE À AÇÃO DA CHUVA (%)	ABSORÇÃO DA ÁGUA DA CHUVA (%)
S10C	0.044	11.86
S10C25PCM	0.110	4.92
S10C50PCM	0.142	5.77
S10C75PCM	0.228	10.40

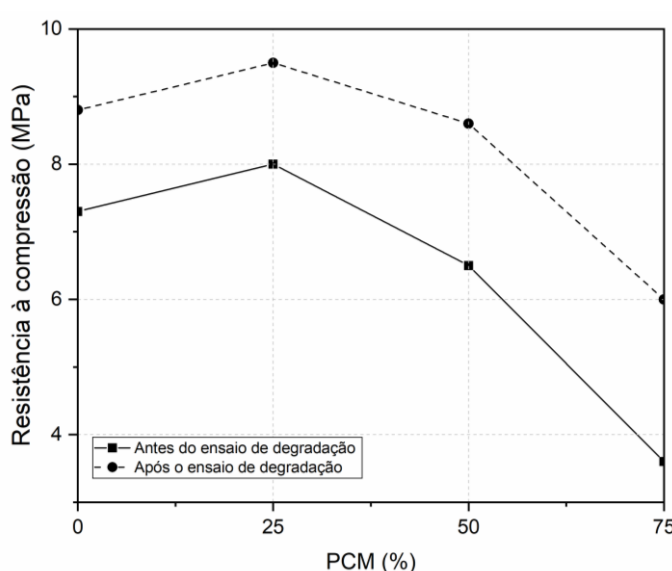
Relativamente à absorção da água da chuva (Tabela 5) foi possível observar uma diminuição de cerca de 59% com a incorporação de 25% de PCM. Porém, a incorporação de maiores teores de PCM originou uma diminuição na absorção da água da chuva menos significativa. Mais uma vez, esse comportamento é justificado pela presença de PCM nos poros da mistura e pela sua natureza hidrofóbica (Figura 2 e 3).

3.6 Resistência à compressão após a degradação face à ação da chuva

A realização deste ensaio teve como principal objetivo avaliar o comportamento mecânico dos BTCs após sua exposição a um ambiente agressivo. Os testes foram realizados com base na norma NP EN 772-1 [47].

De acordo com a Figura 8, pode concluir-se que contrariamente ao esperado, a resistência à compressão dos blocos de terra compactada após o ensaio de degradação face à ação da chuva aumentou em mais de 17%, comparativamente com a resistência à compressão dos BTCs antes da realização do ensaio. Este comportamento deve-se ao fato dos BTCs terem sido colocados numa estufa a 105°C após a realização do ensaio, o que permitiu acelerar o processo de hidratação do cimento, resultando num aumento do seu comportamento mecânico.

Foi ainda possível verificar que a incorporação de teores mais elevados de PCM originou um aumento mais significativo na resistência à compressão após a submissão dos BTCs aos ensaios de degradação face à ação da água da chuva. Esse comportamento encontra-se relacionado com o aumento da capacidade de absorção de água na presença de um maior teor de PCM (Figura 3, Figura 4 e Tabela 5). Considerando que a incorporação de PCM no estado líquido resultou na diminuição da quantidade de água presente nas misturas (Tabela 3) com o intuito de manter a sua trabalhabilidade inalterada, pode concluir-se que a água da chuva absorvida também contribui para a hidratação do cimento que ainda não havia sido quimicamente combinado com a água, aumentando assim o desenvolvimento da resistência à compressão.

**Figura 8:** Resistência à compressão antes e depois do ensaio de degradação face à ação da chuva dos blocos de terra compactada.

3.7 Termogravimetria

Os ensaios de termogravimetria medem a variação da massa da amostra (perda ou ganho) em função da variação de temperatura imposta à composição analisada. O ensaio foi realizado com recurso a um equipamento específico da TROXLER modelo 4155B.

Os resultados dos ensaios de termogravimetria consistem numa curva térmica que representa a variação da massa das amostras em função da temperatura, que registra os fenômenos energéticos desenvolvidos durante o processo de variação da temperatura.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos para as composições analisadas. Pode-se concluir que a composição de referência apresenta uma maior perda de massa, o que pode ser justificado em parte pela presença de um maior teor de água que tenha sido evaporada durante o ensaio, uma vez que esta composição apresenta um teor de água mais elevado (Tabela 3).

Foi ainda possível observar nas argamassas aditivadas com PCM, a existência de três pontos de inflexão, os quais foram identificados a aproximadamente 100°C, 200°C e 400°C. A presença de mudança de declive nas curvas a 100°C encontra-se relacionada com a perda da água quimicamente não combinada, onde a água presente nos poros de grandes dimensões evapora. O pico a uma temperatura de aproximadamente 200°C diz respeito ao ponto de inflamação do PCM presente na amostra [55]. Por fim, o pico apresentada a aproximadamente 400°C está relacionado com a desidroxilação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) em óxido de cálcio e água ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$) [15, 56].

É importante notar que as composições com incorporação de PCM apresentam curvas menos pronunciadas. Esse comportamento encontra-se associado à presença de um menor teor de água nas composições aditivadas com PCM, o que provoca um atraso no processo de hidratação do cimento e, conseqüentemente, uma menor formação de hidróxido de cálcio.

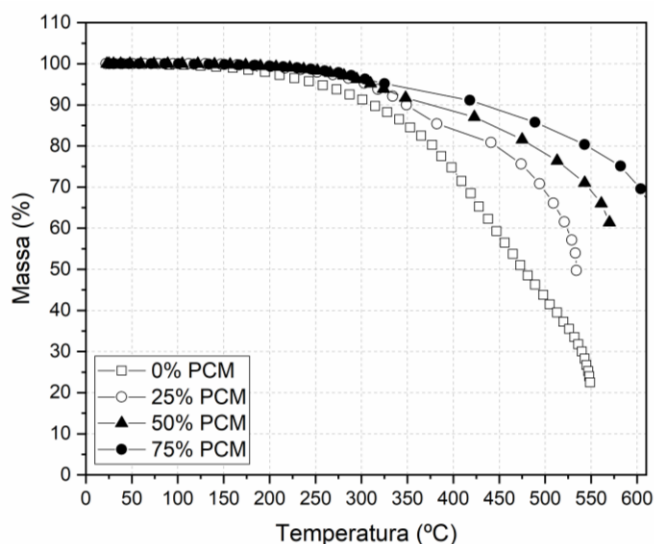


Figura 9: Curva termogravimétrica dos blocos de terra compactada.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou as propriedades físicas e mecânicas de blocos de terra compactada com incorporação de material de mudança de fase puro, ou seja, não encapsulado. Com base nos resultados obtidos, pode concluir-se que a adição de PCM originou algumas alterações nas principais propriedades dos BTCs, tais como a absorção de água por capilaridade e imersão, resistência à compressão, módulo de elasticidade, degradação face à ação da chuva e termogravimetria.

A incorporação do PCM não encapsulado originou uma diminuição na absorção de água por capilaridade e imersão, devido à ocupação parcial ou total dos poros da argamassa pelo PCM.

Por outro lado, foi ainda possível concluir que a incorporação de PCM não encapsulado resultou numa diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, devido à presença de menor teor de água, o que afetou negativamente os processos de hidratação do cimento. Contudo, todas as composições desenvolvidas para os BTCs apresentaram uma resistência à compressão superior à resistência mínima esta-

belecida na normalização de diversos países.

No que confere ao ensaio de degradação face à ação da chuva foi possível observar um aumento da degradação com a incorporação de PCM, o que é justificado pela diminuição da resistência à compressão dos blocos de terra compactada e pelo seu aumento na porosidade.

Relativamente à resistência à compressão após o ensaio de degradação face à ação da água da chuva foi possível verificar um aumento no seu desempenho, comparativamente à sua resistência à compressão antes da realização do ensaio. Este comportamento é justificado pela aceleração do processo de hidratação do cimento em estufa e pela absorção da água da chuva, que permitiu combinar cimento que não tinha sido quimicamente combinado durante o processo de fabrico dos BTCs.

Por último, os ensaios de termogravimetria revelaram que a inflamação do PCM ocorre a cerca de 200°C e comprova que a desidroxilação do hidróxido de cálcio ocorre a cerca de 400°C. Por outro lado, ainda foi possível observar que a presença de PCM afeta as reações de hidratação da mistura solo-cimento, pela formação de uma menor quantidade de hidróxido de cálcio.

Em suma, pode concluir-se que a composição de blocos de terra compactada com incorporação de 25% de PCM (S10C25PCM) é aquela que revela um comportamento mais satisfatório do ponto de vista de absorção de água, resistência à compressão e degradação face à ação da água da chuva.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito das Unidades de I&D Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC) sob a referência UIDB/04047/2020 e do Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), sob referência UIDB/04029/2020.

6. REFERÊNCIAS

- [1] COTTRELL, J. A., ALI, M., TATARI, A., *et al.*, “An investigation into the influence of geometry on compressed earth building blocks using finite element analysis”. *Construction and Building Materials*, v. 273, e121997. Mar. 2021.
- [2] BEN MANSOUR, M., OGAM, E., JELIDI, A., *et al.*, “Influence of compaction pressure on the mechanical and acoustic properties of compacted earth blocks: An inverse multi-parameter acoustic problem”, *Applied Acoustics*, v.125, pp. 128- 135, Out. 2017.
- [3] DANSO, H., MARTINSON, B., ALI, M., *et al.*, “Performance characteristics of enhanced soil blocks: A quantitative review”, *Building Research & Information*, v. 43, pp. 253–262, 2015.
- [4] TURGUT, P., YESILATA, B., “Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks”, *Energy and Buildings*, v. 40, pp. 679–688, 2008.
- [5] OTI, J.E., KINUTHIA, J.M., “Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use”, *Applied Clay Science*, v. 58, pp. 52–59, Abr. 2012.
- [6] WALKER, P.J., “Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks”, *Cement and Concrete Composites*, v. 17, pp. 301-310, 1995.
- [7] MORELL, J., PKLA, A., WALKER, P., “Compressive strength testing of compressed earth blocks”, *Construction and Building Materials*, v. 21, pp. 303–309, Feb. 2007.
- [8] COLINART, T., VINCESLAS, T., LENORMAND, H., *et al.*, “Hygrothermal properties of light-earth building materials”, *Journal of Building Engineering*, v. 29, e101134, Maio 2020.
- [9] CAGNON, H., AUBERT, J.E., COUTAND, M., *et al.*, “Hygrothermal properties of earth bricks”, *Energy and Buildings*, v. 80, pp. 208–217, Set. 2014.
- [10] MEDJELEKH, D., ULMET, L., DUBOIS, F., “Characterization of hygrothermal transfers in the unfired earth”, *Energy Procedia*, v. 139, pp. 487–492, Dez. 2017.
- [11] NIANG, I., MAALOUF, C., MOUSSA, T., *et al.*, “Hygrothermal performance of various Typha–clay composite”, *Journal of Building Physics*, v. 42, pp. 316–335, 2018.
- [12] TOMMERUP, H., SVENDSEN, S., “Energy savings in Danish residential building stock”, *Energy and Buildings*, v. 38, pp. 618–626, Jun. 2006.
- [13] CUNHA, S., AGUIAR, J.B., “Phase Change Materials and Energy Efficiency of Buildings: A Review of Knowledge”, *Journal of Energy Storage*, v. 27, e101083, Feb. 2020.
- [14] CUNHA, S., AGUIAR, J.B., TADEU, A., “Comportamento térmico de argamassas com incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) no clima português”, *Revista Matéria – Rio de Janeiro*, v. 22, e-11889, 2017.
- [15] CUNHA, S., SILVA, M., AGUIAR, J.B., “Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure”, *Construction and Building Materials*, v. 230,

e117011, Jan. 2020.

- [16] ALASSAAD, F., TOUATI, K., LEVACHER, D., *et al.*, “Impact of phase change materials on lightened earth hygroscopic, thermal and mechanical properties”, *Journal of Building Engineering*, v. 41, e102417, Set. 2021.
- [17] Cunha, S., Leite, P., Aguiar, J. B., “Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials”, *Journal of Energy Storage*, v. 30, e101439, Ago. 2020.
- [18] ENTROP, A.G., BROUWERS, H.J.H., REINDERS, A.H.M.E., “Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses”, *Solar Energy*, v. 85, pp. 1007–1020, Maio 2011.
- [19] NAGANO, K., TAKEDA, S., MOCHIDA, T., *et al.* “Study of a Floor Supply Air Conditioning System Using Granular Phase Change Material to Augment Building Thermal Mass Storage – Heat Response in Small Scale Experiments”, *Energy and Buildings*, v. 38, pp. 436-446, Maio 2006.
- [20] CABEZA, L., CASTELL, A., BARRENECHE, C., *et al.*, “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, pp. 1675-1695, Abr. 2011.
- [21] SHILEI, L., NENG, Z., GUOHUI, F., “Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in winter”, *Energy and Buildings*, v. 38, pp. 18-24, Jan. 2006.
- [22] KOSCHENZ, M., LEHMANN, B., “Development of a Thermally Activated Ceiling Panel with PCM for Application in Lightweight and Retrofitted Buildings”, *Energy and Buildings*, v. 36, pp. 567-578, Jun. 2004.
- [23] PASUPATHY, A., ATHANASIOS, L., VELRAJ, R., *et al.* “Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management”, *Applied Thermal Engineering*, v. 28, pp. 556–565, Abr. 2008.
- [24] HUSSEIN, A., PAYAM, N., MUHDZAIMI, A., *et al.*, “A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, pp. 1470-1497, Jul. 2016.
- [25] TUMIRAH, K., MOHD, Z., ZULKARNAIN, Z., *et al.*, “Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, pp. 916-928, Maio 2016.
- [26] LIN, K., ZHANG, Y., XU, X., *et al.* “Experimental Study of Under-Floor Electric Heating System with Shape-Stabilized PCM Plates”, *Energy and Buildings*, v. 37, pp. 215-220, Mar. 2005.
- [27] LU, S., XU, B., TANG, X., “Experimental study on double pipe PCM floor heating system under different operation strategies”, *Renewable Energy*, v. 145, pp. 1280-1291, Jan. 2020.
- [28] BELLOS, E., TZIVANIDIS, C., MOSCHOS, K., *et al.*, “Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems”, *Energy Conversion and Management*, v. 120, pp. 306-319, Jul. 2016.
- [29] CUNHA, S., AGUIAR, J.B., FERREIRA, V.M., *et al.*, “Mortars Based in different binders with incorporation of phase change materials: Physical and mechanical properties”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 19, pp. 1216-1233, 2015.
- [30] OLIVER, A., “Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat”, *Energy and Buildings*, v. 48, pp. 1-7, Maio 2012.
- [31] SAXENA, R., RAKSHIT, D., KAUSHIK, S., “Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution”, *Solar Energy*, v. 183, pp. 276-284, Mar. 2019.
- [32] BAHRAR, M., DJAMAI, Z., MANKIBI, M., *et al.*, “Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage”, *Sustainable Cities and Society*, v. 41, pp. 455-468, Ago. 2018.
- [33] KUZNIK, F., VIRGONE, J., ROUX, J., “Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation”, *Energy and Buildings*, v. 40, pp. 148-156, 2008.
- [34] GRIFFITHS, P., EAMES, P., “Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium”, *Applied Thermal Engineering*, v. 27, pp. 1756–1760, Jul. 2007.
- [35] KHERADMAND, M., AZENHA, M., AGUIAR, J.B., *et al.* “Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings”, *Energy*, v. 94, pp. 250-261, Jan. 2016.
- [36] CASTELL, A., MARTORELL, I., MEDRANO, M., *et al.* “Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling”, *Energy and Buildings*, v. 42, pp. 534-540, Abr. 2010.
- [37] SANTOS, T., KOLOKOTRONI, M., HOPPER, N., *et al.* “Experimental study on the performance of a new encapsulation panel for PCM’s to be used in the PCM-Air heat exchanger”, *Energy Procedia*, v. 161, pp. 352-359, Mar. 2019.
- [38] JIN X., ZHANG X., “Thermal analysis of a double layer phase change material floor”, *Applied Thermal Engineering*, v. 31, pp. 1576-1581, Jul. 2011.
- [39] SHILEI, L., GUOHUI, F., NENG, Z., *et al.* “Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards”, *Energy and Buildings*, v. 39, pp. 1088-1091, Out. 2007.
- [40] ZHOU, G., ZHANG, Y., ZHANG, Q., *et al.* “Performance of a Hybrid Heating System with Thermal Storage Using Shape-Stabilized Phase Change Material Plates”, *Applied Energy*, v. 84, pp. 1068-1077, Out. 2007.
- [41] LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC), Especificação E 196, “Solos – Análise Granu-

lométrica”, 1966.

[42] INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ), NP 83, “Densidade das partículas - peso específico”, 1965.

[43] INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ), NP143, “Solos - Determinação dos limites de consistência”, 1969.

[44] WALKER, P., HB 195 - The Australian earth building handbook, Standards Australia, 2002.

[45] LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC), Especificação E 393, “Betões - Determinação da absorção de água por capilaridade”, 1993.

[46] LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC), Especificação E 394, Betões - Determinação da absorção de água por imersão, 1993.

[47] INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ), NP EN 772-1, Métodos de ensaio para unidades de alvenaria, Parte 1 - Determinação da resistência à compressão”, 2002.

[48] NORMALIZAÇÃO ESPANHOLA, UNE 41410, Bloques de tierra comprimida para muros y taboques/Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo, 2008.

[49] NORMALIZAÇÃO COLUMBIANA, NTC 5324, Bloques de piso de hormigón para muros y divisiones. Definiciones Especificaciones. Métodos de prueba. Condiciones de entrega, 2003.

[50] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 8491, Tijolo de solo-cimento – Requisitos, 2012.

[51] INSTITUTO ALEMÃO DE NORMALIZAÇÃO, DIN 18945, Earth blocks - Requirements, test and labelling, 2018.

[52] PRECERAM, <https://preceram.pt/tradicional/>, acesso em 25 de maio de 2021.

[53] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN), EN 12390-13, Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression, 2013.

[54] REZENDE, M., EIRES, R., CAMÕES, A., *et al.*, “Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas para teste acelerado de degradação”, *Engenharia Civil UM*, v. 53, pp. 17–28, 2016.

[55] Rubitherm, RT22HC, <http://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>, acesso em 25 de maio de 2021.

[56] ANJOS, M., CAMÕES, A., JESUS, C., *et al.*, “Hydration assessment of cement pastes with high levels of mineral additions”, *Engenharia Civil UM*, v. 44, pp. 41-58, 2012.

ORCID

Sandra Cunha	https://orcid.org/0000-0002-6384-1355
André Campos	https://orcid.org/0000-0002-9400-4023
José Aguiar	https://orcid.org/0000-0003-3954-5721
Francisco Martins	https://orcid.org/0000-0001-6088-7860