
COMPÓSITOS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA BLOCOS CONSTRUTIVOS

Patrícia P. Leão^{1*}, Rute M.G. Eires²

1: Arquiteta e Urbanista
Me. Construção e Reabilitação Sustentáveis UMINHO
Email: ppleao.arq@gmail.com

2: Professora Auxiliar, DEC / CTAC - UMINHO
Escola de Engenharia, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães – Portugal
Email: rute@civil.uminho.pt

Resumo Neste estudo investigou-se o uso do bagaço da cana-de-açúcar (BCA) na produção de blocos construtivos. A reciclagem desse resíduo industrial agrega valor social e econômico aos compósitos, reduz custos de construção, viabiliza o uso de sistemas pré-fabricados, e possibilita a reutilização do material ao final do ciclo de vida do edifício. A substituição de blocos formados por blocos de BCA visa reduzir a emissão de gases poluentes e oferecer um destino alternativo à combustão do bagaço para cogeração de energia. Como ligante, usou-se cal aérea e/ou solo. Ambos conferem boa resistência mecânica para vedações não estruturais. O bloco de BCA com solo atingiu o melhor desempenho: 2,6 MPa na compressão e 2,1 MPa na flexão, enquanto o de BCA com cal alcançou 1,76 MPa e 1,7 Mpa, respectivamente. A elevada quantidade de fibras na mistura BCA/cal proporciona um isolamento térmico substancialmente maior que o de tijolo cerâmico, semelhante ao concreto leve com cânhamo. Os blocos com cal têm maior resistência à ação da água e menor perda de resistência mecânica quando saturados. Todavia, o alto coeficiente de absorção de água exige a aplicação de argamassa nas superfícies expostas à intempérie. Estes compósitos podem colaborar na redução da carência habitacional e na qualidade do ambiente construído.

Palavras-chave: bloco construtivo, bagaço de cana-de-açúcar, cal, solo

Abstract In this study, the use of sugarcane bagasse (BCA) in the production of building blocks was investigated. The recycling of this industrial waste adds social and economic value to the composites, reduces construction costs, makes the use of prefabricated systems feasible, and makes it possible to reuse the material at the end of the building's life cycle. The replacement of supplied blocks with BCA blocks aims to reduce the emission of polluting gases and offer an alternative destination to the combustion of bagasse for energy cogeneration. As a binder, aerial lime and/or soil were used. Both provide good mechanical strength for non-structural seals. The BCA block with soil achieved the best performance: 2.6 MPa in compression and 2.1 MPa in bending, while the BCA with lime achieved 1.76 MPa and 1.7 MPa, respectively. The high number of fibers in the BCA/lime mixture provides a better thermal insulation than the clay brick, like the hempcrete. Lime blocks have greater water resistance and less loss of mechanical strength when saturated. However, the high coefficient of water absorption requires the application of mortar on surfaces exposed to the weather. These composites can help reduce housing shortages and improve the quality of the built environment.

Keywords: building block, sugarcane bagasse, lime, soil.

1. INTRODUÇÃO

Em face as metas estabelecidas para o desenvolvimento global sustentável, entre outras providências, o setor da construção civil deve empenhar-se em reduzir o consumo de materiais não renováveis, o consumo de energia fóssil e as emissões dos gases de efeito estufa.

Encontrar destino para sobras inquantificáveis de desperdícios tem sido tarefa constante. A par da necessidade de pesquisas em busca de melhor desempenho para o setor da construção civil, o presente estudo buscou desenvolver um material capaz de responder de forma complementar às diversas demandas contemporâneas, a partir do resgate de tecnologias em obsolescência, entretanto, aproveitáveis no contexto da sustentabilidade, como por exemplo, o adobe e o uso de fibras naturais e cal.

1.1. Aproveitamento de resíduo agroindustrial na construção civil

A indústria sucroalcooleira gera uma relevante produção de biomassa energética, com autonomia, destaque e influência em diversos segmentos globais (econômico, social, ambiental e agrícola) [1]. O bagaço de cana-de-açúcar (BCA) é o principal resíduo dessa indústria e apresenta grande potencial de aproveitamento como matéria-prima para a produção de outros materiais.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. A previsão da safra para o período 2021/2022 é de 585,18 milhões de toneladas. A cana processada gera, em peso, de 25 a 30% de bagaço. Nas usinas brasileiras o BCA é utilizado para a cogeração de energia elétrica e o excedente, como carreador de suplementação nutricional animal e fertilizante para agricultura. Devido à inconsistência de nutrientes, este processo serve mais ao descarte do que ao aproveitamento do material.

1.2. O concreto de cana-de-açúcar

A proposta do bloco de bagaço da cana-de-açúcar (BCA) e Cal é inspirado no compósito similar à base de cânhamo e Cal, brevemente apresentado abaixo. Estudou-se também o compósito obtido pela substituição da Cal por solo como ligante natural, tal como o adobe, em busca de uma solução mais sustentável, na medida em que não usa materiais calcinados na formulação.

Todavia, conforme as características dos materiais, em um compósito com fibras e solo é conveniente a adição de um ligante capaz de melhorar a resistência à ação da água. A cal apresenta esta vantagem porque combate a alta absorção hídrica, e favorece a permeabilidade ao vapor, formando uma barreira de calcário em torno da fibra vegetal.

No compósito sem solo na matriz, a Cal é capaz de agregar e manter as propriedades essenciais à resistência e durabilidade do material. Como desvantagem, o longo tempo de carbonatação impacta o tempo de cura, como se verifica nos estudos com cânhamo [8].

As cinzas de BCA têm desempenho comprovado como material pozolânico eficiente nos compósitos preparados com cimento [9-10]. Desde que possa melhorar ou preservar a resistência e a durabilidade do material, é possível que sua adição como material pozolânico possa trazer mais um benefício ambiental, nomeadamente pelo aproveitamento do resíduo final.

Neste trabalho foram desenvolvidos três compósitos com bagaço da cana-de-açúcar, tendo em vista a confecção de blocos para a construção de paredes. Trata-se de compósitos com adições relevantes, na ordem de 30% a 35% de fibras, em formulações com cal aérea hidratada; com cal e solo; e com solo somente. Adicionalmente, foi ainda testada a adição de cinza de BCA a fim de comparar o efeito pozolânico deste material com o efeito do uso de metacaulino.

Os provetes preparados no decorrer do estudo foram submetidos a testes e ensaios laboratoriais, com o objetivo de mensurar o desempenho mecânico, higroscópico e térmico dos compósitos e assim

verificar a viabilidade de aplicação do produto, e ainda prospectar o potencial para atuar como coadjuvante estrutural.

1.3. O Concreto de Cânhamo

O uso de fibras de cânhamo na construção já vem de muito tempo. Há argamassas de solo com cânhamo na Índia com cerca de 1500 anos [2]. O primeiro “concreto de cânhamo com cal” foi desenvolvido por Charles Rasetti em 1987, na França [3]. O núcleo lenhoso, com elevado teor de sílica, interage com a cal e promove o endurecimento da mistura [4]. Utilizadas para a produção do concreto de cânhamo (ou *hempcrete*), o material de construção é muito estudado e utilizado na União Europeia.

As paredes de bloco de cânhamo funcionam como isolamento térmico e acústico e apresentam elevada inércia térmica [4]. O material é de fácil adaptação climática e fácil produção local. Previne a ocorrência de condensações devido à respirabilidade das paredes e sua capacidade de absorção e resistência à água impacta a qualidade do ambiente e a saúde dos habitantes [5].

Na avaliação do ciclo de vida, além de ser biodegradável, sequestra CO² da atmosfera, diminui o uso de materiais tóxicos e produção de resíduos, usa recursos renováveis e pode ser reciclado ao final do tempo útil do edifício, diminuindo assim o impacto ambiental [6-7]. Sua ductibilidade e capacidade de ajuste aos movimentos da edificação evitam o surgimento de fissuras. É um material não inflamável, não liberta fumos tóxicos e é resistente a insetos, fungos e bactérias [7].

2. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na investigação experimental são: o bagaço de cana-de-açúcar como agregado; como ligantes, a cal aérea, cinza de BCA, solo do Alentejo e de Labruges, metacaulino; e, como aditivo, o bórax.

2.1. Bagaço de Cana - BCA

O BCA utilizado procede da Ilha da Madeira, onde a cana-de-açúcar é cultivada para a produção do rum nacional. O preparo do material utilizado nas misturas exigiu o espalhamento do bagaço húmido sobre lona plástica, em ambiente fechado, onde foi revirado 2 vezes por semana para secar de forma natural e homogênea, durante 4 semanas, até apresentar-se seco. O BCA é composto genericamente por celulose (50%), hemicelulose (25%) e lignina (20%) [11]. Em análise morfológica (Fig. 1, a e b) de amostras de bagaço de cana verificou-se que o comprimento do BCA varia entre 10 e 30 mm, mas na sua maioria são de 15 mm. Os pedaços de BCA, são constituídos por fibras longas [12] com diâmetros na faixa de 0,2 a 0,5 mm abaixo de 100 µm e superfície escamosa (Fig. 1 c).

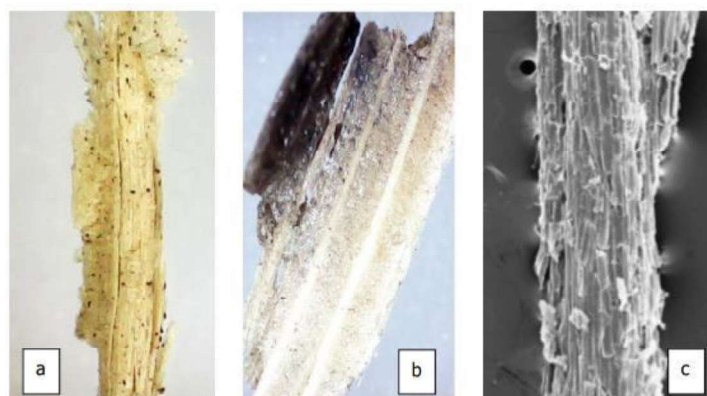


Fig. 1, a e b – Amostras de BCA secas analisadas no microscópio ótico (ampliação a 20x) e c – Feixe de fibras secas analisadas ao microscópio (adaptado de Oliveira [12])

2.2. Solos utilizados

Foram utilizados dois tipos de solos separadamente. O solo utilizado na primeira e segunda campanha é proveniente do Alentejo, região sul de Portugal, aqui designado por Solo 1. Apresenta boa distribuição granulométrica, com 15,9% de cascalho, 47,2% de areia, 17,6% de silte e 19,4% de argila. A percentagem de argila deste solo é considerada suficiente para a construção, pois atinge pouco mais de 20% do volume analisado. A peneiração do solo é necessária para adequar a quantidade de cascalho e se obter 4 mm como máxima dimensão. Na terceira campanha, foi utilizado um solo proveniente de Labruge – Horeiró, Vila do Conde, aqui designado de Solo 2. Este solo apresentou 65% de material fino (silte + argila), sendo a fração de argila equivalente a 15%. O tipo de agregado presente é uma areia fina, diâmetro máximo 2 mm, com distribuição de granulometria bem graduada. A percentagem de areia presente neste solo é pequena.

2.3. Cal hidratada

Foi usada a cal aérea hidratada (hidróxido de cálcio), fabricada em Portugal. Trata-se de cal cálcica, classificada como CL90-S segundo a norma EN 459-1:2015 que apresenta a densidade aparente de 0,46 g/cm³.

2.4. Metacaulino

O metacaulino refere-se à calcinação de materiais cauliniticos, que é uma argila mineral com um teor elevado de dióxido de silício, ocorre a temperaturas entre 700 e 800°C. A reação do metacaulino com cal produz o silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidratos de alumínio. Processado com menos energia do que o cimento, o metacaulino é usado como pozolana, a fim de melhorar a resistência mecânica de misturas com cal ou cimento. O metacaulino utilizado neste estudo foi produzido em Portugal e caracteriza-se por coloração laranja-claro, o que influencia a cor final do compósito.

2.5. Cinzas de BCA (CBCA)

Para a utilização das cinzas do BCA nesta investigação, uma porção de BCA pesando 800 g foi levada à mufla, a 600°C. O processo foi realizado em 3 ciclos: aquecimento (1 hora), queima (4 horas) e esfriamento lento e integral. A cinza resultante pesou 106 g. Observou-se que o processo utilizado não produziu a calcinação idêntica à do BCA obtido industrialmente, uma vez que os estudos de referência indicam que a CBCA corresponde a 0,6% do peso inicial do BCA, e aqui obteve-se CBCA na proporção

de 13,25% do peso inicial do BCA.

3. COMPOSIÇÕES E METODOLOGIAS

Uma campanha inicial de prospecção do potencial do material foi elaborada a fim avaliar as quantidades de ligante e água necessárias para formar um compósito com a trabalhabilidade adequada e resistências mínimas para o fabrico de blocos, de modo a estabelecer um planejamento em consonância com os resultados pretendidos. Os resultados de ensaios de flexão e compressão, aos 28 e 60 dias, obtidos nesta etapa preliminar foram balizadores para o planejamento da 1ª campanha do trabalho. Os ligantes, usados sozinhos ou combinados em proporções variáveis e acrescidos de água foram: solo, cal hidratada, metacaulino e cinzas de BCA. Uma pequena porção de borato de sódio (bórax) foi adicionado na mistura com metacaulino. Foram então realizadas três campanhas distintas, conforme a tabela 1:

A primeira, para avaliação do desempenho dos ligantes principais (cal e solo) e da combinação de ambos, com 30% de BCA;

A segunda para buscar o potencial máximo de sustentabilidade pelo aumento do teor de fibra e reduzir ainda mais o peso do material a fim de melhorar o comportamento térmico. Para tal, procurou-se verificar o efeito do aumento da quantidade de fibras de BCA nas misturas para 35%. Além disso, no intuito de reduzir a quantidade de cal, optou-se por se adicionar metacaulino e avaliar o seu comportamento pozolânico.

A terceira para avaliação da adição de cinzas de BCA enquanto material pozolânico, reajustando-se a quantidade de fibras ao teor da primeira campanha, mas reduzindo levemente a força de compactação na cofragem, de modo a não interferir no comportamento a nível térmico. A mistura de referência MR3 é um adobe sem adição de fibras e foi preparada com a finalidade de comparar os resultados e avaliar a resistência do solo utilizado.

Para verificar a trabalhabilidade dos compósitos obtidos efetuou-se um ensaio empírico conhecido pelo “método da bola”, que consiste em pegar numa amostra da mistura, e com as mãos fazer uma bola. Se a bola se mantiver bem formada e com boa consistência, significa que a trabalhabilidade do material está apta para a produção dos provetes.

COMPOSIÇÕES ESTUDADAS									
	Misturas	Materiais sólidos						Sólidos%	Água%
		BCA %	Ligante%						
			Cal	Solo	MKL	Cinza	BX		
1ª campanha	BC1	30	70	-	-	-	-	55	45
	BS1	30	-	70*	-	-	-	55	45
	BCS1	30	10	60*	-	-	-	55	45
2ª campanha	BC2	35	65	-	-	-	-	55	45
	BS2	35	-	65*	-	-	-	55	45
	BMKBx2	32	40,6	-	27	-	0,4	55	45
3ª campanha	BC3	30	70	-	-	-	-	55	45
	BS3	22	-	78**	-	-	-	55	45
	BCS3	20	60	20**	-	-	-	55	45
	BCCz3	26	68	-	-	6	-	55	45
	MR3	-	-	100**	-	-	-	70	30

Tabela 1 – Composições estudadas – (*) Solo 1, (**) Solo 2

3.1. Fabrico e condições de cura das amostras

Foram realizadas amostras de 40x40x160 mm para a maioria dos ensaios e uma amostra de 150x150x59 mm para o ensaio de condutibilidade térmica conforme a Figura 2.



Figura 2 – provetes para ensaios gerais e amostra para condutividade térmica.

O processo de mistura foi realizado num misturador de panela com tambor rotativo. O procedimento baseia-se nos métodos utilizados para a produção de concreto de cânhamo, como os utilizados por Kropidłowska [8]. A água foi adicionada parcialmente antes e depois do ligante ($\frac{1}{2}$ da quantidade antes e o restante depois). Cada amostra foi compactada manualmente em três camadas, utilizando um bloco de pedra e um martelo de borracha para compactar por igual. A descofragem aconteceu após 2 horas de repouso e os exemplares foram armazenados em armário seco e semifechado, em temperatura e humidade ambiente para o processo de cura (cerca de 20°C e uma humidade relativa de aproximadamente 50%).

3.2. Ensaio realizados

As misturas realizadas foram testadas quanto ao seu desempenho mecânico: à flexão e à compressão, aos 28, 60 e 90 dias, à exceção das misturas da segunda campanha, que em virtude da pandemia do COVID19, foram testadas somente aos 28 e aos 90 dias.

Os ensaios de resistência à flexão das misturas foram realizados de acordo com EN 1015-11:1999. Os testes foram conduzidos numa prensa hidráulica de ensaio universal, Lloyds Instruments (com uma capacidade máxima de 50 kN), com carga aplicada de 10 N/s. Utilizou-se de 3 a 6 espécimes por cada lote.

Os ensaios de resistência à força compressiva foram realizados em conformidade com a norma EN 1015-11:1999, utilizando-se as partes sobranes após a rotura dos provetes usados no ensaio de flexão. A força de 10 N/s foi aplicada no sentido mais desfavorável, perpendicular à compactação do material fibroso. A tensão de compressão foi obtida pela divisão da carga máxima suportada pela amostra por sua área de seção transversal, sendo obtida em N/mm².

A hipótese de que o compósito de BCA apresente um desempenho térmico semelhante ao do hempcrete estimulou o interesse em avaliar o comportamento com o BCA. Preparou-se uma amostra da mistura BC1 de 150 X 150 X 59 mm, testada numa caixa de calor calibrada, projetada e construída no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho [13], com base nas especificações da ASTM C1363. A caixa é composta por duas câmaras, a fria e a quente, e um anel de montagem colocado entre ambas. A placa do compósito foi colocada no centro do anel de montagem e a humidade relativa interna foi monitorada durante o ensaio. Foi considerado o método do medidor de fluxo de calor,

definido na norma ISO 9869-1 (BSI, 2014), pelo qual, um sensor e termopares são instalados na parte central da placa para medir as temperaturas. Com os valores do fluxo de calor (q) e as temperaturas da superfície (T), foi possível determinar a resistência térmica (Re) da placa, utilizando a Equação 1. O ΔT é a diferença entre a temperatura superficial nas câmaras quentes e frias. A resistência térmica da placa foi determinada usando as Equações 2 e 3, onde “ e ” é a espessura da amostra.

$$Re [(m^2 \cdot ^\circ C) / W] = \Delta T / q \quad (1)$$

$$U [W / (m^2 \cdot ^\circ C)] = 1 / Re \quad (2)$$

$$\lambda [W / m \cdot ^\circ C] = e / Re \quad (3)$$

Relativamente ao desempenho face à ação da água foram realizados ensaios absorção de água por capilaridade e por imersão. Os espécimes da primeira campanha aos 7 meses de cura e os da segunda, com 3,5 meses de cura. A natureza fibrosa do BCA e porosa do solo cru exigiu uma adaptação do processo de medição do coeficiente de absorção de água por capilaridade, comumente apresentado pela norma EN 1015-18:2002. Aplicou-se o método de Hall e Djerbib [1] para se obter uma boa indicação de desempenho dos blocos de terra compactada, que é uma adaptação do teste British Standard BS3921 (IRS). Aqui denominado IRS Oásis, o método foi de grande utilidade, pela especial vulnerabilidade da terra e da fibra face ao contato com a água. Para o ensaio foram usados espécimes de 40X40X160 mm, um de cada mistura da primeira e da segunda campanha (213 e 107 dias respectivamente), curados em temperatura e humidade ambiente. Os provetes foram cortados ao meio, medidos e pesados e organizados sobre um bloco esponjoso imerso em caixa com água até estabilizar sua capacidade máxima de absorção. O Oásis foi mantido saturado, com 2 cm fora de água, de modo a criar um contato entre este e as superfícies inferiores dos provetes. A partir desse momento começou-se a cronometrar os tempos de contato e a pesar as amostras após 5, 10, 15, 30 minutos e seguiu nas 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 24h.

Relativamente à absorção de água por imersão foram utilizados três espécimes, de 40 X 40 X 160 mm. Os da primeira campanha tinham 210 dias de cura (7 meses) e os dois da segunda, 105 dias de cura (3,5 meses), sempre em condições de temperatura e humidade ambiente. Depois de secos em estufa foram imersos em água à temperatura ambiente. Após a primeira hora os espécimes foram retirados da água e o excesso de água removido com papel absorvente. Em seguida foram pesados e devolvidos para a água, onde permaneceram por 24 horas, calculando-se a absorção de água após este tempo. Ao final do prazo de absorção os provetes foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, conforme o procedimento descrito anteriormente, para mensurar a perda de resistência face à exposição à água. Entretanto, somente os provetes de BCA com cal e os de BCA com cal e solo foram submetidos ao ensaio, pois os espécimes sem ligante hidráulico estavam muito fragilizados e não suportariam o teste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que não existem ainda normas para este tipo de materiais compósitos leves com fibras e ligantes à base de cal, as considerações serão feitas atendendo aos estudos sobre hempcrete referidos e aos guias técnicos sobre este produto da construção.

4.1. Desempenho a nível de resistências mecânicas

Como se vê nas figuras 3 e 4, do ponto de vista mecânico, o adobe sem fibras, MR3, apresenta melhor resistência à compressão do que as misturas com BCA, seguido pelo compósito BS1 com 30% de BCA e solo e então pela mistura BCS1, de BCA com solo e cal. Na resistência à flexão a adição das fibras apresentou vantagens tanto nas misturas BC1, com cal, como na BS1, com solo, e na BCS1, com cal e solo, superando a mistura de referência MR3, de solo puro. A força de compactação afetou

positivamente as misturas, uma vez que os melhores desempenhos são registados na primeira campanha, em que todos os provetes apresentam maior densidade. O tempo de cura nos compósitos com solo e fibra, sem cal, não foi relevante.

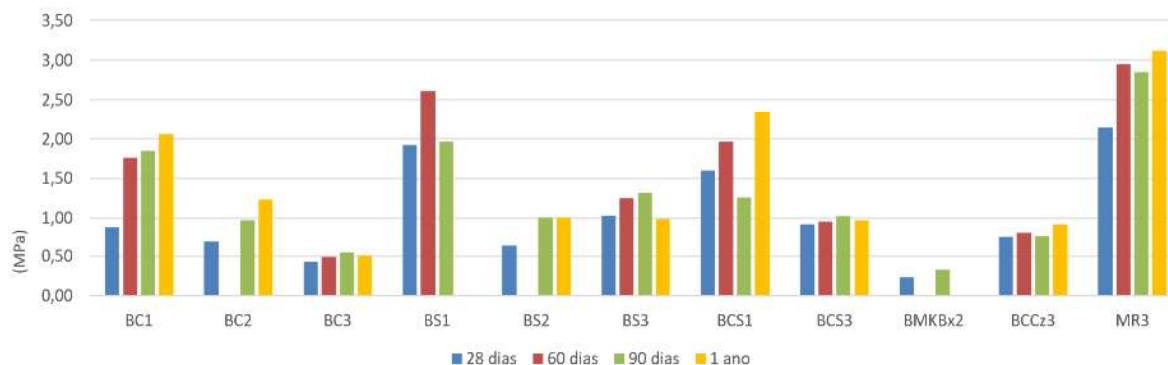


Fig. 3 – Gráfico de desempenho à compressão de todas as misturas

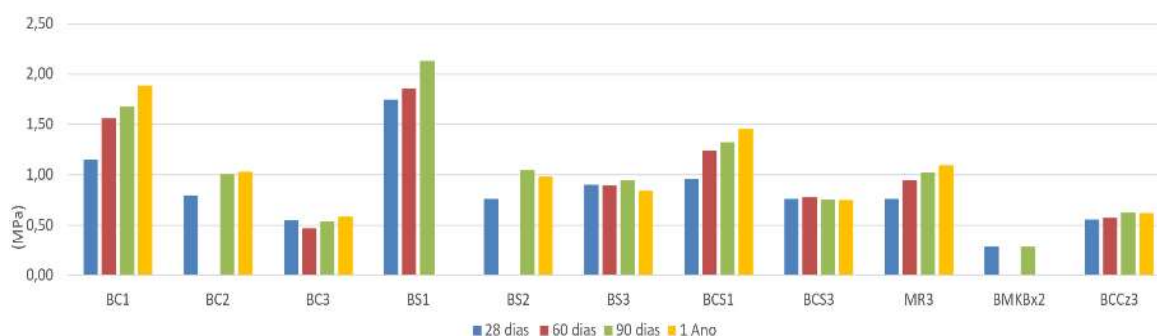


Fig. 4 – Gráfico de desempenho à flexão de todas as misturas

Os ensaios de desempenho mecânico dos blocos de BCA, nas várias misturas estudadas nesta investigação, apresentaram resistências inferiores aos 3 Mpa estabelecidos pela NBR 15.270-2 para blocos cerâmicos e para os blocos de concreto hidráulico convencional, estabelecidos pela NBR 6136: 2016. A dureza reduzida em relação àqueles materiais caracteriza certa ductilidade nos compósitos com BCA, evidenciada pela redução da deformabilidade em relação aos blocos MR3, que corresponde ao adobe sem estabilizante nem fibras.

Considerações:

- O desempenho mecânico da mistura BC1 superou os 0,458 Mpa referidos por Santos [5], os 0,32 Mpa encontrados por Kropidłowska [8], os 1,02 Mpa evidenciados por Araújo [13], e para o “concreto de cânhamo”;
- O aumento na proporção de fibras de 30% para 35% de BCA reduziu o desempenho mecânico das misturas BC2, BC3, BCCz3 e BMKBx2;
- A adição de cinzas não mostrou eficácia no comportamento do compósito BCCz3.
- As resistências da mistura BS1 foram superiores aos 1,5 MPa mínimos, estabelecidos para os blocos de adobe, pela NBR 16814:2020, na compressão. No entanto, sua densidade, muito próxima da do adobe, elimina a virtude da leveza.

- Entre os compósitos de BCA com cal e solo, somente o BCS1 demonstrou eficiência mecânica recomendável. Após um ano de cura a carbonatação da cal favoreceu a resistência da mistura, o que não se pode dizer dos demais compósitos da categoria. Não obstante, é preciso registrar que embora mais leve que o adobe, o material possui massa mais densa que os compósitos de BCA/cal.
- A presença da cal na mistura BSC3 não evidenciou acréscimo no desempenho mecânico, contrariando as expectativas.
- Na mistura BCS1, houve aumento de 25% na resistência à flexão após um ano (30% de BCA, e 15% do ligante é cal e 85% é solo) face ao solo puro (MR3). Todavia, a compressão teve uma redução de 25% na resistência.
- Comparando as misturas de solo/cal com as misturas apenas com solo (BS1 com BCS1, e BS3 com BCS3), observa-se que as misturas apenas com solo apresentam maior grandeza de resistências, tanto à compressão como flexão, parecendo não haver vantagens em termos de resistência mecânica na adição de cal. Note-se que os resultados foram inconstantes em algumas idades, mas pode considerar-se normal uma vez que o estudo é realizado com materiais naturais e sujeitos a maior dispersão de resultados.

4.1.2 Comparação do desempenho das resistências mecânicas dos compósitos de BCA com o “hempcrete”

A fim de comparar o compósito de BCA/cal com o concreto de cânhamo é possível estabelecer uma relação entre as misturas BC2, BS2 e BMKBx2 da segunda campanha e as misturas de concreto de cânhamo preparadas por Kropidłowska [08], uma vez que foi aplicado uma proporção semelhante de fibras, ou seja, entre 30 e 35%. Vale lembrar que BC2 contém 35% de BCA; BS2, 35% de BCA e solo; BMKBx2 contém 32% de BCA, cal, metacaulino e bórax em proporção idêntica à daquela autora.

Segundo os resultados, verificou-se um relevante aumento das resistências mecânicas nos compósitos com BCA. Enquanto o concreto de cânhamo no estudo de Kropidłowska [08], atingiu o máximo de resistência à flexão a menos de 0,20 MPa, o concreto de BCA com cal (BC2) chegou a 1 MPa, para quantidades equivalentes de fibra. No desempenho à compressão, a mistura BC2 chegou a 0,98 MPa, e a de cânhamo a 0,25 MPa.

Quanto à atividade pozolânica de metacaulino, a mesma autora relata em seu estudo que a adição da pozolana reduziu a resistência à flexão das argamassas, e que a resistência à compressão das misturas aumentou em mais do que 8 vezes os valores observados para a argamassa de cal. Tal desempenho não foi observado neste estudo com BCA, onde a adição do metacaulino reduziu o desempenho, tanto na flexão como na compressão.

Na comparação com outros estudos de hempcrete, os resultados foram coerentes com os de Kropidłowska [08], pois apresentaram também um desempenho pior que os compósitos com BCA. Araújo [14] obteve a máxima tensão de compressão para uma mistura de 65% de cal hidratada com 35% de fibras de cânhamo, com 0,46 Mpa.

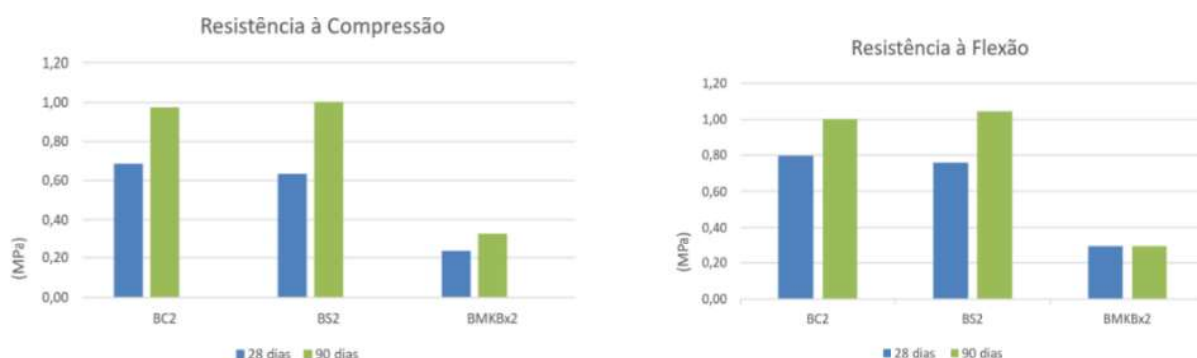


Fig. 5 – Gráficos de resistência mecânica das misturas com BCA

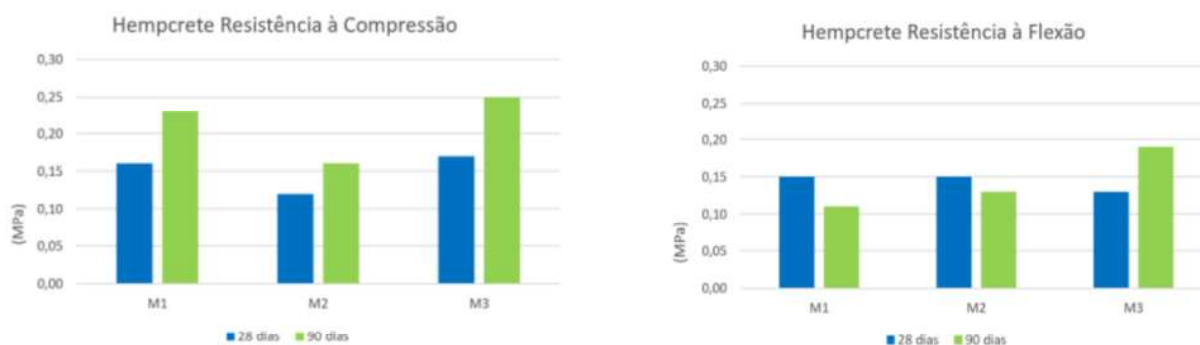


Fig. 6 – Gráficos de resistência mecânica das misturas com cânhamo

4.1.3 Desempenho Térmico

Na Tabela 3 encontra-se o valor do coeficiente de condutividade térmica λ [W/m.° C] obtido pelo compósito de BCA/cal em comparação, por ordem decrescente, com os valores típicos de diversos materiais de construção convencionais e os valores gerais e de alguns estudos de concreto de cânhamo.

Materiais de construção	Coefficiente de Condutividade Térmica λ [W/m.° C]	Referências
Pedra de calcário dura	1,7	Nunes [15]
Adobe	1,1	Nunes [15]
Tijolo cerâmico	0,41	Carvalho [16]
BCA/CAL - Mistura BC1 (842Kg/m ³)	0,12	Leão (2021)
“Hempcrete” (65% de cal hidratada, 30% de cânhamo)	0,11	Araújo [14]
Betão de cânhamo (no geral) (220 a 627 kg/m ³)	0,06 - 0,14	Abdellatef e Kavgic [17]

Tabela 3 – Coeficiente de condutividade térmica do concreto de BCA e outros materiais

O que se verifica é que a composição de BCA/cal teve ótimo desempenho térmico, comparável ao do concreto de cânhamo e bem superior à maioria de materiais de construção convencionais para

alvenarias. Deste modo, o isolamento térmico com recurso a materiais de isolamento convencionais poderá ser dispensado, tal como no concreto de cânhamo.

4.2. Desempenho ao nível de resistência à água

4.2.1 Absorção hídrica por capilaridade e imersão

Os resultados obtidos na absorção por capilaridade, Figura 7, revelam que a adição de cal reduz a absorção de água e a substituição de cal por metacaulino não apresenta vantagem a este nível, pelo contrário. Como pode-se perceber na figura 7, o estudo da absorção hídrica por capilaridade evidenciou tolerância reduzida à água, exigindo a aplicação de argamassa hidrofugante e o preparo de embasamento de alvenaria convencional ou cantaria, para manter o material afastado do contato com a água, o que é fundamental para garantir a durabilidade do edifício.

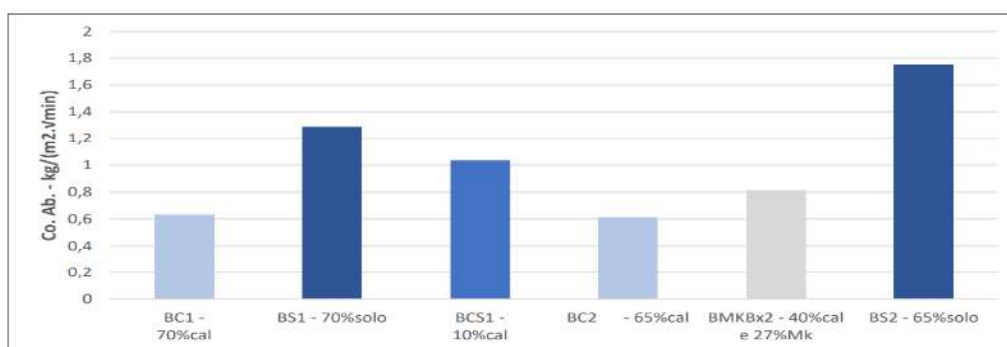


Fig. 7 – Coeficiente de absorção por capilaridade, considerando os valores em Kg/m². min0,5

Durante o ensaio de capilaridade observou-se também crescimento de fungos nas misturas com solo e sem cal. Pelo que se pode considerar que a cal oferece a vantagem de não facilitar o desenvolvimento de matéria viva. Naqueles onde se misturou cal com solo, a contaminação foi retardada e bastante reduzida.

O ensaio de imersão em água confirmou que a adição de cal favorece a redução de absorção de água, de modo proporcional, como se verifica na Tabela 4, abaixo. Registrou-se ainda que o composto apenas com solo não pode ser testado, por falta de coesão do material após a absorção. Como tal, este não apresenta resistência à água.

CLASSE	Peso Seco (g)	24 h (g)	Absorção (%)	Água (Kg)/m ³
BC1 (70% de cal)	155	268,9	73,5	445
BS1	255,7	393,9	54	539
BCS1(10% de cal)	254	362,1	42,5	421
BC2 (65% de cal)	125	229,7	83,8	409
BS2	119	283	137,81	640

Tabela 04 – Percentual de absorção de água por imersão após 24 horas e valor nominal por m³

A Figura 9 apresenta uma comparação dos resultados obtidos neste estudo com os valores de investigações sobre *hemcrete* [8-14], alvenaria cerâmica, e blocos de concreto. Procurou-se verificar a relação entre a densidade e o coeficiente de absorção das composições testadas.

Observa-se que não existe uma relação direta entre a densidade e o coeficiente de absorção de água, mas que o *hemcrete* à base de cal hidratada [8-14] apresenta uma menor densidade e uma menor

absorção que os compostos com BCA e cal (BC1, BC2 e BMKBx2).

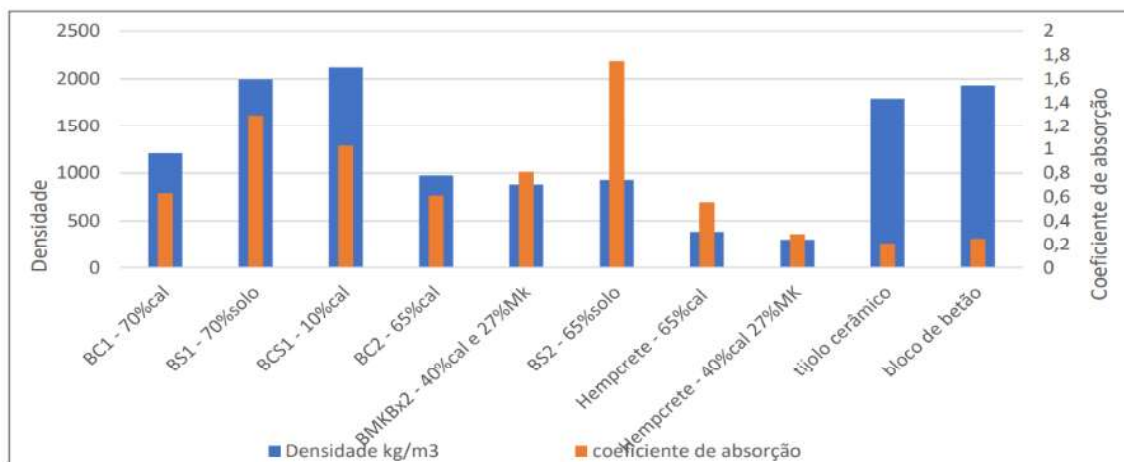


Fig. 9 – Comparação entre as densidades e os coeficientes de absorção das composições estudadas e outros materiais

4.2.2 Compressão com saturação

Os resultados do ensaio de compressão nos provetes submetidos ao ensaio de absorção por imersão estão apresentados na tabela 5 abaixo, onde se vê que a absorção de água não prejudicou a resistência à compressão das amostras ensaiadas de BC1 e BCS1. Pelo contrário, verifica-se um ligeiro aumento da resistência em BC1 e BCS1. No entanto houve uma pequena perda de resistência em BC2. Conforme afirma Pinto [18] quando saturadas, a resistência à tração das fibras lignocelulósicas também é ligeiramente maior.

Classe ligante	Tensão Rotura (MPa) 90 d, seco	Tensão Rotura (MPa), saturado
BC1	1,60	1,65
BCS1	1,26	1,38
BC2	0,98	0,82

Tabela 5 – Resistência à compressão nos provetes submetidos ao ensaio de absorção por imersão

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões a que se pode chegar sobre este estudo são as seguintes:

- Em relação à sustentabilidade dos compostos estudados, pode-se considerar que as misturas apenas com BCA e solo serão as mais sustentáveis, uma vez que não contêm ligante e como tal terão menor gasto energético. Pela mesma razão, seguir-se-ão as composições de BCA com solo e cal e por último o composto de BCA com cal. No entanto, pela menor massa volúmica, a mistura com cal poderá ter um melhor comportamento térmico o que levará a benefícios de sustentabilidade da construção no global. Além disso, por conta de sua leveza, o composto com BCA e cal contribui de forma relevante para o aligeiramento da estrutura. Verifica-se que a composição alcança baixos valores de condutividade térmica, logo apresenta um bom comportamento, bastante superior a muitos materiais utilizados na construção.

- A par dos resultados, conclui-se que os compósitos investigados podem ter diversas aplicações enquanto material não estrutural. Considerando os valores de desempenho mínimos exigidos pelo guia técnico de hempcrete e os resultados obtidos nos testes das amostras, os compósitos se enquadram na faixa de materiais com resistência suficiente para vedações não estruturais.
- Além do mais, os produtos deste estudo mostram um potencial para acabamento diferenciado, com conforto, durabilidade e economia que compensam as dificuldades. O fato de poderem ser manufacturados de forma simples, facilita a autoconstrução ou o sistema de “mutirão”, pelo que seria uma construção a um custo acessível. Como tal, a indústria intensiva da cana de açúcar poderia facilmente patrocinar a construção de casas para a comunidade local de forma a compensá-la parcialmente pelos transtornos causados.

Todo resíduo produz descontentamento. Tomá-lo como matéria-prima é um desafio que por vezes passa a noção de aceitação da existência de uma ordem perversa. No caso presente, é como concordar com a existência de monocultura, sabidamente predatória nas 3 pontas da sustentabilidade. Longe disso, há o desejo de que as engenharias agrícolas e ambientais encontrem melhores formatos para a agroindústria. Enquanto isto, e em outra linha, é preciso transformar os resíduos em bens. Para quem sonha com a sustentabilidade, resta a utopia de que, no futuro mais breve possível, a humanidade consiga neutralizar as distopias estabelecidas pelo “progresso”.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à usina J. Faria & Filhos, Lda., situada na Ilha da Madeira, pela gentileza de nos enviar uma remessa generosa de BCA, sem o que não seria possível a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Hall, M.; Djerbib, Y. 2004. “Moisture ingress in rammed earth: Part 1 — the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction”. UK: Sheffield Hallam University. Centre for the Built Environment, 2004.
- [2] Singh, M; Mamania, D; Shinde, V, 2018. “The scope of hemp (Cannabis sativa L.) use in Historical conservation in India”, Indian journal of traditional knowledge, 17.
- [3] Prieu, F, 2020. “Comment le chanvre est-il utilisé dans la construction?” Artigo Disponível em <https://greentropics.co/chanvre/chanvre-construction/>, acesso em 10/07/2022.
- [4] Eires, R.; Jalali, S.; Camões, A. “Novos compósitos eco-eficientes para aplicações não estruturais na construção”. Guimarães: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/16957>
- [5] Santos, M. O., 2013. “O Cânhamo como material de construção: viabilidade e oportunidade”. Porto: Universidade Fernando Pessoa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013. Dissertação de mestrado.
- [6] Luís, M. L. S., 2021. “Estudo experimental de bloco leve à base aparas de madeira e resíduos de papel”. Guimarães: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2021. Dissertação de mestrado.
- [7] Eires, R. M. G., 2021. “Construção em Terra: Desempenho melhorado com incorporação de biopolímeros” Guimarães: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2012. Tese de doutoramento.

-
- [8]. Kropidłowska, A. M., 2019. “A investigação experimental das propriedades mecânicas e higroscópicas do hempcrete como um material de isolamento para painéis pré-fabricados”. Guimarães: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2019. Dissertação de mestrado.
- [9] Valenciano, M. D. C. N.; Freire, W. J., 2004. “Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. Jaboticabal: Construções Rurais e Ambiente, Eng. Agrícola, V. 4, n. 3, pág. 484-492, set/dez. 2004. Artigo disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000300001>, acesso em maio de 2021.
- [10] Rodrigues, M. S.; Beraldo, A. L.; Savastano Júnior, H.; Santos, S. F., 2013. “Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento”. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.12, UAEA/UFCG, 2013. Disponível em <http://www.agriambi.com.br>
- [11] Lenço, P. C., 2010. “Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia”. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2010. Tese de doutorado.
- [12] Oliveira, O. C., 2018. “Avaliação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar in natura e modificada para aplicação em compósitos”. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2018. Dissertação de mestrado.
- [13] Teixeira, E.R.; Machado, G.; Junior, A.P.; Guarnier, C.; Fernandes, J.; Silva, S. M.; Mateus, R., 2020. “Mechanical and Thermal Performance Characterization of Compressed Earth Blocks. Energies.” Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13112978> Acesso em julho 2021.
- [14] Araújo, E. F., 2015. “Materiais compósitos com incorporação de cânhamo industrial”. Guimarães: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2015. Dissertação de mestrado.
- [15] Nunes, P., 2014. “Comportamento térmico de diferentes soluções de envoltivo opaca vertical em edifícios”. Lisboa: IST, 2014. Dissertação de mestrado.
- [16] Carvalho, P. D., 2017. “Caracterização do desempenho térmico de soluções construtivas sujeitas a um regime de transferência de calor dinâmico”. Coimbra: Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2017. Dissertação de Mestrado.
- [17] Abdellatif, Y.; Kavgic, M., 2020. “Thermal, microstructural and numerical analysis of hempcrete-microencapsulated phase change material composites.” Applied Thermal Engineering, Volume 178, 2020. ISSN 1359-4311.
- [18] Pinto, E. S., 2016. “Solo-cimento compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica”. Bauru: FAAC – UNESP.