

Caracterização e viabilidade técnica de aplicação de tijolos ecológicos em habitações populares: uma contribuição à sustentabilidade ambiental

O crescimento populacional e o aumento no número de indústrias no Brasil acarretaram maior geração de resíduos. Um exemplo são as usinas sucroalcooleiras, que vem aumentando sua produção e com isso a preocupação com uma destinação final correta aos resíduos. Este artigo caracteriza amostras de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) e composto (mistura de cinzas e torta de filtro) a fim de produzir e avaliar a viabilidade técnica de tijolos ecológicos, propondo uma proporção adequada para adição desses materiais alternativos na fabricação de tijolos que possam ser aplicados em habitações populares, obedecendo os padrões estabelecidos por norma. As produções de tijolos ecológicos foram realizadas nos traços 1:1:5, 1:2:4 e 1:3:3 (cimento: resíduo: solo), assim como um traço controle de 1:6 (cimento: solo). As amostras de cinzas e composto foram caracterizadas através de granulometria, compactação, atividade pozzolânica, DRX e FRX, enquanto os tijolos fabricados foram testados quanto a resistência a compressão, umidade e absorção de água. As amostras testadas se mostraram promissoras para utilização como agregado miúdo na produção de tijolos. Apesar de somente a amostra de cinzas ter apresentado resultado satisfatório para atividade pozzolânica, os traços 1:1:5 com ambos os resíduos e 1:2:4 com composto, tanto para os ensaios de resistência à compressão quanto para absorção de água, se mostraram satisfatórios resultando em 4,25 MPa e 15,58% para o traço 1:1:5 com CBC, 4,25 MPa e 14,88% para o traço 1:1:5 com composto e 1,99 MPa e 19,21% para o traço 1:2:4 com composto, atendendo o mínimo estabelecido pela NBR 8491 (2013) para o uso de tijolo solo-cimento-resíduo. Os subprodutos serão reutilizados dentro do contexto de economia circular e dos pilares da sustentabilidade, evitando o descarte na natureza. Além dos benefícios ao meio ambiente, amplia de forma desejável o espectro da construção civil, possibilitando sua aplicação em imóveis populares, fomentando o desenvolvimento local do estado do Mato Grosso do Sul e diversificando as possibilidades de execução, sendo possível a aplicação em proporção adequada da cinza ou composto, que não haviam sido estudados em conjunto até o momento.

Palavras-chave: Tijolos ecológicos; Cinza do bagaço de cana de açúcar; Torta de filtro; Compostagem; Atividade pozzolânica.

Characterization and technical feasibility of application of ecological bricks in popular housing: a contribution to environmental sustainability

Population growth and the increase in the number of industries in Brazil led to greater generation of waste. An example is the sugar and alcohol plants, which have been increasing their production and with that the concern with a correct final destination of the residues. This article characterizes samples of sugarcane bagasse ash (SCBA) and compost (mixture of ash and filter cake) in order to produce and evaluate the technical feasibility of ecological bricks, proposing an adequate proportion for the addition of these alternative materials in the manufacture of bricks. that can be applied in popular housing, complying with the standards established by the norm. The production of ecological bricks was carried out in the mixes 1:1:5, 1:2:4 and 1:3:3 (cement: residue: soil), as well as a control mix of 1:6 (cement: soil). The ash and compost samples were characterized through granulometry, compaction, pozzolanic activity, XRD and XRF, while the manufactured bricks were tested for compressive strength, moisture and water absorption. The tested samples showed promise for use as fine aggregate in the production of bricks. Although only the ash sample showed a satisfactory result for pozzolanic activity, the traces 1:1:5 with both residues and 1:2:4 with compost, both for compressive strength tests and for water absorption, if showed satisfactory resulting in 4.25 MPa and 15.58% for the 1:1:5 mix with SCBA, 4.25 MPa and 14.88% for the 1:1:5 mix with compost and 1.99 MPa and 19.21% for the 1:2:4 mix with compost, meeting the minimum established by NBR 8491 (2013) for the use of soil-cement-waste brick. The by-products will be reused within the context of a circular economy and the pillars of sustainability, avoiding disposal in nature. In addition to the benefits to the environment, it expands in a desirable way the spectrum of civil construction, allowing its application in popular properties, promoting the local development of the state of Mato Grosso do Sul and diversifying the possibilities of execution, being possible to apply in an adequate proportion of the ash or compost, which had not been studied together until now.


Keywords: Ecological bricks; Ash from sugar cane bagasse; Filter cake; Compost; Pozzolanic activity.

Topic: Engenharia da Sustentabilidade e Meio Ambiente

Received: 04/01/2022

Approved: 17/04/2022

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Sheyla Thays Vieira Barcelos 
Universidade Católica Dom Bosco, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4106392653572296>
<https://orcid.org/0000-0002-8623-972X>
sheylathays@hotmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2674-6492.2022.001.0004

Referencing this:

BARCELOS, S. T. V.. Caracterização e viabilidade técnica de aplicação de tijolos ecológicos em habitações populares: uma contribuição à sustentabilidade ambiental. *Environmental Scientiae*, v.4, n.1, p.37-48, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2674-6492.2022.001.0003>

INTRODUÇÃO

A moradia faz parte da história do homem e remete a ideia de um abrigo (MONTEIRO et al., 2017). Porém, o déficit de habitação no Brasil é de cerca de 6,490 milhões de unidades, o que corresponde a 12,1% de casas no país. Embora tenha havido uma queda significativa do número de déficit habitacional brasileiro em comparação a 2007, a população brasileira passou de 184 milhões para 194 milhões, o que representa um aumento de 5,5%, diminuindo o alcance do aumento de unidades habitacionais (SANTOS, 2015).

Globalmente, o problema da habitação seria reduzido se o ritmo de construção de moradias dobrasse nos próximos 15 anos (OLAYA et al., 2016). E com o crescimento populacional e a elevada demanda de consumo, houve o aumento da necessidade de extração de matérias-primas da natureza. Essas extrações requerem grande quantidade de energia e podem emitir gases nocivos ao meio ambiente. Por conseguinte, o aumento na geração de resíduos é inevitável, acarretando a necessidade de áreas cada vez maiores para a disposição final dos mesmos, observando ainda que tal disposição deve atender diversas legislações vigentes (DELALIBERA, 2014).

Portanto, a construção civil vem passando por diversas transformações, haja vista a necessidade de maior segurança em edificar, maior velocidade de execução de obra e, conseqüentemente, a redução de custos fixos com profissionais, diminuição de geração de resíduos e reaproveitamento de materiais que outrora seriam descartados (MELLO et al., 2009).

Atualmente, diversos resíduos e subprodutos são reaproveitados na construção civil para dar-lhes uma destinação final sustentável. São exemplos desses materiais, containers navais, a escória de alto forno, as areias de brita, as cinzas de casca de arroz e as cinzas de cana de açúcar (SALIM et al., 2014).

Neste contexto, as usinas sucroalcooleiras têm grande destaque no que tange o gerenciamento de resíduos haja vista que o Brasil, na condição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, projeta para o segmento crescente relevância para o agronegócio brasileiro devido ao aumento na demanda mundial por etanol e açúcar, tornando o país um participante na comercialização mundial com elevada competitividade¹. Devido a essa demanda, a indústria de etanol de cana continuará crescendo nos próximos anos, causando um aumento nos resíduos gerados por essa indústria. Assim, Ribeiro et al. (2014) alertam que esses resíduos podem causar sérios problemas ambientais se mal administrados.

Por outro lado, as cinzas do bagaço da cana de açúcar (CBC) e o composto, produto da compostagem de torta de filtro e cinza, surgem como potenciais alternativas de reuso por se tratarem de resíduos com potencial pozolânico, auxiliando no processo de formação dos silicatos presentes quando em contato com cimento em argamassas, concretos ou tijolos solo-cimento. Desta forma, Melo et al. (2011) citam a necessidade de alternativas que contemplem o uso de materiais naturais na fabricação de tijolo solo cimento, pois a utilização desses tijolos prensados a frio, corroboram com o emprego desse material e não exige a queima em sua produção, minimizando o consumo energético.

Neste contexto, emerge a questão norteadora que se relaciona a viabilidade técnica da produção de

¹ <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>

tijolos solo-cimento-resíduo para aplicação em moradias populares. Portanto, o presente trabalho objetivou estudar a aplicação de tijolos ecológicos, solo-cimento com acréscimo de subprodutos da indústria sucroalcooleira, visando sua utilização em imóveis populares, possibilitando a diminuição do déficit habitacional, bem como analisar as propriedades do tijolo produzido. As alternativas apresentadas neste trabalho visam à substituição do solo por: (i) cinza do bagaço de cana-de-açúcar; (ii) resíduo de compostagem de cinza e torta de filtro; seguindo as normas vigentes. Desse modo, o presente trabalho pretendeu obter um tijolo resistente à compressão e absorção de água, promovendo a sustentabilidade ambiental e uma economia circular para dois dos resíduos das usinas sucroalcooleiras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta das amostras

A pesquisa foi realizada na Universidade Católica Dom Bosco (UCDB) e ocorreu em duas etapas: (i) caracterização físico-química: do solo, da cinza de bagaço de cana-de-açúcar e do composto de cinza mais torta de filtro dos decantadores; (ii) viabilidade técnica: fabricação dos tijolos nos traços pré-estabelecidos e análise de resistência mecânica e absorção de água dos blocos.

As amostras de CBC e composto, foram coletadas nas coordenadas 21°35'18.7"S 54°15'09.3"O e as amostras de solo nas coordenadas 20°24'16.5"S 54°36'57.2"O. As coletas foram realizadas na leira do pátio dos resíduos da usina parceira e o composto na ala de compostagem, após 30 dias de processo. As amostras foram acondicionadas e transportadas em tambor com tampa até o momento das análises. Enquanto as amostras de solo selecionado e livre de matéria orgânica foram retiradas *in loco* no momento das análises.

Caracterização granulometria

A análise granulométrica foi realizada com base nos parâmetros de peneiramento da ABNT NBR 7181: 2017. O peneiramento grosso consistiu nas peneiras de abertura 50; 38; 25; 19,9; 5 e 4,8mm. Já o peneiramento fino, foi realizado por sedimentação. Do material passado na peneira 2,0 mm, separou-se cerca de 100 gramas para determinação da umidade higroscópica (h) e cerca de 70 gramas para o ensaio de sedimentação (Mh).

Difração e Espectrometria de Fluorescência de Raio X

O espectrômetro utilizado para os ensaios de fluorescência de raios-x (FRX) por energia dispersiva utilizado foi o espectrômetro de fluorescência de raios X da marca Panalytical modelo Minipal Cement, utilizando-se pastilhas fundidas em máquina de fusão marca Claisse modelo M4 e fundentes à base de mistura de tetraborato de lítio/metaborato de lítio marca MAXXIFLUX (66,57 % de Li₂B₄O₇, 32,72 % de LiBO₂ e 0,7 % de LiBr), com proporção de 1,0 g de material e 6,75 g de fundente. Os resultados semiquantitativos são estimados por padrões internos do fabricante utilizando a curva denominada "OMNIAN" e foram normalizados a 100%.

O difratômetro de raio-x (DRX) utilizado foi o da Panalytical modelo Empyrean com detector PIXcel3D, operando na radiação $K\alpha$. As amostras foram preparadas para este ensaio da seguinte maneira: depois de homogeneizadas tiveram sua granulometria reduzida em um almofariz utilizando mão de Gral, para apresentar quantidade significativa de material com granulometria menor do que 0,075 mm.

Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados em conformidade com as normas NBR 7182 (ABNT, 2016). Para o ensaio foi utilizado um cilindro com 1000 cm³ de volume e a compactação é feita em 3 camadas de igual altura. Compactou-se o solo por impacto através da energia gerada por uma massa de um martelo metálico de 2,5 kg que cai de uma altura de 30,5cm, sendo golpeado 26 vezes. Após esse processo, o corpo de prova compactado foi pesado e determinou-se a umidade. Por fim, o corpo de prova foi destorroado, adicionado água e compactado novamente. Este procedimento foi repetido quatro vezes para que se obtivesse a curva de variação do peso específico seco em função da umidade de compactação.

Atividade pozolânica

A atividade pozolânica, conforme NBR 5752 (2014), NBR 15895 (2010) e NBR 12653 (2015) refere-se determinação do índice de atividade pozolânica de materiais por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado. Foi realizado o ensaio de Chapelle Modificado que consiste em manter uma solução com 1,00 g de óxido de cálcio, 1,00 g de amostra e 250,00 g de água (sem dióxido de carbono) aquecida sob agitação à 90°C, durante um tempo de 16 h. Após o resfriamento até a temperatura ambiente adiciona-se à mistura uma solução de sacarose e o teor de CaO livre é medido por meio de titulação de cerca de 50 ml da solução com ácido clorídrico (HCl) 0,1 mol/l e fenolftaleína (1g/l). O resultado é expresso pela quantidade de CaO fixado por grama de cinza pozolânica e quanto maior a fixação, mais reativo é o material.

Definição dos traços

A NBR 10833 (2012) estabelece os requisitos para a fabricação de tijolos de solo-cimento em prensa manual ou hidráulica, citando que entre 10% a 50% deve passar na peneira de 75 μ m, LL deverá ser menor ou igual a 45% e IP menor ou igual a 18%. Para a produção dos tijolos, o cimento escolhido foi o CP II E-32 Cimento Portland.

Todos os tijolos foram moldados conforme NBR 8491 (2012), NBR 12023 (2012) e NBR 12024 (2012) com auxílio de uma prensa manual. Foram do tipo maciço, tendo em média as seguintes dimensões: 24,0 cm de comprimento, 12,0 cm de largura e 7,0 cm de altura, sendo classificado como tipo B, conforme NBR 8491 (2012).

Foram produzidos 10 tijolos para cada traço, conforme NBR 8492 (2012), nos traços 1:1:5, 1:2:4 e 1:3:3 (cimento: resíduo: solo), para ambos subprodutos (cinzas e composto). Já o traço controle foi produzido na proporção 1:6 (cimento: solo).

Umidade

A umidade do material foi determinada conforme metodologia citada na ABNT/NBR 6457. Foram pesadas de 3 a 5g de amostra em cápsulas de porcelana, previamente secas e taradas. Essas cápsulas foram mantidas durante 24 horas a 105°C em estufa marca Marconi®. Após as cápsulas serem resfriadas em dessecador, foram pesadas e, por diferença de massa, determinou-se a quantidade de água perdida durante o processo de aquecimento.

Absorção de Água

Os tijolos foram pesados, posteriormente levados à estufa a uma temperatura de 110°C e deixados durante 24h, de forma a obter o valor da massa seca (M_1) em gramas, em seguida retirados da estufa e inseridos em baldes com água até a submersão dos tijolos durante um período de 24h e, após esse período, retirados e secos para obter massa saturada (M_2). Esse teste foi realizado concomitante a produção, sendo separados conforme cada traço e utilizando a seguinte equação, de acordo com a NBR 8492 (2012):

$$A\% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Compressão Simples

O teste de resistência à compressão simples foi executado conforme a NBR 8492 (2012) com tijolos com 7 e 28 dias de fabricação, que contou com dois pratos de apoio de aço, colocados na parte superior e inferior do prisma afim de assegurar a distribuição uniforme dos esforços ao corpo de prova. Com os dados obtidos, fez-se a aplicação na equação que possibilitou o cálculo da resistência mecânica à compressão simples dos modelos fabricados.

$$F_t(MPa) = \frac{F}{S} \quad \text{Equação (2)}$$

Análise estatística

Os resultados com valores de distribuição normal foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Turkey ao nível de 95% de probabilidade por meio do software Statistical 7.0 (2008). Também foi utilizada correlação simples entre os valores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização

O solo utilizado na fabricação dos tijolos foi classificado em areia argilosa, com 79,23% de areia. Essa amostra já é de uso frequente para fabricação de tijolos solo-cimento e também foi utilizado na composição do tijolo controle. Desta forma, foi considerado como parâmetro de avaliação. Seu limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade apresentaram-se como não plástico, índice de grupo como 0, classificação TRB como solo A-2-4 e classificação SUCS como SM.

Constata-se que, as amostras de cinzas e composto atualmente são objeto de pesquisas para seu

emprego em substituição desse solo na fabricação de tijolos solo-cimento. Sendo assim, avaliamos o perfil granulométrico de ambas. Para cinzas, constatou-se que se trata de silte arenoso, com 53,97% de silte. Seu limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade apresentaram-se como não plástico, assim como o solo, porém com índice de grupo 5 e classificação TRB como solo A-4.

Para o ensaio granulométrico do composto, a curva granulométrica mostrou que os grãos são de uma areia siltosa, com 52,05% de areia, seus limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade apresentaram-se como não plástico, índice de grupo como 3 e classificação TRB como solo A-4, o mesmo que as cinzas.

Desta forma, podemos observar que a curva granulométrica, tanto das cinzas quanto do composto, está dentro do esperado para a fabricação de tijolos se comparadas com a distribuição granulométrica do solo que já é usual (Figura 1).

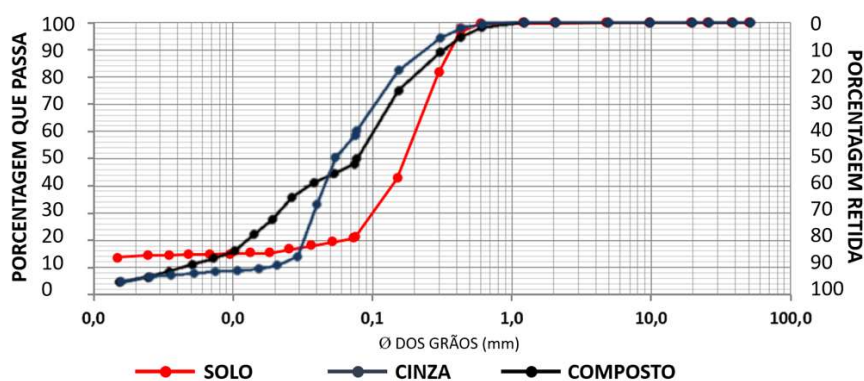


Figura 1: Curva granulométrica das amostras de solo, cinza e composto.

Embora não se tenha ensaios normatizados de granulometria para as amostras ensaiadas, foi necessário adaptar o ensaio normatizado do solo para ambas as amostras. Neste sentido, Drumond (2019) em seu estudo, também adequou o procedimento de caracterização granulométrica do solo para a CBC, obtendo maior presença de solo grosso, com mais de 50% da cinza retida na peneira nº 40 (0,42mm) com graduação dos grãos variando entre 0,07 e 1,20 mm, tendo ainda um comportamento não plástico.

O tamanho dos grânulos das cinzas pode indicar a eficiência no processo de queima do bagaço. Grãos maiores indicam baixa eficiência de queima e, portanto, maior presença de material vegetal na amostra (BARCELOS et al., 2019). Os autores relatam ainda que existe grande relação entre perfil granulométrico mais fino e quantidade de silicato presente na amostra devido à eliminação do material vegetal e concentração de sílica pelo processo de queima, tornando o material mais atraente quanto ao seu potencial pozolânico. Nessa linha, Cordeiro et al. (2011) promoveram a requeima de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a 600°C com o objetivo de beneficiar este material quanto a atividade pozolânica e obtiveram sucesso, devido a liberação do carbono e consequentemente aumento do teor de sílica.

Além da distribuição granulométrica dos materiais, é importante detalhar sua composição química. A NBR 12653 (2015) detalha sobre os requisitos químicos para um material ser considerado pozolânico e estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Os resultados obtidos no estudo podem ser visualizados na Tabela 1 em comparação ao

que a norma estabelece.

Tabela 1: Composição química das amostras de cinza e de composto em comparação ao estabelecido por norma e com a literatura atual.

Parâmetro (%)	CBC	Composto	NBR 12653 (2014)	Amaral e Holanda (2018): CBC	Bahurudeen e Santhanam (2015): CBC	AFRIDI et al. (2019): CBC
Local	Usina Santa Luzia [Nova Alvorada/MS]	Brasil	Campos dos Goytacazes /RJ	Usina Madras, Tamil Nadu, Índia	Paquistão	
Perda ao fogo (PF)	33,6	18,1	≤ 6	9,32	21	15,9
Anidrido silícico (SiO ₂)	47,5	61,8	≥ 50	49,95	72,95	68,42
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	9	9,8		8,86	1,89	0,218
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,3	4,1		8,1	1,68	5,812
Óxido de titânio (TiO ₂)	1,8	2,1	-	0,96	*	*
Óxido de cálcio (CaO)	1,7	1,5	-	10,17	7,77	*
Óxido de potássio (K ₂ O)	1,8	1,3	-	9,62	9,28	*
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,5	0,4	-	1,04	*	1,28
Óxido de magnésio (MgO)	0,3	0,2	-	*	1,98	0,572
Óxido de manganês (MnO)	0,2	0,2	-	0,21	*	*
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,1	0,1	≤ 5	1,76	4,45	4,33
Óxido de estrôncio (SrO)	< 0,1	< 0,1	-	0,02	*	*

(CBC) cinza de bagaço de cana-de-açúcar; (-) a norma não traz nenhum parâmetro para o óxido em questão; (*) não relatado.

A perda ao fogo, tanto para as cinzas quanto para o composto, foi maior do que o estabelecido na norma de 33,6% e 18,1%, respectivamente. Quanto aos óxidos, a norma prevê que a soma de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ deve ser maior ou igual a 50%. No ensaio da CBC obteve-se 59,80% e 75,70% para o composto, SO₃ menor do que 5%, e obteve-se 0,1% para ambas as amostras.

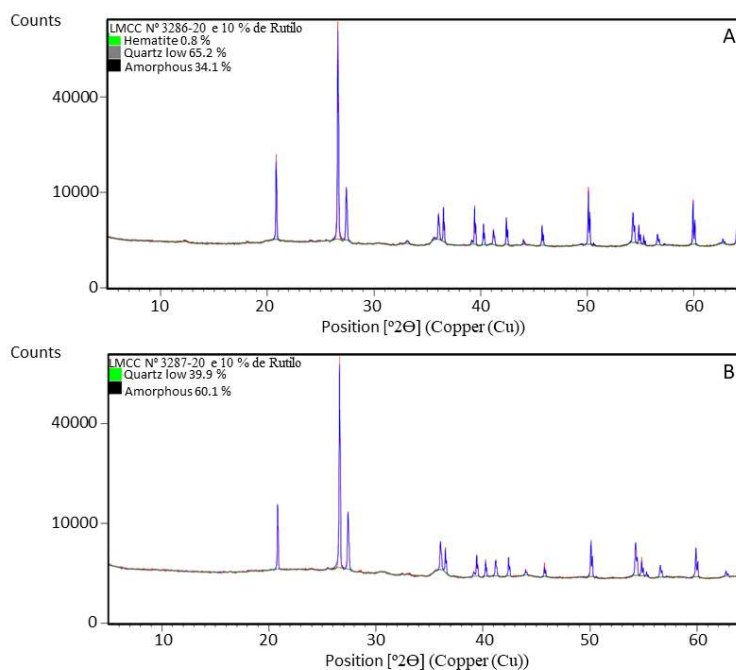


Figura 2: Análise mineralógica qualitativa do Composto (A) e das Cinzas de Bagaço de Cana (B), respectivamente, por difração de raios X.

A análise de espectrometria de DRX permitiu observar mineralogia de 39,9% de quartzo (SiO₂) e 60,1% de amorfo para as amostras de cinzas e uma mineralogia de 65,2% de quartzo (SiO₂), 0,8% de hematita (Fe^{1,987}O₃) e 34,1% de amorfo para as amostras de composto. A fração de sílica amorfa presente na amostra é um fator importante para a atividade pozolânica, como foi observado por Cordeiro, (2014) que estudou as Cinzas de Casca de Arroz (CCA), que por sua natureza apresenta uma grande quantidade de sílica em sua

estrutura. Observaram que a quantidade de sílica reativa diminui à medida que se aumenta a temperatura de queima, mesmo assim, a CCA apresenta sílica amorfa remanescente, em altas temperaturas, suficiente para garantir a reação pozolânica.

Quanto a compactação, para análise do solo constatou-se que o ponto de compactação ótimo possui umidade em 8,3%, resultando numa massa específica de 1,963 gf/cm³. Na análise do composto, ponto de compactação ótimo em 35,8% e massa específica de 0,881 gf/cm³. Já para a análise da cinza, ponto de compactação ótimo em 59,5% e massa específica de 0,876 gf/cm³.

Para Drumond (2019), o aumento do teor de CBC provoca um aumento na umidade ótima (W_{otm}) e uma redução no peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$), sendo explicado devido a capacidade da CBC absorver mais água que o solo e a substituição de parte do solo por um material com grãos de densidade menor ocasionando a redução na massa ocupada num mesmo volume, respectivamente. Botelho (2015) e Islam (2020) descrevem que no ponto de umidade ótima, a amostra terá o maior peso específico seco e está diretamente relacionado com uma maior resistência à compressão.

As amostras de CBC e de composto, resultaram em baixo peso específico seco e elevada umidade ótima (0,876 gf/cm³ e 59,5%; 0,881 gf/cm³ e 35,8%, respectivamente), resultando em um material com menos potencial para resistência à compressão e mais complexo de produção, necessitando de um material para fabricação com elevada umidade e um controle de umidade mais aprimorado, por conta da alta umidade. Por outro lado, o solo foi o material dentre as amostras ensaiadas à compactação que resultou em um maior peso específico seco (1,963gf/cm³), como esperado, tomando como referência relatos em literatura (ISLAM et al., 2020). Portanto, sua umidade ótima foi tomada como referência (8,3%) para os traços fabricados, pois resultará em um material com maior potencial de resistência à compressão.

Outro aspecto avaliado foi a pozolâna, que apesar de não possuir propriedades aglomerantes, ela possui a propriedade de fixar a cal liberada na hidratação do cimento, desenvolvendo-se então suas propriedades hidráulicas, logo há grande interesse de fixar a cal, para impedi-la de reagir ou dissolver-se (PETRUCCI, 1978). Neste caso, a cinza apresentou um resultado de 373 Ca(OH)₂/g. Já no ensaio para determinação de atividade pozolânica do composto, ela apresentou um resultado de 284 Ca(OH)₂/g. Diante disso, para considerar qualquer material pozolânico, ele deve proporcionar fixação de no mínimo 330 mg de hidróxido de cálcio por amostra (RAVERDY et al., 1980).

Amaral et al. (2017) citam que a formação da fase de silicato de cálcio hidratado (gel C-S-H), que é o principal composto do desenvolvimento da resistência mecânica em pasta de cimento, pode ser inibida com a adição de CBC com matéria orgânica, sugerindo que a adição de grandes quantidades de CBC na mistura do tijolo de solo-cimento deve ser evitada, pois prejudica a resistência à compressão dos tijolos curados. Para contornar essa limitação e melhorar as propriedades pozolânicas da CBC, Cordeiro et al. (2011), promoveram a requeima de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a 600°C, assim a atividade pozolânica da cinza foi melhorada devido à liberação do carbono e consequentemente aumento do teor de sílica.

Viabilidade técnica

Durante o processo de fabricação, foram coletadas amostras para ensaio de umidade, conforme Tabela 2.

Tabela 2: umidade média dos traços fabricados

Traços	Umidade (%)	
	Cinza	Composto
Traço 1:1:5	7,39c	6,61c
Traço 1:2:4	14,66b	8,44b
Traço 1:3:3	23,44a	12,11a
Controle 1:6	5,70c	5,70c

Médias seguidas de letras iguais, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey $p < 0,05$ de probabilidade.

Tanto os tijolos fabricados com cinzas quanto com composto, pode-se observar o aumento de umidade a medida em que houve variação nas proporções de adição dos materiais, demonstrando grande capacidade de absorção de umidade higroscópica. Estatisticamente, os traços 1:1:5 para ambas as amostras foram mais próximos da umidade do corpo de controle, ficando dentro do mesmo grupo. Já os corpos de prova que apresentaram estatisticamente os maiores resultados de umidade foram os traços 1:3:3, portanto com umidade elevada.

Após o processo de controle de umidade, fabricação e ensaios dos tijolos fabricados, buscou-se testar a resistência à compressão e absorção de água para avaliar a viabilidade técnica dos tijolos após finalizados. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3. Na investigação de melhoramento dos tijolos cerâmicos, Abbas (2017) estudou a substituição da argila, matéria prima do tijolo cerâmico, por resíduos de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e de cinza da casca de arroz, obtendo resistência compatível com a norma paquistanesa com 5% de substituição da argila por ambos os resíduos.

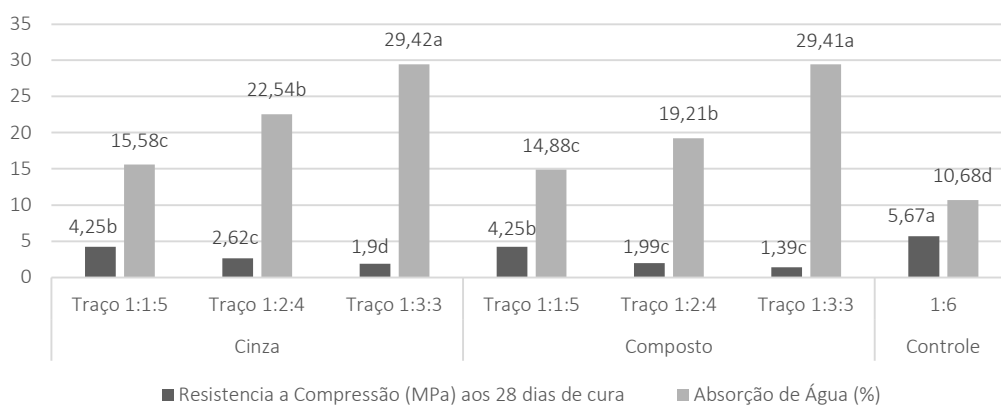


Figura 3: Resistência à compressão e absorção de água dos traços após 28 dias de cura. Médias seguidas de letras iguais, no mesmo ensaio, não diferem entre si pelo teste de Tukey $p < 0,05$ de probabilidade.

A resistência a compressão dos tijolos com substituição do agregado tanto por CBC quanto por composto no traço 1:1:5 e 1:2:4 com amostras de composto, atenderam aos requisitos estabelecidos pela NBR 8491 (2013) onde a resistência a compressão não deve ser menor do que 2,0 Mpa, nem valor individual inferior a 1,7 MPa, enquanto os traços 1:3:3 para ambas as amostras não atenderam aos requisitos. O traço 1:1:5 é estatisticamente mais resistente à compressão do que os traços 1:2:4 e 1:3:3 em ambos os ensaios.

E para o ensaio com composto, não houve diferença estatística entre os traços 1:2:4 e 1:3:3.

Da mesma forma, Ali et al. (2016), constataram um traço ideal para aumentar a resistência à compressão, que foi a adição de 20% de CBC do teor de cimento, no tijolo solo cimento. O ensaio ocorreu com 4 tipos de tijolos com substituição parcial de cimento por CBC. As percentagens utilizadas foram de 0%, 20%, 25% e 30% do teor de cimento, usando um teor de água de 30% do teor de cimento por peso. Seus resultados mostraram que o bloco tem potencial para serem utilizadas como componente de alvenaria não estrutural.

Para um tijolo solo-cimento ser considerável apto para fabricação e execução, ele precisa atender a dois quesitos: resistência à compressão e absorção de água. Portanto, assim como a resistência a compressão, estatisticamente os ensaios de absorção de água os traços 1:1:5 de ambas as amostras e o traço 1:2:4 com composto, atenderam os quesitos mínimos exigidos pela NBR 8491 (2013), apresentando média dos valores menor do que 20% nem valores individuais superiores a 22%, com idade mínima de sete dias.

CONCLUSÕES

A substituição parcial de materiais tradicionais para fabricação de tijolo solo- cimento por materiais de descarte (cinza do bagaço de cana de açúcar e torta de filtro), se mostrou satisfatório nos traços de 1:1:5 tanto para CBC quanto para composto e de 1:2:4 para amostras com composto, obtendo um tijolo sem função estrutural compatível com as normas e com a sustentabilidade, sendo possível a produção dos tijolos sem grande consumo de energia, menor queima no processo e facilidades técnicas para sua produção. Portanto, ambos os subprodutos podem ser usados em tijolos sem função estrutural, a Cinza (CBC) em 14,29% do volume total e o composto pode ser usada em até 28,57% do volume total.

Ocorreu atividade pozolânica na cinza, o que sugere que o subproduto poderá auxiliar nas reações do cimento, possivelmente aumentando a resistência à compressão. Não ocorreu atividade pozolânica no composto. Por outro lado, as análises químicas se mostraram promissoras para utilização dos resíduos como matéria prima para fabricação de cimento, visto que apenas a propriedade perda ao fogo não está dentro dos padrões da norma, fato este que pode ser melhorado com um maior controle sob a temperatura da queima dos resíduos.

O estudo mostrou viabilidade técnica no uso de tijolo solo-cimento-resíduo, apresentando benefícios na redução do passivo ambiental ao utilizar materiais de descarte, contribuindo para a construção civil, diversificando as possibilidades de execução de alvenaria e trazendo maior concorrência ao mercado, além de subsidiar pesquisas futuras sobre o tema.

REFERÊNCIAS

ABBAS, S.; SALEEM, M. A.; KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M. J.. Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: mechanical and durability properties. **Journal Of Building Engineering**, v.14, p.7-14, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.09.008>.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR**

7181:2017: Solo, Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182:2016**: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR**

8491:2012: Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8492:2012:** Tijolo maciço de solo-cimento, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10833:2012 versão corrigida:** Fabricações de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica, procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653:2014:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15895:** Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado, método Chapelle modificado I. Rio de Janeiro, 2010a.

ALI, N.; ZAINAL, N. A.; BURHANUDIN; M. K.; SAMAD, A. A. A.; MOHAMAD, N.; SHAHIDAN, S.; ABDULLAH, S. R.. Physical and Mechanical Properties of Compressed Earth Brick (CEB) Containing Sugarcane Bagasse Ash. **Matec Web Of Conferences**, v.47, p.1-18, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20164701018>.

AMARAL, M. C.; HOLANDA, J. N. F.. Application of sugarcane bagasse ash in the production of low-cost soil-cement brick. **Advances in Environmental Research**, v.6, n.4, p.255-264, 2017. DOI: <https://doi.org/10.12989/AER.2017.6.4.255>.

BARCELOS, S. T. V.; TOMIELIS, I. P.; GARCIA, M. S.; CEREDA, M. P.. Characterization of boiler ashes from sugarcane mill. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.3, p.179-190, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.003.0016>.

BOTELHO, M. H. C.. **Princípios da Mecânica dos Solos e Fundações para a Construção Civil**. São Paulo: Blucher, 2015.

CORDEIRO, G. C.; BARROSO, T. R.. Avaliação da atividade pozolânica e aplicação em concreto de cinza do bagaço de cana-de-açúcar produzida com queima controlada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53. **Anais**. Florianópolis: IBRACON, 2011.

DELALIBERA, R. G.; SARMENTO, A. P.; LOPES, B. C. S.; BRITO, A. F. S.. Análise da viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento Portland. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.9, n.3, p.32-40, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v9i3.32023>.

DRUMOND, M. A. M. M.. **Avaliação da aplicação da cinza resultante da queima do bagaço da cana-de-açúcar sobre o potencial expansivo de uma argila proveniente do**

município de Paulista-PE. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ISLAM, M. S.; ELAHI, T. E.; SHAHRIAR, A. R.; MUMTAZ, N.. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction. **Construction And Building Materials**, v.255, p.119392-119406, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119392>.

MELO, A. B.; BARBOSA, N. P.; LIMA, M. R. F.; SILVA, E. P.. Desempenho estrutural de protótipo de alvenaria construída com blocos de terra crua estabilizada. **Revista Ambiente Construído**, v.11, n.2, p.111-124, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212011000200008>.

MELLO, L. C. B. B.; AMORIM, S. R. L.. O subsetor de edificações da construção civil no Brasil: uma análise comparativa em relação à união europeia e aos estados unidos. **Production**, v.19, n.2, p.388-399, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132009000200013>.

MONTEIRO, A. R.; VERAS, A. T. R. The housing issue in Brazil. **Mercator**, v.16, n.7, p.1-12, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4215/rm2017.e16015>.

OLAYA, Y.; VÁSQUEZ, F.; MULLER, D. B.. Dwelling stock dynamics for addressing housing deficit, **Resources, Conservation and Recycling**, v.123, p.187-199, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.028>.

PETRUCCI, E.. **Materiais de Construção**. 3 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1978.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLIERE, A. M.; DRON, R.. Appreciation de l'activite pouzzolannique des constituants secondaires. In: INTERNATIONAL CONGRESS CHEMICAL CEMENT. **Proceedings**. Paris, 1980.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R.. Effect of Calcination Temperature on the Pozzolanic Activity of Brazilian Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA). **Mat. Res.**, v.17, n.4, p.974-981, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000093>.

SANTOS, N.R.G. S.. **Caracterizações mecânica, térmica e acústica de um compósito que utiliza rejeitos de mármore, granito e EPS para a fabricação de blocos para a construção civil**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SALIM, R.; NDAMBUKI, J.; ADEDOKUN, D.. Improving the Bearing Strength of Sandy Loam Soil Compressed Earth Block Bricks Using Sugercane Bagasse Ash. **Sustainability**, v.6, n.6, p.3686-3696, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su6063686>.

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157698850197078017/>