

SUBMETIDO 05/03/2021

APROVADO 21/05/2021

PUBLICADO ON-LINE 22/08/2021

PUBLICADO 30/12/2022

EDITOR ASSOCIADO

Hugo Plínio de Andrade Alves

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5528>

ARTIGO ORIGINAL

Adição conjunta do resíduo de cerâmica vermelha e da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de tijolos ecológicos

 João Batista Duarte ^{[1]*}

 Ricardo Eugênio Barbosa Ramos Filho ^[2]

 Nayara Jhessica Marques da Fonsêca ^[3]

 Leonardo Nascimento Dias ^[4]

 Vamberto Monteiro da Silva ^[5]

 Wilson Acchar ^[6]

[1] jbduart961@gmail.com

[2] ricramosf30@ufrn.edu.br

[3] jhessica_marques5@hotmail.com

[6] wacchar@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Brasil

[4] leonardonascimento1994@hotmail.com

[5] vambertomonteirodasilva@yahoo.com.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Brasil

RESUMO: As indústrias da construção civil e do agronegócio buscam processos e produtos que necessitem de uma menor quantidade de energia na sua fabricação. Diversos resíduos oriundos dos segmentos citados são aproveitados como fundentes, ligantes, aditivos, etc. evitando o descarte *in natura*. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) são passivos que, isoladamente, apresentam potencial pozolânico. Quando misturados, poderão gerar novos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, decorrentes da recombinação da sílica e alumina amorfas existentes em sua composição com a fase Portlandita, advinda da hidratação do cimento e da constituição química da cal hidratada. A pesquisa avaliou a viabilidade do uso combinado desses resíduos como aditivo pozolânico na moldagem de tijolos maciços de solo-aglomerante(s), sem e com teores de 2% e 4% de RCV e 2% de CBC. Foi realizada a caracterização física, química e mineralógica dos insumos e, em seguida, a moldagem dos tijolos. Amostras dos melhores resultados foram submetidas aos ensaios de DRX e MEV. As composições S12C4RCV e S12C2CBC2RCV, em relação às propriedades físicas e mecânicas, atingiram os melhores resultados.

Palavras-chave: atividade pozolânica; cinza do bagaço da cana-de-açúcar; resíduo de cerâmica vermelha; tijolos ecológicos.

Joint addition of red ceramic residue and sugarcane bagasse ash in the production of ecological bricks

ABSTRACT: The civil construction and agribusiness industries are looking for processes and products that require less energy to manufacture. Various residues from the mentioned segments are used as fluxes, binders, additives, etc., avoiding unprocessed disposal. The sugarcane bagasse ash (CBC) and the red ceramic residue (RCV) are liabilities that, in isolation, have pozzolanic potential. When mixed, they can generate new hydrated calcium silicates and aluminates,

*Autor para correspondência.

resulting from the recombination of the existing silica and amorphous alumina in them with the Portlandite phase, resulting from the hydration of cement and the chemical constitution of hydrated lime. The research evaluated the feasibility of the combined use of these residues as a pozzolanic additive in the molding of solid bricks of soil-agglomerate (s) without and with contents of 2% and 4% of RCV and 2% of CBC. The physical, chemical, and mineralogical characterization of the inputs was carried out and then the molding of the bricks. Samples of the best results were subjected to XRD and SEM tests. The compositions S12C4RCV and S12C2CBC2RCV, concerning physical and mechanical properties, achieved the best results.

Keywords: *ecological bricks; pozzolanic activity; red ceramic residue; sugarcane bagasse ash.*

1 Introdução

De todos os recursos naturais disponíveis, cerca de 20% a 50% são consumidos pelo setor da construção civil (CBCS, 2014), que cresce a cada ano, causando sérios danos à natureza com a poluição gerada. O cimento Portland é um produto muito consumido por esse setor, contribuindo para esses danos. Seu processo produtivo é um intensivo emissor de gases de efeito estufa.

A necessidade de se buscar o aperfeiçoamento de novas técnicas de reutilização e reciclagem dos resíduos produzidos torna-se cada vez mais evidente. A utilização dos resíduos objetiva dar-lhes um destino adequado, possibilitando, também, contribuir no desempenho de outros materiais, quanto a sua incorporação na matriz cimentícia (VASCONCELOS, 2013).

Os tijolos de solo-cimento e solo-cal, ambos incorporados com o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), promovem a ocorrência da reação pozolânica por conterem pozolanas – óxidos de sílica e alumina em estruturas cristalinas não organizadas ou amorfas. Estes se recombinaem com o hidróxido de cálcio proveniente da cal e/ou decorrente da hidratação cimentícia, contribuindo para a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

A produção de tijolos ecológicos, com utilização de resíduos pozolânicos, torna-se importante, pois, além de apresentar caráter sustentável, devido à não necessidade de sinterização dos tijolos e possibilitar a destinação correta dos resíduos, aumenta a resistência do tijolo, necessitando de menores teores de aglomerantes.

A utilização de materiais pozolânicos pode reduzir consideravelmente o consumo de aglomerantes. A utilização de dois resíduos, um orgânico (CBC) e um inorgânico (RCV), enriqueceu as propriedades (físicas e mecânicas) dos tijolos. A viabilidade da ocorrência da reação pozolânica tornou possível o melhoramento dessas propriedades.

2 Referencial teórico

A pozolana era utilizada desde épocas antigas, como no período romano, na forma de pó de tijolo, na ausência de pozolanas naturais; esse material ainda conferia características hidráulicas para argamassas de cal e, por vezes, propriedades impermeabilizantes (VEJMEJKOVA *et al.*, 2012).

De acordo com a norma do Instituto Americano de Concreto 232 1R-00 (ACI, 2000), o material pozolânico é definido como “material silico e silicoaluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma atividade cimentante, mas que, quando finamente moído e na presença de água, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas normais para formar compostos dotados de propriedades cimentícias”.

Conforme a norma NBR 12653 (ABNT, 2015), a propriedade pozolânica dependerá da composição química dos materiais, e a soma dos óxidos de alumínio, silício e ferro existentes deverão apresentar percentual superior a 70%.

O emprego de materiais pozolânicos pode promover uma redução substancial do consumo de aglomerantes, como o cimento Portland e a cal. A reação pozolânica ocorre entre a pozolana e o hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1 O resíduo de cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, integra o setor dos minerais não metálicos da indústria da transformação mineral, fazendo parte da complexa cadeia produtiva que compõe o sistema construtivo.

No Brasil, os principais produtos do setor de cerâmica vermelha são: blocos, tijolos, telhas, elementos vazados, lajes, lajotas, ladrilhos vermelhos, tubos, agregados leves, além de produtos para outros fins, como: argilas piro expandidas, objetos ornamentais e utensílios domésticos.

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV), devido a sua comprovada atividade pozolânica, quando submetido a processos de cominuição, possibilita aumento na superfície específica e reatividade, em meio aquoso, com o hidróxido de cálcio existente nos aglomerantes cimento e cal hidratada (SILVA, 2013).

Estudos indicam que os resíduos de cerâmica vermelha, quando finamente moídos (material passante na peneira #200 de 0,075 mm), promovem a ocorrência de atividade pozolânica em contato com o cimento Portland e/ou cal, em presença de água.

O RCV proveniente da quebra de tijolo cerâmico aplicado na execução de alvenarias de vedação apresenta-se como uma alternativa viável, devido a sua comprovada atividade pozolânica (quando submetido a processos de cominuição) (SILVA, 2013).

Pesquisas como o estudo da potencialidade do resíduo cerâmico incorporado na produção de tijolos maciços de solo-aglomerante (SILVA, 2013) e a substituição de 10% do cimento Portland em argamassas mistas (cimento, cal e areia), aplicadas em revestimentos de alvenarias e tetos, que proporcionaram melhoria significativa nas propriedades físicas e mecânicas dessas argamassas, nos estados fresco e endurecido (ARAÚJO, 2017), estão contribuindo para confirmar o potencial pozolânico desse resíduo inorgânico.

2.2 A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)

O bagaço da cana-de-açúcar era considerado um problema ambiental, e uma das poucas vantagens comerciais era a sua destinação para alimentação de animais em confinamento, entretanto, era utilizado em pequena quantidade frente aos volumes gerados nas usinas (REZENDE, 2016).

Na atualidade, o cenário é outro. A partir de novas tecnologias e demandas, o bagaço da cana-de-açúcar, até então um resíduo altamente poluidor, passou a ser uma importante fonte de geração de energia elétrica e de renda para os consumidores.

O resíduo passou a ser queimado, com o intuito de produzir energia a ponto de ser, hoje, uma importante fonte de renda. Segundo Tommaselli *et al.* (2011), com a queima, são gerados outros resíduos, como os gases produzidos pela combustão e as cinzas, que ainda se avolumam nos pátios das usinas. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) é obtida a partir da queima do bagaço da cana nas fornalhas das caldeiras das usinas produtoras de açúcar e álcool.

O bagaço da cana-de-açúcar é um dos resíduos orgânicos de maior expressão, capaz de servir como fonte de minerais a serem utilizados na produção industrial de diversos materiais. Para cada tonelada de bagaço, são gerados 25 kg de cinzas, constituindo-se em um problema residual, pois se trata de grande volume comumente descartado em aterros ou em áreas agrícolas.

Segundo Seco *et al.* (2012), atualmente os materiais com potencialidade pozolânica são bastantes aplicados no setor de construção. Na Engenharia Civil, a técnica de estabilização do solo utiliza esses materiais como ligantes. Nos edifícios, o uso de materiais pozolânicos é também muito importante nos elementos estruturais.

Estudos científicos recentes utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), na produção de tijolos ecológicos de cascalho, oriundo da perfuração de petróleo e cimento (MARQUES, 2015), em tijolos de solo-cimento, obtendo resultados promissores, como exposto nos trabalhos de Katere e Maduwar (2017), Kazmi *et al.* (2016) e Moura *et al.* (2021).

A CBC por si só é um resíduo de caráter pozolânico e filer e, portanto, proporciona mudanças benéficas à estrutura hidratada (CASTALDELLI *et al.*, 2013; MORAES *et al.*, 2015).

3 Materiais e métodos

O cimento empregado foi o CP II F-32, cimento composto, com significativo teor de filer calcário, apresentando propriedades recomendadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2012) para produção de composições de solo-cimento, adquirido na cidade de Natal.

A cal utilizada foi a cálcica hidratada (CH-II), comercialmente conhecida como Rebocal, atendendo às recomendações da NBR 7175 (ABNT, 2003) e da Associação Brasileira dos Produtores de Cal (ABPC, 2010), fabricada na cidade de Campina Grande (PB).

O solo utilizado, coletado na BR-101 (Km 126), entre as cidades de São José de Mipibú e Goianinha, no estado do Rio Grande do Norte (RN), apresenta características geotécnicas de solos tropicais lateríticos, sendo típico dessa região do estado (SILVA, 2013). Segundo o sistema de classificação HRB (*Highway Research Board*) é um solo tipo A-4 e conforme o sistema USCS (*Unified Soil Classification System*) é um solo arenoso com fração fina silto-argilosa.

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) foi proveniente da usina Monte Alegre, localizada na cidade de Mamanguape (PB). A CBC foi refinada para ajuste da granulometria na faixa próxima à do cimento Portland (próxima a peneira #200).

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV) foi coletado na cidade de Natal, em obras de pequeno e médio porte, oriundos de tijolos cerâmicos fabricados na Cerâmica Ouro

Branco, localizada no município de Ielmo Marinho (RN). Após coletado, o RCV (proveniente de tijolos cerâmicos), foi fragmentado em um moinho de bolas, sendo peneirado em seguida na peneira #200. A água empregada na pesquisa foi proveniente da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN).

A nomenclatura das misturas solo-aglomerante(s) com CBC e RCV aplicadas na moldagem dos tijolos maciços, está explicitada na Tabela 1.

Tabela 1 ►
Nomenclatura
das composições.
*Fonte: dados da
pesquisa (2020)*

Nomenclatura	Composições
S12C	Solo + 12% cimento
S12C4RCV	Solo + 12% cimento + 4% RCV
S12C2CBC2RCV	Solo + 12% cimento + 2% CBC + 2% RCV
S6C6CH	Solo + 6% cimento + 6% cal
S6C6CH4RCV	Solo + 6% cimento + 6% cal + 4%RCV
S12CH2CBC2RCV	Solo + 12% cal + 2% CBC + 2% RCV

A metodologia de trabalho foi constituída inicialmente da caracterização das matérias-primas através das técnicas de análise granulométrica das normas NBR 6457 (ABNT, 2016a) e NBR 7181 (ABNT, 2016c), ensaio de compactação da NBR 7182 (ABNT, 2016d), limites de Atterberg – limite de liquidez da NBR 6459 (ABNT, 2016b) e limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 2016c) – e o teste de retração (CEPED, 1984), sendo esta etapa realizada no laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN. Concluídas as caracterizações iniciais, foram realizados ensaios de análise mineralógica por difração de raios X (DRX), análise química por fluorescência de raios X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), todos realizados nos laboratórios da Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Foram moldados tijolos maciços, compostos por misturas de solo-cimento e solo-cimento-cal, incorporando um resíduo orgânico (CBC) e um inorgânico (RCV), buscando, com isso, melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos produzidos. A melhoria dessas propriedades tornou-se possível, devido à possibilidade da ocorrência da reação pozolânica, pela existência de óxidos de sílica e alumina, na forma desorganizada (não cristalina), no solo intemperizado, na CBC e no RCV.

Depois de moldados, os tijolos foram levados à cura, durante o período de sete dias, em câmara úmida adaptada à temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa do ar de aproximadamente 90%. Terminado o processo de cura, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e absorção de água, com os tijolos moldados aos 56, 90, 120, 150 e 180 dias, em conformidade com a NBR 8492 (ABNT, 2012b).

A escolha de idades superiores a 28 dias justifica-se pela necessidade de uma avaliação mais criteriosa dos efeitos da combinação do RCV e CBC, pois as propriedades pozolânicas diferentes das cimentícias necessitam do tempo para atingir sua plenitude (GUIMARÃES, 2002).

Também foi realizado o ensaio de durabilidade modificada, que consiste em doze ciclos de secagem em estufa e imersão em água, de acordo com o método DNER-ME 203 (DNER, 1994).

4 Resultados e discussão

O teste de retração (CEPED, 1984), executado na mistura de água no solo usado no estudo científico, não constatou a existência de fendas transversais na parte central do solo em observação que viessem a ultrapassar o limite de 2,0 cm. As fissuras apresentadas foram inferiores a 1,0 cm, comprovando a ausência de argila expansiva, de acordo com a Figura 1.

Figura 1 ▶
Teste de retração.
Fonte: arquivo dos
autores (2020)



Essa constatação visual preliminar de um solo com plasticidade adequada, que não originasse retrações acentuadas que pudessem comprometer a fabricação de tijolos maciços prensados, foi um dos parâmetros adotados em conjunto com as análises microestruturais para a seleção do solo em estudo.

A Tabela 2 indica os valores para o solo e solo com adição de RCV e CBC, dos limites de Atterberg (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade).

Tabela 2 ▶
Limites de Atterberg
(solo e resíduos).
Fonte: dados da
pesquisa (2020)

Parâmetro	Solo	Solo+2%RCV+2%CBC
Limite de liquidez	25,3%	26,8%
Limite de plasticidade	18,1%	17,9%
Índice de plasticidade	7,25%	8,9%

Analisando os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) e tomando-se como referência Caputo (2011), o solo é classificado como medianamente plástico, uma vez que possui índice de plasticidade (IP) menor que 7 e maior que 15 e do tipo A-4, de acordo com a classificação adotada pelo sistema HRB.

A NBR 10833 (ABNT, 2013) estabelece o limite máximo de 45% para o LL e 18% para o IP, logo o solo atende aos parâmetros exigidos por essa norma, podendo ser utilizado como solo-cimento. Os ensaios realizados demonstraram que teores dos resíduos (2% RCV+ 2% CBC) adicionados à massa do solo mantiveram os índices de Atterberg em conformidade com o que estabelece a NBR 10833 (ABNT, 2013).

A compactação realizada através do ensaio do Proctor Normal constatou um peso específico aparente máximo de 1,90 g/cm³ e uma umidade ótima de 13,54% para o solo. A adição separada ou combinada dos resíduos acarretou uma pequena elevação na umidade ótima das misturas, devido ao seu grau de finura.

A Tabela 3 apresenta o resultado da composição química das matérias-primas utilizadas na pesquisa, obtido através de FRX.

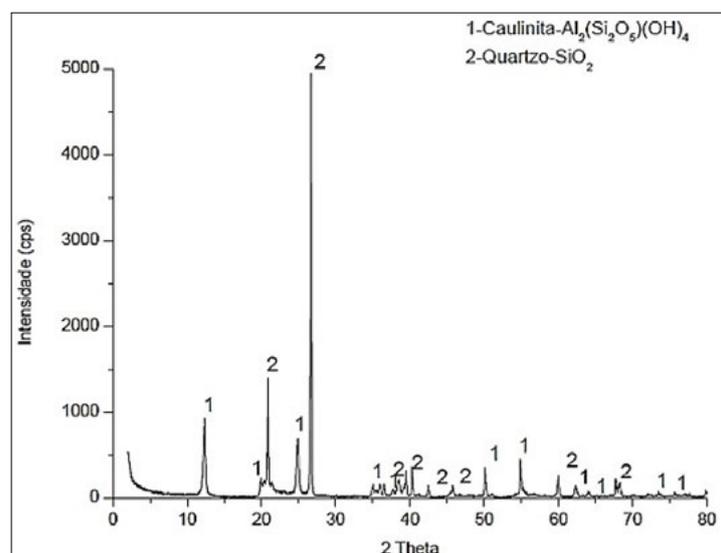
Tabela 3 ►
Composição química das matérias-primas utilizadas na pesquisa (%).
Fonte: dados da pesquisa (2020)

OX.	SO	CA	CI	RCV	CBC
SiO ₂	52,2	2,31	19,3	45,49	26,74
Al ₂ O ₃	36,0	0,75	4,6	35,69	3,66
Fe ₂ O ₃	1,91	0,47	3,22	7,82	13,48
MgO	0,49	6,43	3,2	4,11	2,86
K ₂ O	0,25	0,12	1,22	2,38	15,27
CaO	-	88,3	60,84	1,46	19,82
SO ₃	0,05	0,34	-	0,59	6,05
TiO ₂	0,68	-	0,27	0,94	1,16

Legenda: OX: óxidos; SO: solo; CA: cal; CI: cimento; RCV: resíduo da cerâmica vermelha; CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

O solo, conforme apresentado na Tabela 3, possui aproximadamente 88% da sua composição química total composta de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), indicando uma forte presença dos minerais quartzo e caulinita, comprovado no ensaio de DRX (Figura 2).

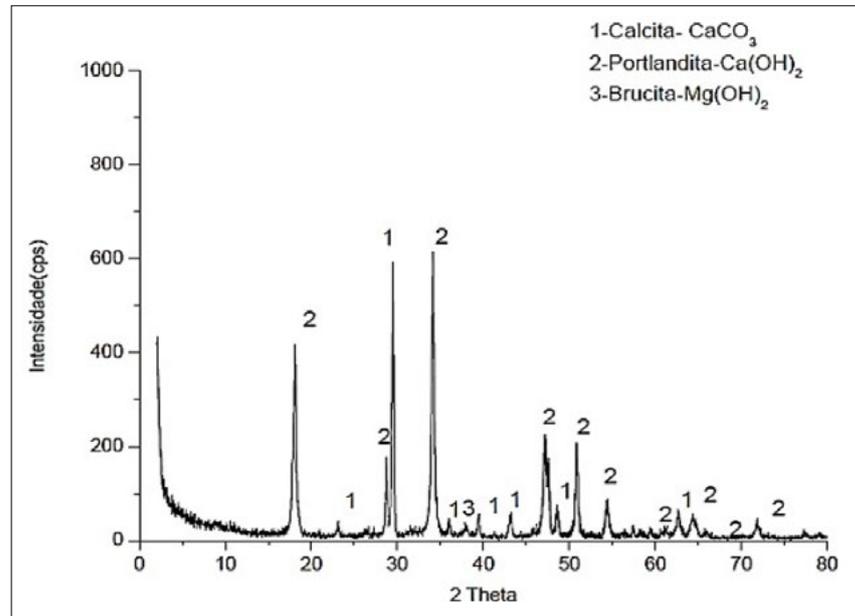
Figura 2 ►
DRX do solo.
Fonte: dados da pesquisa (2020)



Além disso, a constatação da predominância do argilomineral caulinita na composição do solo confirmou os resultados dos ensaios dos limites de Atterberg e do teste de retração, que indicaram a ausência de argilas expansivas ou com plasticidade inadequada para produção de tijolos maciços prensados de solo-cimento.

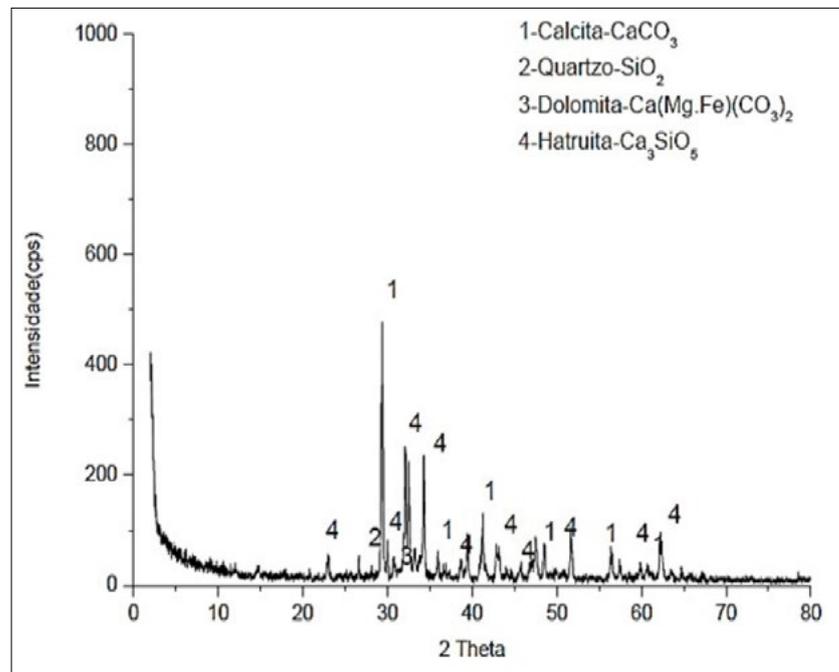
A cal, conforme apresentado na Tabela 3, tem um alto percentual de óxido de cálcio (CaO), aproximadamente 88%, e um valor de óxido de magnésio (MgO) da ordem aproximada de 6%, comprovados no ensaio de DRX (Figura 3). Com base nesses índices, a cal foi classificada como cálcica tipo CH-II, como dispõe a NBR 7175 (ABNT, 2003).

Figura 3 ►
DRX da cal.
Fonte: dados da pesquisa (2020)



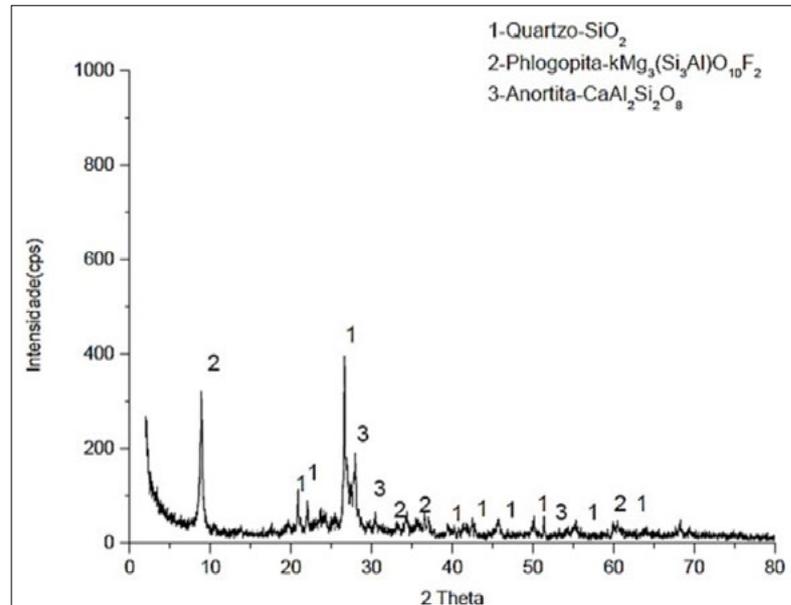
O cimento apresenta um percentual de óxido de cálcio (CaO) de aproximadamente 60% (Tabela 3), confirmando a adição de filer calcário, sendo um cimento composto. Apresenta as fases mineralógicas calcita, dolomita, quartzo e hatruita (Figura 4).

Figura 4 ►
DRX do cimento.
Fonte: dados da pesquisa (2020)



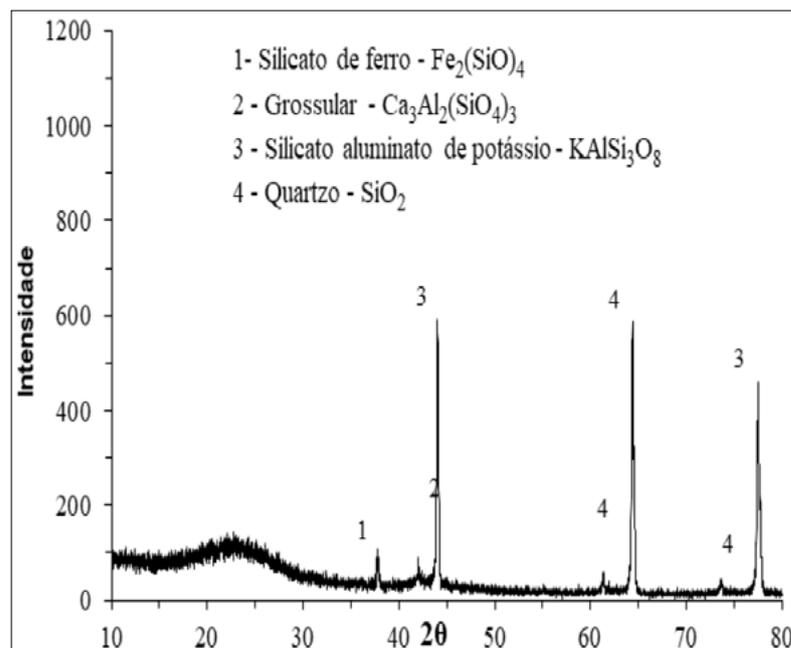
A amostra do RCV, conforme Tabela 3, apresenta, na sua composição, aproximadamente 89% de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro. Esse valor é superior ao valor mínimo exigido (70%) para a soma dos óxidos citados, para materiais pozolânicos da classe N, conforme dispõe a NBR 12653 (ABNT, 2015). O DRX do RCV (Figura 5) apresenta as fases mineralógicas quartzo, phlogopita e anortita, todas estando em concordância com os óxidos ou elementos encontrados no ensaio de FRX.

Figura 5 ►
DRX do RCV.
Fonte: dados da
pesquisa (2020)



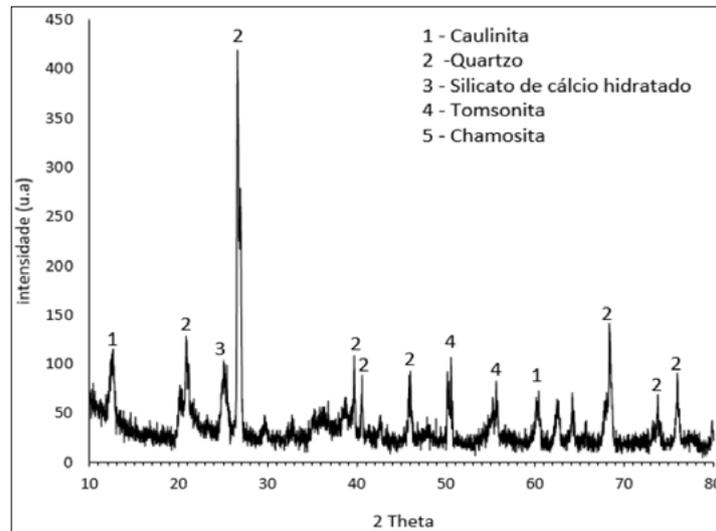
A CBC é constituída de, aproximadamente, 75% de sílica, óxido de cálcio, óxido de ferro e óxido de potássio, conforme observado na Tabela 3. O seu DRX (Figura 6) mostra as fases silicato de ferro, grossular (espécie de cálcio-alumínio, do grupo de minerais granada), silicato aluminato de potássio e quartzo.

Figura 6 ►
DRX da CBC.
Fonte: dados da
pesquisa (2020)



A Figura 7 apresenta o DRX da composição S12C2CBC2RCV. Percebe-se uma maior quantidade de fases de silicatos e aluminatos presentes. Devido ao fato de o RCV ser sinterizado e rico em alumina, ocorre formação de aluminossilicatos hidratados. Aparece também a formação de silicatos de cálcio hidratados formados pelo RCV e pela CBC.

Figura 7 ►
DRX da composição
S12C2CBC2RCV.
Fonte: dados da
pesquisa (2020)



A fase chamosita, encontrada em 55,5°, é um exemplo de aluminossilicato contendo ferro e magnésio – $(Mg_{1.5}Fe_{7.9}Al_{2.6})(Si_{6.2}Al_{1.8}O_{20})(OH)_{16}$. Destaca-se, também, a presença do silicato de cálcio hidratado (C_2S), encontrado na fase $Ca_2(SiO_4)(H_2O)$ e $Ca_2(SiO_3OH)(OH)$.

As análises granulométricas do solo (Figura 8), do RCV (Figura 9) e da CBC (Figura 10), foram realizadas conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016c). O solo apresentou percentuais de 100%, 69,5% e 36,0% passando, respectivamente, nas peneiras #4 (4,8 mm), #40 (0,42 mm) e #200 (0,075 mm).

Figura 8 ►
Granulometria do solo.
Fonte: dados da
pesquisa (2020)

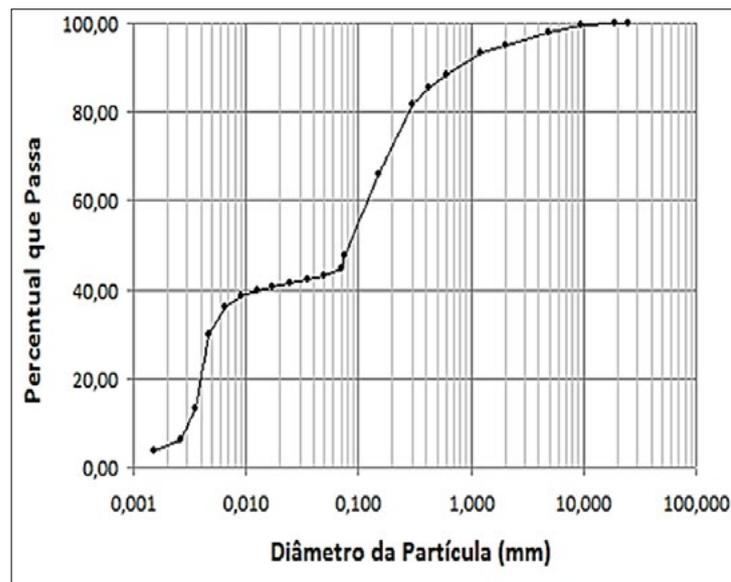


Figura 9 ►
Granulometria do RCV.
Fonte: dados da pesquisa (2020)

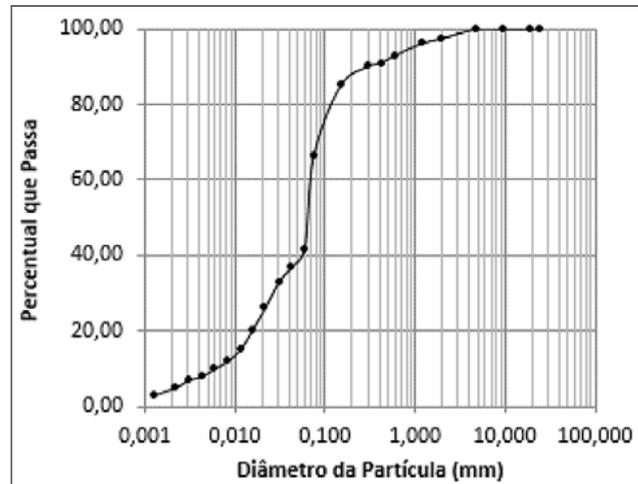
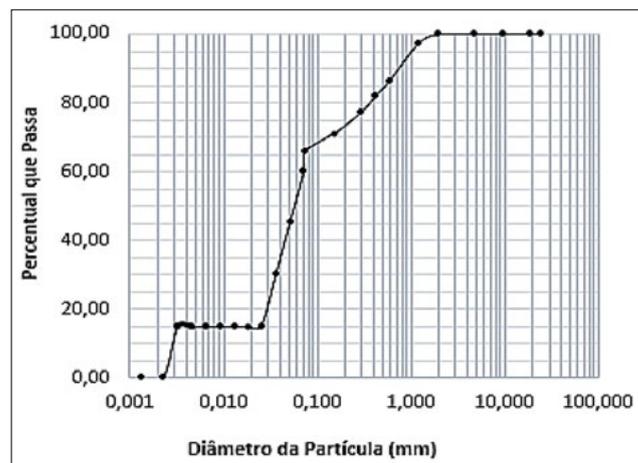


Figura 10 ►
Granulometria da CBC.
Fonte: dados da pesquisa (2020)



O RCV apresentou percentuais de 99,9%, 90,9% e 66,4%, passando nas peneiras #4 (4,8 mm), #40 (0,42 mm) e #200 (0,075 mm), respectivamente (Figura 9). Os percentuais de 2% e 4% de RCV adicionados à fração fina do solo atenderam aos limites prescritos pela NBR 10833 (ABNT, 2013), com 10% a 50% da formulação solo-RCV, passando na peneira #200.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2012) e a NBR 10833 (ABNT, 2013) prescrevem os critérios para a seleção dos solos, destinados à fabricação dos tijolos maciços de solo-cimento:

- i) 100% do material, passando na peneira ABNT #4 (4,8 mm);
- ii) 10% a 50% de material, passando na peneira #200 (0,075 mm).

Os valores encontrados revelam que o solo atende aos parâmetros estabelecidos pela ABCP, para misturas de solo-cimento, e aos critérios estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2013), para produção de tijolos maciços de solo-cimento, não necessitando de correção granulométrica.

A CBC apresentou percentuais de 100%, 81,7% e 65,9%, passando nas peneiras #4 (4,8 mm), #40 (0,42 mm) e #200 (0,075 mm), respectivamente (Figura 10). O elevado percentual das partículas da CBC passante na peneira #200 possibilitou uma maior ocorrência da atividade pozzolânica, pois, de acordo com Silva (2013), quanto menor o

diâmetro das partículas, maior a possibilidade da ocorrência de atividade química dessas partículas, quando em contato com o cimento e/ou cal, em presença de água.

Após a caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas, foram realizadas as prensagens e cura dos tijolos e, em seguida, realizados os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), absorção de água e durabilidade modificada.

A Tabela 4 apresenta os valores da RCS das composições, com apresentação gráfica desses valores na Figura 11. Observa-se que os valores da RCS, aos quais os valores da RCV e/ou CBC foram adicionados, elevaram-se, quando comparados aos das composições moldadas sem a adição do RCV e/ou CBC. Isso é explicado pelo efeito filler de colmatação dos poros, ocasionado pela fração fina que provém dos resíduos e também, possivelmente, pela produção dos silicatos hidratados, através das reações pozolânicas.

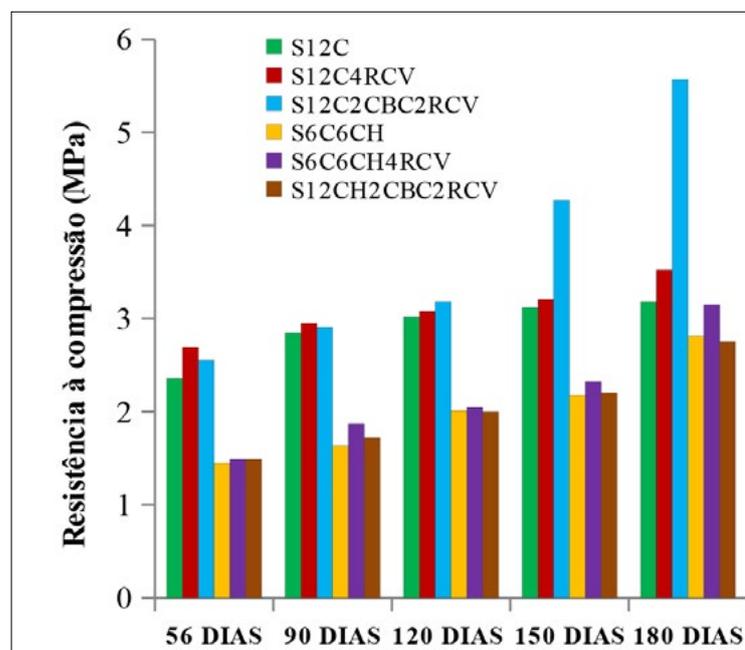
Tabela 4 ▼

Resistência à compressão simples das composições (MPa).
Fonte: dados da pesquisa (2020)

Composições	Idades (dias)				
	56	90	120	150	180
S12C	2,36 ± 0,21	2,85 ± 0,19	3,02 ± 0,05	3,12 ± 0,25	3,18 ± 0,35
S12C4RCV	2,69±0,37	2,95 ± 0,25	3,08 ± 0,10	3,21 ± 0,14	3,52 ± 0,59
S12C2CBC2RCV	2,55 ± 0,37	2,91 ± 0,12	3,18 ± 0,31	4,27 ± 0,21	5,57 ± 0,25
S6C6CH	1,45 ± 0,15	1,63 ± 0,34	2,01 ± 0,01	2,18 ± 0,04	2,81 ± 0,10
S6C6CH4RCV	1,49 ± 0,32	1,87 ± 0,47	2,05 ± 0,26	2,32 ± 0,08	3,15 ± 0,18
S12CH2CBC2RCV	1,49 ± 0,16	1,72 ± 0,43	2,0 ± 0,37	2,20 ± 0,17	2,75 ± 0,13

Figura 11 ►

Gráfico da resistência à compressão simples das composições (MPa).
Fonte: dados da pesquisa (2020)



Quando foram adicionados a CBC e o RCV à mistura solo-cal (para a composição S12CH2CBC2RCV), a Resistência à Compressão Simples (RCS) alcançou os maiores valores ao longo das idades de moldagem. Isso pode ser explicado pelo fato de o efeito *filler* ter proporcionado, pela adição conjunta do RCV e da CBC à mistura, a possibilidade da recombinação dos elevados teores de sílica existentes nos resíduos com a fase Portlandita, formando silicatos de cálcio hidratados.

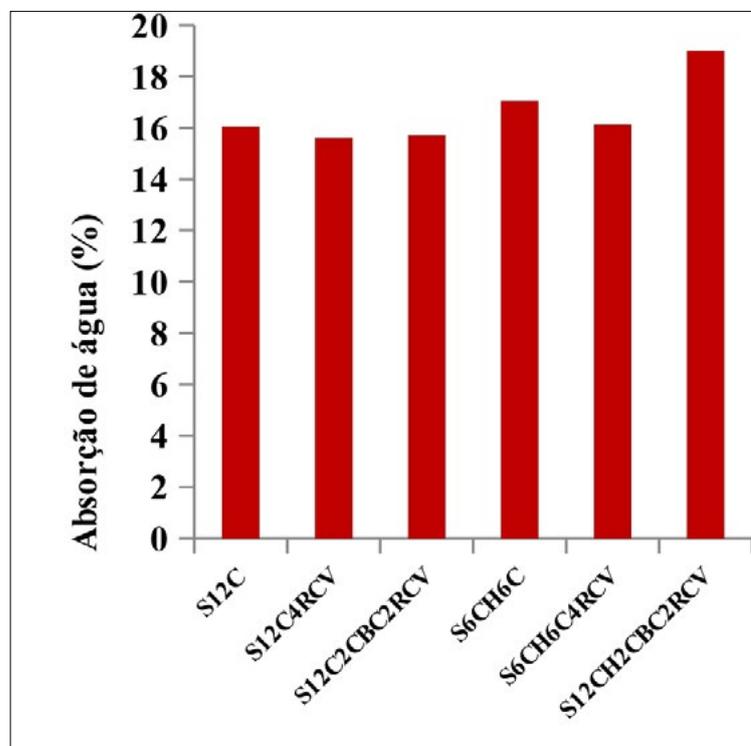
Foi observado (Figura 11) que, à medida que as idades de moldagem aumentaram, os valores da RCS continuaram crescendo ao longo do tempo (para a composição S12CH2CBC2RCV).

As reações pozolânicas para formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados ocorrem a médio e longo prazo, melhorando as propriedades mecânicas da mistura solo-cal (SILVA, 2013). A substituição parcial do cimento pela cinza (CBC) ocasiona pequeno acréscimo na resistência (RCS) – esse ganho é atribuído à presença do óxido de silício, que, junto com o óxido de alumínio em presença de água, confere ao material o efeito pozolânico.

A adição da CBC e do RCV à mistura solo-cimento (composição S12C2CBC2RCV) proporcionou maiores valores na RCS para essa composição, quando comparados com os valores obtidos pela composição citada anteriormente (S12CH2CBC2RCV), comprovando a ação dos silicatos de cálcio C₂S e C₃S, a partir da hidratação desses silicatos, aumentando a resistência mecânica da composição com o aglomerante cimento.

A Figura 12 apresenta, graficamente, a absorção de água dos tijolos produzidos na pesquisa. Todas as composições apresentaram índice de absorção inferior ao máximo recomendado pela NBR 8491 (ABNT, 2012a). As composições nas quais os resíduos foram adicionados reduziram significativamente os valores da absorção (principalmente naquelas produzidas apenas com o aglomerante cimento).

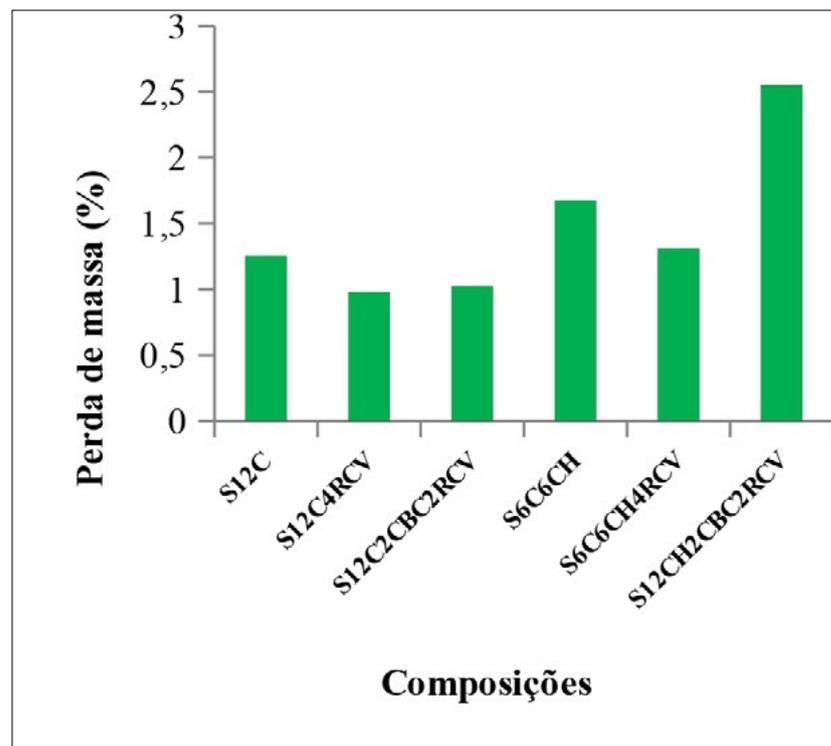
Figura 12 ►
Absorção de água
das composições
dos tijolos (%).
Fonte: dados da
pesquisa (2020)



Esse fenômeno está relacionado ao preenchimento dos poros existentes na microestrutura, devido à adição do RCV e da CBC, tornando essas composições mais densas. A composição S12C4RCV apresentou o menor valor para o índice de absorção entre todas as demais, fato que pode ser explicado pela ocorrência do efeito filer e pela ocorrência de possíveis reações pozolânicas ao longo do tempo, causadas pelo RCV.

As perdas de massas das composições produzidas na pesquisa estão apresentadas graficamente na Figura 13. De um modo geral, as composições dos tijolos moldados com solo-cimento apresentaram uma menor perda de massa quando comparadas com as composições de solo-cal. A durabilidade das composições dos tijolos moldados com solo-cimento apresentou uma menor perda de massa quando comparadas com as composições moldadas com solo-cal (SILVA *et al.*, 2014).

Figura 13 ►
Perda de massa das
composições (%).
Fonte: dados da
pesquisa (2020)



A composição moldada, utilizando-se somente a cal como aglomerante (S12CH2CBC2RCV), apresentou o maior valor da perda de massa. A solubilidade do hidróxido de cálcio, a curto prazo, provoca a floculação das partículas do solo e a formação de compostos cimentícios fracos (carbonatação), formando um composto menos resistente que os silicatos e aluminatos, oriundos das reações pozolânicas e contribuindo para o elevado percentual de perda de massa da formulação solo-cal, em relação às misturas de solo-cimento (SILVA, 2013).

Todas as composições atenderam à exigência da NBR 13553 (ABNT, 2012c) quanto à perda de massa, não ultrapassando 10% para os solos do tipo A-4 (solo da pesquisa).

O resultado da perda de massa mostrou que a composição S12C2CBC2RCV (com cimento) apresentou um valor significativamente menor quando comparado com o valor encontrado para a composição S12CH2CBC2RCV (com cal). Isso ocorre pela produção mais rápida de compostos oriundos da hidratação do cimento.

Na Figura 14, é apresentada uma microscopia eletrônica de varredura (MEV) da composição S12C2CBC2RCV. Nota-se uma microestrutura densificada com

reduzida quantidade de poros, sendo também observadas ramificações fibrosas da CBC, conforme visto no trabalho de Marques (2015), e formas que se assemelham às apresentadas pelos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), visto em vários estudos, alguns bem conhecidos, como de Mehta e Monteiro (2014).

Figura 14 ►
MEV da composição
S12C2CBC2RCV.
Fonte: arquivo dos
autores (2020)



5 Conclusões

Os resultados da pesquisa comprovaram os obtidos por outros pesquisadores, como Silva *et al.* (2014) e Marques (2015), que utilizaram o RCV e a CBC, respectivamente. Esses pesquisadores comprovaram a viabilidade técnica desses resíduos, que melhoraram as propriedades físicas e mecânicas, quando foram adicionados nas composições dos tijolos, fato também constatado na presente pesquisa.

O elevado percentual de partículas finas apresentado não só pelo resíduo orgânico (CBC) como também pelo resíduo inorgânico (RCV) colaborou para um empacotamento mais eficiente das partículas, durante o processo de prensagem dos tijolos. A adição do RCV e da CBC, aos aglomerantes das composições formuladas, resultou em melhoria em todas as composições dos tijolos produzidos (constatado, tanto nos ensaios físicos e mecânicos, como nos de DRX e MEV).

As composições S12C2CBC2RCV e S12C4RCV obtiveram os melhores resultados nos experimentos realizados para mensurar a resistência mecânica, a absorção de água e a perda de massa (durabilidade modificada), quando comparadas às outras composições.

Destaca-se a vantagem da utilização dos dois resíduos em conjunto, uma vez que o RCV possui mais alumina e a CBC, apesar de menores teores de alumina e sílica, apresenta baixa cristalinidade (como observado no DRX), contribuindo para um aumento da pozolanidade total.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com utilização de prensas manuais**. São Paulo: ABCP, 2012. Disponível em: <https://abcp.org.br/fabricacao-de-tijolos-de-solo-cimento-com-a-utilizacao-de-prensas-manuais-bt-111/>. Acesso em: 10 maio 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica. Versão corrigida 2. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491**: Tijolos de solo-cimento: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8492**: Tijolo de solo cimento: Análise dimensional, Determinação da resistência à compressão e da Absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13553**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c.

ABPC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. **Programa setorial da qualidade da cal hidratada para a construção civil**. São Paulo: ABPC, 2010. (Relatório setorial n. 58).

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 232.1R-00**: Use of raw or processed natural pozzolans in concrete. Reported by ACI Committee 232. Farmington Hills: ACI, Dec. 2000. Disponível em: <https://metakaolin.ru/Documents/NaturalPozzolans.pdf>. Acesso em: 3 set. 2019.

ARAÚJO, R. A. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24470>. Acesso em: 4 jul. 2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. v. 1.

CASTALDELLI, V. N.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; MONZO, J.; PAYA, J. Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. **Materials**, v. 6, n. 8, p. 3108-3127, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma6083108>.

CBCS – CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas**: subsídios para a promoção da Construção Civil Sustentável. São Paulo: CBCS, 2014. Disponível em: http://www.cbcs.org.br/_5dotsystem/userfiles/mma-pnuma/aspectos%20da%20construcao%20sustentavel%20no%20brasil%20e%20promocao%20de%20politicassustentavel.pdf. Acesso em: 17 abr. 2018.

CEPED – CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. **Manual de construção com solo-cimento**. Camaçari, BA: CEPED, 1984.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **ME 203 – 94**. Solo-cimento: determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem. Brasília, DF: DNER, 1994.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. São Paulo: Pini, 2002.

KATERE, V. D.; MADUWAR, M. V. Application of solid wastes for the production of sustainable concrete. *In*: FIRAT, S.; KINUTHIA, J.; ABU-TAIR, A. (ed.). **Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)**. Cham: Springer, 2017. (Lecture Notes in Civil Engineering, v. 7). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-64349-6_10.

KAZMI, S. M. S.; ABBAS, S.; SALEEM, M. A.; MUNIR, M. J.; KHITAB, A. Manufacturing of sustainable clay bricks: utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 29-41, Sept. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084>.

MARQUES, S. K. J. **Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/20550>. Acesso em: 4 jul. 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 669 p.

MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 670-677, Sept. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>.

MOURA, E. M.; SALES, J. N. B.; NASCIMENTO, N. C.; SOUSA, V. M. Z.; SILVA, D. D. C.; LIBERA JUNIOR, V. D. Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 69-80, jan./mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>.

REZENDE, M. F. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) –Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6981>. Acesso em: 4 jul. 2022.

SECO, A.; RAMIREZ, F.; MIQUELEIZ, L.; URMENETA, P.; GARCIA, B.; PRIETO, E.; OROZ, V. Types of waste for the production of pozzolanic materials: a review. *In*: SHOW, K.- Y.; GUO, X. (ed.). **Industrial Waste**. London: IntechOpen, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/36285>.

SILVA, V. M. **Estudo da potencialidade do resíduo cerâmico incorporado na produção de tijolos maciços de solo-aglomerante(s)**. 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/26931>. Acesso em: 4 jul. 2022.

SILVA, V. M.; GOÍS, L. C.; DUARTE, J. B.; SILVA, J. B.; ACCHAR, W. Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks. **Materials Research**, v. 17, n. 2, p. 326-331, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000014>.

TOMMASELLI, M. A. G.; LIMA, A. V.; TSUJI, E. R.; MACHADO, C. A. C.; ALVES, A. L. Alternativa de utilização sustentável do resíduo cinza, oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar, incorporando-a ao concreto como agregado. *In*: ENCONTRO NACIONAL

DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENESEP), 31., 2011, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABEPRO, 2011. p. 1-8. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enesep2011_tn_stp_143_904_19403.pdf. Acesso em: 4 jul. 2022.

VASCONCELOS, M. C. A. **Avaliação da atividade pozzolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. Mestrado (Dissertação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17103>. Acesso em: 4 jul. 2022.

VEJMELOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVANANIKOVA, P.; KERSNER, Z.; CERNY, R. Properties of lime composites containing a new type of pozzolana for the improvement of strength and durability. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 8, p. 3543-3540, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.053>.