


TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM PERLITA COMO MCS E CINZA DE ALGAROBA E CAJUEIRO COMO FÍLLER

Luiz Alexandre Aquino de Oliveira^A, Sâmea Valensca Alves Barros^B



ARTICLE INFO	RESUMO
<p>Article history: Received: January, 29th 2024 Accepted: April, 02nd 2024</p>	<p>Objetivo: O objetivo deste estudo é investigar a viabilidade técnica de tijolos de solo-cimento sem função estrutural confeccionados com perlita expandida como material cimentício suplementar e cinza de algaroba e cajueiro em substituição parcial ao solo.</p>
<p>Palavras-chave: ODS 12; Material Cimentício Suplementar; Tijolos Ecológicos; Viabilidade Técnica.</p> 	<p>Referencial Teórico: A pesquisa fundamentou-se nas normativas técnicas quanto as características que os materiais utilizados em tijolos de solo-cimento devem apresentar.</p> <p>Método: Para o desenvolvimento desta pesquisa, traçou-se o planejamento experimental, que compreendeu as etapas: aquisição dos materiais convencionais e alternativos utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento; caracterização química-mineralógica da perlita expandida (PE) e cinza de algaroba e cajueiro (CAC); definição de qual uso seria dado a PE e CAC na mistura de solo-cimento; definição dos traços e moldagem dos corpos de prova; determinação da resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento propostos.</p> <p>Resultados e Discussão: Os resultados obtidos revelaram que os tijolos de solo-cimento sem função estrutural propostos apresentaram desempenho técnico e “pegada ambiental” adequados.</p> <p>Implicações da Pesquisa: As implicações desta pesquisa contribuem para a popularização dos objetivos do desenvolvimento sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, principalmente, em promover o consumo e produção sustentável no setor da construção civil.</p> <p>Originalidade/Valor: Este estudo contribui para a literatura ao propor o uso concomitante de adição mineral e resíduo sólido na confecção de tijolos solo-cimento. A relevância e o valor desta pesquisa são evidenciados por sua originalidade em propor o uso simultâneo de materiais de características diferentes e com funções distintas na mistura solo-cimento, ainda não proposto na literatura.</p> <p>Doi: https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i5.4629</p>

SOIL-CEMENT BRICKS WITH PERLITE AS MCS AND MESQUITE AND CASHEW ASH AS FILLER

ABSTRACT

Objective: The objective of this study is to investigate the technical feasibility of soil-cement bricks without structural function made with expanded perlite as a supplementary cementitious material and mesquite and cashew ash as a partial replacement for soil.

Theoretical Framework: The research was based on technical regulations regarding the characteristics that the materials used in soil-cement bricks must present.

Method: For the development of this research, an experimental plan was drawn up, which comprised the steps: acquisition of conventional and alternative materials used in the manufacture of soil-cement bricks; chemical-

^A Graduando em Engenharia Civil. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: luiz.oliveira46336@alunos.ufersa.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-5079-3603>

^B Doutora em Ciências e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: sameavalensca@ufersa.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9035-486X>

mineralogical characterization of expanded perlite (PE) and mesquite and cashew ash (CAC); definition of what use would be given to PE and CAC in the soil-cement mixture; definition of traces and molding of test specimens; determination of the simple compressive strength and water absorption of the proposed soil-cement bricks.

Results and Discussion: The results obtained revealed that the proposed soil-cement bricks without structural function presented adequate technical performance and “environmental footprint”.

Research Implications: The implications of this research contribute to the popularization of the sustainable development objectives established by the United Nations, mainly in promoting sustainable consumption and production in the construction sector.

Originality/Value: Originality/Value: This study contributes to the literature by proposing the concomitant use of mineral addition and solid waste in the manufacture of soil-cement bricks. The relevance and value of this research are evidenced by its originality in proposing the simultaneous use of materials with different characteristics and with different functions in the soil-cement mixture, not yet proposed in the literature.

Keywords: SDG 12, Supplementary Cementitious Material, Ecological Bricks, Technical Viability.

LADRILLOS DE SUELO-CEMENTO CON PERLITA COMO MCS Y MESBUS Y CENIZAS DE CAJU COMO RELLENO

RESUMEN

Objetivo: El objetivo de este estudio es investigar la viabilidad técnica de ladrillos de suelo-cemento sin función estructural elaborados con perlita expandida como material cementante suplementario y cenizas de mezquite y anacardo como reemplazo parcial del suelo.

Marco Teórico: La investigación se basó en normativas técnicas respecto a las características que deben presentar los materiales utilizados en los ladrillos de suelo-cemento.

Método: Para el desarrollo de esta investigación se elaboró la planificación experimental, la cual comprendió los pasos: adquisición de materiales convencionales y alternativos utilizados en la fabricación de ladrillos de suelo-cemento; caracterización químico-mineralógica de perlita expandida (PE) y ceniza de mezquite y anacardo (CAC); definición de qué uso se le daría al PE y CAC en la mezcla suelo-cemento; definición de trazas y moldeado de probetas; Determinación de la resistencia a la compresión simple y la absorción de agua de los ladrillos de suelo-cemento propuestos.

Resultados y Discusión: Los resultados obtenidos revelaron que los ladrillos de suelo-cemento propuestos sin función estructural presentaron un desempeño técnico y “huella ambiental” adecuados.

Implicaciones de la investigación: Las implicaciones de esta investigación contribuyen a la popularización de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas, principalmente en la promoción del consumo y la producción sostenible en el sector de la construcción.

Originalidad/Valor: Este estudio contribuye a la literatura al proponer el uso concomitante de adición de minerales y residuos sólidos en la fabricación de ladrillos de suelo-cemento. La relevancia y valor de esta investigación se evidencian en su originalidad al proponer el uso simultáneo de materiales con diferentes características y con diferentes funciones en la mezcla suelo-cemento, aún no propuestos en la literatura.

Palabras clave: ODS 12, Material Cementoso Suplementario, Ladrillos Ecológicos, Viabilidad Técnica.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de cerâmica vermelha do Rio Grande do Norte está entre um dos setores que mais proporciona a geração de empregos no estado, porém apresenta o desafio de modernizar seu processo produtivo, adequando a sua matriz energética. Pois, ainda é constituída por um número significativo de olarias que fazem uso de biomassa como fonte de energia na sua linha de produção.

A biomassa como fonte de energia gera grande quantidade de cinzas, que são resíduos sólidos os quais necessitam de destinação adequada para não trazerem prejuízo aos ecossistemas (Dos Santos et al., 2022). Cada vez mais a busca por soluções que levem ao reaproveitamento de resíduos provenientes da indústria e do meio urbano determina a qualidade de vida das populações, como também, o uso de recursos minerais cuja exploração deve ocorrer de modo eficiente, sustentável e capaz de promover a preservação ambiental (Souza et al., 2023).

Levando assim, a colocar em prática os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) apresentados no plano de ação universal que beneficia as pessoas, o planeta e a prosperidade, a partir da cooperação internacional entre governos, sociedade civil, iniciativa privada e instituições de pesquisa, denominado Agenda 2030 (Koerich et al., 2023).

As propriedades das cinzas de biomassa dependem da composição química, mineralógica (grau de cristalinidade) e da finura delas. Já a estabilização química do solo para uso em tijolos ecológicos decorre do uso de aditivos, comumente são utilizados o cimento Portland e a cal que geram a classificação desses em tijolos de solo-cimento e tijolos de solo-cal, respectivamente. Porém, buscando reduzir a quantidade de cimento utilizada e contribuir para diminuição da emissão de dióxido de carbono (CO_2) a literatura propõe a substituição parcial do cimento Portland por materiais alternativos que apresentem atividade pozolânica como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (Moura et al., 2021; Ferrari et al., 2014).

Porém, não é todo material alternativo que, ao ser beneficiado pelos processos de moagem e/ou peneiramento, irá apresentar propriedades ou características que se adequem a substituição parcial do cimento. À medida que para tal uso é necessário ter atividade pozolânica, e um material terá atividade pozolânica, de acordo com a ABNT NBR 12653, 2014, quando na sua composição química apresenta a soma dos teores de sílica, alumina e ferro superiores a 70%; a estrutura da sílica for amorfa, e quantidade de álcalis disponíveis em Na_2O máxima de 1,5 %.

Quando um material não apresenta atividade pozolânica, mas apresenta baixa granulometria e efeito cimentante, isto é, características semelhantes ou complementares às do cimento Portland pode ser utilizado como material cimentício suplementar (MCS) em substituição parcial ao cimento Portland (Hill & Sharp, 2002; Rosa et al., 2020).

Os materiais não apresentando pozolanicidade e nem efeito cimentante, mas sendo pulverulentos podem ser usados para promover o efeito fíller nas misturas. Utilização bastante disseminada em matrizes cimentícias porque esse efeito promove o empacotamento do sistema,

e conseqüentemente melhora do comportamento mecânico (De Oliveira Neto et al., 2022; Dias et al., 2022; Barros et al., 2020).

A estabilização química do solo com o cimento acontece porque são desencadeadas reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado (Milani & Freire, 2006). Mas, também, pode ocorrer o melhoramento da mistura solo e cimento promovendo o efeito fíller, que proporciona melhor comportamento mecânico.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é verificar o desempenho mecânico de tijolos de solo-cimento confeccionados com perlita expandida como material cimentício suplementar (MCS) em substituição parcial ao cimento e cinza de algaroba e cajueiro em substituição parcial ao solo para proporcionar o efeito filler. Esta pesquisa é relevante por propor e investigar o uso concomitante de adição mineral e incorporação de resíduo sólido na produção de tijolos de solo-cimento, e nas últimas décadas de pesquisa sobre estabilização de solos para fins de produtos ecoeficientes ainda não havia sido levantada esta hipótese do uso simultâneo de materiais distintos com finalidades diferentes que promovem a otimização das propriedades dos tijolos de solo-cimento.

2 OBJETIVOS

Investigar a viabilidade técnica de tijolos de solo-cimento sem função estrutural confeccionados com perlita expandida como material cimentício suplementar e cinza de algaroba e cajueiro em substituição parcial ao solo para promover o efeito filler.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 TIJOLOS DE SOLO CIMENTO

Os tijolos de solo-cimento, também conhecidos como tijolos ecológicos, correspondem a mistura homogênea e proporcional de solo, cimento e água, que é compactada ao teor de umidade ótima do solo utilizado, sob a máxima densidade em prensas hidráulicas ou manuais, apresentando formato de paralelepípedo e podem ser maciços ou vazados (Souza, 2006).

Euphrosino et al. (2022) apresentam as vantagens obtidas na construção que faz uso de tijolos de solo-cimento, e destacam que são elas: a fácil obtenção sustentável de solo; a possibilidade de serem confeccionados com formato auto encaixável (simplifica a colocação dos tijolos e evita o desperdício); a alvenaria levantada com os tijolos de solo-cimento tem consumo reduzido de argamassa por não demandar reboco ou outros revestimentos; a estética singular etc.

Nesta perspectiva, Rodrigues e Holanda (2015) afirmam que estes tijolos são sustentáveis devido à sua produção ocorrer sem necessidade de queima, ao contrário dos tijolos de barro tradicionais. Ademais, Ângelo e Simões (2023) corroboram destacando que na composição destes pode ser incorporados resíduos sólidos, tornando-os produtos ecologicamente corretos.

A literatura destaca que na mistura de solo-cimento pode ser incorporado distintos materiais, sejam eles convencionais (comerciais) ou alternativos (resíduos sólidos beneficiados), com diferentes finalidades de usos dentro da mistura. Os principais são: redução do consumo de cimento Portland e substituição parcial do solo.

O solo utilizado na fabricação dos tijolos de solo-cimento não pode conter matéria orgânica em quantidade que prejudique a hidratação do cimento, de acordo com a ABNT NBR 10833 (2013). Ademais, esta norma cita que o solo deve apresentar as seguintes características: 100 % de material passante na peneira de malha de 4,75 mm; 10 % a 50 % de material passante na peneira de malha de 0,075 mm; limite de liquidez ≤ 45 % e índice de plasticidade ≤ 18 %.

3.2 MATERIAIS QUE PODEM SER UTILIZADOS NA CONFEÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Na confecção de tijolos de solo-cimento pode ocorrer a incorporação de materiais distintos, de acordo com as suas características químicas, mineralógicas e granulométricas. Podendo ocorrer o uso de adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland, este ocorre quando apresentam atividade pozolânica ou possuem baixa granulometria e efeito cimentante. Neste último caso, Hill e Sharp (2002) e Rosa et al. (2020) afirmam que não sendo classificado como pozolana, mas apresentando características semelhantes ou complementares às do cimento o material pode ser utilizado como material cimentício suplementar (MCS) em substituição parcial ao cimento Portland.

Ângelo e Simões (2023) destacam o uso de resíduos sólidos como filler em substituição parcial ao solo na fabricação de tijolos de solo-cimento. Ressaltam, assim, o uso de materiais alternativos nas misturas de solo-cimento.

Um material alternativo ou convencional pode ser considerado filler quando apresenta granulometria de pó (material pulverulento) e este ao ser usado em tijolos de solo-cimento melhora as propriedades deles, promovendo a diminuição da porosidade e da permeabilidade, e assim evita a infiltração de água e garante a estabilidade do tijolo ao longo do tempo, à medida que pode contribuir para aumento da resistência à compressão simples (Ângelo & Simões, 2023).

De acordo com a ABNT NBR 12653 (2014), os materiais para serem classificados como pozolanas devem atender as exigências químicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1

Exigências químicas para classificar os materiais como pozolânicos

PROPRIEDADES	CLASSES DE MATERIAL POZOLÂNICO		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 12653, 2014

Na literatura, investigou-se o uso concomitante de materiais convencionais e alternativos (resíduos beneficiados) como MCS, em substituição parcial ao cimento, e como *filler*, em substituição parcial ao solo. Porém, não há na literatura atual o uso simultâneo em tijolos de solo-cimento. Ocorrendo apenas a proposição do uso separadamente, como se observa nas pesquisas de Ângelo e Simões (2023); Moura et al. (2021); Mendonça et al. (2021); Anjos e Neves (2011), e Milani e Freire (2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

As matérias-primas utilizados nessa pesquisa foram: cimento Portland CP V ARI (composição química na Tabela 2); solo argiloso; perlita expandida (PE); cinza de algaroba e cajueiro (CAC) e água potável fornecida pela Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN).

Tabela 2

Composição química do cimento utilizado

Elementos	Porcentagem (%)
CaO	35 a 58
SiO ₂	21,50 a 30
MgO	2 a 6,50
Al ₂ O ₃	2,50 a 15
Fe ₂ O ₃	1 a 4

Fonte: Adaptado do Fabricante, 2024

Escolheu-se o cimento CP V ARI por não conter adições pozolânicas na sua composição química (Tabela 3), conforme a ABNT NBR 16697 (2018). E, principalmente, por apresentar rápido tempo de secagem que permite acelerar a produção dos tijolos ecológicos sem comprometer sua qualidade e durabilidade (Forcelini et al., 2016).

O solo utilizado foi um solo argiloso, após ser coletado, ele passou pelos processos de secagem ao ar; quarteamento; destorroamento e peneiramento em peneira ABNT n° 4 (4,75 mm). Posteriormente, determinou-se seus parâmetros físicos, para verificação se poderia ser utilizado na fabricação de tijolos de solo-cimento. É importante ressaltar que um solo para ser usado com esta finalidade deve apresentar as características descritas na Tabela 3, segundo as especificações da ABNT NBR 10833 (2013).

Tabela 3

Características que o solo deve apresentar para ser utilizado em tijolo de solo-cimento

Parâmetros	Procedimentos	Valores
% passando na peneira 4,8 mm (n° 4)	ABNT NBR NM ISO 3310-1	100%
% passando na peneira 0,075 mm (n° 200)	ABNT NBR NM ISO 3310-1	10% a 50%
	ABNT NBR 7181	
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459	≤ a 45%
Índice de Plasticidade	ABNT NBR 7180	≤ a 18%

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 10833, 2013

A PE foi cedida pela empresa Bentonita do Nordeste S.A, que se localiza no município de Campina Grande/PB, enquanto a CAC foi coletada em olaria pertencente ao polo cerâmico do Vale do Assú/RN, localizada no município de Itajá/RN. É importante destacar que a CAC é oriunda dos fornos da olaria, pois esta utiliza madeira de algaroba (*Prosopis juliflora*) e de cajueiro (*Anacardium occidentale*) como fontes de biomassa em sua linha de produção.

Após aquisição da PE e da CAC, estes materiais foram beneficiados e caracterizados, após obtida a caracterização química-mineralógica tiveram seus usos definidos na confecção dos tijolos de solo-cimento. À medida que o objetivo específico desta investigação é propor o

uso técnico correto da adição mineral e da cinza de biomassa, em consonância com suas características químicas e mineralógicas, na confecção dos tijolos de solo-cimento sustentáveis.

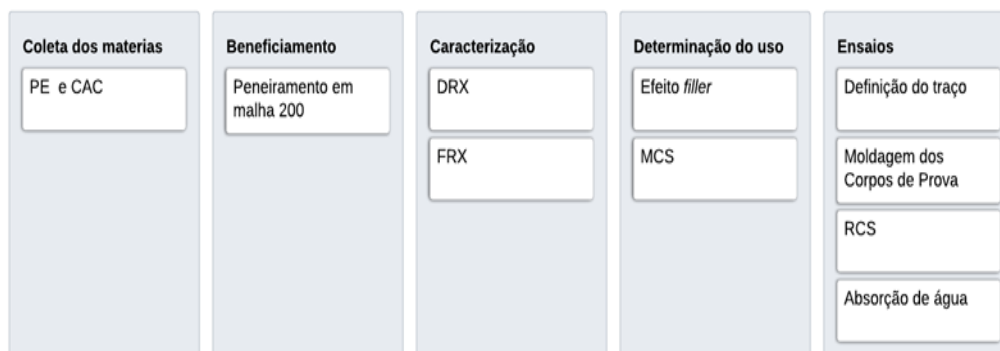
A perlita expandida foi usada como material cimentício suplementar (MCS) ao cimento Portland nos teores de 5% e 10% por ter sido caracterizada como material amorfo e pulverulento (Figura 2). Enquanto, a cinza de algaroba e cajueiro foi utilizada como filler em substituição parcial ao solo no teor de 10%, pois não apresentou características de material pozolânico e sim de filler. A utilização do filler em matrizes cimentícias ocorre porque melhora o empacotamento do sistema, contribuindo para o ganho de resistência mecânica destas (Lima et al., 2021).

4.2 MÉTODOS

Para alcançar o objetivo desta pesquisa, traçou-se o planejamento experimental descrito no Fluxograma da Figura 1.

Figura 1

Etapas do planejamento experimental



A primeira etapa consistiu na aquisição dos materiais, posteriormente, procedeu-se com o beneficiamento da PE e da CAC, que ocorreu através do processo de peneiramento em peneira ABNT nº 200 (0,074 mm). A terceira etapa consistiu na caracterização química-mineralógica da PE e da CAC, utilizando-se as técnicas de espectrometria de fluorescência de raios x (equipamento EDX 720 da Shimadzu) para determinação da composição química e de difração de raios X (equipamento Difratômetro Shimadzu XRD-6000) para se chegar à composição mineralógica.

A etapa seguinte correspondeu a determinação de qual uso seria dado a PE e a CAC (MCS e/ou filler) na confecção dos tijolos de solo-cimento, conforme os resultados obtidos na

caracterização química-mineralógica de cada um destes materiais. Logo, em função das características químicas e mineralógicas a PE foi utilizada como MCS ao cimento Portland por ser um material amorfo e a CAC em substituição parcial ao solo como filler.

Na quarta etapa, definiu-se os traços utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento propostos (Tabela 4), em seguida, procedeu-se com a moldagem dos corpos de prova (CP's) em modelo reduzido e com a realização dos ensaios para determinação da resistência à compressão simples e absorção de água dos CP's.

Tabela 4

Traços volumétricos definidos em conformidade com a finalidade de uso

Materiais	Finalidade de uso na mistura solo-cimento	Teor de substituição (%)	Traço (cimento: PE: Solo: CAC)
PE	Material Cimentício Suplementar em substituição parcial ao cimento <i>Portland</i>	5 10	0,95:0,05: 9: 1 0,90:0,10:9:1
CAC	<i>Filler</i> em substituição parcial ao solo	10	1:9:1*

* Refere-se apenas a CAC, pois aqui considerou-se a junção do cimento com a PE

4.2.1 Determinação dos parâmetros físicos do solo argiloso para verificação da viabilidade de seu uso em tijolos de solo-cimento

Os limites de consistência do solo foram determinados de acordo com as metodologias propostas pelas normas ABNT NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016). Enquanto, a análise granulométrica ocorreu por peneiramento, de acordo com a norma da ABNT NBR 7181 (2016).

4.2.2 Confecção dos tijolos de solo-cimento com PE e CAC

A fabricação dos tijolos de solo-cimento seguiu as orientações da ABNT NBR 10833 (2013), com adaptações. Dessa forma, após determinar a umidade ótima do solo a partir da obtenção da curva de compactação dele conforme a ABNT NBR 7182 (2016), definiu-se a quantidade de água a ser usada. Utilizando argamassadeira misturou-se o cimento, a PE, o solo argiloso, a CAC e água até obter uma coloração uniforme, com a mistura obtida moldou-se os tijolos maciços, fazendo uso de moldes cilíndricos com dimensões de (50x100)mm. Adotando a técnica do modelo reduzido estabelecida por Anjos e Neves (2011) em pesquisa com tijolos ecológicos com resíduos de caulim, reproduzida por Figueiredo et al. (2011) em investigação da durabilidade de tijolos ecológicos com resíduos de demolição da construção civil e por Botelho e Magalhães (2019) em averiguação de tijolos de solo-cimento com substituição parcial

do solo por resíduo de demolição da construção civil. O processo de cura dos tijolos foi em câmara úmida por 28 dias, conforme determina a ABNT NBR 10833 (2013), período requerido para hidratação do cimento.

4.2.3 Resistência à compressão simples e a Absorção d'água dos tijolos de solo-cimento com PE como MCS e CAC como filler no solo argiloso

O ensaio para a determinação da resistência à compressão simples (RCS) ocorreu em conformidade com a norma da ABNT NBR 12025 (2012). A determinação da absorção de água foi realizada conforme a metodologia recomendada pela norma ABNT NBR 8492 (2012).

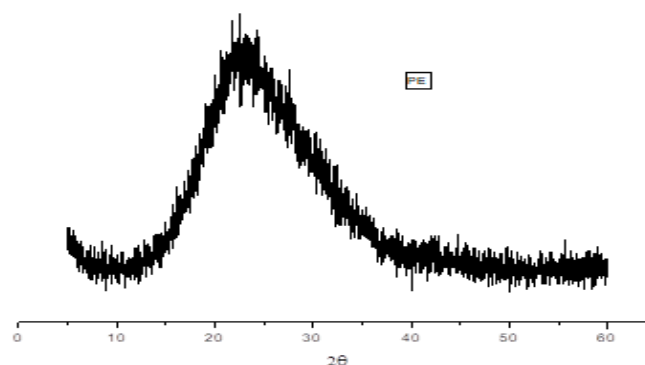
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-MINERALÓGICA

A Figura 2 apresenta o difratograma da perlita expandida, que se caracteriza pela formação de uma banda larga na faixa entre 15 e 35 Θ , que é um indicativo da não cristalinidade dela. Logo, a perlita expandida corresponde a material amorfo.

Figura 2

Difratograma da perlita expandida



A caracterização obtida para perlita expandida (Figura 2) se assemelha a encontrada por Filho et al. (2017). A Tabela 5 apresenta a composição química da perlita expandida.

Tabela 5

Traços volumétricos definidos em conformidade com a finalidade de uso

Óxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Outros Óxidos	Na ₂ Oeq.*
	74,28	15,66	5,39	2,41	0,79	0,97	0,50	5,96

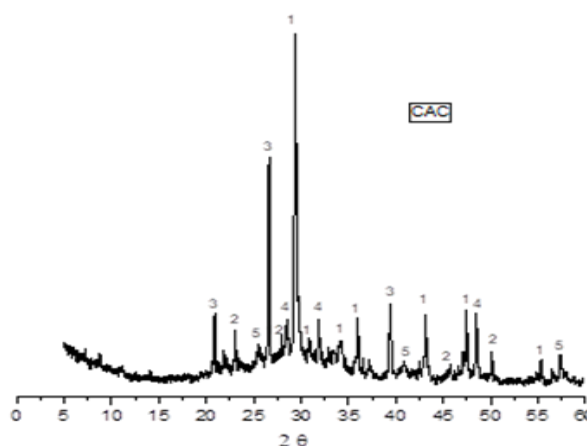
* Na₂Oeq. = %Na₂O + 0,658 %K₂O

Percebe-se na composição química da PE (Tabela 4) uma predominância da sílica (74,28 %), corroborando com os resultados obtidos na sua caracterização mineralógica, porém de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) um material para ser pozolânico deve apresentar a soma percentual de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ de no mínimo 70 % e a quantidade de álcalis disponíveis em Na₂O máxima de 1,5 % (Tabela 1). A PE apresentou 90,73 % e 5,96 %, respectivamente. Este último fator ultrapassou o máximo permitido, logo a perlita expandida não é considerada material pozolânico, de acordo com a ABNT NBR12653 (ABNT, 2014), pois por possuir elevada porcentagem de álcalis disponíveis em Na₂O pode desencadear estas reações nas matrizes cimentícias.

A Figura 3 mostra que a CAC não se classifica como material amorfo, pois seu difratograma apresenta fases cristalinas.

Figura 3

Difratograma da cinza de algaroba e cajueiro



As fases cristalinas apresentadas na composição mineralógica da CAC (Figura 3) foram: CaCO₃ (JCPDS 28-0775); K₂O (JCPDS 23-0493); SiO₂ (JCPDS 34-0717); Ca₂SiO₄ (JCPDS 23-1045); K₂Si₄O₉ (JCPDS 26-1463); CaO (JCPDS 28-07758); Co₃O₄ (JCPDS 74-1657) e CuO (JCPDS 45-0937).

A composição química da cinza de algaroba e de cajueiro é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6

Composição química da cinza de algaroba e cajueiro

Óxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SrO	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Outros Óxidos
	15,55	2,24	28,93	5,10	2,55	5,26	36,09	10,28

Nota-se na Tabela 6, predominância de cálcio (36,09 %) na composição química da CAC e menor quantidade de sílica (15,55 %). De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) ela não é classificada como material pozolânico por não apresentar a soma percentual de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ mínima de 70% (23,05 %). Logo, esses resultados demonstram a viabilidade técnica do uso concomitante da PE como MCS ao cimento Portland e da CAC como *filler* em substituição parcial ao solo, para promover o efeito *filler* (melhorando o empacotamento do sistema) na mistura de solo-cimento.

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

5.2.1 Limites de *Atterberg* e fração passante na peneira da ABNT nº 200

A Tabela 7 apresenta os limites de *Atterberg* e a fração passante na peneira da ABNT nº 200 obtidos para o solo estudado de acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012).

Tabela 7

Parâmetros físicos do solo

Parâmetros	NBR 10833	Valores obtidos para solo estudado
Malha de 4,75 mm	100 %	100 %
Malha de 0,075 mm	10 % a 50 %	22 %
Limite de Liquidez	≤ 45 %	37 %
Índice de Plasticidade	≤ 18 %	15 %

Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que o índice de plasticidade obtido (15%) atende as exigências da NBR 10833 (ABNT, 2013). Logo, o solo usado é classificado, de acordo com Caputo (2013), como mediamente plástico porque seu IP se encontra no intervalo $7 < IP \leq 15$. Assumindo papel fundamental na fabricação de tijolos de solo-cimento devido esse tipo de solo desempenhar uma melhor trabalhabilidade na mistura. Ademais, o limite de liquidez obtido (37 %) atende ao estabelecido por norma.

À fração passante na peneira de malha 0,075 mm também atendeu ao intervalo de valor estabelecido pela norma (22%). Logo, os valores obtidos para os parâmetros estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012) indicam que o solo estudado pode ser utilizado na confecção de tijolos de solo-cimento.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS TIJOLOS

A Tabela 8 apresenta os resultados alcançados para a resistência à compressão simples dos corpos de prova ensaiados após 28 dias de cura úmida.

Tabela 8

Resistência à Compressão Simples aos 28 dias dos tijolos de solo-cimento

CORPO DE PROVA	TRAÇO	RCS (MPa)	RCS MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (±)
CP 01	0,90:0,10:9:1	4,54		
CP 02	0,90:0,10:9:1	3,90	3,91	0,51
CP 03	0,90:0,10:9:1	3,29		
CP 04	0,95:0,05:9:1	4,96		
CP 05	0,95:0,05:9:1	4,76	4,73	0,20
CP 06	0,95:0,05:9:1	4,48		
CP 07	Referência	4,21		
CP 08	Referência	4,64	4,24	0,32
CP 09	Referência	3,86		

Os tijolos de solo-cimento confeccionados com adição de 10 % de PE em substituição parcial ao cimento *Portland* (traço 0,90:0,10:9:1) obtiveram RCS média de 3,91 Mpa aos 28 dias de cura úmida e os com adição de 5 % de PE (traço 0,95:0,05:9:1) alcançaram RCS média de 4,73 MPa. Demonstrando que o uso proposto apresenta viabilidade técnica, ocasionando pequeno ganho de RCS em relação ao traço de referência quando o teor de substituição é de 5%. Os resultados para RCS aos 28 dias de cura se assemelham aos obtidos por Euphrosino et al. (2022).

A NBR 8491 (ABNT, 2012) especifica que os tijolos de solo-cimento devem apresentar valor de resistência à compressão simples médio de no mínimo 2,0 MPa e valores individuais de 1,7 MPa. Todos os corpos de prova rompidos superaram os valores mínimos estabelecidos pela respectiva norma (Tabela 8).

5.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS TIJOLOS

A Tabela 9 apresenta os resultados alcançados para a resistência à compressão simples dos corpos de prova estudados aos 28 dias.

Tabela 9

Absorção de água aos 28 dias dos tijolos de solo-cimento

CORPO DE PROVA	TRAÇO	Absorção de água (%)	Absorção de água MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (±)
CP 01	0,90:0,10:9:1	20,01		
CP 02	0,90:0,10:9:1	20,20	20	0,001
CP 03	0,90:0,10:9:1	20,03		
CP 04	0,95:0,05:9:1	20,41		
CP 05	0,95:0,05:9:1	19,73	20	0,003
CP 06	0,95:0,05:9:1	19,70		
CP 07	Referência	18,82		
CP 08	Referência	18,32	19	0,002
CP 09	Referência	18,65		

A NBR 8491 (ABNT, 2012) define valores máximos médios para a absorção de água por imersão de 20 % e para valores individuais de 22 %. Os resultados obtidos para os tijolos propostos nesta pesquisa (Tabela 9) revelam concordância com os valores estabelecidos por esta norma, onde nenhum dos corpos de prova excedeu o valor máximo de 22 %, nem a média obtida entre eles ultrapassou o valor de 20 %.

Os valores obtidos para RCS e para absorção de água dos tijolos de solo-cimento confeccionados com a PE como MCS e a CAC como *Filler* em substituição parcial ao solo demonstram viabilidade técnica quanto ao uso proposto para estes materiais, apresentando o desempenho técnico exigido pelas normas que regem a confecção de tijolos de solo-cimento.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa para os tijolos de solo-cimento confeccionados com perlita expandida como material cimentício suplementar em substituição parcial ao cimento *Portland* e cinza da algaroba e cajueiro como *filler* em substituição parcial ao solo levam as seguintes conclusões:

- o solo argiloso utilizado nesta investigação apresenta os parâmetros físicos indicados pela NBR 10833 (ABNT, 2013) para que possa ser utilizado na fabricação de tijolos de solo-cimento;

- a caracterização química-mineralógica da PE e da CAC demonstra a viabilidade técnica do uso concomitante da PE como MCS ao cimento Portland e da CAC como Filler em substituição parcial ao solo;
- os tijolos de solo-cimento propostos apresentaram resistência à compressão simples superior aos valores estabelecidos pela norma, comprovando que a adição da perlita expandida como material cimentício suplementar concomitantemente com a substituição parcial do solo por cinza de algaroba e cajueiro foi benéfica a melhora do desempenho mecânico deles;
- os tijolos com adição de 5 % de perlita em substituição parcial ao cimento Portland se mostraram mais eficazes quando o parâmetro analisado é a resistência à compressão simples;
- os tijolos apresentaram valores individuais e médios para absorção de água aprovados pela NBR 8491 (ABNT, 2012), demonstrando viabilidade técnica do uso dos materiais propostos na confecção deles;
- a pesquisa apresentou êxito na redução do teor de cimento na produção de tijolos de solo-cimento utilizando material cimentício suplementar como substituto parcial, mantendo suas propriedades físicas e mecânicas em conformidades com as normas vigentes, demonstrando viabilidade técnica e representando um passo significativo na redução das emissões de CO₂ na indústria cimenteira;
- os tijolos de solo-cimento com PE e CAC apresentam maior “pegada ambiental”, pois além de reduzir o consumo de cimento propõe uma destinação adequada para os resíduos sólidos gerados nas olarias de Itajá/RN.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 8491: Tijolo de solo-cimento - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Ângelo, F. A. & Simões, G. F. (2023). Tijolos ecoeficientes de barro cru com resíduos sólidos e efluente industrial utilizando tecnologias não convencionais. *Ambiente Construído*, 23(2), 131-148.
- Anjos, C. M. & Neves, G. A. (2011). Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 6, 91-96.
- Araujo, F. M. et al. (2021). Perlita expandida como material cimentício suplementar em argamassas alternativas. *Research, Society and Developmen*, 10(10), 1-10.
- Barros, S. V. A. et al. (2020). Behavior of mortar blended with quartzite residues when subjected to natural aging. *Revista Eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental*, 10, 1-10.
- Botelho, T. S. S. & Magalhães, E. M. (2019). Production of pressed brick of cement soil manufactured with addition of construction and demolition waste. *Internacional Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 6, 190-212.
- Caputo, H. P. (2013). *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações*. 6. ed. Rio de Janeiro: Livro Técnico Científico Editora S.A.
- De Oliveira Neto, R. E. et al. (2022). New sustainable mortar compositions containing perlite waste. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24, 1403-1415.
- Dias, A. R. O. et al. (2022). Avaliação técnica da substituição do filler calcário por cinza da casca da castanha de caju no concreto autoadensável. *Revista de Engenharia Civil*, 59, 44-53.
- Dos Santos, B. C. S. et al. (2022). Fabricação e análise de tijolos solo-cimento com adição de cinzas da biomassa de caldeiras industriais. *Brazilian Journal of Development*, 8(5), 33141-3315.
- Euphrosino, C.A. et al. (2022). Tijolos de solo-cimento usados para Habitação de Interesse social (HIS) em mutirão: estudo de caso em olaria comunitária. *Revista Matéria*, 27(1), 1-13.
- Ferrari, V. J. et al. (2014). Tijolos vazados de solo-cimento produzidos com solo da Região do Arenito Caiuá do Paraná. *Ambiente Construído*, 14(3), 131-148.

- Figueiredo, S. S. et al. (2011). Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. *Revista Escola de Minas*, 64(3), 273-279.
- Forcelini, M. et al. (2016). Mechanical Behavior of Soil Cement Blends with Osorio Sand. *Procedia Engineering*, 143, 74-81.
- Hill, J. & Sharp, J. H. (2002). The mineralogy and microstructure of three composite cements with high replacement levels. *Cement & Concrete Composites*, 24, 191-199.
- Koerich, A. B. et al. (2023). Os impactos das inovações de processo na administração pública à luz dos objetivos de desenvolvimento sustentável. *Interações*, 24(3), 845-862.
- Lima, G. L. S. et al. (2021). Efeito filler em argamassas de revestimento com resíduos de quartzito. *Revista Construindo*, 13(2), 1-10.
- Mendonça, A. M. G. D. et al. (2021). Resíduo de caulim como material alternativo para produção de blocos de tijolos solo-cimento. *Brazilian Journal of Development*, 7(5), 44168-44178.
- Milani, A. P. S. & Freire, W. J. (2006). Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. *Construções Rurais e Ambiente - Eng. Agrícola*, 26(1), 1-10.
- Mendonça, A. M. G. D. et al. (2021). Resíduo de caulim como material alternativo para produção de blocos de tijolos solo-cimento. *Brazilian Journal of Development*, 7(5), 44168-44178.
- Moura, E. M. et al. (2021). Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. *Ambiente Construído*, 21(1), 69-80.
- Rodrigues, L. P. & Holanda, J. N. F. (2015). Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of SoilCement Bricks. *Procedia Materials Science*, 8, 197-202.
- Rosa, L. S. et al. (2020). Materiais cimentícios suplementares: Histórico e novas tendências. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 7, 121-127.
- Souza, G. M. de et al. (2023). Estudo de misturas compostas por resíduos de scheelita e solos destinados a pavimentação. *Ambiente Construído*, 23(3), 117-137.
- Souza, M. I. B. (2006). Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
- Rodrigues, L. P. & Holanda, J. N. F. (2015). Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of SoilCement Bricks. *Procedia Materials Science*, 8, 197-202.
- Rosa, L. S. et al. (2020). Materiais cimentícios suplementares: Histórico e novas tendências. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 7, 121-127.
- Souza, G. M. de et al. (2023). Estudo de misturas compostas por resíduos de scheelita e solos destinados a pavimentação. *Ambiente Construído*, 23(3), 117-137.

- Souza, M. I. B. (2006). Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha SoMoura, E. M. *et al.* (2021). Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. *Ambiente Construído*, 21 (1), 69-80.
- Rodrigues, L. P. & Holanda, J. N. F. (2015). Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of SoilCement Bricks. *Procedia Materials Science*, 8, 197-202.
- Rosa, L. S. *et al.* (2020). Materiais cimentícios suplementares: Histórico e novas tendências. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 7, 121-127.
- Souza, G. M. de *et al.* (2023). Estudo de misturas compostas por resíduos de scheelita e solos destinados a pavimentação. *Ambiente Construído*, 23(3), 117-137.
- Souza, M. I. B. (2006). Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.