

# AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DA FOLHA DE BAMBU EM TIJOLOS SOLO-CIMENTO

Humberto Denys de Almeida Silva<sup>1</sup>, Hitalo de Jesus Bezerra da Silva<sup>2</sup>,  
Valdeci Bosco dos Santos<sup>3</sup> e José Milton Elias de Matos<sup>4</sup>

## RESUMO

O bambu é uma importante matéria-prima natural, sendo atualmente utilizado em diversos tipos de indústrias, como de alimentos, cerveja, construção, agricultura, fibra, papel, têxtil, entre outras. Em contrapartida, o uso desta planta pode provocar impactos ambientais significativos, como a geração de grandes volumes de resíduos de folhas. Paralelo a isso, a indústria da construção civil tem buscado alternativas sustentáveis para aplicações que possam fazer substituições parciais do cimento, visto que na fabricação deste produto são utilizados grandes volumes de recursos naturais/energia, além de ser reponsável pela emissão de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Desta forma, o objetivo do presente estudo foi realizar a avaliação da utilização de cinzas da folha de bambu (CFB), como substituto parcial do cimento na composição de tijolos de solo-cimento. As CFB foram obtidas à temperatura de 600 °C e tempo controlado de 2 horas, sendo caracterizadas por Difração de Raios-X, Fluorescência de Raios X, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier, Microscopia Eletrônica de Varredura e Atividade Pozolânica. Corpos de provas de tijolos solo-cimento com substituição do cimento em 0%, 5%, 10%, 15% e 20% pelas CFB foram preparados, curados por 7, 14, 28 e 56 dias e caracterizados por absorção de água, ensaio mecânicos e por Microscopia Eletrônica de Varredura. Verificou-se que as CFB possuem alto índice pozolânico, ou seja, possuem propriedades cimentícias, sendo compostas, em sua maior parte, por sílica (SiO<sub>2</sub>) amorfa. Os resultados apontaram que a dosagem ótima de CFB

1 Doutorando em Ciências e Engenharia dos Materiais - UFPI. Professor do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IEMA. E-mail: eng.pro.humberto@gmail.com.

2 Doutorando em Ciências e Engenharia dos Materiais - UFP. E-mail: hitalocx@hotmail.com

3 Doutora em Ciências e Engenharia dos Materiais. Professora da Universidade Federal do Piauí - UFPI. E-mail: valdecisantos@ufpi.edu.br

4 Doutor em Química. Professor da Universidade Federal do Piauí – UFPI. E-mail: jmematos@ufpi.edu.br

a ser adicionada à matriz cimentícia é de 15%. Os resultados de absorção de água e resistência à compressão estavam acima do exigido pela norma brasileira para todas as amostras, em todos os tempos de cura. Portanto, as CFB apresentaram-se como uma alternativa viável e promissora para a substituição parcial do cimento em tijolos solo-cimento.

**Palavras-Chave:** Materiais de Construção; Sustentabilidade; Tijolo Ecológico.

## EVALUATION OF PARTIAL REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT BY BAMBOO LEAF ASH IN SOLO-CEMENT BRICKS

### ABSTRACT

Bamboo is an important natural raw material currently used in various industries, such as food, beer, construction, agriculture, fiber, paper, and textiles. On the other hand, using this plant can cause significant environmental impacts, such as generating large volumes of leaf waste. At the same time, the civil construction industry has been looking for alternatives aimed at applications that can partially replace cement since large volumes of natural resource, and energy are used in the manufacture of this product, in addition to being responsible for the emission of large amounts of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. Thus, the present study's objective was to evaluate the use of bamboo leaf ash (BLA) as a partial substitute for cement in the composition of soil-cement bricks. The BLA was produced at a temperature of 600 °C for 2 hours, identified by X-Ray Diffraction, X-Ray Fluorescence, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy, and Pozzolanic Activity. Test specimens of soil-cement bricks with cement replacement at 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by BLA were prepared and cured for 7, 14, 28, and 56 days and characteristics by water absorption, test mechanical, and SEM. The results classify BLA as a material with a high pozzolanic index. That is, it presents cementitious properties. The residue is mainly composed of amorphous silica (SiO<sub>2</sub>). According to these characterizations, the optimal dosage of BLA to be partially replaced by the cementitious material in the matrix is 15%. However, for all curing times The results showed that the optimal dosage of CFB to be added to the cementitious matrix is 15%. The results of water absorption and compressive strength were above the required by the Brazilian standard for all samples were above the required by the Brazilian standard. Therefore, the BLA applied to soil-cement brick presented as a viable and sustainable alternative, observing cement consumption.

**Keywords:** Construction Materials; Sustainability; Ecologic brick.

## INTRODUÇÃO

O bambu é uma planta de crescimento rápido e com vida útil de mais de 75 anos, atingindo sua maturidade de colheita em 3 a 6 anos (OKOKPUJIEA et. al., 2020). Devido a estas características de possuir um crescimento acelerado, alta produtividade por área, além de ser uma planta perene, renovável e de baixo custo, o interesse pelo seu uso tem crescido mundialmente. Destaca-se também pela possibilidade de remoção de dióxido de carbono, contribuindo para o desenvolvimento sustentável (ASHA et. al. 2014).

O bambu é uma importante matéria-prima e de multiuso em diversos tipos de indústrias, como de alimentos, cerveja, construção, agricultura, fibra, papel, têxtil, carvão e outros (LOBOVIKOV, 2007). Portanto atua de forma significativa para o desenvolvimento econômico de muitos países (OKOKPUJIEA et. al., 2020). Contudo, essas mesmas indústrias contribuem para a geração de uma grande quantidade de resíduos de folhas de bambu (LOBOVIKOV et. al., 2007; KOLAWOLE et. al. 2021). Enquanto que as plantações de bambu produzem grandes volumes de folhas secas (resíduo agrícola) que ficam alocados embaixo das mesmas, para apodrecer (MORAES et. al., 2019). Com isso, ainda são buscadas alternativas adequadas para este resíduo agroindustrial (VILLAR-COCIÑA et. al., 2011).

Uma das alternativas para o aproveitamento dos resíduos das folhas de bambu é como material cimentício complementar, entretanto, se faz necessário realizar o processo de calcinação em temperatura controlada para ativar suas propriedades pozolânicas (SILVA et. al., 2009; VILLAR-COCIÑA et. al., 2011). Pozolana é um material finamente moído, que quando na presença de umidade, reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), produzindo fases hidratadas, apresentando propriedades cimentícias (HEWLETT, 2008).

Paralelo a isso, a indústria da construção apesar de exercer importante papel para crescimento de uma nação, contribui com aproximadamente 30% de toda a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do planeta GIANG et. al., 2011; HUANG et. al., 2018; AROOZ, et. al., 2018). Somente a indústria cimenteira gera cerca de 8% do total (ANDREW, 2019). Além disso, a produção de cimento é caracterizada por precisar de altos volumes de recursos naturais não renováveis e de energia em seu processo (KARIYAWASAM et. al., 2016). No ano de 2020 a produção mundial de cimento foi de aproximadamente 4 bilhões de toneladas (GARSIDE, 2020).

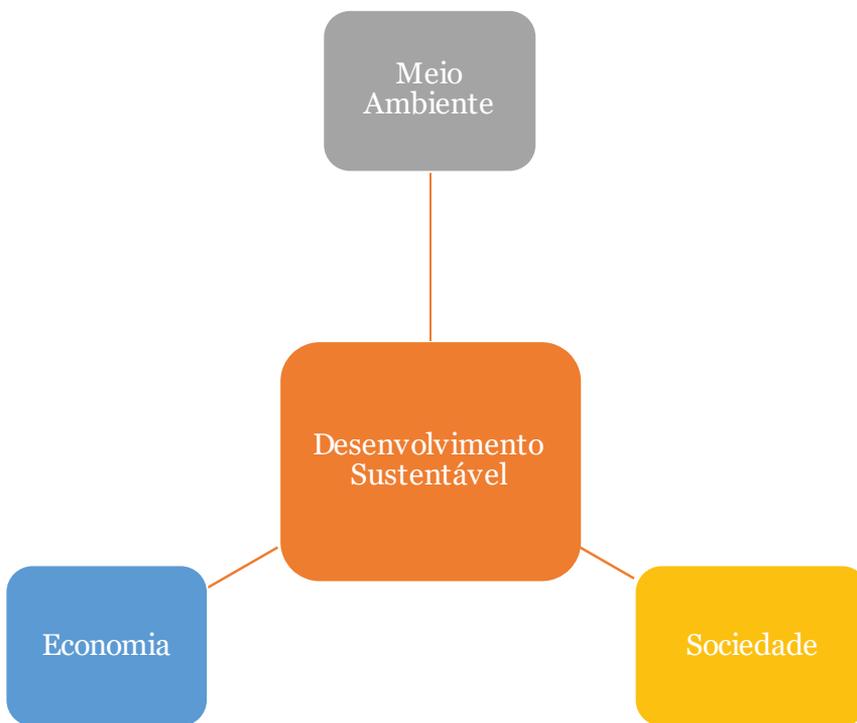
Alinhado à necessidade de redução do uso do cimento Portland, estudos realizados com as CFB em substituição parcial ao cimento revelaram o seu potencial uso em matrizes cimentícias (MORAES et. al., 2019; VILLAR-COCIÑA et. al., 2011; FRÍAS et. al., 2012; RODIER et. al., 2019).

Embora existam pesquisas sobre o uso do CFB em argamassas e concretos (KOLAWOLE et. al., 2021; SILVA et. al., 2021), não encontrou-se na literatura pesquisas que tragam dados a respeito do uso da CFB em substituição ao cimento em tijolos solo-cimento (tijolo ecológico). Isto foi evidenciado em uma consulta às plataformas de periódicos Web of Science, Scielo, Science Direct e Scopus, relacionando trabalhos até o presente momento.

O tijolo solo-cimento é composto por uma mistura de solo, água e material estabilizante (cimento Portland), sendo este responsável pela resistência e durabilidade, passando, por fim, pelo processo de prensagem dos constituintes (VILELA et. al., 2020). Os tijolos solo-cimento não passam pelo processo de queima durante seu processo de produção, conferindo-lhes destaque no que tange à sustentabilidade (VILELA et. al., 2020). Ademais, em comparação aos tijolos de argila queimada, os tijolos de solo-cimento utilizam menos de 10% da energia (MASKELL et. al., 2016).

Tendo em vista o apelo sustentável do presente trabalho, a Figura 1 apresenta os pilares que compõem o desenvolvimento sustentável segundo González & Abadía (2002).

Figura 1 – Dimensões do desenvolvimento sustentável



Fonte: Adaptado de González & Abadía (2002).

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como um modelo de desenvolvimento que busca equilibrar as dimensões ambiental, econômica e social, garantindo o atendimento das necessidades da geração atual sem comprometer as possibilidades de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades (SILVA et al., 2022). A dimensão do meio ambiente refere-se à preservação dos recursos naturais e ecossistemas, a dimensão econômica trata do crescimento econômico aliado à sustentabilidade,

enquanto a dimensão social envolve questões relacionadas à igualdade social, justiça e bem-estar da população. O desenvolvimento sustentável visa, portanto, conciliar o desenvolvimento econômico com a proteção do meio ambiente e a promoção da equidade social, promovendo ações integradas e coordenadas entre essas dimensões (BRAGA *et. al.*, 2007; SILVA, 2008, LIU *et al.*, 2019).

De forma sucinta, este artigo contou com o processo metodológico, composto por etapas como, obtenção das matérias-primas para a fabricação dos tijolos, caracterização das matérias-primas, confecção dos corpos de provas e caracterização dos corpos de prova.

Sob essa ótica, o presente trabalho teve por objetivo verificar as naturezas químicas, mineralógicas e físicas da CFB, bem como estudar a viabilidade de sua incorporação à composição da mistura solo-cimento em substituição parcial do material cimentício empregado na fabricação de tijolos solo-cimento.

O artigo está organizado em quatro seções principais. A primeira é a Introdução, que apresenta os conceitos básicos e os objetivos da pesquisa. A segunda é a seção de Materiais e Métodos, em que são descritos os procedimentos de preparação das matérias-primas e corpos de prova utilizados nos testes. A terceira seção apresenta os Resultados e Discussão, em que os resultados obtidos são discutidos em relação aos objetivos propostos. Por fim, a última seção apresenta as conclusões do estudo e sugestões para futuras pesquisas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram solo, CFB e cimento Portland. A caracterização básica destas matérias-primas foi alcançada

em concordância com as normas brasileiras regulamentadoras (NBR). O solo foi extraído de uma jazida localizada no estado do Maranhão. Este material foi caracterizado por análise granulométrica e limites de Atterberg, de acordo com NBR 7181 (ABNT, 2016), NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016).

As CFB foram obtidas a partir da coleta das folhas de bambu no estado do Piauí, sendo levada posteriormente à calcinação a 600 °C durante 2 horas a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. As CFB foram então, maceradas e peneiradas em peneira malha de nº 500, obedecendo desta forma a NBR 12653 (ABNT, 2014). As cinzas foram caracterizadas, por análise termogravimétrica (TG), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), atividade pozolânica definida pelo método de (LÚXAN et. al., 1989), e por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Além das caracterizações já mencionadas, todos os materiais foram caracterizados mineralógicamente por difração de raios X (DRX) e quimicamente por Fluorescência de raios X (FRX).

A proporção adotada para produção dos corpos de provas do tijolo solo-cimento foi de 1:8 (cimento: solo), de acordo com NBR 8491 (ABNT, 2012) e com a Portland Cement Association (PCA, 2003). Nesta pesquisa, adotou-se 5 formulações diferentes para a preparação e confecção dos tijolos solo-cimento. Para todas as formulações manteve-se constante a proporção de solo (89,89%), alterando-se somente a porcentagem de cimento, o qual foi então substituído em 5%, 10%, 15% e 20% pelas CFB. Os tijolos solo-cimento receberam a nomenclatura de CP (corpo de prova) sendo acompanhada por um número referente à porcentagem de substituição das CFB: CP5, CP10, CP15 e CP20. A amostra padrão (sem substituição de cimento por CFB) foi denominada de CPO. A Tabela I

mostra a proporcionalidade de todas as matérias-primas utilizadas com base em 100 g de composição.

Tabela I - Dosagens das misturas usadas para tijolos (% em massa).

Amostra	Cinzas da folha de bambu (%)	Cimento (g)	Solo (g)	Cinzas da folha de bambu (g)
CP0	0	11,11	88,89	0
CP5	5	10,56	88,89	0,55
CP10	10	10,0	88,89	1,11
CP15	15	9,45	88,89	1,66
CP20	20	8,90	88,89	2,21

Fonte: Os autores, 2023.

Primeiramente, todos os materiais empregados para a produção dos corpos de prova foram pesados separadamente com o auxílio de uma balança analítica. Logo, para cada formulação, os materiais (solo, cimento e cinzas) foram adicionados em uma bandeja e misturados homogeneamente com o auxílio de uma espátula. Após estas etapas, foi acrescentado à massa 10% de água em relação ao peso da mistura. Então, realizou-se a homogeneização manual da massa úmida solo-cimentícia.

Os corpos de provas foram conformados via prensagem uniaxial, depois de prensados, os tijolos foram colocados em bandejas para que a partir do dia seguinte pudessem ser umidificados com água com o auxílio de um borrifador, realizando-se assim a etapa de cura por aspersão manual durante de 7 dias.

As propriedades tecnológicas dos tijolos foram determinadas de acordo com os procedimentos padronizados, considerando a resistência à compressão, NBR 8492 (ABNT, 2012) e absorção de água, NBR 8492 (ABNT, 2012). Os ensaios de resistência à compressão e absorção de água foram realizados aos 7, 14, 28 e 56 dias de idade de cura.

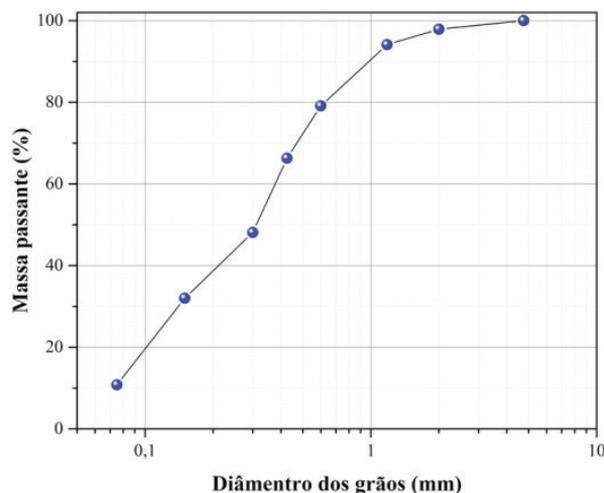
Após os 56 dias de idade de cura pequenos fragmentos das amostras

de teste CPO e CP15 foram usados na análise microestrutural. As amostras tiveram suas superfícies examinadas usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Mira 3, Tescan, operado a 5 kV.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 2 apresenta os dados granulométricos conseguidos a partir do peneiramento do solo.

Figura 2: Distribuição granulométrica do solo.



Fonte: Os autores, 2023.

A norma NBR 10833 (ABNT, 2012) norteia os requisitos necessários para a produção de tijolos de solo-cimento. A partir disso, percebeu-se que o solo coletado está em conformidade com o exigido pela norma, ou seja, 100% do material passou pela peneira N°4, (abertura de 4,75 mm). Outro aspecto também atendido pelo solo utilizado na pesquisa foi à porcentagem de solo passada pela peneira de 75  $\mu\text{m}$  (n° 200), alcançando 10,8% do material, sendo requerido pela norma valores entre 10% e 50%.

Os resultados referentes aos limites de *Atterberg* ou limites de consistência do solo coletado são apresentados na tabela II. É possível verificar que o solo, está enquadrado com as recomendações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004), bem como a NBR 10833 (ABNT, 2012). A norma requer que o solo possua um limite de liquidez abaixo de 45% e o índice de plasticidade menor que 18%. Neste estudo, tanto o limite de liquidez quanto o índice de plasticidade do solo adotado cumprem as exigências requeridas, 35% e 12,6%, respectivamente.

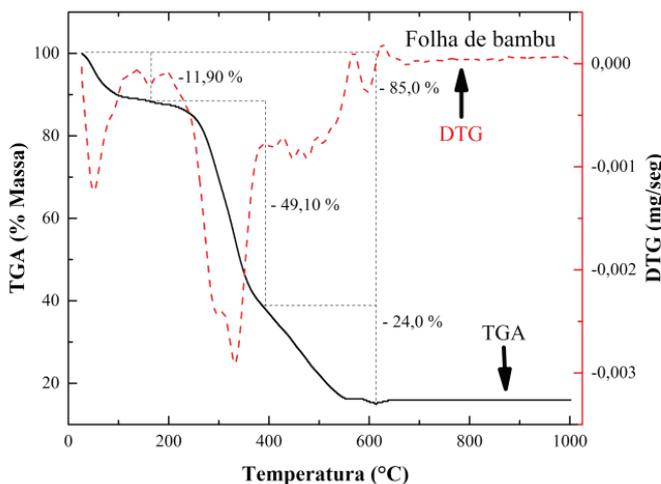
Tabela II - Limites de Atterberg (%) do solo.

Limites de Atterberg (%)		
	ABCP (1986) e NBR 10833 (ABNT, 2012).	Solo Coletado
Limite de Liquidez	< 45	35
Limite de Plasticidade	-	22,4
Índice de Plasticidade	< 18	12,6

Fonte: Os autores, 2023.

As curvas termogravimétricas (TGA/DTG) das folhas de bambu são apresentadas na Fig. 3, com o objetivo principal de avaliar a temperatura ideal para realização da produção da CFB. É possível observar, inicialmente, 11,90% de perda de massa do material entre 25 °C e 150 °C, por conta da evaporação da água (ALIAS et al., 2014). Posteriormente, ocorreu a perda de massa mais expressiva da análise, cerca de 49,10% entre 150 °C e 400 °C, possivelmente sendo provocada pela decomposição de hemicelulose e celulose (ENG-POH et. al., 2017). Por fim, observou-se a perda de 39% da amostra, até os 600 °C, justificada pela decomposição de lignita (GAŠPAROVIČ et al., 2010). Desta maneira, adotou-se a temperatura de 600 °C para realizar a calcinação das folhas de bambu, mesma temperatura adotada em outras pesquisas (MORAES et. al., 2019; VILLAR-COCIÑA et. al., 2018; UMOH et. al., 2015; UTODIO et. al., 2015).

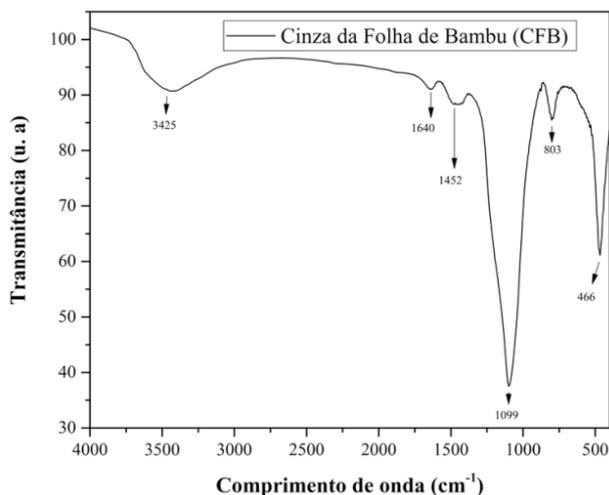
Figura 3: Curvas TG/ DTG da folha de bambu.



Fonte: Os autores, 2023.

O espectro do FTIR das CFB (Fig. 4) apresentam duas zonas principais de absorção de infravermelho, a primeira entre  $3750$  e  $3000\text{ cm}^{-1}$ , seguida por uma zona com frequências mais baixas entre  $1700$  e  $450\text{ cm}^{-1}$ . A confirmação da presença de água não estrutural veio por meio da identificação da banda de absorção de vibração de O–H ( $3425\text{ cm}^{-1}$ ) e a banda de deformação de H–O–H ( $1640\text{ cm}^{-1}$ ). Por FTIR observa-se, também, frequência em  $1452\text{ cm}^{-1}$ , sendo esta banda comum e conferida à ligação C–O de carbonatos (calcita). As bandas a partir de  $1099$  e  $466\text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas às vibrações de alongamento e flexão (Si–O), respectivamente, no tetraedro  $\text{SO}_4$ , que são devidas à presença de traços principalmente de sílica amorfa (MARTINEZ-RAMIREZ et. al.,2006).

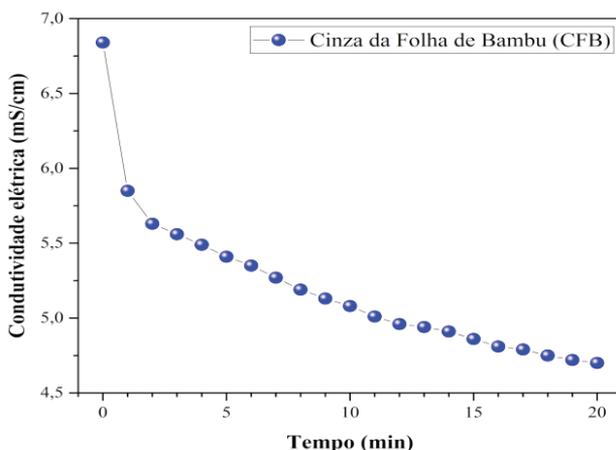
Figura 4: Espectro de FTIR das CFB.



Fonte: Os autores, 2023.

O método adotado para a determinação da atividade pozolânica das CFB foi proposta por Lúxan et. al., (1989), sendo denominado como método da condutividade elétrica. A Fig. 5 apresenta os dados de condutividade elétrica das cinzas, sendo observado um decréscimo na curva em um intervalo de tempo de 20 minutos. Isto pode ser atribuído à produção de produtos insolúveis, além da diminuição da concentração de hidróxido de cálcio presente na solução (BASTO et. al., 2019). O decaimento da condutividade elétrica nos primeiros minutos é uma característica desejada e positiva tendo em vista que é considerado um indicativo que a pozolana está reagindo com o CaO, apresentando conseqüentemente mais reatividade (VILLAR-COCIÑA, et. al., 2003; MORALES et. al., 2009).

Figura 5: Ensaio de Condutividade elétrica das cinzas da folha de bambu (CFB).

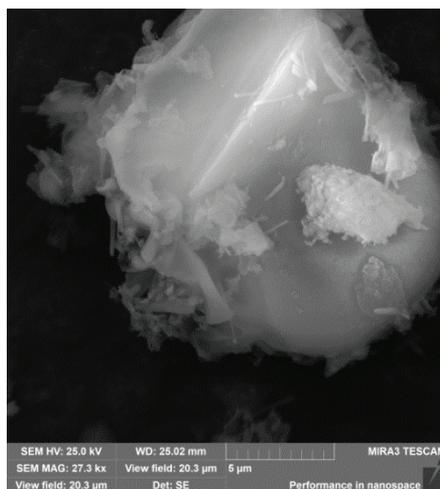


Fonte: Os autores, 2023.

A Fig. 5 ainda apresenta a variação da condutividade elétrica da CFB até 2 minutos. É neste intervalo de tempo que é feita a classificação da pozolana proposta por Lúxan et. al., (1989). Com isso, é possível verificar que a CFB, pode ser classificada como um material de alta pozolanicidade, já que a diminuição da condutividade no segundo minuto foi superior a 1,2 mS/cm. O resultado alcançado demonstra que o potencial do material em estudo está alinhado com a CFB estudada por (CORDEIRO et al. 2020) que também obtiveram a classificação de material com alta pozolanicidade.

A Fig. 6 apresenta detalhadamente as CFB a partir da observação por meio da caracterização por MEV. É possível então, observar que a mesma apresenta uma morfologia em sua maior parte regular e lisa com a presença de algumas partículas de formatos irregulares em sua superfície. Villar-Cociña et al., (2011) também observou em sua pesquisa, as mesmas características regulares para a CFB.

Figura 6: Imagem de MEV da CFB.



Fonte: Os autores, 2023.

Realizou-se a análise química pelo ensaio de FRX para o solo, CFB e cimento. As porcentagens de cada elemento químico, juntamente com o respectivo material, são apresentadas na Tabela III. O solo é composto predominantemente por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), alcançando 74,98% da composição do material, logo em seguida aparece o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) com 19,39% e 3,82%, respectivamente. Os resultados obtidos apresentam similaridades com o encontrado por outros autores (VILELA et. al., 2020; NASCIMENTO et. al., 2021; LOZANO-LUNAR et. al., 2020; RIBEIRO et. al., 2017).

Para a CFB, os principais óxidos presentes em sua composição foram  $\text{SiO}_2$  com 82,56% e o  $\text{CaO}$ , representando 5,97%. Os demais componentes apresentaram porcentagem inferior a 4%. A porcentagem de sílica presente na CFB caracterizada por outros autores obteve resultados semelhantes (MORAES et. al., 2019; SILVA et. al., 2021; CHANDANA et. al., 2016). O somatório das porcentagens de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é de 83,279%, sendo este valor superior aos 70% requisitados pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

A ausência de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pode ser o resultado da metodologia de queima, espécie de bambu, idade, solo e clima (FRÍAS et. al., 2012). No que tange a porcentagem de trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) presente na CFB, o resultado obtido foi de 2,42%, também cumprindo com as exigências pedidas pela norma brasileira (FRÍAS et. al., 2012).

Os resultados referentes à composição química do cimento *Portland* V-ARI também foram apresentados na Tabela III, sendo percebido que esse material é formado em sua maior parte por óxido de cálcio (CaO), cerca de 71%, e também por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), com 13,81%. A referente composição química atende a requisitos especificados pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Os estudos realizados por Berenguer et al., (2020), Agostinho et al., (2021) e Bezerra et al., (2021) obtiveram composições do cimento *Portland* similares aos apresentados na Tabela III.

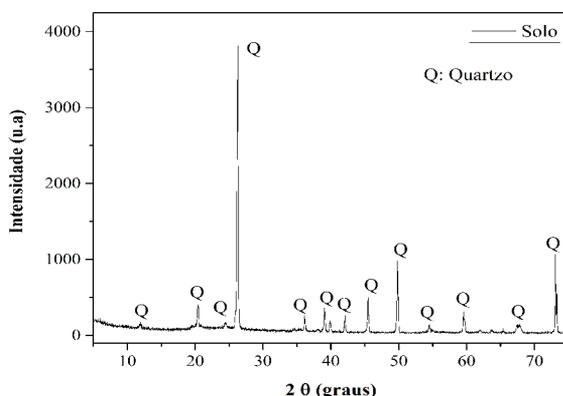
Tabela III - Composição química (% em massa) do solo, cinza da folha de bambu (CFB) e cimento determinado por FRX.

Composição	(% )		
	Solo	CFB	Cimento
$\text{Al}_2\text{O}_3$	19,39	-	3,45
$\text{SiO}_2$	74,98	82,56	13,81
$\text{K}_2\text{O}$	0,29	3,88	0,46
CaO	0,19	5,97	71,06
$\text{TiO}_2$	1,15	0,11	0,31
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,82	0,72	5,16
$\text{ZrO}_2$	0,12	-	-
MgO	-	3,26	2,5
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	0,78	-
$\text{SO}_3$	-	2,42	3,06
Cl	-	0,17	-
MnO	-	-	0,19

Fonte: Os autores, 2023.

A identificação das fases mineralógicas presentes nos materiais (solo, CFB e Cimento) foi obtida a partir do banco de dados ICDD (*International Center for Diffraction Data*), com auxílio do *software X'Pert HighScore*. É possível verificar, no difratograma, que as fases do solo (Fig. 7) são dominadas por minerais de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) também observadas por Nejad et al., (2020). Esse resultado corrobora os dados da análise química que mostra que mais de 74% do material é formado por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e quase 20% por óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). O quartzo no solo possibilita ao tijolo solo-cimento sua estabilização dimensional (REGO, 2019).

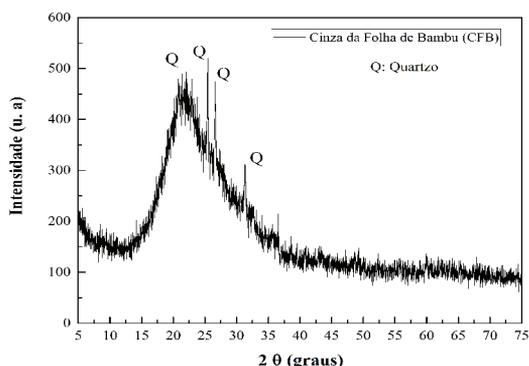
Figura 7: Difratograma de raios X do solo.



Fonte: Os autores, 2023.

A CFB (Fig. 8) apresentou uma natureza amorfa, sendo observado uma banda larga entre  $15^\circ$  e  $40^\circ$  em  $2\theta$ , comportamento semelhante a de CFB produzidas por outros autores (FRÍAS et. al., 2012; MORAES et. al., 2019). Apesar de sua natureza ser amorfa, a CFB apresentou alguns picos cristalinos de quartzo em  $2\theta = 25,49^\circ$ ,  $26,72^\circ$ ,  $31,19^\circ$  e  $36,74^\circ$ . A presença de quartzo pode ser explicada pelo contato das folhas com o solo, no momento da coleta (MORAES et. al., 2019).

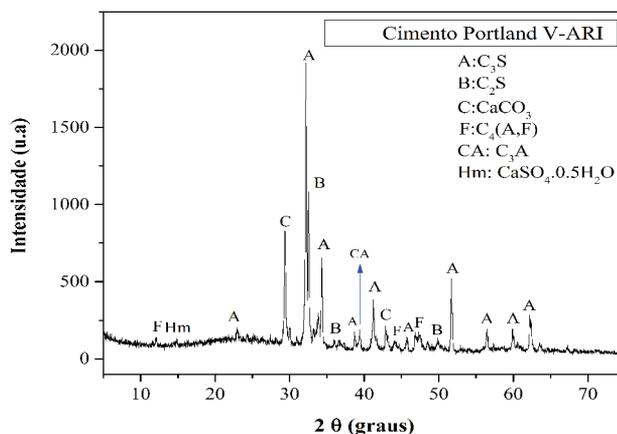
Figura 8: Difratoograma de raios X da cinza da folha de bambu (CFB).



Fonte: Os autores, 2023.

A Fig. 9 apresenta a análise mineralógica do cimento *Portland* V-ARI. Percebe-se a complexidade e grande quantidade de fases presentes no cimento. A alita ( $C_3S$ ) aparece como sendo a principal fase mineral do material, exibindo picos em  $2\theta = 22,79^\circ, 32,13^\circ, 34,30^\circ, 38,77^\circ, 41,34^\circ, 45,68^\circ, 51,63^\circ, 56,37^\circ, 59,75^\circ$  e  $62,24^\circ$ , resultado similar a outra pesquisa (VILELA et. al., 2020). Além disso, é possível observar que fases de belita ( $C_2S$ ), calcita ( $CaCO_3$ ), ferrita ( $C_4, A,F$ ), aluminato ( $C_3A$ ) e bassanita ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ) também estão presentes. A presença dos silicatos de cálcio, alita, belita e além do aluminato, no cimento *Portland* V-ARI, proporcionam a resistência no primeiro dia de cura (BARBOSA; PORTELLA, 2019).

Figura 9: Difratoograma de raios X do cimento Portland.



Fonte: Os autores, 2023.

A Fig. 10 exhibe os valores de absorção de água para tijolos de solo-cimento com diferentes quantidades de CFB, aos 7, 14, 28 e 56 dias. Deve-se notar que a porcentagem de CFB teve um efeito relevante na absorção de água dos tijolos após os períodos de cura. Uma redução na absorção de água ocorreu à medida que a quantidade de CFB nos tijolos aumentou além do avanço do fator temporal (tempo de cura) dos tijolos.

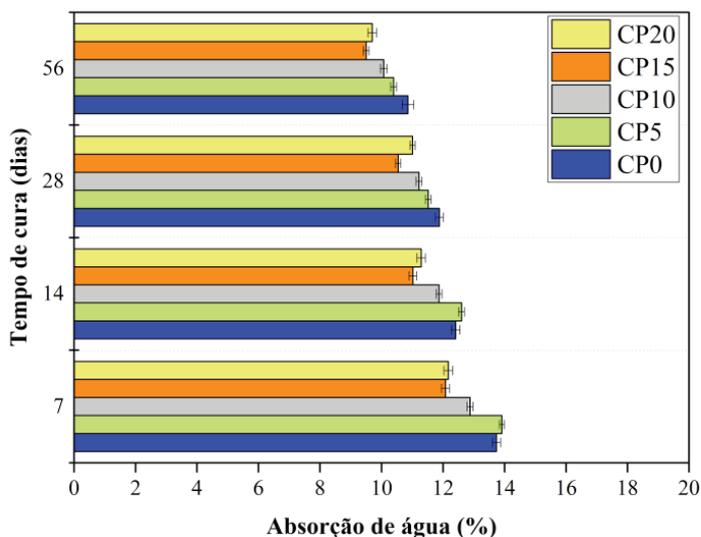
A amostra CP15 (15% de CFB) apresentou o menor valor de absorção com 9,5% aos 56 dias de cura. Neste mesmo período de cura a amostra CP20, aquela com o maior percentual de cinzas (20%), obteve resultado bastante similar: 9,7%. Desta forma para todos os valores médios de absorção de água avaliados foram inferiores ao máximo sugerido pela norma NBR 8492 (ABNT, 2012) de 20%.

A pesquisa realizada por Rocha *et al.* (2021) com substituição do material cimentício por resíduos de mineração em tijolos de solo-cimento também obteve redução do índice de absorção de água com o aumento da porcentagem do resíduo. O fenômeno de diminuição da absorção de água

por parte dos tijolos pode ser consequência da diminuição da porosidade na matriz, causada pelo processo de cura, momento em que ocorrem as reações de hidratação do cimento e consequente minimização do número de poros para receber água (SEKHAR; NAYAK, 2018; XU *et al.*, 2020).

Portanto, a substituição do cimento por CFB contribuiu para aumentar o empacotamento das partículas (solo, cimento e CFB) fazendo com que se tenham menos vazios e, conseqüentemente, menos inserção de água (GUETTALA *et al.*, 2002; SIQUEIRA *et al.*, 2013). Esse resultado está associado com a distribuição granulométrica da CFB que age como um elemento de preenchimento causando a redução de grande parte de poros capilares. Além disso, as propriedades pozolânicas promovem ligações químicas com cimento gerando uma matriz mais densa (REDDY; KUMAR, 2011; TRIPURA; SINGH, 2015; SEKHAR; NAYAK, 2017).

Figura 10: Absorção de água para tijolos de solo-cimento preparados com solo, cimento e CFB considerando diferentes proporções e tempos de cura.



Fonte: Os autores, 2023.

A Fig. 11 mostra o resultado das propriedades mecânicas, ou seja, resistência à compressão para as amostras de tijolos solo-cimento. Ambas as propriedades aumentam com a idade de cura. Também é percebido que as resistências aumentam com a adição do aditivo, exceto na substituição de 5% aos 7 dias, em que houve a diminuição na resistência dos tijolos em relação ao tijolo sem CFB que foi utilizado como amostra de referência.

A maior resistência à compressão, 7 MPa foi obtida na substituição de 15% (CP15) de CFB aos 56 dias de cura, valores estes 3 vezes maiores, que o valor (2 MPa) exigido pela NBR 10834 (ABNT, 2012), sendo este portanto o teor ótimo. Também é possível verificar que as outras amostras também superaram o valor prescrito pela norma. Sob a óptica da sustentabilidade é desejável que a maior porcentagem possível de cimento seja substituída sob a condição de que a resistência do material elaborado seja mantida (CHEN et. al., 2021).

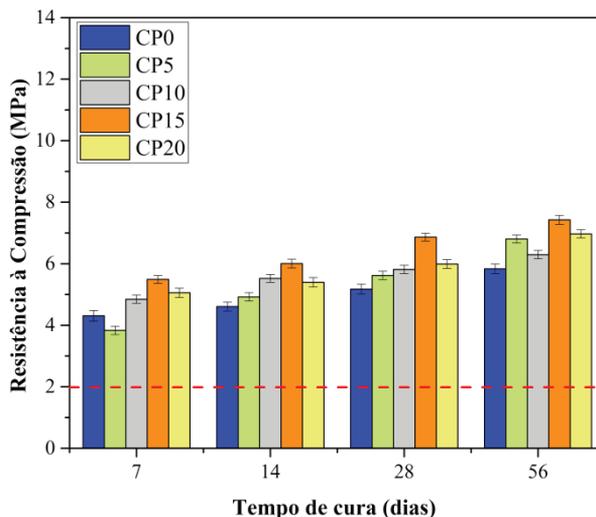
Os resultados apresentados pelas amostras com CFB se devem ao preenchimento de poros realizados pelas cinzas, já que esse material possui um alto grau de finura, realizando o preenchimento dos vazios (CHUSILP et. al., 2009). Outro fator que pode ter influenciado nos resultados é a formação de compostos hidratados, como o CSH, durante a reação de hidratação do cimento e a reação pozolânica (RODIER et al., 2017).

A reação entre a sílica ou aluminossílica e o hidróxido de cálcio forma o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, realizando assim o preenchimento dos poros capilares. O processo de densificação da matriz provoca o aumento das propriedades mecânicas do material (TAYLOR, 1997). Esses resultados encontram-se alinhados com os índices de absorção de água dos tijolos.

Os resultados mostram que as CFB não beneficiam somente o comportamento mecânico, mas também o meio ambiente, tornando o uso

de CFB em tijolo solo-cimento uma alternativa altamente sustentável, uma vez que a substituição de até 20% de cimento *Portland* gera uma economia significativa de cimento *Portland*, implicando na redução de impactos ambientais.

Figura 11: Resistência à compressão para tijolos de solo-cimento preparados com solo, cimento e CFB considerando diferentes proporções e tempos de cura.



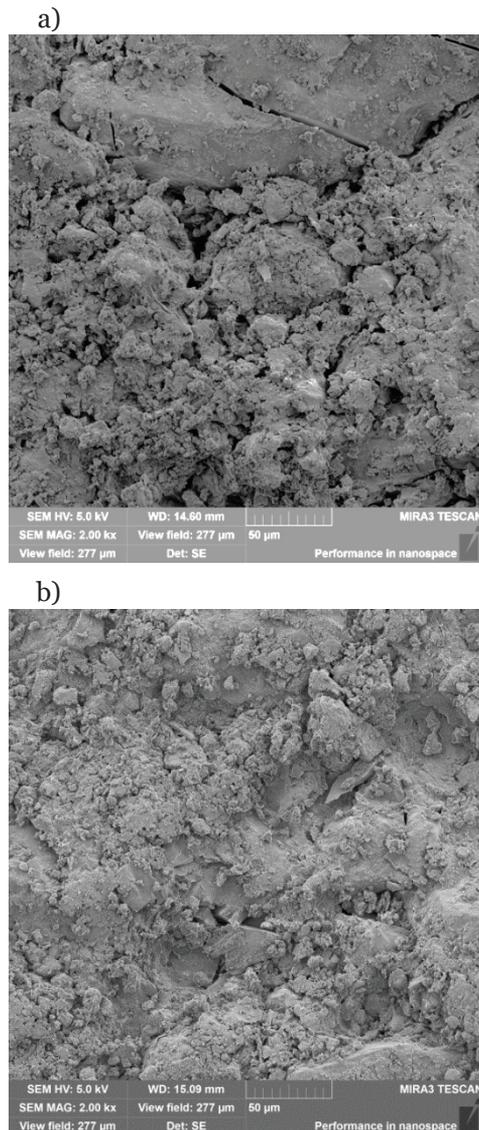
Fonte: Os autores, 2023.

As propriedades microestruturais dos tijolos solo-cimento contendo 0 e 15% de CFB são apresentadas na Fig. 12 (a e b). Em ambos os casos as microestruturas possuem muitos grãos sobrepostos o que dá aparência de vale-montanha. As Micrografias obtidas na Fig. 12 denotam que houve uma mistura homogênea em CP0 e CP15. No entanto, é possível observar as diferenças presentes entre as estruturas.

Na amostra com 0% de CFB (CP0), microestruturalmente os grãos estão bem empacotados, no entanto podem ser percebidos alguns poros espalhados pela estrutura. Apesar do bom arranjo, a amostra CP15, exibe um intertravamento dos grãos ainda melhor. Isso é perceptível pela

estrutura com a presença de poucos poros muito estreitos, ao contrário dos largos poros encontrados no tijolo solo-cimento sem CFB. O resultado microestrutural está alinhado com os resultados já discutidos sobre as propriedades mecânicas e de absorção de água dos tijolos.

Figura 12: Imagem de MEV da amostra CPo (a) e CP15 (b).



Fonte: Os autores, 2023.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo investigou a substituição parcial de cimento por cinza de folha de bambu (CFB) em tijolos de solo-cimento e, a partir dos resultados, verificou-se que a CFB é rica em sílica amorfa, podendo substituir o cimento *Portland*.

A substituição do cimento *Portland* pela CFB resultou no aumento da resistência mecânica do tijolo, sendo que a amostra CP15 obteve o melhor resultado mecânico entre todas as amostras para os diferentes tempos de cura. Ainda observou-se que todas as amostras contendo CFB em diferentes proporções obtiveram aumento em seus índices de resistência ao longo do tempo, bem como diminuição da absorção de água, o que pode ter melhorado o adensamento atendendo aos padrões preconizados pela norma brasileira vigente.

Portanto, o emprego de cinzas da folha de bambu em substituição ao material cimentício mostrou que é possível obter tijolos que apresentem propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, fazendo o uso de materiais alternativos, proporcionando a redução quanto ao uso de cimento *Portland* na produção de um tipo de tijolo que não necessita do processo de queima em sua fabricação.

Para futuras pesquisas, sugere-se a avaliação da eficiência energética, emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos reduzidos associados ao uso deste aditivo nos tijolos, a fim de destacar sua contribuição para a mitigação dos impactos ambientais resultantes da produção e utilização do cimento *Portland*.

## REFERÊNCIAS

ABCP, **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaios**. São Paulo, 2004.

AGOSTINHO, L. B. ALEXANDRE, C. P. DA SILVA, E. F. TOLEDO F. R. D. Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanosilica. **Journal of Building Engineering**. Vol. 34, 2021, pp. 102024.

ALIAS, N. IBRAHIM, N. MOHD, H. K. A. HASBULLAH, H. Thermogravimetric analysis of rice husk and coconut pulp for potential biofuel production by flash pyrolysis. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**. Vol. 18, n. 3, 2014, 705-710.

ANDREW, R. M. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, 1928–2018. **Earth Syst. Sci. Data**. Vol. 11, 2019, pp. 1675–1710.

AROOZ, R. F. HALWATURA, R. U. Mud-concrete block (MCB): mix design & durability characteristics. **Case Studies in Construction Materials**. Vol. 8, 2018, pp. 39 -50.

ASHA, P. SALMAN, A. KUMAR, R. A. Experimental study on concrete with bamboo leaf ash. **Int. J. Eng. Adv. Technol.** Vol. 3, 2014, pp. 2249-8958.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10833: **Fabricação de Tijolo e Bloco de Solo-Cimento utilizando Prensa Manual ou Hidráulica: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10834: **Bloco de solo-cimento sem função estrutural: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Solo: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: **Tijolo de solo-cimento: Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

BARBOSA W. PORTELLA K. F. Synthesis and characterization of mineral phases C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A and C<sub>4</sub>AF for use in Portland cement. **Cerâmica**.

Vol. 65, 2019, pp. 373.

BASTO, P.A. SAVASTANO, H. NETO, A. A. M. Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 104, 2019, pp. 103410.

BRAGA D. T. GUERREIRO E. M. B. R. A sustentabilidade ambiental e social: um olhar sobre a Amazônia. **Revista Igapó**. V. 01, 2007, pp. 54-59.

BERENGUER, R. A. CAPRARO, A. P. B. MEDEIROS, M. H. F. CARNEIRO, A. M. P. OLIVEIRA, R. A. Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Vol. 8, n. 2, 2020, pp. 103655.

BEZERRA C.G., ROCHA C.A.A., DE SIQUEIRA I.S., FILHO R.D.T. Feasibility of iron-rich ore tailing as supplementary cementitious material in cement pastes. **Construction and Building Materials**. Vol. 303, 2021, pp. 124496.

CHANDANA, D.G.G.H. DHINAKARAN, G. Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete. **Jordan Journal of Civil Engineering**. Vol. 10, 2016, pp. 279-289.

CHEN J.J. LI B. H NG P. L KWAN A.K.H. Adding granite polishing waste to reduce sand and cement contents and improve performance of mortar. **Journal of cleaner production**. Vol. 279, 2021, pp. 123653.

CHUSILP N. JATURAPITAKKUL C. KIATTIKOMOL K. Effects of LOI of Ground Bagasse Ash on the Compressive Strength and Sulfate Resistance of Mortars. **Construction and Building Materials**. Vol. 23, n. 12, 2009, pp. 3523-3531.

CORDEIRO, G. C. LEMOS, M.N. XAVIER, K.V. LIMA, C. P. F. Production of agroindustrial ashes with pozzolanic activity via acid leaching, conjugated burning and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**. Vol. 20, n. 4, 2020, pp. 189-203.

DERAKHSHAN-NEJAD Z. LEE. W. HAN. S. CHOI. J. YUN. S. LEE. G. Effects of soil moisture content on CO<sub>2</sub> triggered soil physicochemical properties in a near-surface environment. **Journal of Soils and Sediments**. Vol. 20, n. 4, 2020, pp. 2107-2120.

ENG-POH, N. JACK-HAO, C. RINO, R. M. OKI, M. TAU, C. L. KA-LUN, W. Hydrothermal synthesis of zeolite a from bamboo leaf biomass and its catalytic activity in cyanoethylation of methanol under autogenic pressure and air conditions. **Materials Chemistry and Physics**. Vol. 201, n. 1, 2017, pp. 78-85.

FRÍAS, M. SAVASTANO, H. VILLAR, E. ROJAS, M.I.S. SANTOS. S. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 34, 2012, pp. 1019-1023.

GARSIDE, M. **Global lead industry - statistics & facts**. Statista. 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/topics/5177/lead/#topicOverview>. Acesso em 27 jan. 2023.

GAŠPAROVIČ, L. KOREŇOVÁ, Z. JELEMENSKÝ, L. Kinetic study of wood chips decomposition by TGA. **Chemical Papers**. Vol. 64, n. 2, 2010, pp. 174-181.

GIANG, D. T. Pheng, L.S. Role of construction in economic development: Review of key concepts in the past 40 years. **Habitat International**. Vol. 35, n. 1, 2011, pp. 118-125.

GONZÁLEZ, C. L. ABADÍA, J. M. M. Global Reporting Initiative: Contabilidad y Sostenibilidad. **Revista Partida Doble**. Vol. 135, 2002, pp. 80-87.

GUETTALA A. HOUARI H. MEZGHICHE B. CHEBILI R. Durability of lime stabilized earth blocks. **Courrier du Savoir**. Vol. 2, n. 2, 2002, pp. 61-66.

HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4 ed. .Londres. Elsevier, 2008.

HUANG, L. KRIGSVOLL, G. JOHANSEN, F. LIU, Y. ZHANG, X. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 81, n. 2, 2018, pp. 1906 - 1916.

KARIYAWASAM, K.K.G.K.D. JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. **Construction and Building Materials**. Vol. 105, 2016, pp. 519 - 527.

KOLAWOLE, J. T. OLUSOLA, K. O. BABAFEMI, A. J. OLALUSI, O. B. Blended cement binders containing bamboo leaf ash and ground clay brick waste for sustainable concrete. **Materialia**. Vol. 15, 2021, pp. 101045.

LIU, X.; GUO, P.; GUO, S. Assessing the eco-efficiency of a circular economy system in China's coal mining areas: Emergy and data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**. 206 (1), 2019, p. 1101-1109.

LOBOVIKOV, M. PAUDEL, S. PIAZZA, M. REN, H. WU, J. World Bamboo Resources: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. **Food and Agriculture Organization**. Vol. 18, 2007, pp. 73.

LOZANO-LUNAR, A. DUBCHENKO, I. BASHYNSKYI, S. RODERO, A. FERNÁNDEZ, J. M. JIMÉNEZ, J. R. Performance of self-compacting mortars with granite sludge as aggregate. **Construction and Building Materials**. Vol. 251, 2020, pp. 118998.

LUXÁN, M.P. MADRUGA, F. SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. Vol. 19, n. 1, 1989, pp. 63- 68.

MARTINEZ-RAMIREZ, S. BLANCO-VARELA, M.T. ERENA, I. GENER, M. Pozzolanic reactivity of zeolitic rocks from two different Cuban deposits: Characterization of reaction products. **Appl Clay Sci**. Vol. 32, 2006, pp. 40-52.

MASKELL, D. HEATH, A. WALKER, P. Appropriate structural unfired earth masonry units', Proceedings of the Institution of Civil Engineers. **Construction Materials**. Vol. 169, 2016, pp. 261-270.

MORAES M.J.B. MORAES J.C.B. TASHIMA M.M. AKASAKI J.L. SORIANO L. BORRACHERO M.V. PAYÁ J. Production of bamboo leaf ash by auto-

combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**. Vol. 208, 2019, pp. 369-380.

MORAES, M.J.B. MORAES, J.C.B. TASHIMA, M.M. A. SORIANO, J.L. BORRACHERO, L. PAYÁ, M.V. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**. Vol. 208, 2019, pp. 369-380.

MORALES, E. V. VILLAR-COCIÑA, E. FRÍAS, M. SANTOS, S. F. SAVASTANO, H. Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 31, n. 1, 2009, pp. 22-28.

NASCIMENTO, E. S. S. SOUZA, P. C. OLIVEIRA, H. A. MELO JÚNIOR, M. M. ALMEIDA, V. G. O. MELO, F. M. C. Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 321, 2021, pp. 129002.

OKOKPUJIEA, I. P. AKINLABI, E.T. FAYOMI, O.O. Assessing the policy issues relating to the use of bamboo in the construction industry in Nigeria Elsevier Enhanced Reader. **Heliyon**, vol. 6, n. 5, 2020, E04042.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Soil-cement Information**. Washington, 2003.

REDDY B. V. V. KUMAR P. P. Cement stabilised rammed earth. Part B: compressive strength and stress–strain characteristics. **Materials and Structures**. Vol. 44, n. 3, 2011, pp. 695 – 707.

REGO, R. R. C. **Estudo do tijolo solo cimento em formulações com a adição da cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais), IFPI, 2019.

RIBEIRO, S. V. **Reuse of Wood Ash Waste in the Production of Soil-Cement Brick: Formulation, Properties and Microstructure.** Dissertação em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2017.

ROCHA J. H. A. ROSAS M. H. CHILENO N. G. C. TAPIA G. S. C. Physical-mechanical assessment for soil-cement blocks including rice husk ash. **Case Studies in Construction Materials.** Vol. 14, 2021, pp. e00548.

RODIER L. BILBA K. ONEÂSIPPE C. ARSÈNE M.A. Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. **Journal of Materials and Structures.** Vol. 87, 2017, pp. 58.

RODIER, L. VILLAR-COCIÑA, E. BALLESTEROS, J.M. JUNIOR, H.S. Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials. **Journal of Cleaner Production.** Vol. 231, 2019, pp. 54-63.

SEKHAR D. C. NAYAK S. SEM and XRD investigations on lithomargic clay stabilized using granulated blast furnace slag and cement. **International Journal of Geotechnical Engineering.** Vol. 13, n. 6, 2017, pp. 615-629.

SEKHAR D. NAYAK S. Utilization of Granulated Blast Furnace Slag and Cement in the Manufacture of Compressed Stabilized Earth Blocks. **Construction and Building Materials.** Vol. 166, 2018, pp. 531-536.

SILVA, L. H. P. TAMASHIRO, J.R. PAIVA, F.F.G SANTOS, L.F. TEIXEIRA, S.R. KINOSHITA, A. ANTUNES, P. A. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**. Vol. 42, 2021, pp. 102769.

SILVA, J. R. N. Meio ambiente, modos de produção e trabalho: uma análise histórico-conceitual. **Revista Igapó**. Vol.01, 2008, pp. 22-27.

SILVA, A. B. MACIEL, J. C. S. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Revista Igapó**. Vol. 01, 2009, pp 109-114.

SILVA, T. N. et al. Desenvolvimento sustentável: conceitos e indicadores. **Revista de Administração Pública**. V. 54, n. 5, 2020, pp. 1267-1288.

SIQUEIRA, F. B. HOLANDA J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks. **Journal of Environmental Management**. Vol. 131, 2013, pp. 1-6.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: Thomas Telford, 1997.

TRIPURA D. D. SINGH K. D. Characteristic properties of cement-stabilized rammed earth blocks. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 27, n. 7, 2015, pp. 04014214 .

UMOH, A.A. ODESOLA, I. A. Characteristics of bamboo leaf ash blended cement paste and mortar. **Civil Engineering Dimension**. Vol. 17, n. 1, 2015, pp. 22-28.

UTODIO, N. F. EKANDEM, E. S. EGEGE, C. C. OCHOLI, M. ATAKPU, O. D. NWAIGWE, D. N. Investigation of the effect of bamboo leaf ash blended cement on engineering properties of lateritic blocks. **Journal of Sustainable Development Studies**. Vol. 8, 2015, n. 1, pp. 193-208.

VILELA, A. P. EUGÊNIO, T. M. C. OLIVEIRA, F. F. MENDES, J. F. RIBEIRO, A. G. C. VAZ, L. E. V. S. B. MENDES, R. F. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**. Vol. 262, 2020, pp. 120883.

VILLAR-COCIÑA, E. MORALES, E. V. GONZÁLES, R. R. RUÍZ, J. H. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic–diffusive model. **Cement and Concrete Research**. Vol. 33, n. 4, 2003, pp. 517-524.

VILLAR-COCIÑA, E. MORALES, E. V. SANTOS, S. F. SAVASTANO, H. FRÍAS, M. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 33, n. 1, 2011, pp. 68-73.

VILLAR-COCIÑA, E. SAVASTANO, H. RODIER, L. LEFRAN, M. FRÍAS, M. Pozzolanic characterization of cuban bamboo leaf ash: calcining temperature and kinetic parameters. **Waste Biomass Valor**. Vol. 9, 2018, pp. 691–699.

XU F. WANG S.L. LI T. LIU B. LI B.B. ZHOU Y. The mechanical properties of tailing recycled aggregate concrete and its resistance to the coupled deterioration of sulfate attack and wetting-drying cycles. **Structures**. Vol. 27, 2020, pp. 2208-2216.