



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DOS MATERIAIS

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

Mestrando: Humberto Denys de Almeida Silva

Orientador: Prof. Dr. José Milton Elias de Matos

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Valdeci Bosco dos Santos

Teresina - Piauí

2022

HUMBERTO DENYS DE ALMEIDA SILVA

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

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí – UFPI, como requisito complementar à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Milton Elias de Matos

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Valdeci Bosco dos Santos

Teresina - Piauí

2022

HUMBERTO DENYS DE ALMEIDA SILVA

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí – UFPI, como requisito parcial à obtenção do título de mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Prof. Dr. José Milton Elias de Matos

Prof.^a Dr.^a Valdeci Bosco dos Santos

Prof.^a Dr. Francisco Eroni Paz dos Santos

Prof.^a Dr. Rafael Farinassi Mendes

Teresina - Piauí

2022

DEDICATÓRIA

Primeiramente ao meu amado Senhor Jesus Cristo, a Santíssima Virgem Maria e a São José meu padroeiro. A toda minha família, em especial, meus pais e irmã. A minha esposa e meu filho, que de diversas formas contribuíram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Senhor da minha história e autor da vida, que me amou e levou-me para frente quando já não tinha forças.

À minha família, em especial à minha esposa, Nágela Almeida, pelo amor, compreensão, paciência e total apoio para a conclusão deste trabalho. Ao meu filho José Miguel, que nos momentos de dificuldade com um simples sorriso me motivou a seguir em frente. A minha mãe, Irisneide, que dedicou toda sua vida para minha formação, sendo uma verdadeira intercessora, ao meu pai, Humberto, por ser espelho de homem para mim, e a minha irmã pelo apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Milton Elias de Matos, que em todo esse ciclo me fez crescer como pesquisador e ser humano. A minha co-orientadora Prof. Dr. Valdeci Bosco, que aceitou o desafio de me orientar, fazendo com que pudesse dar um salto de maturidade e desenvolvimento científico, com todos os seus posicionamentos.

Ao meu grande amigo Hitalo de Jesus, que contribuiu em todos os momentos da minha vida acadêmica desde a graduação até o mestrado, sendo um instrumento de Deus para mim. A CAPES por acreditar no projeto e pelo incentivo financeiro concedido. A Universidade Federal do Piauí – UFPI, em especial ao PPGCM, local onde sempre sonhei estudar. Gostaria também de agradecer ao IFPI e ao UFPE.

Se deixei de citar alguém, perdão. Segue outros colaboradores importantes:

Edgar (Limav), Luciano (LIMAV), Kelson (Coordenação PPGCM), Prof. Ramon Raudel (PPGCM), Bernado (Química), Rui (Cerâmica - IFPI), Miquéias (Metalografia), Jean (Metalografia), Edson (Microscopia - UFPE).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 GERAL.....	4
2.2 ESPECIFICOS	4
3. REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 TIJOLO SOLO-CIMENTO.....	5
3.1.1 COMPONENTES DO TIJOLO SOLO-CIMENTO	7
3.1.1.1 Solo.....	7
3.1.1.2 CIMENTO PORTLAND.....	9
3.1.1.2.1 Hidratação do Cimento.....	13
3.1.1.2.2 Tipos de Cimento Portland.....	15
3.1.1.2.3 A produção do cimento Portland e o meio ambiente	17
3.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	19
3.3 CINZAS DA FOLHA DE BAMBU.....	22
4 PARTE EXPERIMENTAL	26
4.1 MATÉRIAS-PRIMAS	27
4.1.1 SOLO.....	27
4.1.2 CINZAS DA FOLHA DE BAMBU.....	27
4.1.3 CIMENTO.....	27
4.1.4 ÁGUA.....	28
4.2 PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	28
4.2.1 SOLO.....	28
4.2.2 CINZAS DA FOLHA DE BAMBU.....	29
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	30

4.3.1 CARACTERIZAÇÕES DO SOLO.....	30
4.3.1.1 Limites de Atterberg	30
4.3.1.2 Distribuição Granulométrica.....	31
4.3.2 CARACTERIZAÇÕES DAS CINZAS DA FOLHA DE BAMBU (CFB)	31
4.3.2.1 Análise Térmica	31
4.3.2.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR.....	32
4.3.2.3 Atividade Pozolânica	32
4.3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	33
4.4 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS	34
4.4.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X.....	34
4.4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	34
4.5 PREPARAÇÃO E CONFECÇÃO DE CORPOS DE PROVAS DE TIJOLOS SOLO- CIMENTO	34
4.5.1 DOSAGEM DO CIMENTO	34
4.5.2 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES.....	35
4.5.3 PREPARAÇÃO DA MISTURA.....	36
4.5.4 PRENSAGEM.....	36
4.5.5 CURA	38
4.6 CARACTERIZAÇÕES DOS CORPOS DE PROVAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO	38
4.6.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	38
4.6.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	40
5.1.1 SOLO.....	40
5.1.1.1 Distribuição granulométrica do solo.....	40

5.1.1.2 Limites de Atterberg	42
5.1.2 CARACTERIZAÇÕES DAS CFB	43
5.1.2.1 Análise Térmica	43
5.1.2.2 Atividade Pozolânica	44
5.1.2.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	45
5.1.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura	46
5.2 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS	47
5.2.1 ANÁLISE QUÍMICA - FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	47
5.2.2 ANÁLISE MINERALÓGICA – DIFRAÇÃO DE RAIOS X	49
5.2.2.1 Solo.....	49
5.2.2.2 Cinza da Folha de Bambu – CFB.....	50
5.2.2.3 Cimento Portland V-ARI.....	52
5.3 CARACTERIZAÇÕES DOS CORPOS DE PROVAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO	53
5.3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA	53
5.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	55
5.3.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO	58
5.3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	59
6. CONCLUSÃO.....	62
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas da produção do cimento Portland.	11
Figura 2: Evolução da resistência dos principais tipos de cimento.....	17
Figura 3: Esquemática resumida das etapas desenvolvidas.....	26
Figura 4: Etapas na produção das cinzas de folha de bambu (CFB).....	30
Figura 5: Ensaio de condutividade elétrica pelo método de Lúxan et al. (1989).....	33
Figura 6: Preparação das misturas: (A) Pesagem de cada material, (B) Junção de todos os componentes, (C) Homogeneização dos componentes (massa seca), (D) Umidificação da massa.	36
Figura 7: Prensa hidráulica (A) Processo de prensagem do corpo de prova (B)..	37
Figura 8: Corpo de prova conformado.	38
Figura 9: Ensaio de resistência à compressão.	39
Figura 10: Ensaio de resistência à flexão	40
Figura 11: Distribuição granulométrica – solo	41
Figura 12: Curvas TG/ DTG das cinzas da folha de bambu (CFB).....	43
Figura 13: Ensaio de Condutividade, cinzas da folha de bambu (CFB)..	44
Figura 14: Ensaio de Condutividade, cinzas da folha de bambu (CFB).	46
Figura 15: Morfologia da partícula de cinzas da folha de bambu (CFB).....	47
Figura 16: Difratoograma de Raios-X do solo	50
Figura 17: Difratoograma de Raios-X da Cinza da folha de bambu (CFB).....	51
Figura 18: Difratoograma de Raios-X do cimento Portland V-ARI	52
Figura 19: Absorção de água versus período de cura dos corpos de prova de tijolos solo-cimento.	54
Figura 20: Resistência à compressão dos corpos de prova de tijolos solo-cimento.....	55
Figura 21: Resistência à flexão dos corpos de prova de tijolos solo-cimento.....	58
Figura 22: Microscopia eletrônica de varredura do tijolo solo-cimento: CP0, sem adição de CFB.....	60
Figura 23: Microscopia eletrônica de varredura dos corpos de prova de tijolos solo-cimento: (A) CP5, (B) CP10, (C) CP15, (D) CP20.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios para a seleção de solos apropriados.....	8
Tabela 2: Compostos do cimento Portland.....	12
Tabela 3: Tipos de cimento Portland e composições.	16
Tabela 4: Classificação dos materiais Pozolânicos.	20
Tabela 5: Composição química dos materiais pozolânicos.....	21
Tabela 6: Propriedades físicas dos materiais pozolânicos.....	22
Tabela 7: Buscas de anterioridades.	25
Tabela 8: Especificações do cimento Portland CP V-ARI.....	28
Tabela 9: Conjunto de peneiras adotado..	31
Tabela 10: Composições adotadas para a confecção dos tijolos solo-cimento..	33
Tabela 11: Distribuição granulométrica – solo..	35
Tabela 12: Limites de Atterberg.....	41
Tabela 13: Composição química solo, CFB e cimento... ..	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

C-A-H - Aluminato de cálcio hidratado

CP - Corpo de prova

% - Porcentagem

°C/min – Graus Celsius por minuto

$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ – Silicato dicálcico

$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ – Aluminato tricálcico

$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ – Silicato tricálcico

$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ – Ferroaluminato tetracálcico

Å – Angstrom

AA - Absorção de água

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

C_2S – Belita

C_3A – Aluminato

C_3S – Alita

C_4AF – Ferrita

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Hidróxido de cálcio

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

CaO - Óxido de cálcio

$\text{CaSO}_4.0,5\text{H}_2\text{O}$ – Bassanita

CFB – Cinza da Folha de Bambu

CH - Hidróxido de cálcio

CO₂ - Dióxido de carbono

C-S-H - Silicatos de Cálcio Hidratados

CuK α – Radiação de cobre

DRX - Difractometria de Raios-X

Fe₂O₃ - Óxido de ferro

FRX -Fluorescência de Raios-X

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

g – Grama

IFPI - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí

INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial

kg – Quilograma

KN - Quilonewton

kV – Quilovolt

LabMat - Laboratório de Materiais

LBM - Laboratório de Biodiesel e Materiais

LIMAV -Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados

mA - Miliampere

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

mL/min – Mililitro por minuto

mm – Milímetros

mm/min – Milímetro por minuto

MPa - Mega Pascal

mS/cm - MilliSiemens por centímetro

N/s - Newton por segundo

n° - Número

Na_2O - Óxido de sódio

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PCA: Portland Cement Association

PPGEM -Pós-graduação em Engenharia dos Materiais

S-A-C-H - Silício-aluminato de cálcio hidratado

SiO_2 - Dióxido de silício

SO_3 - Trióxido de enxofre

TG - Análise termogravimétrica

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

UFPI – Universidade Federal do Piauí

USPTO - Escritório de Patentes e Marcas Registradas dos Estados Unidos

WIPO - Organização Mundial da Propriedade Intelectual

ΔC - Variação de condutividade

μm – Micrômetro

RESUMO

O alto cultivo de bambu por todo o mundo assim como o seu grande uso em diversas indústrias provocam grandes impactos ambientais como a geração de grandes volumes de resíduos de folhas. Paralelo a isso, a indústria da construção civil tem buscado alternativas sustentáveis para aplicações em que possam fazer a substituição parcial do cimento. O presente estudo então objetivou utilizar cinzas da folha de bambu (CFB), como substituto parcial do cimento na composição de tijolos de solo-cimento. As CFB's foram produzidas a temperatura de 600 °C e tempo controlado de 2 horas. Os resultados das caracterizações realizadas classificam as CFB's como um material com alto índice pozolânico, sendo composto em sua maior parte por sílica (SiO₂) amorfa. Corpos de provas de tijolos solo-cimento com substituição do cimento em 0%, 5%, 10%, 15% e 20% pelas CFB's foram preparados, curados por 7, 14, 28 e 56 dias e caracterizados por absorção de água, ensaio mecânicos e por MEV. De acordo com estas caracterizações a dosagem ótima de CFB a ser substituída parcialmente pelo material cimentício na matriz é de 15%, entretanto, para todos os tempos de cura os resultados de absorção de água e resistência à compressão para todas as amostras, estavam acima do exigido pela norma brasileira. As CFB's aplicadas a tijolo solo-cimento, portanto, se apresentaram como uma alternativa viável e sustentável, diminuindo o consumo de cimento.

Palavras-chave: Cinza da Folha de Bambu; Tijolo solo-cimento; Cimento; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The high cultivation of environmental environments around the world, as well as its great use in amusements for the generation of great environmental impacts such as its large volumes of leaves. In addition, the civil industry has derivative alternatives for applications where they can make a partial replacement of cement. The present study then aimed to use bamboo leaf ash (BLA) as a partial substitute for cement in the composition of soil-cement bricks. The BLA were at a temperature of 600°C and a controlling time of 2 hours. The results of the characterizations performed classify BLA as a material with a high pozzolanic index, being composed mostly of amorphous silica (SiO₂). Soil-cement brick specimens with cement replacement at 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by BLA were prepared, cured for 7, 14, 28 and 56 days and characterized by water absorption, test mechanics and by SEM. According to these characterizations the optimization of BLA to be changed by the cement material in the matrix is 1, however, for all water curing times the results of absorption of and resistance to all BLA characterizations with all samples, were above what is required by the Brazilian standard. As the BLA applied to a soil-cement brick, therefore, it is proposed as a viable and sustainable alternative, the consumption of sustainable cement.

Keywords: Bamboo Leaf Ash; Soil-cement brick; Cement; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Os bambus são plantas que fazem parte da família *Poaceae* (subfamília *Bambusoideae*) (SORENG *et al.*, 2015). São cultivadas em regiões tropicais e subtropicais e no Brasil, esse cultivo é de aproximadamente 1,5 milhões de hectares entre nativas e plantadas (ANUNCIATO *et al.*, 2020). Devido a seu crescimento rápido, vida útil de mais de 75 anos, maturidade de colheita em 3 a 6 anos, alta produtividade por área, além de ser uma planta perene, renovável e de baixo custo, o interesse pelo seu uso tem crescido mundialmente (OKOKPUJIEA; AKINLABI; FAYOMI, 2020). Destaca-se também pela possibilidade de remoção de dióxido de carbono (CO₂), contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável (ASHA; SALMAN; KUMAR, 2014).

De forma significativa, o bambu atua para o desenvolvimento econômico de muitos países (OKOKPUJIEA; AKINLABI; FAYOMI, 2020). Sendo uma importante matéria-prima natural, tem sido de multiuso em diversos tipos de indústrias, como de alimentos, cerveja, construção, agricultura, fibra, papel, têxtil, carvão e outros (LOBOVIKOV *et al.*, 2007). 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). As plantações de bambu produzem grandes volumes de folhas secas (resíduos agrícolas) que ficam alocados embaixo das mesmas, entrando em processo de apodrecimento (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 destes resíduos das folhas de bambu é em uso como material cimentício complementar, entretanto, se faz necessário realizar o processo de calcinação em temperatura controlada para ativar suas propriedades pozolânicas (MORAES *et al.*, 2019). 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 e assim, alcançando as propriedades cimentícias (HEWLETT, 2009).

A indústria da construção exerce importante papel para crescimento de uma nação. Por exemplo, no ano de 2020 a produção mundial de cimento foi de aproximadamente 4 bilhões de toneladas (GARSIDE, 2020). Paralelo a isso, a indústria da construção também contribui com aproximadamente 30% de todas as emissões de CO_2 do planeta (GIANG; PHENG, 2011; HUANG *et al.*, 2018; AROOZ; HALWATURA, 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 sua preparação (KARIYAWASAM; JAYASINGHE, 2016).

Assim sendo, uma preocupação crescente com questões ambientais tem despertado grande interesse relacionado ao incentivo a dar um destino adequado aos resíduos (agroindustriais ou não) e à busca de produtos construtivos mais sustentáveis. Neste sentido, estudos realizados com a cinza de folha de bambu (CFB) em substituição parcial ao cimento tem revelado o seu potencial uso em matrizes cimentícias (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011; FRÍAS *et al.*, 2012; MORAES *et al.*, 2019; RODIER *et al.*, 2019). Embora existam pesquisas sobre o uso do CFB em argamassas e concretos (SILVA *et al.*, 2021; KOLAWOLE *et al.*, 2021), por exemplo, não existem pesquisas que tragam dados a respeito do uso da CFB em substituição ao cimento em tijolos solo-cimento (tijolos ecológicos).

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, HEATH, WALKER, 2016).

Através de uma consulta às plataformas de periódicos (*Web of Science, Scielo, Science Direct e Scopus*) e patentes (WIPO, USPTO e INPI) relacionando trabalhos até fevereiro de 2022, sobre o uso da CFB em substituição ao cimento em tijolos solo-cimento reforçou a necessidade de incentivo nessa área de pesquisa, tendo em vista que nada foi encontrado, podendo então, esta aplicação contribuir para agregar valor aos resíduos, reduzir o custo de produção dos tijolos solo-cimento, além de amenizar os impactos ambientais.

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

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Desenvolver e caracterizar formulações de corpos de provas de tijolos de solo-cimento substituindo parcialmente o material cimentício por cinzas da folha de bambu (CFB).

2.2 ESPECIFICOS

- Caracterizar as matérias-primas (solo, cimento e CFB) em função de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas;
- Avaliar o comportamento físico (absorção de água) e mecânico (compressão e flexão) dos corpos de provas produzidos.
- Avaliar a microestrutura das composições, por meio da caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 TIJOLO SOLO-CIMENTO

O tijolo convencional pode ser considerado um elemento básico da indústria da construção civil, devido ser requisitado na grande maioria das edificações, independente de alguns fatores como investimento, modelo de construção e local. Apesar disso, para a sua fabricação é preciso realizar a etapa de cozimento em fornos nas olarias, necessitando assim da queima de uma elevada quantidade de lenha para combustão, provocando poluição ambiental e grande consumo energético (AGRAFIOTIS & TSOUTSOS, 2001).

Recentemente, o tijolo solo-cimento surge como alternativa com grande potencial e relevância, como meio de reduzir o alto consumo energético derivado do processo produtivo, além da redução da poluição ambiental (TORGAL & JALALI, 2011). De acordo com a NBR 8491 (item 3.1), de dezembro de 2012, por definição:

Tijolo de solo-cimento componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compacta e endurecida de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos e/ou pigmentos em proporções que permitam atender aos requisitos desta Norma, cuja altura (H) seja menor que sua largura (L), pode ser maciço ou vazado (ABNT, 2012:01a)

Segundo Prompt (2008) o tijolo solo-cimento ou tijolo ecológico, é definido como o produto da prensagem de três matérias primas básicas, solo, cimento e água. Após a homogeneização destas matérias primas, o material é compactado com o auxílio de uma prensa (manual ou automática), para posterior etapa de cura. A partir disso, o tijolo ecológico ganha resistência mecânica e durabilidade para que possa resistir às cargas a serem solicitadas. A fim de conferir melhores propriedades mecânicas ao tijolo solo-cimento, também tem sido acrescentado em sua composição materiais alternativos, como resíduos sólidos (ANITECO, 2018).

Pesquisadores vêm estudando a incorporação de resíduos em tijolos de solo-cimento.

Xiao *et al.*, (2021) estudaram sobre a reutilização de entulho de construção em tijolos de solo-cimento. Barros *et al.*, (2020) avaliaram a produção de tijolos ecológicos a partir de resíduos de rochas ornamentais e resina de poliéster. Vilela *et al.*, (2020) investigaram as propriedades tecnológicas de tijolos de solo-cimento produzidos com resíduos de mineração de minério de ferro. Ashour *et al.*, (2015) estudaram sobre a condutividade térmica de tijolos de terra não queimados reforçados com resíduos agrícolas com cimento e gesso. Siqueira e Holanda (2013) pesquisaram o reaproveitamento de resíduos de grês para a produção de tijolos de solo-cimento. Eko *et al.* ., (2012) examinaram o potencial de fibras de aço recuperadas para reforço de blocos de terra não queimados.

Segundo Souza *et al.*, (2007), o solo representa a maior porcentagem na proporção dentro da matriz do tijolo ecológico, enquanto que o cimento é aplicado em uma menor quantidade, tendo este o objetivo de estabilizar o solo, e estabelecer o fenômeno químico que permitirá que o mesmo torne-se mais resistente que somente o material primitivo (FERREIRA & OLIVEIRA, 2007; ALBUQUERQUE *et al.* 2008). Alguns pontos importantes podem influenciar as propriedades dos tijolos solo-cimento, tais como, teor de umidade, compactação e homogeneização da mistura, tipo e teor de cimento, tipo de solo e processo de cura do tijolo (CAMPOS; NASCIMENTO JUNIOR; BRITO, 2019).

O tijolo solo-cimento utiliza menos de 10% da energia exigida para confeccionar tijolos de argila queimada (MASKELL, HEATH E WALKER, 2016) e não requer o processo de queima, necessitando somente da secagem natural. Portanto, não se faz o uso de combustíveis para queima no decorrer de sua fabricação, e conseqüentemente não se tem a emissão de CO₂ na atmosfera, evitando assim o agravamento dos problemas causados pelo efeito estufa (PROMPT, 2008; NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Outro fator importante sobre o tijolo solo-cimento é a redução da necessidade de transporte dos tijolos para o local da obra, tendo em vista que os mesmos podem ser

fabricados com o solo presente do próprio canteiro de obras (TORGAL & JALALI, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2021). Sendo assim, o tijolo solo-cimento já é considerado uma realidade de baixo custo dentro das construções, destacando-se como uma alternativa para o desenvolvimento sustentável (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Além de suas características ecológicas, os tijolos de solo-cimento trazem outros benefícios como uma produção muito simples e boa resistência ao fogo (JAYASINGHE; MALLAWAARACHCH, 2009; MUNTOHAROS, 2011). Por conta de seu formato, possui um sistema de montagem simples e de forma geral não é necessário realizar altos investimentos para a contratação de trabalhadores qualificados (KONGKAJUN *et al.*, 2020). Por exibirem bom acabamento, é possível fazer o uso de tijolos de solo-cimento sem realizar posteriores acabamentos superficiais (PROMPT, 2008).

3.1.1 COMPONENTES DO TIJOLO SOLO-CIMENTO

3.1.1.1 Solo

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018) descreve solo como o conglomerado de corpos naturais que se encontram nos estados solo sólido, líquido e gasoso, possuindo estruturas tridimensionais, composto por minerais e elementos orgânicos, encontrados na área superficial do globo terrestre. Caputo (2015) corrobora definindo solo como sendo a soma de todo o material presente na superfície terrestre proveniente da fragmentação mecânica e da decomposição química do material rochoso através da ação do intemperismo, possuindo em sua estrutura um sistema ternário composto por partículas minerais agregadas, ar e água.

De acordo com Grande (2003), para a obtenção de um produto de solo-cimento com padrões desejáveis de qualidade é importante realizar a investigação do solo que irá ser

aplicado na mistura. O solo, portanto, necessita possuir características que confira alta resistência à compressão ao material, bem como, deter valores mínimos de contração durante a secagem. Esses fatores estão intimamente relacionados a uma proporção equilibrada de areia, silte e argila dentro do solo.

Os solos que não possuem uniformidade em sua distribuição granulométrica são os mais apropriados, pois exige menor teor de estabilizante, além de favorecer o preenchimento dos espaços existentes com as partículas menores de solo, e nesta situação, os produtos gerados pelas reações solo-cimento, atuam de forma integral na ligação entre os grãos, interferindo assim na resistência final do produto (SOUSA & BARBOSA, 2000).

Para realizar as devidas análises no solo, além das características granulométricas devem ser levadas em consideração aspectos relacionados ao comportamento do solo em contato com a água, este por sua vez denominado de limites de Atterberg. Na tabela 1 é descrito os padrões granulométricos e dos limites de Atterberg descritos pela ABNT NBR 10833/2013 para a fabricação dos tijolos solo-cimento.

Tabela 1. Critérios para a seleção de solos apropriados.

CARACTERÍSTICA	REQUISITO
% passando na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4)	100
% passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200)	10 a 50
Limite de Liquidez (%)	≤ 45
Limite de Plasticidade (%)	≤ 18

Fonte: Adaptada de NBR 10833 (ABNT, 2013).

Visto que a fração fina implica em mudanças no comportamento das partículas (Tabela 1) de solo quando em contato com a água, os limites de Atterberg devem ser considerados para demonstrar a consistência de solos. Deste modo, adotam-se quatro estados fundamentais de solo: sólido, semi-sólido, plástico e líquido, conforme o teor de umidade

existente no material (DAS, 2010). A partir de ensaios normatizado pela ABNT NBR 6459 (2016) e ABNT 7180 (2016), é possível determinar respectivamente, o limite de liquidez e o limite de plasticidade de solos. Conforme a Tabela 1, o limite de liquidez e limite de plasticidade do solo aplicado à produção do tijolo solo-cimento, deve ser menor que 45% e 18%, respectivamente.

Os solos mais apropriados para a produção de tijolo solo-cimento são aqueles que em sua composição possuem um teor entre 45% e 50% de areia. Caso haja a indisponibilidade deste solo dentro das especificações desejadas, pode-se acrescentar outros tipos de solos e/ou areia buscando deixá-lo dentro dos limites técnicos e econômicos (SOUZA *et al.*, 2008).

Ferreira *et al.*, (2008) afirmaram que a maior parte dos solos pode ser estabilizada com cimento e conseqüentemente pode ser aplicado na fabricação de solo-cimento, entretanto os tipos de solos mais utilizados para esta finalidade são aqueles que precisam de baixos teores de cimento para realizar sua estabilização. Segundo Abdullah (2020) o solo também é considerado como a matéria-prima utilizada na construção, que detém a mais vantajosa relação custo-benefício, desde que este material já esteja disponível no local.

3.1.1.2 Cimento Portland

O Cimento Portland é sem dúvida um dos itens mais usuais dentro do setor da construção civil, sendo caracterizado por ser um material extremamente fino e que contém em sua composição minerais que são adequados para proporcionar propriedades ligantes quando entram em contato com água (MARTINS, 2020). A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (ABCP, 2002) define o cimento Portland como um material em forma de pó bastante fino e que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, alcançando a solidificação sob ação da água.

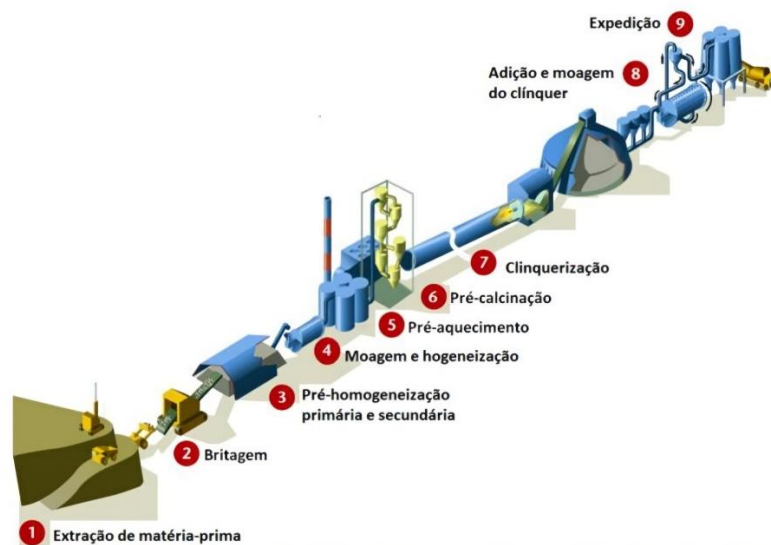
De acordo com Callister (2020), o cimento Portland é classificado como um ligante hidráulico, ou seja, quando esse material entra em contato com água produz-se uma pasta e em seguida, ocorre o endurecimento do mesmo. Isso acontece devido aos processos de hidratação, seja ao ar ou dentro d'água, possuindo potencial de conservar a resistência nos dois cenários ao longo do tempo. De acordo com a NBR 12655 (2012), tem por definição o cimento Portland como:

Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante essa operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a essa mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores indicados nas normas específicas (NBR 12655, ABNT, 2015).

Segundo Mehta & Monteiro (2014), o cimento Portland é composto essencialmente por silicatos de cálcio, sendo importante em seu processo de produção realizar ajustes na porcentagem de cálcio e sílica, a depender da composição destas matérias-primas. Comumente, o cálcio é originado do calcário e a sílica, da argila. O calcário pode apresentar impurezas como quartzo e/ou dolomita. A argila, por outro lado, é rica em alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e álcalis, o que ajuda no desenvolvimento dos produtos da hidratação a temperaturas mais baixas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1997).

A Figura 1 apresenta o esquema representativo do processo de produção presente na fabricação do cimento Portland, em que possui as etapas de extração da matéria-prima, britagem, moagem e homogeneização da mistura crua (calcário e argila), calcinação e por fim a operação de nova moagem (SNIC, 2019).

Figura 1. Etapas da produção do cimento Portland.

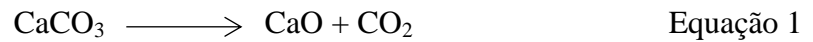


Fonte: ABDI (2012).

Dentre as etapas do processo de fabricação do cimento Portland, a moagem é considerada como principal, pois a matéria-prima em proporções previamente planejadas e adequadas é tratada à temperatura na faixa de 1450 °C, em grandes fornos rotativos. Assim, ocorre a sinterização e fundição do material, produzindo então o clínquer, o qual possui formato de esferas com diâmetros entre 10 e 30 mm. Posteriormente, com o resfriamento do clínquer, uma quantidade de gesso é acrescentada, além de outros materiais, e então, a mistura passa novamente pelo moinho, em que finalmente resultará no produto final ofertado no mercado (NEVILLE, 2015).

Diversas reações químicas acontecem por toda extensão do forno. Cerca de 100 kg a 350 kg de carvão é requerida para produzir-se uma tonelada de clínquer, e essa quantidade pode variar de acordo com o processo. Outro fato, é que no processo de produção do cimento Portland pode-se utilizar outros tipos de combustíveis além do carvão (NEVILLE; BROOKS, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014). A reação que exige a maior demanda de energia é a de descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em torno de 400 kcal a cada quilograma de

clínquer, sendo responsável por 50% de toda energia usada na produção do clínquer (MOIR, 2003). O CO_2 é liberado durante a descarbonatação do CaCO_3 (Equação 1), a qual acontece em temperaturas entre 700 °C e 1000 °C, contendo 80% de calcário na maioria das vezes na mistura.



Quimicamente as características apresentadas pelo clínquer dependerão de quatro aspectos presentes na matéria-prima: sua composição, finura, cozedura no forno e das condições de arrefecimento. A combinação destes fatores implicará nas propriedades do cimento Portland, principalmente as suas características de resistência.

Óxidos como CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 são constituintes presentes na composição química do clínquer, e dificilmente são encontrados em porcentagens adequadas em apenas uma única rocha. Portanto, estes óxidos também são os componentes presentes no cimento Portland (NEVILLE & BROOKS, 2013). Na Tabela 2 são apresentadas as composições do cimento Portland. As abreviaturas adotadas são comumente utilizadas para representar a química do cimento, em que cada óxido constituinte é denominado por uma letra: $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$.

Tabela 2. Compostos do cimento Portland.

Nome do Composto	Composição em óxidos	Nome do mineral	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Alita	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Belita	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferrita	C_4AF

Fonte: NEVILLE; BROOKS, (2013); MOIR, (2003).

O silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S) podem juntos ser considerados

os compostos de maior relevância dentre os constituintes do clínquer, devido serem os compostos encarregados de gerar resistência mecânica à pasta cimentícia. Entre 50% a 70% da massa de clínquer é composta pelo C_3S , agente principal responsável pela resistência ao longo do tempo, em particular ao fim do primeiro mês de cura. Em contra partida, o C_2S , representa entre 10% a 30% do clínquer, sendo importante para a resistência mecânica do cimento após os 28 dias de cura. Já no primeiro dia de cura, um outro agente responsável pela resistência mecânica é o C_3A , sendo considerado o constituinte mais reativo do clínquer. Possui um rápido processo de hidratação, além de ser encarregado pela pega do cimento e por maior liberador de calor de hidratação. O ferro aluminato de tetracálcico (C_4AF) não exerce influência no processo de resistência da pasta de cimento (NEVILLE, 2013). Contudo, atua dando estabilidade química à pasta, equilibrando sua composição (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.1.1.2.1 Hidratação do Cimento

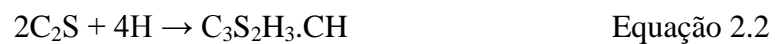
Segundo Itambé (2019), o processo de hidratação do cimento acontece a partir da reação química de silicatos e aluminatos juntamente com a água, formando uma massa estável e resistente. O C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF encontram-se distribuídos respectivamente, entre 45 e 60%, 15 e 30%, 6 e 12%, e 6 e 8% no cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A hidratação dos aluminatos acontece de forma mais rápida que a dos silicatos. Aproximadamente 75% da pasta de cimento é preenchida por silicatos, sendo estes também responsáveis pela resistência, ao mesmo tempo em que, os aluminatos definem o tempo de pega e enrijecimento da massa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No decorrer do processo de hidratação, os grãos de cimento, que inicialmente encontravam-se suspensos, gradativamente começam a se amontoarem, por consequência do processo de floculação. Assim formam um “esqueleto” sólido de cristais fortemente unidos,

sendo encarregado pela estabilidade da pasta em termos estruturais (COUTINHO, 2012). Desta forma, durante o processo, a pasta que anteriormente se encontrava no estado plástico, vai lentamente sendo endurecida e ganhando as propriedades físicas, mecânicas e químicas da pasta endurecida. As reações iniciais, ou seja, com a pasta ainda fresca são marcadas pelo acréscimo repentino da viscosidade e aumento de temperatura (REN, 2017).

A hidratação do C_3S e C_2S em ambos os casos, inicia-se horas após a hidratação do cimento, formando assim, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Este é um composto hidratado microcristalino, e no estado cristalino tem-se o $Ca(OH)_2$ e (CH) (NEVILLE, 2016). O C_3S e o C_2S necessitam de quantidades aproximadas de água para executar o processo de hidratação, porém o C_3S gera duas vezes mais $Ca(OH)_2$, que a hidratação produzida pelo C_2S . Os produtos das reações de hidratação do C_2S e do C_3S são apresentados na equação 2.1 e 2.2:



O C_3A possui dentre outras características a rápida reação com a água, formando uma estável estrutura cristalina. O clínquer recebe em sua composição a gipsita, com o objetivo de minimizar e retardar parcialmente a grande velocidade de reação do C_3A . Nesta reação forma-se o sulfoaluminato de cálcio, etringita (equação 2.3), produzindo-se uma camada pouco permeável na superfície do C_3A , impedindo a rápida hidratação do composto. A etringita possui uma alta instabilidade, convertendo-se em cristais de monossulfoaluminato de cálcio hidratado (equação 2.4). Quando não ocorre o processo de hidratação nas idades iniciais no C_3A existe a possibilidade de formação de aluminatos de cálcio hidratados (equação 2.5), e outra possibilidade é a conversão para fases mais estáveis (equação 2.6). Em condições comuns essa reação acontece dentro de uma faixa de poucos dias. O C_4AF assemelha-se ao

C_3A , com a diferença que possui uma hidratação mais lenta (MOIR, 2003).



As reações presentes na hidratação do cimento Portland são exotérmicas. A quantidade de calor gerado pela reação de hidratação completa a certa temperatura é definida como, calor de hidratação. Cerca da metade do calor de hidratação é emitido entre o primeiro e o terceiro dia, com uma semana, 75% e aos seis meses alcança a marca de aproximadamente 90%. A composição química do cimento exerce influência sobre o calor de hidratação do mesmo, podendo realizar-se também a soma dos calores de hidratação individuais de cada composto como forma comparativa (NEVILLE; BROOKS, 2013).

3.1.1.2.2 Tipos de Cimento Portland

As diversas espécies de cimento produzidos se diferem pelos tipos e variadas porcentagens de adições em sua composição. Escórias de alto-forno, materiais pozolânicos ou materiais carbonáticos, são exemplos de matérias-primas que podem ser agregados ao clínquer na fase de moagem (ABCP, 2002).

Os diferentes tipos de cimento possuem normas específicas determinadas pela ABNT, as quais devem ser adotadas pelos produtores de cimento no Brasil, visto que para a sua comercialização, deve se respeitar as características e propriedades mínimas, além do emprego de ensaios para certificar o cumprimento das normas. A classificação por nível de resistência mínima do cimento Portland, aos 28 dias de idade (tempo de cura), se divide em 25 MPa, 32MPa, 40 MPa (ABCP, 2002). A Tabela 3 mostra os principais tipos de cimento em

termos de classificação e composição de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018).

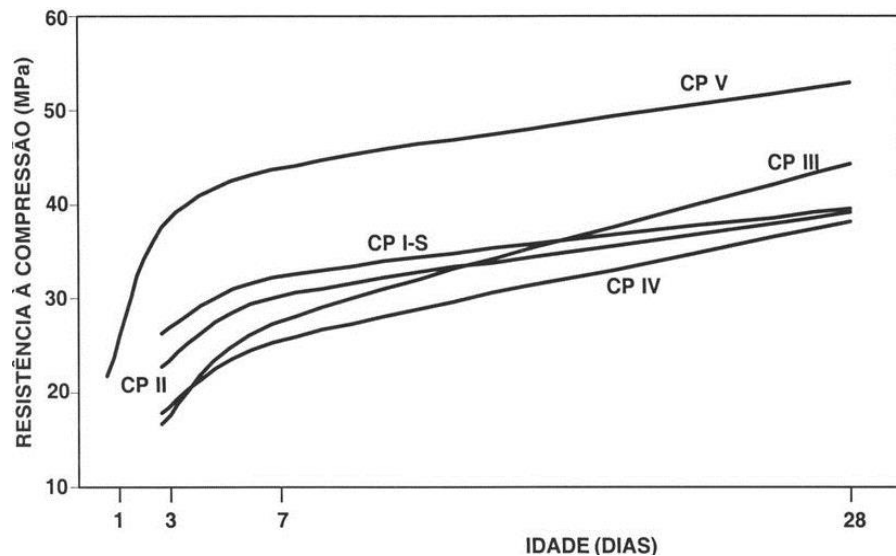
Tabela 3. Tipos de cimento Portland e composições.

Tipo	Sigla	Clinker + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada de alto-forno (%)	Material pozolânico (%)	Material carbonático (%)
	CP I	95 – 100		0 – 5	
Comum	CP I-S	90 – 94	0	0	6 – 10
	CP II-E	51– 94	6– 34	0	0 – 15
Composto	CP II-Z	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
	CP II-F	75 – 89	0	0	11 – 25
Alto-Forno	CP III	25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Pozolânico	CP IV	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Alta resistência inicial	CP V	90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland	CPB	75 – 100	-	-	0 – 25
Branco		50 – 74	-	-	26 – 50

Fonte: Adaptado da NBR 166997 (ABNT, 2018).

A depender da disponibilidade e aplicação final, então é definido, qual tipo de cimento será utilizado, a fim de atender tal demanda e assim atingir as propriedades requeridas (ABCP, 2002). Para a confecção de tijolos solo-cimento, pode ser utilizado qualquer um dos tipos de cimentos classificados pela NBR 166997 (ABNT, 2018). A Figura 2 é apresentada de maneira comparativa à evolução média da resistência mecânica em função da idade de cura para as variadas classes de cimento Portland.

Figura 2. Evolução da resistência dos principais tipos de cimento.



Fonte: (ABCP, 2002).

3.1.1.2.3 A produção do cimento Portland e o meio ambiente

Nos últimos anos a construção civil tem aumentado sua demanda e por consequência, o cimento, um de suas principais matérias-primas, consolidou-se como o material mais produzido e consumido mundialmente (AL-KUTTI, ISLAM e NASIR, 2019). A produção de cimento em nível global alcançou números na casa de 4 bilhões de toneladas no ano de 2020 (GARSIDE, 2020).

O processo de fabricação do cimento Portland, entretanto, resulta em grandes volumes de resíduos, provenientes da extração e das etapas de beneficiamento. Na etapa de fabricação, em particular durante a calcinação, quando são requeridas altas temperaturas, produz-se aproximadamente 7% do total das emissões de CO₂ do planeta (SATHONSAOWAPHAK, CHINDAPRASIRT, PIMRAKSA, 2009; WBCSD, 2009; THOMAS, 2018).

De acordo com Cobîrzan *et al.*, (2015), a produção de cimento não implica somente no alto consumo de energia a altas temperaturas (aproximadamente 1500 °C), mas também no

resultante aumento da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Além disto, medidas pontuais estão sendo realizadas visando minimizar os custos de produção, melhorando desta forma, a lucratividade, acessibilidade e tornando o material mais acessível ao público (SUHENDRO, 2014; OLUTOGE e OLADUNMOYE, 2017; GANA, ATOYEBI e ICHAGBA, 2020).

A emissão de gases poluentes no Brasil por tonelada de cimento fabricada fica próxima de 610 kg, número abaixo da média de outros países, como a Espanha (698 kg / tonelada), Inglaterra (839 kg / tonelada) e China (848 kg / tonelada) (ALBUQUERQUE e LIMA, 2014). Apesar destas nações emitirem uma maior quantidade de dióxido de carbono que o Brasil, sua média apresenta resultados inferiores a média mundial de 866 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzida (WBCSD, 2009).

Os resultados positivos conseguidos pelo Brasil é, sobretudo devido as adições minerais aplicadas ao cimento Portland. Desta forma, a pesquisa e a avaliação da atividade pozolânica dos materiais se faz importante no contexto atual em que se buscam cimentos mais sustentáveis (ASHA, SALMAN e KUMAR, 2014). Ademais, a demanda por materiais de construções com preços mais acessíveis precisa ser considerada, ainda mais em países em desenvolvimento, onde a carência por habitações é um grave problema social, e os custos econômicos dos materiais de construção ficam por volta de 66% do custo total em uma obra (ADESANYA e RAHEEM, 2009).

Pesquisas têm sido realizadas com materiais aglutinantes alternativos, como é o caso das pozolanas, também conhecidos como materiais cimentícios suplementares, para realizar a substituição parcial do cimento Portland como ligante (BHATTACHARJEE, KUMAR, GOYAL, 2008; MURTHI e SIVAKUMAR, 2008; MATOS e COUTINHO, 2016). Já existe uma longa lista desses materiais, como: cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno granulada moída, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar (MORAES *et*

al., 2019). Diversas vantagens podem ser observadas como o uso dos materiais cimentícios suplementares, dentre eles a melhoria nas propriedades mecânicas e durabilidade, tendo em vista os efeitos de nucleação e preenchimento (MORAES *et al.*, 2019). As CFB podem ser classificadas como sendo uma pozolana, e também pode ser considerada como uma pozolana agroindustrial (HASSAN *et al.*, 2014, MOHAMMED, 2017; RODIER *et al.*, 2019; MORAES *et al.*, 2019).

3.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS

As adições minerais podem ser compreendidas como materiais extremamente finos acrescidos ao cimento. Diversos resíduos industriais são utilizados como adições minerais, devido a questões econômicas e ambientais (MEHTA; MONTEIRO, 2014) tais como: rocha fina granítica (SANTOS *et al.*, 2022), resíduos de construção civil (COSTA & RIBEIRO, 2020), cinzas volantes (EL FAMI *et al.*, 2021), resíduos de polpa de papel e celulose (BURUBERRI *et al.*, 2015, SIMÃO *et al.*, 2017), escória de alto forno (GAO *et al.*, 2021; IACOBESCU *et al.*, 2016), resíduos cerâmicos (PUERTAS, 2010), mármore (LIN *et al.*, 2017) e fibrocimento (TOMASSETTI *et al.*, 2020). Estes podem atuar de diferentes maneiras, tendo em vista as suas características físico-químicas, finura, tipo e porcentagem da adição na mistura. Logo, promovem mudanças nos comportamentos microestruturais destas pastas cimentícias, e por consequência no comportamento mecânico e na durabilidade das pastas endurecidas (LIMA, 2013).

Dal Molin (2011) corrobora que as adições minerais utilizadas são geralmente resíduos resultantes do processo produtivo de diversos segmentos da indústria, sendo que estes são comumente descartados de forma indevida no meio ambiente, gerando passivos ambientais. O uso dessas adições ao cimento resulta em minimização dos custos de produção já que substituem parcialmente parcelas do clínquer, por materiais com baixo custo

energético.

Dentre os tipos de adições minerais, os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silico-aluminosos e que ao serem finamente divididos, possuem pouca ou quase nenhuma propriedade ligante. Entretanto, ao misturá-los a água, reagem com hidróxido de cálcio, constituindo assim compostos com propriedades aglomerantes (ABNT NBR 12653, 2014).

Dentre os materiais pozolânicos, as pozolonas naturais são aquelas que quando sujeitas a etapas de processamento industrial como britagem, moagem e peneiramento, formam produtos mais reativos, podendo também ser subprodutos provenientes de processos industriais (ABNT NBR 12653, 2014). De acordo com Mehta & Monteiro (2014), os materiais pozolânicos podem ser aplicados em materiais cimentícios como adição mineral e de suplementação. A Tabela 4 apresenta os materiais pozolânicos subdivididos em três classes diferentes segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 4. Classificação dos materiais Pozolânicos.

Classificação	Materiais que obedecem aos requisitos
Classe N	Pozolanas naturais e artificiais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas.
Classe C	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas
Classe E	Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Os materiais para serem classificados e definidos como materiais pozolânicos, devem atender há alguns critérios físicos e químicos. Tais parâmetros são expressos na NBR 12653 (ABNT, 2014) para que cada material seja enquadrado na devida categoria. A Tabela 5 apresenta as porcentagens da composição química para que determinado material seja classificado como pozolânico.

Tabela 5. Composição química dos materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Os materiais pozolânicos possuem como constituintes principais ativos a sílica e a alumina (Al_2O_3) estando na forma amorfa (CORDEIRO, 2006). Na maior parte dos casos, a reação pozolânica acontece quando as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio a partir da hidratação do cimento, produzindo produtos resistentes, como por exemplo, o C-S-H, o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e/ou o silico-aluminato de cálcio hidratado (S-A-C-H) (TASHIMA, 2006).

Tashima (2006) e Hewlett (2008) corroboram afirmando que na reação entre o material pozolânico e o hidróxido de cálcio devem incluir além da alta concentração de SiO_2 ou $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ na composição do material, alto grau de finura e ser predominantemente amorfo, formando assim materiais resistentes.

De acordo com Mehta & Monteiro (2014), a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é acompanhada por três eventos principais. Primeiramente, acontece um atraso na reação, ocorrendo também o atraso na taxa de liberação de calor e no ganho de resistência. Posteriormente ocorre o consumo do hidróxido de cálcio, gerando melhorias na durabilidade da pasta em ambientes severos. E por fim, os produtos da reação realizam o trabalho de preenchimento dos espaços capilares, trazendo como resultado o aumento da resistência e impermeabilidade do sistema.

Além dos benefícios trazidos pela reação química, o material pozolânico também contribui com um efeito físico nas misturas com o cimento Portland. As propriedades físicas para inclusão na classe de materiais pozolânicos são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Propriedades físicas dos materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μ m	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014).

O efeito de micro preenchimento (fíler) tende a contribuir para o aumento da densidade da mistura, fechando os vazios com as pequenas partículas do material pozolânico, que na maioria das vezes possui maior grau de finura se comparado ao cimento. A estrutura dos poros e os produtos de hidratação do cimento Portland são refinados, em decorrência do preenchimento dos vazios durante a hidratação, realizados pelos pequenos cristais (DAL MOLIN, 2011).

3.3 CINZAS DA FOLHA DE BAMBU

Os bambus são plantas que fazem parte da família *Poaceae* (subfamília *Bambusoideae*) (SORENG *et al.*, 2015), os quais desenvolvem-se (em sua maioria) em temperaturas entre 8 °C e 36°C. Estando dispostos naturalmente por todos os continentes (exceção do continente europeu) existem aproximadamente 31,5 milhões de hectares de florestas de bambu (GUARNETTI, 2013), tendo uma maior concentração na China, Índia e Brasil (CHEN *et al.*, 2018 , LIU *et al.*, 2016 , YE *et al.* , 2020 , LI *et al.*, 2020).

O bambu é reconhecido como sendo uma das alternativas mais adequadas para reduzir a concentração de CO₂ na atmosfera e por consequência minimizar as mudanças climáticas

(YADAV e MATHUR, 2021). Além disso, essa planta possui um crescimento muito rápido, com um ciclo de crescimento entre 4-6 anos (SCURLOCK; DAYTON; HAMES, 2000; ZHANG *et al.*, 2021). É um recurso natural com potencial aplicação em diferentes áreas, como por exemplo, na indústria de papel e celulose, vergalhões, confecção de tecidos, compensados, cestos, chapéus, ligantes de solo, alimentos e medicamentos, biomassa, carvão, telhados, pisos entre outros (LI *et al.*, 2014; SAWARKAR *et al.*, 2020).

Segundo Silva *et al.*, (2020), o crescente aumento no uso do bambu pelos diversos setores industriais, traz a possibilidade que os resíduos gerados no processo produtivo conduzam a novos materiais. Um dos subprodutos gerados é uma grande quantidade de folhas de bambu, que muitas vezes são queimadas, gerando a CFB. Logo, esta cinza torna-se fonte de poluição, já que não possui uma adequada finalidade (SCURLOCK; DAYTON; HAMES, 2000; FRÍAS *et al.*, 2012).

Desta forma, estudos vêm sendo desenvolvidos para tornar esse resíduo uma alternativa sustentável como um substituto parcial do cimento para a produção de materiais de construção como, por exemplo, em argamassas e concretos. Villar-Cociña *et al.*, (2011) realizaram um estudo específico de caracterização da CFB, obtido a partir da calcinação das folhas a uma temperatura controlada de 600 °C, em forno elétrico por 2 horas. Os resultados mostraram que a CFB possui uma alta parcela de SiO₂ em sua composição, e uma natureza predominantemente amorfa. Além disto, é possível perceber uma morfologia retangular, e uma alta atividade pozolânica em idades iniciais conseguidas por ensaio de condutividade elétrica.

Frías *et al.*, (2012) realizaram pesquisas sobre as propriedades da CFB, bem como seu desempenho em argamassas. A queima da CFB foi realizada utilizando um forno elétrico a uma temperatura controlada à 600 °C. Neste estudo a CFB também exibiu alto teor de SiO₂, além de estrutura amorfa com traços de calcita, cristobalita e sulfato de cálcio. No ensaio de

atividade pozolânica, a CFB ao ser colocada em uma solução saturada com cal a 40 °C, consumiu metade da cal em somente 6 horas e 90% em 3 dias. Após esse período, alcançou a estabilização, apresentando, portanto, grande reatividade logo no primeiro dia de aplicação, resultado similar a sílica ativa e outras pozolanas altamente reativas. As substituições do cimento Portland por concentrações de 10 e 20% da CFB nas misturas cimentícias como adição mineral, resultaram em permanência de valores de resistência à compressão muito próximos à dosagem de controle a partir da idade de 28 dias.

Roselló *et al.*, (2015) buscaram estabelecer a relação da porcentagem de SiO₂ presente na folha de bambu antes e posteriormente á calcinação, quando já se caracteriza como CFB. Os resultados obtidos mostraram que a folha de bambu é composta por fitólitos (células de sílica) com alta concentração de sílica. A composição química da CFB como consequência desses fatores, obteve como o principal composto, a sílica.

Villar-Cociña *et al.*, (2018) realizaram a avaliação das temperaturas de calcinação e a sua respectiva influência nas propriedades pozolânicas da CFB. A geração das cinzas foi obtida a partir do uso de um forno elétrico em três temperaturas diferentes, 500 °C, 600°C e 700 °C, durante 2 horas, adotando uma taxa de aquecimento de 10 ° C min⁻¹. A avaliação das cinzas foi feita por meio do ensaio de condutividade elétrica, além do uso de modelos matemáticos para a preciação de parâmetros cinéticos. Dentre as temperaturas investigadas, a CFB calcinada a 500 °C exibiu o melhor resultado em termos de reatividade.

Outro estudo realizado por Villar-Cociña *et al.*, (2019) buscou comparar a reatividade da sílica ativa, da pozolana comercial e da CFB, em termos qualitativos e quantitativos. Para tal, baseou-se em ensaio de condutividade elétrica e no uso de modelos matemáticos a fim de precisar parâmetros cinéticos. A sílica ativa mostrou-se como sendo o material mais reativo, entretanto, com pouca diferença em relação à CFB. Já a pozolana comercial não apresentou boa reatividade. Os autores concluíram assim que a CFB é um excelente material pozolânico,

semelhante à sílica ativa. A CFB utilizada nesta pesquisa foi calcinada em um forno elétrico, inicialmente a 400 °C/1 hora e posteriormente durante 600 °C por mais 1 hora.

Portanto, é possível observar que as CFB tendem a melhorar o desempenho físico e mecânico dos produtos construtivos citados, uma vez incorporados em suas composições. Contudo, a produção de artigos/patentes até o presente momento, sobre a substituição parcial das CFB em tijolos solo-cimento, tem sido pouca reportado. Isto foi confirmado pela busca de anterioridades (Tabela 7) em banco de dados de patentes (internacionais e nacional) e periódicos, realizadas em fevereiro de 2022.

Tabela 7. Buscas de anterioridades.

Palavras-chave	Bases de Artigos Científicos			Bases de Patentes		
	<i>Web of Science</i>	<i>Scopus</i>	<i>Scielo</i>	WIPO	USPTO	INPI
<i>Ash</i>	133.378	165.353	3.049	160.371	4931	588
<i>Ash and Leaf</i>	4.136	5.486	185	1.809	5	6
<i>Ash and Leaf and Bamboo</i>	114	142	2	128	1	0
<i>Ash and Leaf and Bamboo and Brick</i>	1	1	0	1	0	0
<i>Ash and Leaf and Bamboo and Brick and Soil-Cement</i>	0	0	0	0	0	0

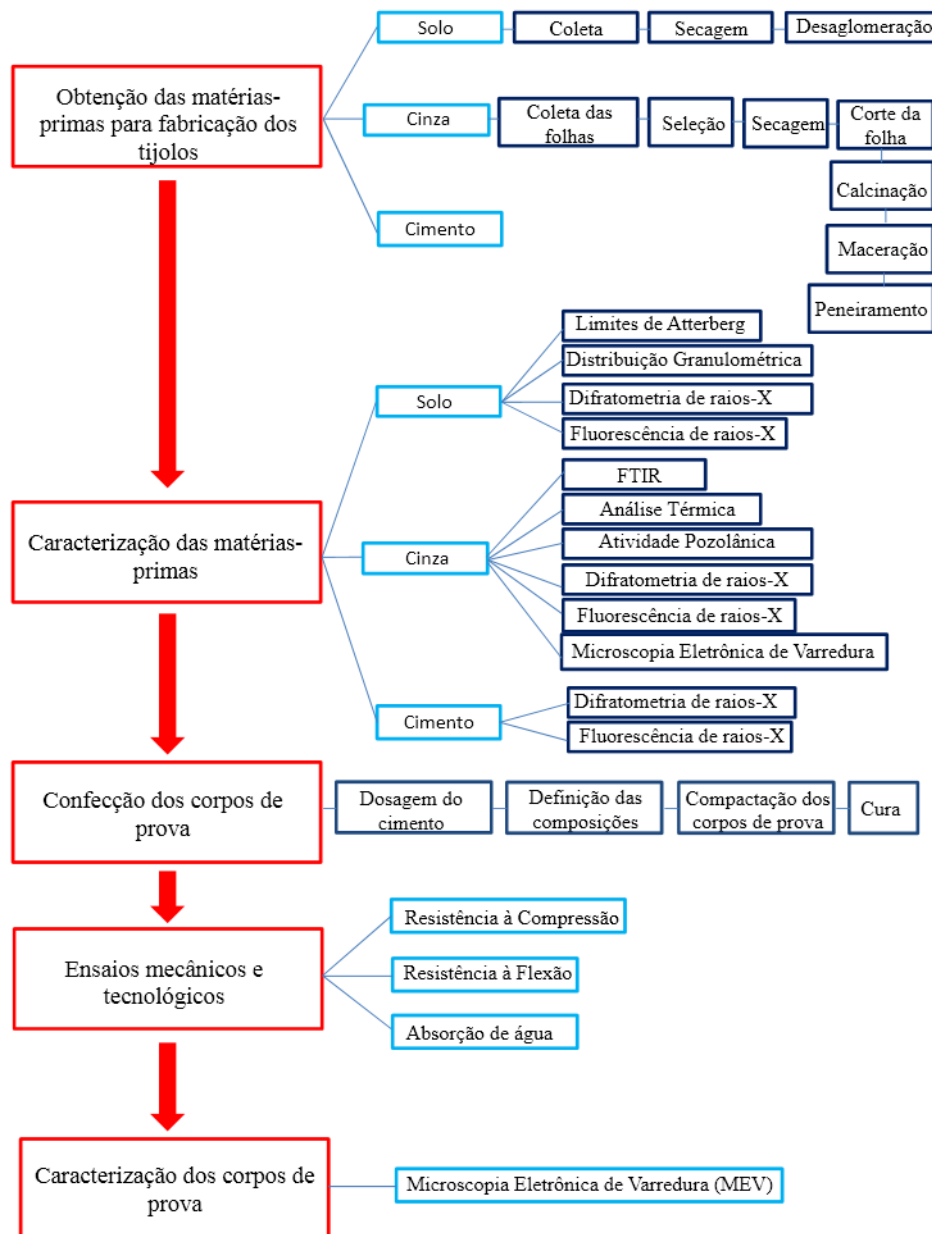
Fonte: Próprio autor.

As CFB podem ser uma importante fonte de matéria-prima natural abundante para ser aplicada aos tijolos solo-cimento, podendo agregar valor a este produto, amenizar os impactos ambientais, bem como contribuir para o desenvolvimento econômico e regional.

4 PARTE EXPERIMENTAL

As etapas metodológicas empregadas no processamento dos corpos de provas dos tijolos de solo-cimento com substituição parcial do cimento por CFB estão demonstradas na Figura 3.

Figura 3. Esquematização resumida das etapas desenvolvidas.



Fonte: Próprio autor (2021).

4.1 MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas utilizadas nesta pesquisa foram: Solo, Cinzas da Folha de Bambu, Cimento e Água.

4.1.1 SOLO

O solo foi extraído de uma jazida localizada na zona rural, na cidade de Codó, no estado do Maranhão (Latitude - 4° 42' 85* S, Longitude - 43° 88' 54*O).

4.1.2 CINZAS DA FOLHA DE BAMBU

As cinzas foram geradas a partir da queima de folhas de bambu, as quais foram coletadas no Viveiro de Mudas da Prefeitura de Teresina (Latitude - 5° 06' 16* S, Longitude - 42° 80' 49*O), local em que possui bambus adultos em uma área reservada. As folhas recolhidas foram aquelas que já estavam dispostas no solo, ou seja, já tinham caído dos galhos do bambu e estavam secas.

4.1.3 CIMENTO

Para realizar a estabilização do solo utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V), com classe de resistência ARI, designado como CP V-ARI. O mesmo é frequentemente empregado para a produção de tijolos solo-cimento (VILELA *et al.*, 2020; NASCIEMNTO *et al.*, 2019), e atende as especificações contidas na NBR 16697 (ABNT, 2018) descritas na Tabela 8.

Tabela 8. Especificações do cimento Portland CP V-ARI.

Propriedades		Limites NBR 16697:2018
Finura (%)	Material retido na peneira 75 μ m	$\leq 6,0$
Limites de composição (%)	Clínquer + sulfatos de cálcio	90-100
	Material carbonático	0-10
Tempo de pega (min)	Início	≥ 60
	Fim	≤ 600
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	$\geq 14,0$
	3 dias	≥ 24
	7 dias	≥ 34
	28 dias	-
Composição química (%)	Resíduo insolúvel (RI)	$\leq 3,5$
	Perda ao fogo (PF)	$\leq 6,5$
	Óxido de ferro	$\leq 6,5$
	Trióxido de enxofre (SO ₃)	$\leq 4,5$

Fonte: Adaptado ABNT NBR 16697, 2018.

4.1.4 ÁGUA

A água utilizada nesta pesquisa para elaboração dos corpos de provas e demais ensaios foi a mesma fornecida pelo serviço de abastecimento domiciliar pela Concessionária Águas de Teresina, localizada no município de Teresina no estado Piauí.

4.2 PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.2.1 SOLO

Após a extração do solo, armazenou-se em um local aberto para secagem natural. Posteriormente foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas com o objetivo de eliminar qualquer presença de umidade.

Na sequência, o material foi submetido ao processo de peneiramento em malha de nº 60 (abertura de 0,25 mm). Esta etapa foi realizada para garantir a desaglomeração do solo,

permitindo desta forma, que sua granulometria esteja em concordância com a NBR 10833:2012 para a produção dos corpos de provas.

4.2.2 CINZAS DA FOLHA DE BAMBU

Inicialmente, após a coleta das folhas de bambu, foi realizada a etapa de remoção de possíveis folhas diferentes das de bambu. Em seguida, foram conduzidas para uma secagem natural em um local aberto, que teve a finalidade de remover possível umidade presente. Após secagem, as mesmas foram cortadas, em pedaços menores, otimizando o espaço a ser usado dentro do cadinho bem como para que houvesse uma queima mais uniforme. O processo de calcinação foi realizado em um forno mufla (modelo 3P-S 3000) localizado no laboratório da Pós-graduação em Química da Universidade Federal do Piauí -UFPI. Então as folhas foram calcinadas a 600 °C durante 2 horas a uma taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹. Esta etapa se repetiu diversas vezes, para obter-se a quantidade de matéria prima suficiente para as caracterizações e confecção dos corpos de prova. Após o resfriamento, as CFB obtidas foram desaglomeradas e passadas em malha de n° 500 (abertura de 0,025 mm), para garantir padrão granulométrico de suas partículas, assim como boa finura do material, a escolha dessa peneira se deu a partir da disponibilidade da malha e finura inferior à exigida pela norma. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), um material para ser considerado como pozolânico deve atender a critérios físicos de granulometria, em que somente 20% deste material deve ser retido na peneira de abertura igual a 0,045 mm. Portanto, as CFB obtidas atendem aos requisitos estabelecidos pela norma, visto que apresentam uma finura superior (aproximadamente 2 vezes maior). Um resumo deste procedimento experimental é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Etapas na produção das cinzas de folha de bambu (CFB).



Fonte: Autoria própria (2021).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas foram submetidas a diversas caracterizações buscando analisar suas composições químicas, características físicas, comportamentos térmicos, condições mineralógicas e microestruturais, além do potencial pozolânico. Nesta seção as caracterizações foram subdivididas por materiais que possuam caracterizações específicas e caracterizações adotadas para mais de uma matéria-prima.

4.3.1 CARACTERIZAÇÕES DO SOLO

4.3.1.1 Limites de Atterberg

O solo foi caracterizado de acordo com a norma NBR 6459 – Solo: Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 2016); NBR 7180 – Solo: Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI.

4.3.1.2 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica do solo foi realizada de acordo com as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2016). Utilizou-se 100 g de solo para realizar o presente ensaio. Tal ensaio também foi realizado no IFPI (Laboratório de Materiais Cerâmicos) utilizando o conjunto de peneiras descritas na Tabela 9.

Tabela 9. Conjunto de peneiras adotado.

Peneiras	Abertura de malha (mm)
4	4,75
10	2,0
16	1,18
30	0,6
40	0,425
50	0,3
100	0,15
200	0,075
Fundo	0

Fonte: ABNT NBR 7181 (2016).

4.3.2 CARACTERIZAÇÕES DAS CINZAS DA FOLHA DE BAMBU (CFB)

4.3.2.1 Análise Térmica

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada nas folhas de bambu, buscando verificar a perda de massa da amostra, transformações físicas e químicas em função de uma dada temperatura, até que as mesmas chegassem ao estado de cinza, sendo este o real estado de aplicação deste material. Utilizou-se um equipamento modelo DTG-60 da marca Shimadzu. A amostra foi então analisada com o auxílio de um cadinho de alumina, utilizando atmosfera de nitrogênio, com um fluxo de gás de 50 mL min^{-1} , a uma taxa de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ e faixa de temperatura entre 20 a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.3.2.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR

As análises foram realizadas no Espectrômetro FTIR Perkin Elmer, spectrum 100 com a leitura de 400 a 4000 cm^{-1} , sendo feitas 16 varreduras. O equipamento contava com uma resolução de 4 cm^{-1} . As análises foram realizadas no Laboratório de Biodiesel e Materiais – LBM da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

4.3.2.3 Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica das CFB foi verificada a partir da variação da condutividade elétrica, definida pelo método de Lúxan *et al.* (1989). Para este ensaio, além das cinzas, foram utilizados o Ca(OH)_2 e água destilada. Assim sendo, 98,7 mg de Ca(OH)_2 foi adicionado a um béquer com 70 g de água destilada previamente aquecida a temperatura de $40,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ em banho de areia. Manteve-se a solução em agitação por 20 minutos e após sua estabilização foi acrescida 1,75 g da cinza. Com o auxílio de um condutivímetro foram realizadas leituras de condutividade durante 20 minutos com intervalos de 1 minuto entre cada medição. A atividade pozolânica foi determinada a partir da variação da condutividade aos 2 minutos. A Figura 5 mostra o ensaio sendo realizado no Laboratório da Pós-Graduação em Química da UFPI.

Figura 5 - Ensaio de condutividade elétrica pelo método de Lúxan *et al.* (1989).



Fonte: Autoria própria (2021)

Na Tabela 10 são apresentados os valores de variação de condutividade (ΔC) e suas respectivas classificações. O material é considerado não pozolânico quando apresenta valores inferiores a $0,4 \text{ mS cm}^{-1}$. Quando o material apresenta variação de condutividade maior que $0,4 \text{ mS cm}^{-1}$ e menor que $1,2 \text{ mS cm}^{-1}$ é classificado como tendo pozolanicidade moderada, enquanto valores maiores que $1,2 \text{ mS cm}^{-1}$ revela que o material é altamente pozolânico.

Tabela 10. Classificação pozolanicidade do material

Classificação do Material	Variação da condutividade (ΔC) mS/cm
Não pozolânico	$\Delta C < 0,4$
Pozolanicidade moderada	$0,4 < \Delta C < 1,2$
Alta pozolanicidade	$\Delta C > 1,2$

Fonte: Lúxan et al. (1989).

4.3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A caracterização morfológica foi realizada com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) por elétrons secundários Mira 3, Tescan, operado a 5 kV. As amostras foram metalizadas em 20 nm de Au. A caracterização foi realizada nas CFB e também em todas as formulações dos corpos de prova passados pelo ensaio de flexão, aos 56

dias de cura. As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

4.4 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS

4.4.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

As análises mineralógicas das matérias-primas (solo, CFB e cimento) foram realizadas por Difratometria de Raios-X (DRX), utilizando o difratômetro da marca Shimadzu modelo XRD-6000, com radiação de $\text{CuK}\alpha$ (1,54 Å), realizando uma varredura na faixa 2θ de 10° a 75° , a uma velocidade de 1° min^{-1} , no Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados (LIMAV) da UFPI. O equipamento foi operado a uma tensão de 40 kV, com corrente de 30 mA.

4.4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

As matérias-primas (solo, cimento e CFB) foram caracterizadas quimicamente pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando o espectrofotômetro Panalytical, modelo Epsilon 3 XL. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais (LabMat), localizado na Pós-graduação em Engenharia dos Materiais (PPGEM) do IFPI.

4.5 PREPARAÇÃO E CONFECÇÃO DE CORPOS DE PROVAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO

4.5.1 DOSAGEM DO CIMENTO

De acordo com o estabelecido pela norma ABNT NBR 8491:2012 (tijolo solo-cimento – requisitos), a dosagem dos componentes (cimento:solo) pode variar de 1:7 a 1:14. Nesta

pesquisa, para a produção dos corpos de provas do tijolo solo-cimento foi adotada a proporção de 1:8 (cimento:solo), e desta forma a quantidade do material cimentício está alinhado com a norma. A Portland Cement Association (PCA) recomenda como norma geral para a fabricação de tijolos solo-cimento, a utilização de pequenas quantidades de cimento misturadas a maiores quantidades de solo (ABCP, 2004).

4.5.2 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

Nesta pesquisa, adotou-se 5 formulações diferentes para a preparação e confecção dos corpos de provas de tijolos solo-cimento. Para todas as formulações manteve-se constante a proporção de solo, ou seja, 8 partes de solo para 1 parte de cimento, ou (88,89% em termos percentuais, alterando-se somente a porcentagem de cimento, o qual foi então substituído em 5%, 10%, 15% e 20% pelas cinzas da folha de bambu. Os tijolos solo-cimento receberam a nomenclatura de CP (corpo de prova) sendo acompanhada por um número referente à porcentagem de substituição das CBF: CP5, CP10, CP15 e CP20. A amostra padrão (sem substituição de cimento por CBF) foi denominada de CP0. A Tabela 11 mostra a proporcionalidade de todas as matérias-primas utilizadas com base em 100 g de composição.

Tabela 11. Composições adotadas para a confecção dos corpos de provas de tijolos solo-cimento.

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

Fonte: Autoria própria (2021)

4.5.3 PREPARAÇÃO DA MISTURA

Primeiramente, todos os materiais empregados para a produção dos corpos de prova foram pesados separadamente com o auxílio de uma balança digital (Figura 6A). Logo, para cada formulação, os materiais (solo, cimento e cinzas) foram adicionados em uma bandeja (Figura 6B) e misturados homogeneamente com o auxílio de uma espátula (Figura 6C). Após estas etapas, foi acrescido à massa 10% de água em relação ao peso da mistura (Figura 6D). Então, realizou-se a homogeneização manual da massa úmida solo-cimentícia, a qual foi passada pela peneira de malha n° 20 (abertura de 0,841 mm).

Figura 6 - Preparação das misturas: (A) Pesagem de cada material, (B) Junção de todos os componentes, (C) Homogeneização dos componentes (massa seca), (D) Umidificação da massa.



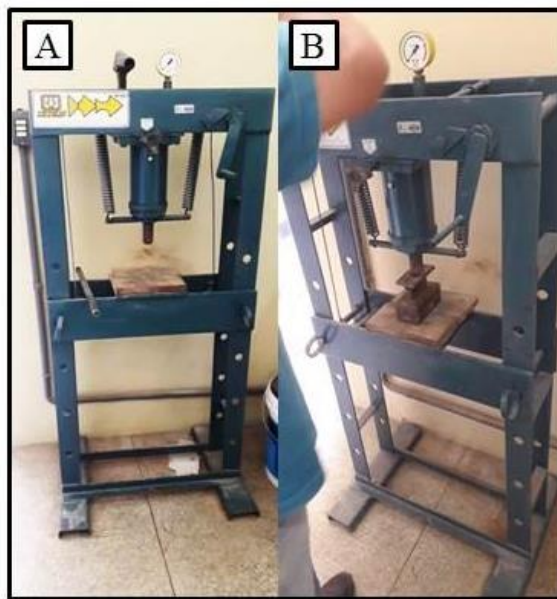
Fonte: Autoria própria (2021)

4.5.4 PRENSAGEM

Os corpos de provas foram conformados via prensagem uniaxial, em uma prensa hidráulica da marca Ribeiro, modelo RP0002 (Figura 7A), com capacidade máxima de

prensagem de 15 toneladas. Para cada corpo de prova, 20 g do material homogeneizado, foi inserido dentro de moldes de matrizes metálicas, com dimensões de 80 mm x 10 mm x 10 mm (comprimento, largura e altura) e posteriormente prensados a uma intensidade média de 4,5 toneladas (50 MPa) (Figura 7B). Para cada formulação foram produzidos 52 corpos de provas, perfazendo um total de 260 unidades.

Figura 7 - Prensa hidráulica (A) Processo de prensagem do corpo de prova (B).



Fonte: Autoria própria (2021)

Após a confecção de todos os corpos de prova, estes foram submetidos a identificações numéricas, além de pesagem e aferição de suas dimensões com o auxílio de uma balança digital e paquímetro, respectivamente, para os futuros ensaios. A Figura 8 mostra o corpo de prova conformado e pronto para o processo de cura.

Figura 8 - Corpo de prova conformado.



Fonte: A autoria própria (2021)

4.5.5 CURA

Neste estudo, foram adotados os tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias para todos os corpos de prova. Os mesmos foram umidificados com água com o auxílio de um borrifador, realizando-se assim a etapa denominada de cura por aspersão manual, duas vezes ao dia, durante uma semana, de acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012).

4.6 CARACTERIZAÇÕES DOS CORPOS DE PROVAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO

4.6.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Seguindo a NBR 8492 (ABNT, 2012), foi realizado o ensaio de absorção de água nos corpos de provas aos 7, 14, 28 e 56 dias de idade. Para realização deste ensaio reservou-se 3 amostras de cada formulação em cada idade de cura, totalizando 60 corpos de prova. Os corpos de provas foram secos em estufa a uma temperatura controlada de 105 °C até atingirem uma massa constante. Após esta etapa, realizou-se a pesagem dos corpos de prova (massa seca - M_2) e então foram imersos em água por um período de 24 horas. Passado este período, os corpos de provas foram retirados da imersão, secos superficialmente e novamente

pesados (massa saturada – M_1). Os valores referentes à absorção de água foram obtidos através da equação (1):

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

A = absorção de água (%);

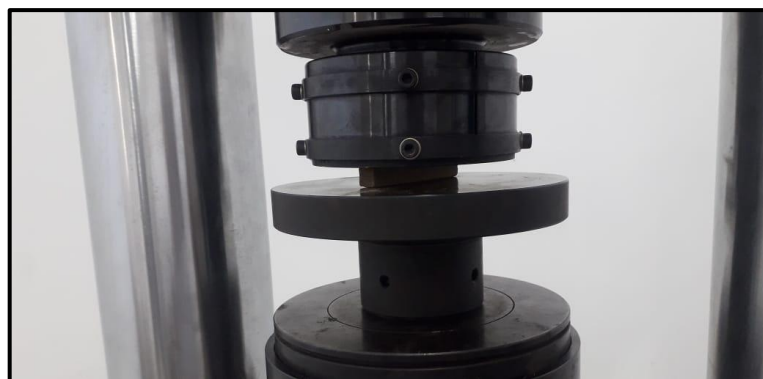
M_1 = massa do corpo de prova saturado (g);

M_2 = massa do corpo de prova seco em estufa (g).

4.6.2 Resistência à Compressão

Um total de 140 corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, sendo utilizados 7 corpos de provas de cada formulação para cada idade/tempo de cura (7, 14, 28 e 56 dias). Utilizou-se uma máquina universal de ensaios mecânicos Emic DL 20000, com célula de carga de 2000 KN e incremento de força de 500 N s⁻¹. As medidas experimentais foram realizadas no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica - UFPI. Na Figura 9 é apresentado o momento em que a amostra foi ensaiada.

Figura 9 - Ensaio de resistência à compressão.

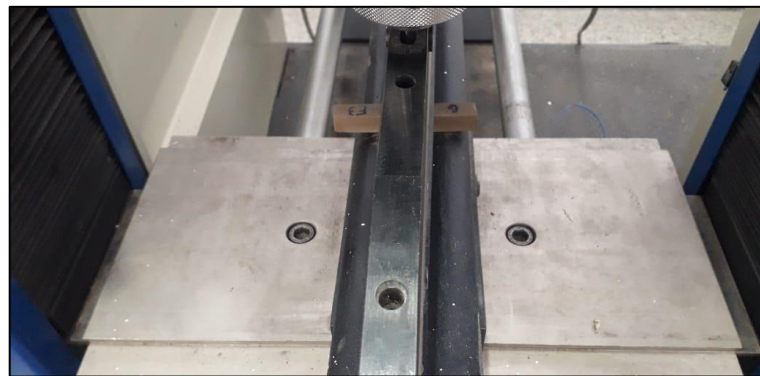


Fonte: Autoria própria (2021)

4.6.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O ensaio de resistência à flexão de três pontos (Figura 10) foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos, do departamento de Engenharia Mecânica/UFPI, utilizando o mesmo equipamento do ensaio de resistência à compressão (ver sessão 4.6.2). Os corpos de prova (um total de 60 unidades) foram rompidos (Figura 10) utilizando os seguintes parâmetros: Célula de carga de 5 kN; Velocidade de deslocamento de $0,5 \text{ mm min}^{-1}$; e Distância entre os apoios do corpo de prova igual a 40 mm (NBR 16613:2017).

Figura 10. Ensaio de resistência à flexão.



Fonte: próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1 SOLO

5.1.1.1 Distribuição granulométrica do solo

A Tabela 12 apresenta os dados granulométricos a partir do ensaio de peneiramento do solo, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016). Para uma melhor visualização e análise

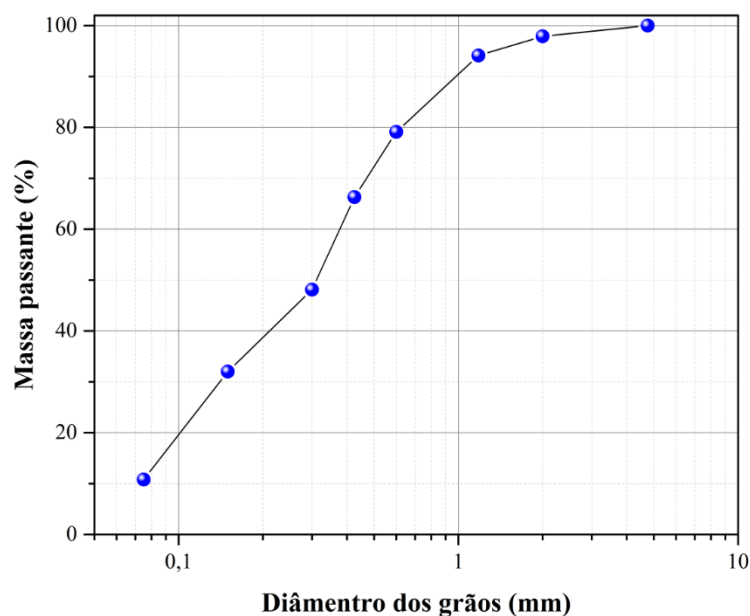
destes dados, uma curva granulométrica em função da massa (%) passante do solo, é ilustrada na Figura 11.

Tabela 12. Distribuição granulométrica do solo.

Peneira (n°)	Abertura (mm)	Material Passante	Material Retido
		Massa (%)	Massa (%)
4	4,75	100	0
10	2,0	97,91	2,09
16	1,18	94,11	3,8
30	0,6	79,11	15
40	0,425	66,31	12,8
50	0,3	48,1	18,21
100	0,15	32,02	16,08
200	0,075	10,8	21,22
Fundo		0	10,8

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 11- Distribuição granulométrica do solo



Fonte: Autoria própria (2021)

A partir da Figura 11, percebeu-se que o solo coletado está em conformidade com o exigido pela NBR 10833 (ABNT, 2012), a qual norteia os requisitos necessários para a produção de tijolos de solo-cimento. Desta forma, 100% do solo utilizado nesta pesquisa apresentou partículas menores que 4,75 mm. Outro aspecto também atendido foi o alcance de 10,8% de partículas de solo com tamanhos abaixo de 0,075 mm, sendo requerido pela norma valores entre 10% e 50%.

5.1.1.2 Limites de Atterberg

Os resultados referentes aos limites de Atterberg ou limites de consistência do solo coletado são apresentados na tabela 13. É possível verificar que o solo, está enquadrado com as recomendações da ABCP, bem como a NBR 10833 (ABNT, 2012). A norma solicita que o solo possua um limite de liquidez abaixo de 45% e 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 13. Limites de Atterberg

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

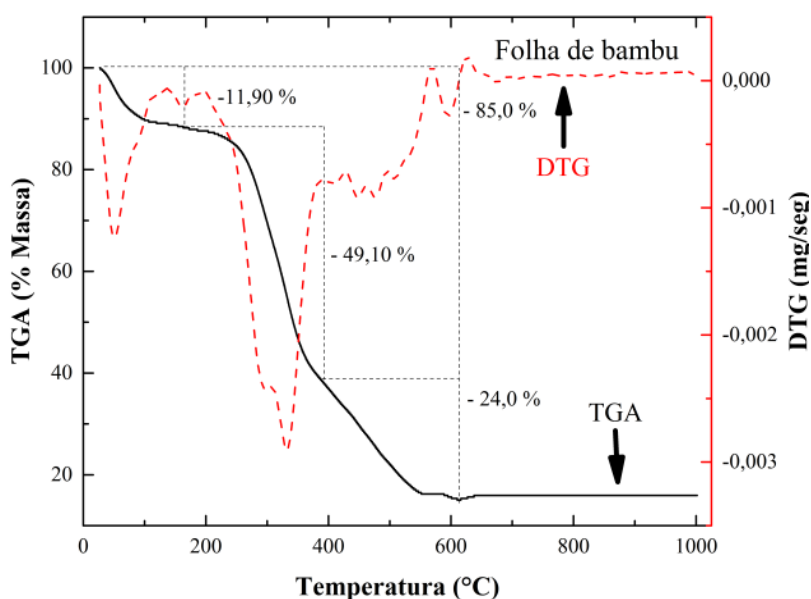
Fonte: Autoria própria (2021)

5.1.2 CARACTERIZAÇÕES DAS CFB

5.1.2.1 Análise Térmica

As curvas termogravimétricas (TGA/DTG) da folha de bambu são apresentadas na Figura 12, com o objetivo principal de avaliar a temperatura ideal para realização da produção do 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 24% da amostra, até os 600 °C, justificada pela decomposição de lignita (GAŠPAROVIČ; KOREŇOVÁ; JELEMENSKÝ, 2010). Desta maneira, adotou-se a temperatura de 600 °C para realizar a calcinação das folhas de bambu, a mesma temperatura também observada nos resultados de TG e adotada para a calcinação das CFB por Cociña *et al.*, (2011, 2018), Umoh e Odesola (2015) e Utodio *et al.*, (2015).

Figura 12 – Curvas TG/ DTG das folhas de bambu (CFB).

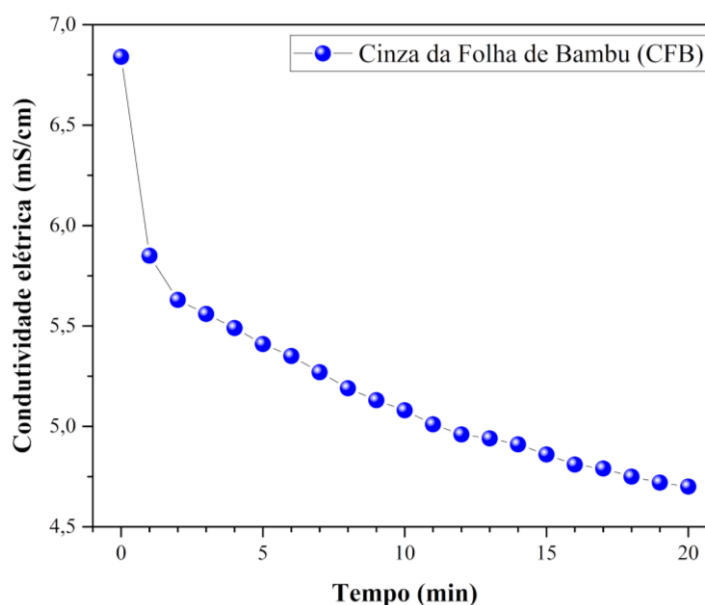


Fonte: Autoria própria (2021)

5.1.2.2 Atividade Pozolânica

A Figura 13 apresenta os dados de condutividade elétrica das CFB obtidos pelo método de Lúxan *et al.*, (1989), sendo observado um decréscimo na curva em um intervalo de tempo de 20 minutos. Este comportamento pode ser atribuído à produção de produtos insolúveis, além da diminuição da concentração de hidróxido de cálcio presente na solução (BASTO; SAVASTANO; NETO, 2019). De acordo com Villar-Cociña *et al.*, (2003) e Morales *et al.*, (2009), 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.

Figura 13 – Condutividade elétrica em função do tempo.



Fonte: Autoria própria (2021)

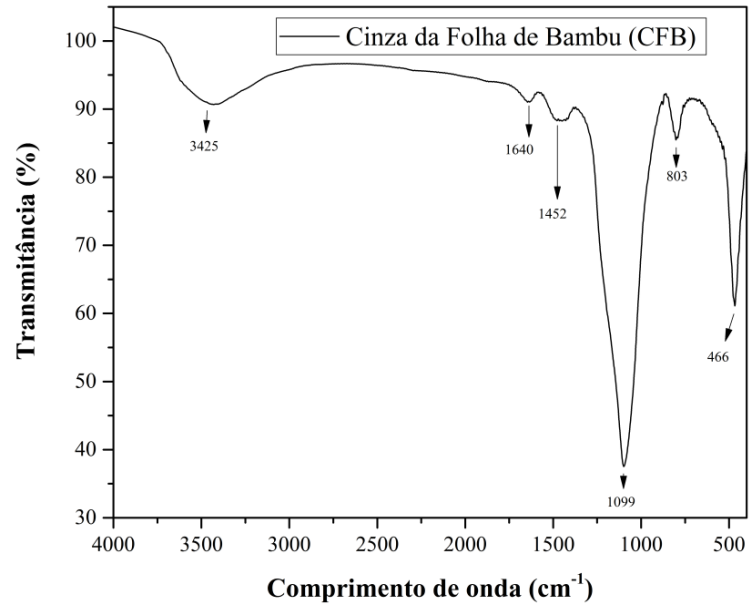
De acordo com proposta por Lúxan *et al.*, (1989), a variação da condutividade elétrica (ΔC) em até 2 minutos é que o possibilita a classificação do nível de pozolana presente no material. Com isto, é possível verificar (Figura 13), que a diminuição da condutividade no segundo minuto foi igual a $1,21 \text{ mS cm}^{-1}$ para a CFB, que a classifica como um material com alta pozolanicidade.

O resultado alcançado é superior a classificação ($\Delta C > 1,2 \text{ mS cm}^{-1}$) estabelecida por Luxán *et al.*, (1989), demonstrando o potencial do material em estudo. De acordo com Villar-Cociña *et al.*, (2011) as CFB, ao serem misturas com o cimento Portland produzem efeitos químicos desejáveis no material, reagindo com o hidróxido de cálcio (produto de reação do cimento), em contato com água, gerando compostos com alta resistência. Nas CFB estudada por Cordeiro *et al.*, (2020), também obtiveram a classificação de material com alta pozolanicidade.

5.1.2.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 14 apresenta o espectro de FTIR das CFB, podendo ser dividido em suas zonas principais de absorção de infravermelho. A primeira zona entre 3600 e 3000 cm^{-1} e a segunda zona em frequências mais baixas, entre 1700 e 500 cm^{-1} (FRÍAS *et al.*, 2012). A banda de absorção de vibração de O-H (3425 cm^{-1}) além da banda de deformação H-O-H (1640 cm^{-1}), confirmaram a presença de água não estruturalmente combinada. A frequência em 1452 cm^{-1} é comumente atribuída à ligação C-O de carbonatos (calcita). Outras duas bandas de Si-O localizadas em 1099 e 469 cm^{-1} podem ser atribuídas respectivamente às vibrações de alongamento (1100 cm^{-1}) e flexão (466 cm^{-1}) no tetraedro SiO_4 , que são provenientes da presença de traços de fases mineralógicas cristalinas, como a de quartzo e principalmente, de sílica amorfa, presente na CFB (PALANIVEL & VELRAJ, 2007; WANG *et al.*, 2013). Por consequência a banda em 803 cm^{-1} pode ser justificada principalmente pela presença de sílica amorfa (MARTÍNEZ *et al.*, 2006).

Figura 14 – FTIR das cinzas da folha de bambu (CFB).

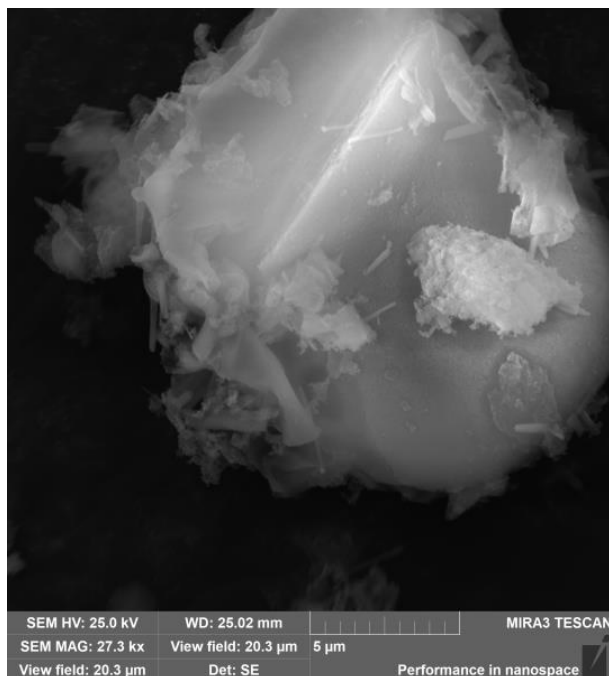


Fonte: Autoria própria (2021)

5.1.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 15 apresenta as características morfológicas das CFB a partir da observação por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). É possível então, observar que a mesma apresenta uma morfologia em sua maior parte regular e rugosa com a presença de fitólitos (células de sílica). Villar-Cociña *et al.*, também observaram em sua pesquisa, as mesmas características regulares para a CFB.

Figura 15 – Morfologia da partícula de cinzas da folha de bambu (CFB).



Fonte: A autoria própria (2022).

Roselló et *al.*, (2015) também verificaram a presença de fitólitos em CFB calcinadas, relacionando-as com o alto teor de sílica da cinza. Portanto, o alto teor de sílica da CFB apresentado pelos ensaios de FRX podem ser relacionados com os fitólitos observados no ensaio de MEV.

5.2 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS

5.2.1 ANÁLISE QUÍMICA - FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Os resultados da análise química para o solo, CFB e cimento obtidos por Fluorescência de Raios-X são apresentados na Tabela 14. Inicialmente, é possível observar que o SiO_2 está presente como componente majoritário, tanto para o solo quanto para as CFB. Logo, o solo é composto predominantemente por SiO_2 , alcançando 74,98% da composição do

material, em seguida aparece o Al_2O_3 e o Fe_2O_3 com 19,39% e 3,82%, respectivamente. Os resultados obtidos apresentam similaridades com o encontrado por outros autores (Nascimento *et al.*, 2021; Vilela *et al.*, 2020; Lozano-Lunar *et al.*, 2020 ; Ribeiro, 2017).

Tabela 14. Composição química do solo, CFB e cimento.

Composição (%)	Solo	CFB	Cimento
SiO_2	74,98	82,56	13,81
Al_2O_3	19,39	-	3,45
K_2O	0,29	3,88	0,46
CaO	0,19	5,97	71,06
TiO_2	1,15	0,11	0,31
Fe_2O_3	3,82	0,72	5,16
ZrO_2	0,12	-	-
MgO	-	3,26	2,5
P_2O_5	-	0,78	-
SO_3	-	2,42	3,06
Cl	-	0,17	-
MnO	-	-	0,19

Fonte: Autoria própria (2021)

Para a CFB, os principais óxidos presentes em sua composição foram SiO_2 com 82,56% e CaO , representando 5,97%. Os demais componentes apresentaram porcentagem inferiores a 4%, como por exemplo o Fe_2O_3 (0,72%). A porcentagem de sílica presente na CFB caracterizada por outros autores obtiveram resultados semelhantes (CHANDANA; DHINAKARAN, 2016; VILLAR-COCIÑA *et al.* 2011, 2019; SILVA *et al.*, 2021). De acordo com NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos devem apresentar um somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superior a 70% (em massa). No presente estudo, a CFB não apresentou Al_2O_3 em sua composição, ausência que pode ser do resultado da metodologia de queima, espécie de bambu, idade, solo e clima. Contudo, as CFB atenderam ao requisito para um material pozolânico, uma vez que o somatório ($\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) dos componentes

presentes foi igual a 83,28%, bem superior ao exigido pela norma. No que tange a porcentagem de trióxido de enxofre (SO₃) presente na CFB, o resultado obtido foi de 2,42%, também cumprindo com as exigências pedidas pela norma brasileira. A concentração de SO₃ influencia no tempo de início e fim de pega do cimento (Silva, 2010).

Os resultados referentes à composição química do cimento Portland V-ARI também foram apresentados na Tabela 14, sendo percebido que esse material é formado em sua maior parte por CaO, cerca de 71%, e também por SiO₂, com 13,81%. A referente composição química atende a requisitos especificados pela NBR 16697 (ABNT, 2018d). Os estudos realizados por Berenguer *et al.*, (2020), Agostinho *et al.*, (2021), Bezerra *et al.*, (2021), obtiveram composições do cimento Portland similares aos apresentados na Tabela 14.

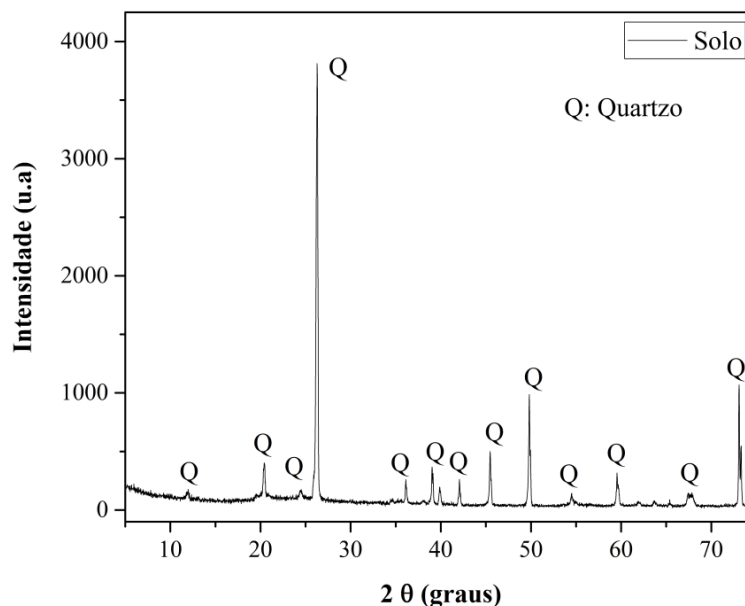
5.2.2 ANÁLISE MINERALÓGICA – DIFRAÇÃO DE RAIOS X

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 5.1. Plus*.

5.2.2.1 Solo

O resultado das fases mineralógicas presentes no solo utilizado é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Difratoograma de Raios X do solo



Fonte: Autoria própria (2021)

É possível verificar, no difratograma, que as fases do solo são dominadas por minerais de quartzo (SiO_2), além disso, é verificável a presença de picos mais acentuados de quartzo cristalino em $2\theta = 26,3^\circ$, $49,82^\circ$ e $73,08^\circ$. Esse resultado também foi observado por Nejad (2020) e está em boa concordância com os resultados da análise química por Fluorescência de Raios-X. A presença de quartzo no solo possibilita ao tijolo solo-cimento sua estabilização dimensional (REGO, 2019).

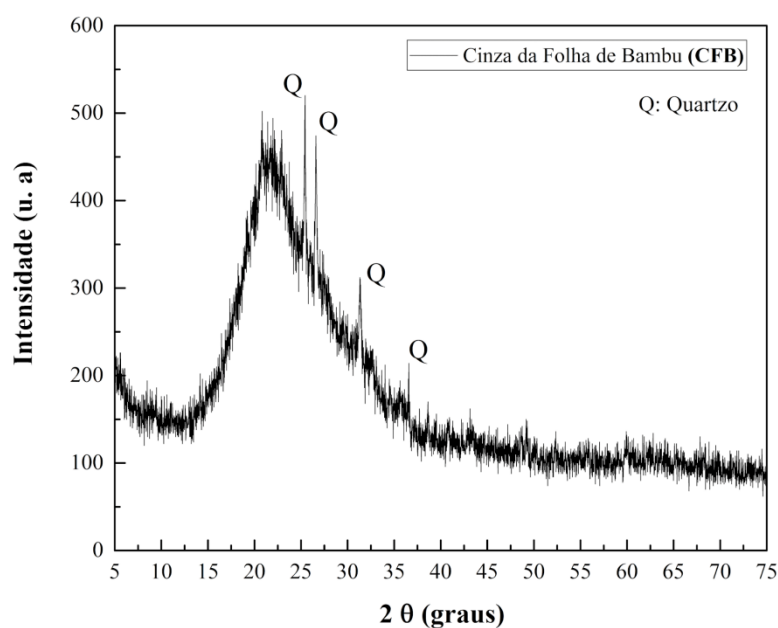
5.2.2.2 Cinza da Folha de Bambu – CFB

Os resultados referentes à mineralogia da CFB são apresentados na Figura 17. A cinza apresentou uma natureza amorfa, sendo observado uma banda larga entre 15° e 40° em 2θ , comportamento semelhante a de CFB produzidas por outros autores (VILLAR-COCIÑA *et*

al. 2011, FRÍAS, 2012; MORAES, 2019). A DRX da CFB calcinada a 600 °C, sugere que existe a formação de SiO₂ amorfa em sua estrutura química. Nos materiais cimentícios suplementares, como é o caso da CFB, o principal parâmetro responsável pela atividade pozolânica e conseqüentemente o desempenho, é o teor de sílica amorfa/reactiva, contida na composição desse óxido. Os óxidos pozolânicos amorfos proporcionam as reações das cinzas com a Portlandita de hidratação do cimento. São essas propriedades que possibilitam que as CFB, possam ser substitutas do cimento em materiais cimentícios (KOLAWOLE *et al.* 2021).

Além do comportamento amorfo, a CFB apresentou alguns picos cristalinos de quartzo em $2\theta = 25,49^\circ$, $26,72^\circ$, $31,19^\circ$ e $36,74^\circ$ (cartão JCPDS nº 85-1780). A presença de quartzo pode ser explicada pelo contato das folhas com o solo, no momento da coleta (MORAES, 2019). O resultado de DRX da CFB corrobora com aqueles obtidos por FTIR e FRX, e, portanto, confirmado o seu potencial uso para a produção dos tijolos solo-cimento quando em substituição parcial ao cimento.

Figura 17 - Difratoograma de Raios-X da Cinza da folha de bambu (CFB)



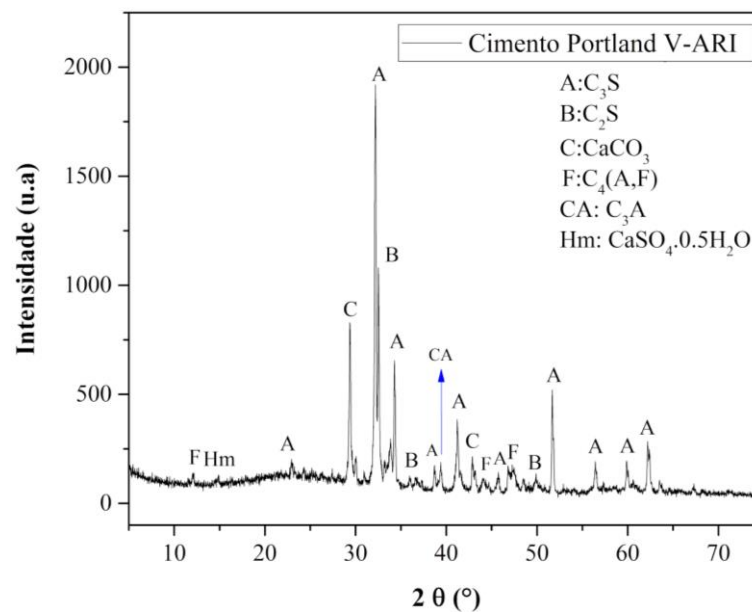
Fonte: Autoria própria (2021)

5.2.2.3 Cimento Portland V-ARI

A Figura 18 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 2θ igual a $22,79^\circ$, $32,13^\circ$, $34,30^\circ$, $38,77^\circ$, $41,34^\circ$, $45,68^\circ$, $51,63^\circ$, $56,37^\circ$, $59,75^\circ$ e $62,24^\circ$, assim como na pesquisa de 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 ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) também estão presentes.

A alita (C_3S) possui composição entre 50% a 70% da massa de clínque, sendo o agente principal responsável pela resistência ao longo do tempo, em particular ao fim do primeiro mês de cura (28 dias de cura). A fase de belita (C_2S) também identificada no difratograma encarregasse de contribuir com a resistência mecânica do cimento após os 28 dias de cura. O aluminato (C_3A) proporciona a resistência no primeiro dia de cura (Barbosa; Portella, 2019).

Figura 18- Difratograma de Raios-X do cimento Portland V-ARI



Fonte: Autoria própria (2021)

5.3 CARACTERIZAÇÕES DOS CORPOS DE PROVAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO

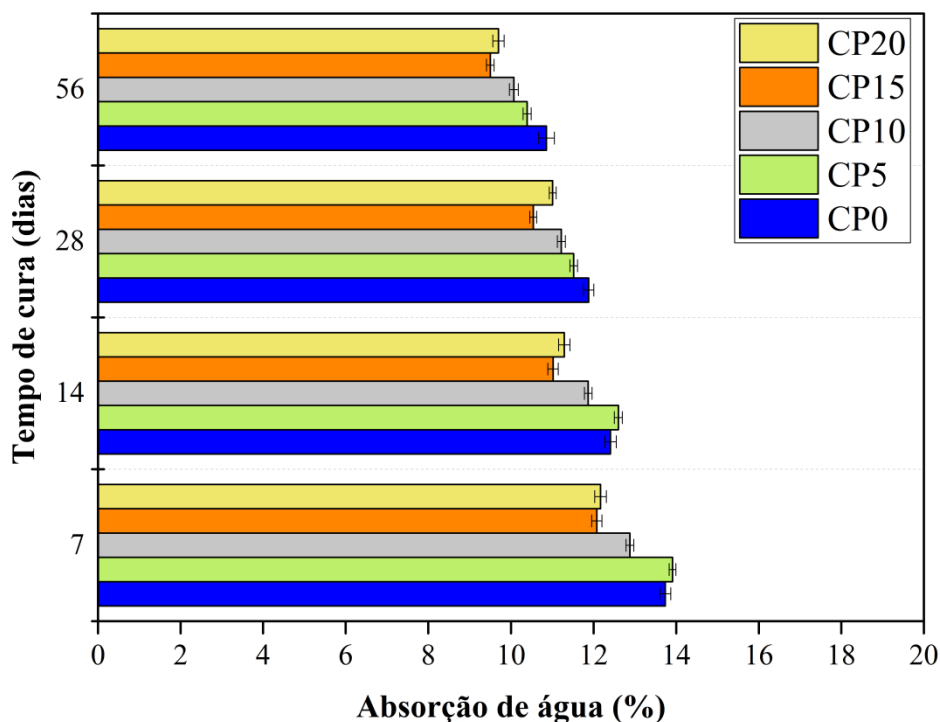
5.3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Na Figura 19, são apresentados os valores médios e desvios padrões dos índices de absorção de água (AA) dos corpos de provas de tijolos solo-cimento com a presença de CFB ao longo de 7 aos 56 dias de processo de cura. Pode-se observar que os índices de AA de todas as amostras ultrapassaram o índice médio exigido pela NBR 8492:2012 para AA, que delimita a porcentagem máxima de absorção em 20% aos 7 dias. De forma geral, as amostras apresentaram uma diminuição nos índices de AA que variaram entre 2,49% e 25,31%, de acordo com o aumento das idades de cura dos tijolos.

Conforme os resultados apresentados, em todos os tempos de curas, os corpos de provas com a substituição parcial do material cimentício por 15% de CFB (amostra CP15), foram os que exibiram o menor índice de AA quando comparados aos resultados do tijolo solo-cimento padrão com a presença das diferentes porcentagens de CFB usadas. Aos 7 dias, a amostra CP15 alcançou 12,08% de AA, uma diminuição de 12,07% em relação a amostra padrão (13,73%). Com o aumento do tempo de cura para 14 dias, os tijolos CP15, obtiveram 11,02% de AA, uma diminuição de 11,21 % em relação a amostra padrão (12,41%).

Aos 28 dias de cura os corpos de prova de composição CP15 (10,54%) apresentaram uma diminuição em seu índice de AA em 11,28%, quando comparada a amostra CP0 (11,88%). Na última idade de cura (56 dias) observa-se também uma diminuição de 12,53% no índice de AA (9,5%) do tijolo com 15% de CFB, se comparados com os resultados do tijolo CP0 (10,86%). É importante salientar que para todas as idades, as demais porcentagens de CFB também apresentaram um decréscimo nos índices de AA.

Figura 19 – Absorção de água versus período de cura dos corpos de provas de tijolos solo-cimento.



Fonte: Autoria própria (2021)

O fenômeno de diminuição da absorção de água por parte dos corpos de prova pode ser consequência da diminuição da porosidade na matriz, causada pelo processo de cura, reações de hidratação do cimento e consequente minimização do número de poros (SEKHAR & NAYAK, 2018; XU, *et al.*, 2020). Portanto, a substituição do cimento por CFB em corpos de prova de tijolos de solo-cimento, contribuiu para aumentar o empacotamento das partículas (solo, cimento) fazendo com que se tenham menos vazios, e consequentemente menos inserção de água (GUETTALA *et al.*, 2002; SIQUEIRA; HOLANDA, 2013). Esse resultado está associado com a boa finura das partículas de CFB (seção 4.2.2), que age como um elemento de preenchimento, causando a redução de grande parte de poros capilares. Além disso, as propriedades pozolânicas presentes nestas cinzas promovem ligações químicas com cimento, gerando produtos de hidratação como, o do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e/ou o silico-aluminato de cálcio hidratado (S-A-C-H)

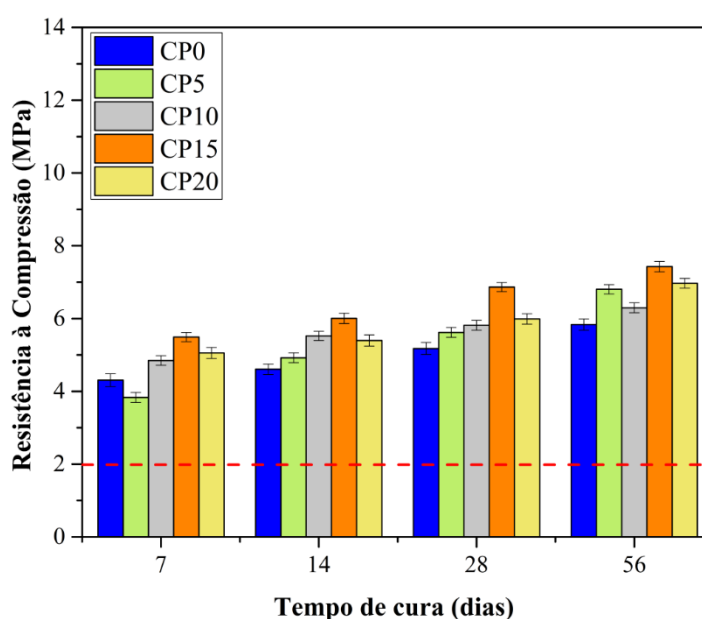
(TASHIMA, 2006; REDDY; KUMAR, 2011; TRIPURA; SINGH, 2015, SEKHAR; NAYAK, 2017).

5.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Figura 20, são apresentados os valores médios e desvios padrões de resistência à compressão dos corpos de prova de tijolos solo-cimento com a presença de CFB ao longo de 7 aos 56 dias de processo de cura. Pode se observar que as resistências à compressão de todas as amostras ultrapassaram consideravelmente a resistência mínima (2 MPa, aos 7 dias) exigida pela NBR 8492:2012. De forma geral, as amostras apresentaram um aumento das resistências que variaram entre 5% e 43,68% de acordo com o aumento das idades de cura dos tijolos.

Os resultados também demonstram claramente que o uso da CFB com características pozolânicas (químicas e físicas), contribuiu para o aumento da resistência das formulações (exceto, CP5- 7 dias) de tijolos solo-cimento e em todas as idades de cura em comparação.

Figura 20 - Resistência à compressão dos corpos de prova de tijolos solo-cimento.



Fonte: A autoria própria (2021)

Conforme os resultados apresentados, em todos os tempos de cura, os corpos de prova de tijolos solo-cimento com a substituição parcial do material cimentício por 15% de CFB (amostra CP15), foram os que exibiram maior resistência à compressão quando comparados aos resultados de do tijolo solo-cimento padrão com a presença das diferentes porcentagens de CFB usadas. Aos 7 dias, a amostra CP15 alcançou 5,49 MPa de resistência à compressão, um aumento de 21% em relação a amostra padrão (4,30 MPa). Nesta mesma idade a amostra CP5 apresentou resultado inferior à amostra CP0, podendo esse resultado ter sido influenciado pelo teor de água adotado na conformação dos corpos de prova. Com o aumento do tempo de cura para 14 dias, os corpos de prova CP15, em comparação com a amostra padrão (4,60 MPa), obteve um acréscimo igual a 23% em sua resistência alcançando 6 MPa.

De forma similar aos dados anteriores (7 e 14 dias), os corpos de prova de solo-cimento de composição CP15 (6,86 MPa) com 28 dias de idade, apresentaram um aumento em sua resistência em 24%, quando comparada a amostra CP0 (5,17 MPa).

Na última idade de cura (56 dias) observa-se também um aumento de 21% na resistência à compressão (7,42 MPa) do tijolo com 15% de CFB, se comparados com os resultados do tijolo CP0 (5,83 MPa). Ressalta se que para todas as idades, as demais porcentagens de CFB apresentaram um ligeiro progressivo crescimento no comportamento de suas resistências.

Um fator determinante que pode ter influenciado os bons resultados de resistência à compressão para as amostras com a presença de CFB, superando inclusive a amostra CP0, é a formação de C-S-H pela reação pozolânica. A reação pozolânica ocorre devido ao consumo de hidróxido de cálcio, produzindo compostos mais resistentes como o C-S-H (MENDONÇA, 2018). Quimicamente, as sílicas e aluminas amorfas presentes na pozolana reagem com a portlandita (C-H) formada na hidratação do cimento, produzindo mais silicatos e aluminatos cálcico hidratados (C-S-H, C-A-H, C-S-A-H), aumentando a resistência da matriz

(SENHADJI et al, 2014). Os bons resultados também foram conseguidos pelo preenchimento de poros realizados pela CFB, já que possui um alto grau de finura, realizando o preenchimento dos vazios (CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009).

Neste estudo, os resultados demonstraram que independente dos períodos de cura usados, a dosagem ótima de CFB a ser substituída parcialmente pelo material cimentício na matriz é de 15%, pois foi a que forneceu os melhores resultados de resistência à compressão, ultrapassando os valores das demais formulações com os diferentes teores de cinzas proposto. A amostra com a porcentagem de 20% também pode ser usada em tijolos solo-cimento, já que essa formulação também se apresenta dentro dos padrões exigidos pela norma. Entretanto, a amostra CP20 pode ter sido prejudicada pela ausência de umidade na matriz cimentícia, já que a taxa de água no momento da umidificação da massa foi fixado em 10% do peso da amostra, fazendo com que menos produtos de hidratação fossem formados.

Os resultados de compressão estão alinhados com os valores de absorção de água apresentado na seção anterior, nº 5.3.1.. Além disso, confirmam o potencial pozolânico da CFB já indicada pelas análises de condutividade elétrica, amorficidade, tamanho das partículas e composição.

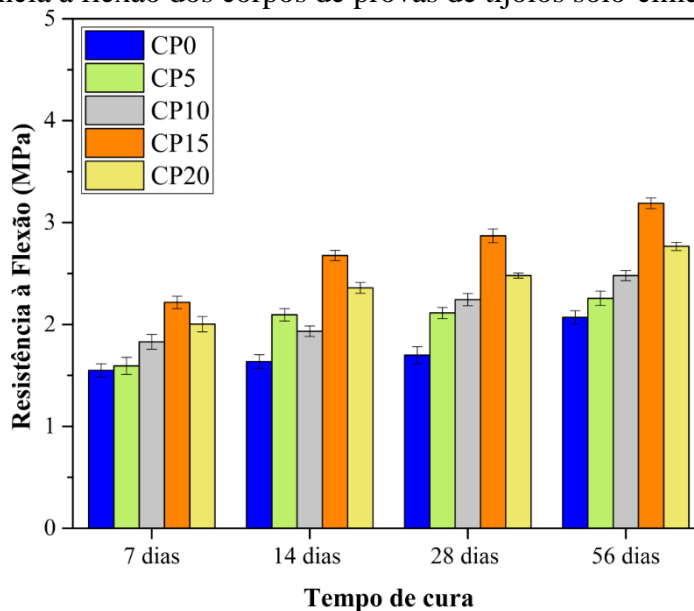
Como previamente informado no levantamento de busca de anterioridades (seção 2.4), não há na literatura pesquisas científicas a respeito do uso de CFB em tijolos solo-cimento, realçando a importância do presente estudo. A maioria dos estudos trabalha com a aplicação da CFB em outros compósitos cimentícios. Na pesquisa realizada por Moraes *et al.*, (2019), trabalhou-se o CFB em substituição ao cimento em argamassas, em 5, 10, 15, 20, 25 e 30%, alcançando resultados de resistência à compressão próximos ou superiores a amostra padrão (0% de CFB) em 3, 7, 28 e 90 dias de idade de cura, respectivamente. Frías *et al.*, (2012) também reportam resistência à compressão próximas a amostra padrão, com 10 e 20% de CFB, em 7, 28 e 90 dias. Umoh e Odesola (2015) produziram argamassas com 0, 5, 10, 15, 20

e 25% de CFB, obtendo, aos 28 dias, para a composição de 5%, um aumento de 28% na resistência, se comparada com a argamassa padrão. O estudo realizado por Silva *et al.*, (2021) aponta que a CFB, pode ser um material substituto parcial do cimento Portland em matrizes cimentícias.

5.3.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os resultados de resistência à flexão obtida para os corpos de provas de tijolos solo-cimento, aos 7, 14, 28 e 56 dias de idade, são apresentados na Figura 21. O comportamento de resistência à flexão dos corpos de prova se apresentou de forma semelhante ao verificado para a resistência a compressão. Sendo assim, existe um aumento da resistência a flexão dos corpos de prova com a porcentagem de 15% de CFB (2,21 MPa), logo aos 7 dias. Esse incremento nos valores de resistência em relação à amostra padrão (CP0, 1,55 MPa) foi de 29%.

Figura 21 - Resistência à flexão dos corpos de provas de tijolos solo-cimento.



Fonte: Autoria própria (2021)

Aos 14 dias, os corpos de provas CP15, em comparação com a amostra padrão (1,63 MPa), obteve um acréscimo igual a 39% em sua resistência alcançando 2,67 MPa. A idade seguinte de cura (28 dias) obteve comportamento similar aos dados anteriores (7 e 14 dias), os corpos de prova de composição CP15 (2,87 MPa), apresentaram um aumento em sua resistência em 42%, quando comparada a amostra CP0 (1,69 MPa). Aos 56 dias (última idade de cura) observa-se também um aumento de 35% na resistência à compressão (3,19 MPa) do tijolo com 15% de CFB, se comparados com os resultados do corpo de prova CP0 (2,07 MPa).

De forma geral, as amostras apresentaram um aumento das resistências que variaram entre 3,56% e 30,73% de acordo com o aumento das idades de cura dos tijolos.

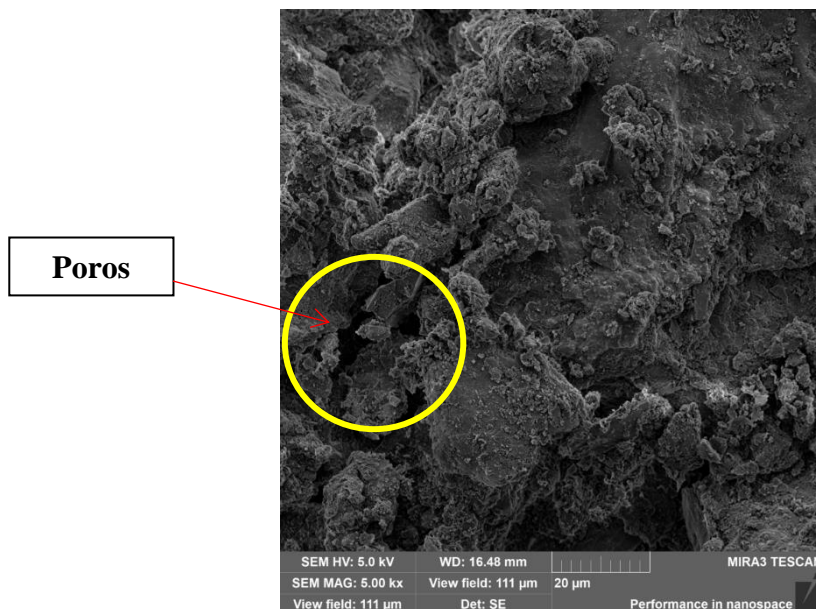
Considerando isoladamente a propriedade resistência à flexão e condições em que este teste foi feito, conclui-se então, que a quantidade ótima de CFB a ser incorporada ao tijolo solo-cimento é de 15%, tendo em vista que oportunizou os tijolos a obterem os melhores resultados de resistência à flexão, superando os valores encontrados pelo tijolo solo-cimento de referência (CP0), como também dos demais teores de CFB. Os resultados do ensaio de flexão são justificados pelos mesmos fatores já discutidos na seção anterior, de resistência a compressão, ou seja, pela efeito físico de preenchimento dos vazios na matriz do tijolo devido a sua finura e pelo efeito químico, através da reação pozolânica da CFB com o cimento.

5.3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As propriedades microestruturais foram obtidas por MEV para todas as formulações dos corpos de prova de tijolos solo-cimento. Como pode ser visualizado na Figura 22, a microestrutura do tijolo CP0, ou seja, aquele sem a presença de CFB apresenta uma matriz densa, entretanto, pode ser percebido pequenos poros de formato irregular. Mesmo cumprindo com os critérios de absorção de água e resistência mecânica, a presença de vazios nesta

amostra confirma os resultados inferiores obtidos no ensaio de absorção e propriedades tecnológicas (compressão e flexão), comparativamente aos das amostras contendo a CFB.

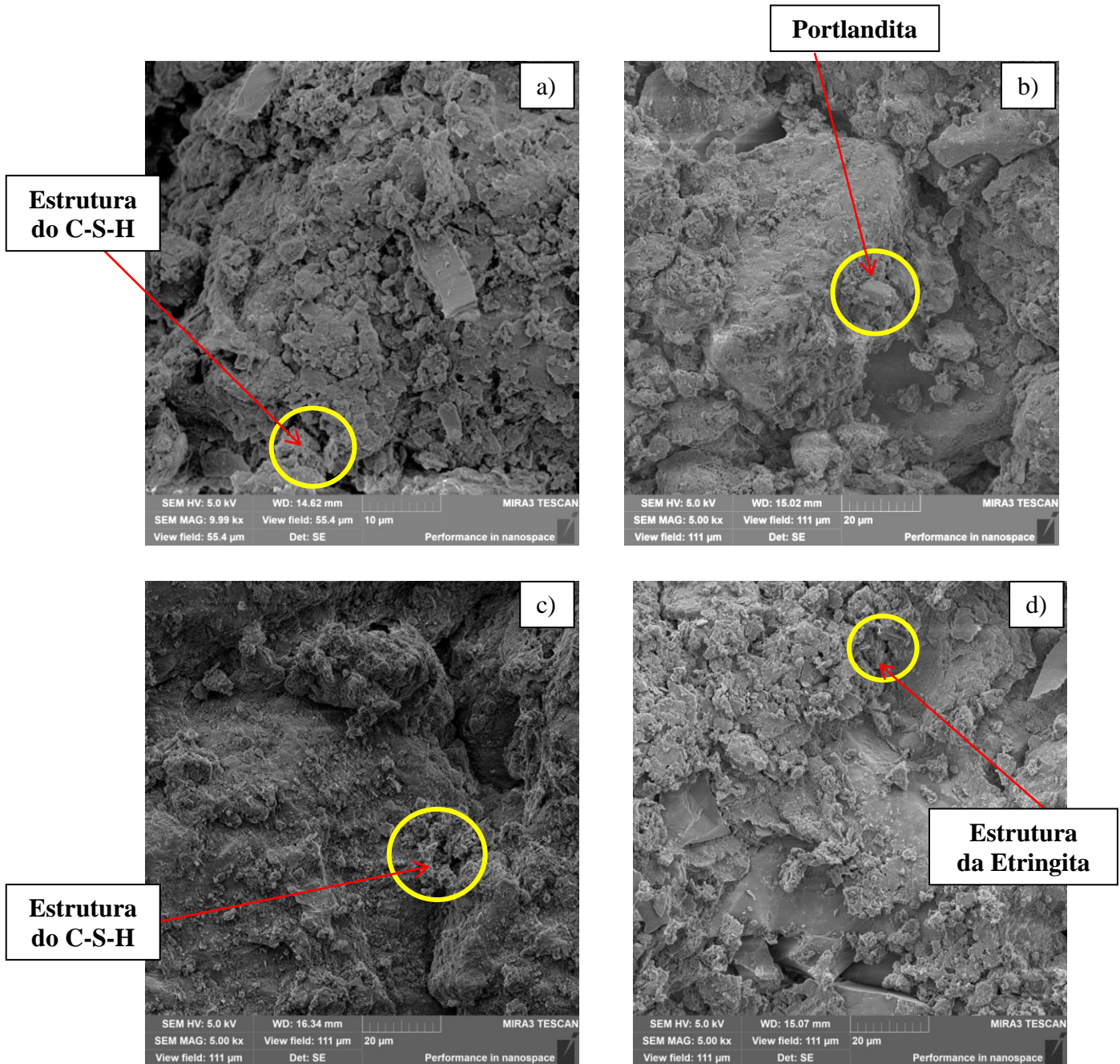
Figura 22 – Imagens MEV do tijolo solo-cimento da amostra CP0.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 23 (a, b, c e d) apresenta a morfologia das amostras com a presença de CFB, respectivamente, CP5, CP10, CP15 e CP20. Em todas os casos as microestruturas possuem muitos grãos sobrepostos o que dá aparência de vale-montanha. A partir das micrografias é possível constatar o efeito benéfico da CFB à matriz cimentícia dos tijolos, evidenciando que todas as amostras possuem uma microestrutura bem compacta, ou seja, com aspecto menos poroso em comparação a CP0 (ver Figura 22). Este fator pode ter contribuído para a melhora das propriedades de absorção de água e mecânicas, em todas as composições com CFB estudadas, como mostrado nas Figuras 19, 20 e 21 (Figuras dos gráficos de AA, compressão e flexão). A CFB aderiu bem à massa do tijolo, resultado da finura das partículas e da reação da sílica amorfa presente nestas cinzas aliado ao hidróxido de cálcio presente no cimento.

Figura 23 – Imagens MEV dos corpos de prova de tijolos solo-cimento: (A) CP5, (B) CP10, (C) CP15, (D) CP20.



Fonte: Próprio Autor.

Nas imagens de MEV ainda é possível visualizar os produtos hidratados encontrados na matriz do tijolo solo-cimento, como a portlandita e o C-S-H, principal produto responsável pela resistência mecânica em materiais à base de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Além disso, o CSH também preenche espaços vazios, ao mesmo tempo que se liga às partículas do solo, favorecendo assim os baixos valores de absorção de água.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos a partir das caracterizações dos materiais de partida e dos corpos de provas de tijolos solo-cimento, pode-se concluir que a substituição de CFB pelo cimento em tijolos de solo-cimento é viável.

A partir do ensaio de pozolanicidade, verificou-se que a CFB foi classificada como um material com alto índice de pozolanicidade. As cinzas são compostas em sua maioria por SiO_2 amorfa, resultados estes confirmados pelas caracterizações químicas, mineralógicas e morfológica. As curvas termogravimétricas demonstraram que a obtenção das CFB com essas propriedades passara pela adoção do processo de calcinação realizado a $600\text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas.

A aplicação da CFB em corpos de prova de tijolos solo-cimento resultou em resultados satisfatórios para todas as composições, cumprindo as exigências normativas. Os resultados do teste de absorção de água revelaram que ao longo do tempo a porcentagem de absorção diminuiu, estando adequados com a NBR 8492:2012. Conforme os resultados apresentados, em todos os tempos de curas, os corpos de prova com a substituição parcial do material cimentício por 15% de CFB (amostra CP15), foram os que exibiram o menor índice de AA quando comparados aos resultados do tijolo solo-cimento padrão com a presença das diferentes porcentagens de CFB usadas.

A CFB em substituição ao cimento Portland aumentou a resistência à compressão nos corpos de prova testados, estando todos os tijolos adequados com a NBR 8492:2012, inclusive a formulação com maior porcentagem de CFB (CP20, 20%). A partir dos resultados dos testes mecânicos de flexão e compressão, foi possível comprovar que os níveis de resistência cresceram com o aumento do tempo de cura.

A amostra CP15, entretanto, apresentou as melhores propriedades em função da composição/tempo de cura, já que ao longo do tempo teve sua resistência aumentada e aos 56 dias foram registrados valores de resistência à compressão de 7,42 MPa e mais de 3 MPa para o teste de flexão, superior às demais composições. Considerando isoladamente as propriedades mecânicas, bem como as condições e resultados obtidos pelo presente estudo, pode-se afirmar que a dosagem ótima de CFB a ser substituída pelo material cimentício na matriz é de 15%, pois foi a que forneceu ao material os melhores resultados de resistência mecânica e de absorção de água. A CFB proporcionou o preenchimento dos poros presentes nos tijolos, conseqüentemente aumentando a resistência dos mesmos, além de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio do cimento, gerando matrizes cimentícias resistentes.

A caracterização morfológica dos corpos de prova de tijolos solo-cimento corroborara com os resultados já obtidos na pesquisa. As amostras que continham CFB em sua composição apresentaram uma matriz densa e compacta, com poucos poros. Ainda é possível observar nas imagens os produtos de hidratação (C-S-H, portlandita) presentes na matriz dos tijolos.

Portanto, a CFB, impactou positivamente as propriedades dos tijolos solo-cimento, sendo viável seu uso como substituto parcial para o material cimentício. O resultado da pesquisa foi relevante no que tange a ganhos ambientais e econômicos com o uso de CFB em tijolos solo-cimento.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para as futuras pesquisas com tijolos solo-cimento com cinzas da folha de bambu, as sugestões são:

- Realizar ensaio de granulometria a laser para todos os materiais;

- Realizar ensaio de densidade específica dos materiais;
- Utilizar outros parâmetros (Tempo/ Temperatura) para a produção de CFB;
- Processar a CFB com o moinho de bolas;
- Substituir as porcentagens de cimento por cal.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, E.S.R; MIRASA, A.K.; ASRAH, H.; LIM, C.H. Review on interlocking compressed earth brick. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, Malásia, 2020.

ADESANYA, D.A.; RAHEEM, A.A. A study of the workability and compressive strength characteristics of corn cob ash blended cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23(1), p. 311-317, 2009.

AGOSTINHO, L. B.; ALEXANDRE, C. P.; SILVA, E. F.; FILHO, R. D. T. Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanosilica. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 2021.

AGRAFIOTIS, C.; TSOUTSOS, T. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. **Applied Thermal Engineering**, v. 21, n. 12, p. 1231-1249, 2001.

ALBUQUERQUE, L. Q. C., et. al. Resistência a compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com montículos do cupim *Cornitermes cumulans*. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 32, n. 2, p. 553-560, 2008.

ALBUQUERQUE, R.T.O.; LIMA, N.L.A. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga Almeida**, p. 57 – 64, 2014.

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**, v. 18(3), p. 705-710, 2014.

AL-KUTTI, W.; ISLAM, A.B.M.S.; NASIR, M. Potential use of date palm ash in cement-based materials. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 31(1), p. 26-31, 2019.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth Syst. Sci.** v. 11, 1-52, 2019.

ANITECO. Associação Nacional da Indústria do Tijolo Ecológico. abr. 2018. Disponível em:<<https://www.aniteco.com/o-tijolo-ecologico/>>. Acesso em: 2021 out. 2021.

ANUNCIATO, V. M., DIAS R. C., BIANCHI L., PERISSATO S. M., GOMES D. M. Bambu: Versatilidade para quem sabe lucrar. Disponível em:

<<https://revistacampoenegocios.com.br/bambu-versatilidade-para-quem-sabe-lucrar>>. Acesso em 30 de outubro de 2021, 2020.

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

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

ASHOUR T.; KORJENIC A.; KORJENIC S.; WU W. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. **Energy and Buildings**. v. 104, p. 139 – 146, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento - normas de dosagem e métodos de ensaios**. 3ª edição. São Paulo: ABCP, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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 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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16613: Freio ferroviário — Sapatas de freio não metálicas — Classificação, requisitos de fabricação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2017.

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 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

BARBOSA, W.; PORTELLA, K. F. Synthesis and characterization of mineral phases C_3S , C_2S , C_3A and C_4AF for use in Portland cement. **Cerâmica**, v. 65, p. 373, 2019.

BARROS, M. M.; OLIVEIRA M.F.L.; RIBEIRO R.C.C.; BASTOS D.C.; OLIVEIRA M.G. Tijolos ecológicos a partir de resíduos de rochas ornamentais e resina de poliéster. **Construction Materials**, v. 232, 2020.

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**, v. 104, 2019.

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**, v. 8(2), 2020.

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

Bhattacharjee, B.; Kumar, M.; Goyal, S. Effect of relative proportion of pozzolana on compressive strength of concrete under different curing conditions. **International Journal of Engineering**, v. 2, p. 20-34, 2008.

BURUBERRI, L.H.; SEABRA, M.P.; LABRINCHA, J.A. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. **J. Hazard Mater.**, v. 286, p. 252-260, 2015.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC 10ª edição, p. 864, 2020.

CAMPOS, A.; NASCIMENTO, J.B.J.; BRITO, L.T. Comportamento estrutural de tijolos de solo-cimento utilizando diferentes fontes de água e métodos de cura. **Interações**, v. 20, n. 1, p. 283-296, 2019.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, volume1. Editora LTC. 7ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

Chandana, D.G.G.H.; Dhinakaran G. (2016). Compressive strength and durability of bamboo leaf ash concrete. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 10, p. 279-289, 2016.

CHEN, H.; ZHANG, W.; WANG, X.; WANG, H.; WU, Y.; ZHONG, T.; FEI, B. Effect of alkali treatment on wettability and thermal stability of individual bamboo fibers. **Journal of Wood Science**, v. 64, p. 398-405, 2018.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. **Construction and Building Materials**, 23, 3523 – 3531, 2009.

COBÎRZAN, N.; BALOG, A.; MOȘONYI, E. Investigation of the natural pozzolans for usage in cement industry *Procedia Technology: 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, Romania, p. 506 - 511, 2015.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da**

casca de arroz como aditivos minerais em concreto. Tese [Doutorado em Ciências e Engenharia Civil] - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

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**, v. 20(4), p. 189-203, 2020.

COSTA, F.N.; RIBEIRO, D.V. Reduction in CO₂ emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). **Journal of Cleaner Production**, v. 276 (10), 2020.

COUTINHO, A. S. **Fabricação e propriedades do betão.** 5^a ed, v. 1. LNEC. 2012.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011.

EKO R.M.; OFFA E.D.; NGATCHA T.Y.; MINSILI L.S. Potential of salvaged steelfibers for reinforcement of unfired earth blocks. **Constr. Build. Mater.**, v. 35, p. 340–346, 2012.

EL FAMI, N.; EZ-ZAKI, H.; BOUKHARI, A.; DIOURI, A. Rheological behaviour and mechanical properties of Moroccan ternary binder's Portland clinker-fly ash-limestone. **Construction and Building Materials**, v. 279, 2021.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5^a edição. Brasília-DF, 2018.

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**, v. 201(1), p. 78-85, 2017.

FERREIRA, R. C.; GLOBO, J. C.; CUNHA, A. H. Incorporation of rice and brachiaria husk and their effects on physical and mechanical properties of soil-cement bricks. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 1, 2008.

FERREIRA, R. C.; OLIVEIRA, M. F. Incorporação de resíduos vegetais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de misturas de solo cimento para fins de construção rural. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, V. 37, p. 204-213, 2007.

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**, v. 34, p. 1019-1023, 2012.

GANA, A.J.; ATOYEBI, O.D.; ICHAGBA, R.B. Effect of different brands of Nigerian cement on the properties of pervious concrete Effect of different brands of Nigerian cement on the properties of pervious concrete. **IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.**, v. 445, 2020.

GAO, T.; DAI, T.; SHEN, L.; JIANG, L. Benefits of using steel slag in cement clinker production for environmental conservation and economic revenue generation. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, 2021.

GARSIDE, M. **Principais países da produção global de cimento em 2019.** Statista, (2020). GAŠPAROVIČ, L.; KOREŇOVÁ, Z.; JELEMENSKÝ, L. Kinetic study of wood chips decomposition by TGA. **Chemical Papers**, v. 64 (2), p. 174-181, 2010.

GIANG, D.T.; PHENG, L.S. Role of construction in economic development: review of key concepts in the past 40 years. **Habitat International**, v. 35 (1), p. 118-125, 2011.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com adição de sílica ativa**. [Dissertação de Mestrado]. São Carlos: EESC-USP, 2003.

GUARNETTI, R. L. **Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos, econômicos e ambientais**. Tese [Doutorado em Energia]. Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

GUETTALA, A.; HOUARI, H.; MEZGHICHE, B.; CHEBILI, R. Durability of lime stabilized earth blocks. **Courrier du Savoir**, v. 2 (2), p. 61-66, 2002.

HASSAN, I.O; ISMAIL, M.; FOROUZANI, P.; MAJID, Z.A.; MIRZA, J. Flow characteristics of ternary blended self-consolidating cement mortars incorporating palm oil fuel ash and pulverised burnt clay. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 253-260, 2014.

HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4ª edição. ELSEVIER. Londres, 2008.

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

HUANG, L; KRIGSVOLL, G.; JOHANSEN F.; LIU Y.; ZHANG X. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1906–1916, 2018.

IACOBESCU, R.I.; ANGELOPOULOS, G.N.; JONES, P.T.; BLANPAIN, B.;PONTIKES, Y. Ladle metallurgy stainless steel slag as a raw material in Ordinary Portland Cement production: a possibility for industrial symbiosis. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 872-881, 2016.

JAYASINGHE, C.; MALLAWAARACHCHI R.S. Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials. **Materials & Design**, v. 30, p. 3859-3868, 2009.

KARIYAWASAM, K.K.G.K.D.; JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 519 – 527, 2016.

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

KONGKAJUN, N.; LAITILA, E.A.; INEURE, P.; PRAKAYPAN, W.; CHERDHIRUNKORN, B.; CHAKARTNARODOM P. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. **Case Studies in Construction Materials**, v.13, 2020.

LEA, F.M.; HEWLETT, P.C. **Lea's chemistry of cement and concrete**, Elsevier. Butterworth- Heinemann, Oxford, 2008.

LI, Z.; CHEN, C.; MI, R.; GAN, W.; DAI, J.; JIAO, M.; XIE, H.; YAO, Y.; XIAO, S.; HU, L. A strong, tough, and scalable structural material from fast-growing bamboo. **Advanced Materials**, v. 32, 2020.

LI, Z.; JIANG, Z.; FEI, B.; CAI, Z.; PAN, X. Comparison of bamboo green, timber and yellow in sulfite, sulfuric acid, and sodium hydroxide pre-treatments for enzymatic saccharification. **Bioresour. Technol.**, v. 151, p. 91-99, 2014.

LIMA, J.F. **Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland**. [Dissertação de Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

LIN, K.L.; CHANG, K.Y.; LIN, C.Y. Recycling of spent catalyst and waste sludge from industry to substitute raw materials in the preparation of Portland cement clinker. **Sustainable Environment Research**, v. 27 (5), p. 251-257, 2017.

LIU, Z.; MI, B.; WEI, P.; JIANG, Z.; FEI, B.; LIU, X.. Combustion characteristics of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). **European journal of wood and wood products**, v. 74, p. 255-259, 2016.

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**, v. 18, p. 73, 2007.

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**, v. 251, 2020.

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

MACHADO, P. J. C.; FERREIRA, R. A. R.; MOTTA, L.A.C.; PASQUINI, D. Characterization and properties of cementitious composites with cellulose fiber, silica fume and latex. **Construction and Building Materials**, v. 10, 2020.

MARTÍNEZ, S.; BLANCO, M.T.; EREÑA I.; GENER, M. Reatividade pozolânica de rochas zeolíticas de dois depósitos cubanos diferentes: caracterização de produtos de reação. **Appl Clay Sci**, v. 32, p. 40-52, 2006.

MASKELL, D.; HEATH A.; WALKER, P. Appropriate structural unfired earth masonry units. **Construction Materials**, v. 169, p. 261-270, 2016.

MATOS, A.M.; COUTINHO, J.S. Waste glass powder in cement: macro and micro scale study. *Advances in Cement Research*, v. 28, p. 423-432, 2016.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. *Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2ª edição. São Paulo. IBRACON. 2014.

MENDONÇA, M. F. **Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu (*Bambusa Vulgaris*)**. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Pará, 2018.

MOHAMMED S. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: a review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 10-19, 2017.

MOIR, G. Cements. In: NEWMAN, J.; CHOO, B. S. (Ed.). **Advanced Concrete Technology: Constituent Materials**. Oxford: Elsevier, 2003.

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**, v. 208, p. 369-380, 2019.

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

MURTHI, P.; SIVAKUMAR, V. Studies on acid resistance of ternary blended concrete. **Materials Science, Engineering**, v. 9(5), p. 473-486.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

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. **Heliyon**, v.6, 2020.

OLUTOGE, F.A.; OLADUNMOYE, O.M. Bamboo leaf ash as supplementary cementitious material. **American Journal of Engineering Research**, v. 6, p. 1-8, 2017.

PALANIVEL, R.; VELRAJ G. FTIR and FT-Raman spectroscopic studies of fired clay artifacts recently excavated in Tamilnadu. **Int. J. Pure Appl. Phys.**, v. 45, p. 501-508, 2007.

PROMPT, C. **Curso de Bioconstrução**. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável. Departamento de Desenvolvimento Rural Sustentável. Brasília: MMA, p. 64, 2008.

PUERTAS, F.; BARBA, A.; GAZULLA, M.F.; GÓMEZ, M.P.; PALACIOS, M.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. Clinkers and cements obtained from raw mix containing ceramic waste as a raw material: characterization, hydration and leaching studies. **Cement Concr. Res.**, v. 30 (3), p. 789-805, 2010.

REDDY B. V. V.; KUMAR P.P. Cement stabilised rammed earth. Part B: Compressive strength and stress-strain characteristics. **Materials and Structures**, v. 44 (3), p. 695 – 707, 2011.

REGO, R. R.C. **Estudo do tijolo solo cimento em formulações com a adição da cal**. [Dissertação Mestrado]. Engenharia de Materiais. Instituto Federal do Piauí, 2019.

REN, C., WANGA, W., LI, G. Preparation of high-performance cementitious materials from industrial solid waste. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 39-47, 2017.

RIBEIRO, S.V. **Reuse of Wood Ash Waste in the Production of Soil-Cement Brick: Formulation, Properties and Microstructure**. [Tese de doutorado]. Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2017.

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**, v. 231, p. 54 – 63, 2019.

ROSELLÓ, J.; SORIANO, L.; SANTAMARINA, M. P.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; PAYÁ J. Microscopy Characterization of Silica-Rich Agrowastes to be used in Cement Binders: Bamboo and Sugarcane Leaves. **Microscopy and Microanalysis**, v. 21, p.1314-1326, 2015.

SANTOS, T.A.; NETO, J.S.A.; CILLA, M.S.; RIBEIRO, D.V. Influence of the content of alkalis (Na_2O and K_2O), MgO , and SO_3 present in the granite rock fine in the production of portland clinker. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 34 (3), 2022.

SATHONSAOWAPHAK, A.; CHINDAPRASIRT, P.; PIMRAKSA, K. Workability and strength of lignite high bottom ash geopolymers mortar, **J. Hazard. Mater**, v. 168(1), p. 44, 2009.

SAWARKARA, D.; SHRIMANKARA, D.; KUMAR, A.; KUMAR, A.; SINGH, E. Commercial clustering of sustainable bamboo species in India. **Industrial Crops and Products**. v. 154, 2020.

SCURLOCK, J.M.O; DAYTON D.C.; HAMES B. Bamboo: an overlooked biomass resource?. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 229-244, 2000.

SEKHAR, D.C.; NAYAK S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v.166, p. 531-536, 2018.

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**, p. 615-629, 2017.

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**, v. 42, 2021.

SILVA, L.H.P.; TAMASHIRO, J.R.; PAIVA, F.F.G.; SILVIO, L.F.S.; KINOSHITA, A.; ANTUNESA, P.A. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**. v. 42, 2021.

SILVA, M. G. **Cimentos portland com adições minerais**. Materiais de Construção Civil. São Paulo: Ibracon, v. 1, cap. 23, p. 761, 2010.

SIMÃO, L.; JUSTI, J.; LÓH, N.J.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J.A.; MONTEDO, O.R.K. Valorization of alter-native mineral sources from pulp and paper mills. **Process Saf. Environ. Protect.**, v. 109, p. 106-116, 2017.

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

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

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Processo produtivo**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/processo-de-producao.php>. Acesso em: 9 ago. 2021.

SORENG, R. J.; PETERSON, P. M.; ROMASCHENKO, K.; DAVIDSE, G.; ZULOAGA, F. O.; JUDZIEWICZ, E. J.; FILGUEIRAS, T. S.; DAVIS, J. I.; MORRONE, O. A worldwide phylogenetic classification of the Poaceae (Gramineae). **Journal of Systematics and Evolution**, v.53, p.117-137, 2015.

SOUSA, S. M. T.; BARBOSA, N. P. **Estabilização granulométrica de solos para a confecção de tijolos prensados de terra crua**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais. Salvador, 2000.

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p.205-212, 2008.

SUHENDRO, B. Toward green concrete for better sustainable environment. **Procedia Engineering**, v. 95, p. 305-320, 2014.

TASHIMA, M. M. **Cinza da Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento das matrizes de cimento Portland**. [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. 2^a ed. London: Thomas Telford, 1997.

TOMASSETTI, L.; DI GIUSEPPE, D.; ZOBOLI, A.; PAOLINI, V.; TORRE, M.; PARIS, E.; GUALTIERI, A.F. Emission of fibres and atmospheric pollutants from the thermal treatment of asbestos containing waste (ACW). **Journal of Cleaner Production**, v. 268, 2020.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Materiais biomiméticos: materiais de construção inspirados na natureza. **Revista Arte & Construção**, v. 240, p. 38-40, 2011.

TRIPURA, D.D., SINGH K.D. Characteristic Properties of Cement-Stabilized Rammed Earth Blocks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.27 (7), 2015.

UMOH, A.A.; ODESOLA, I.A. Characteristics of Bamboo Leaf Ash Blended Cement Paste and Mortar. **Civil Engineering Dimension**, v. 17(1), p. 22-28, 2015.

UTODIO, N. F.; EKANDEM, E. S.; EGECE, 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**, v. 8(1), p. 193-208, 2015.

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**, v. 262, 2020.

- 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**, v. 33(1), p.68-73, 2011.
- 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**, v. 33(4), p. 517-524, 2003.
- VILLAR-COCIÑA, E.; RODIER, L.; SAVASTANO, H.; LEFRÁN, M.; ROJAS, M. F. A Comparative Study on the Pozzolanic Activity Between Bamboo Leaves Ash and Silica Fume: Kinetic Parameters. **Waste Biomass Valor**, v. 11, p. 1627–1634, 2019.
- 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**, v. 9, p. 691–699, 2018.
- WANG, W.; LIY, H.; GUO, Q.; CHEN, S. Mullite whiskers prepared by molten salt method using Si powders. **J. Adv. Ceram.**, V. 4, p. 283-289, 2013.
- WBCSD/CSI. Getting the Numbers Right. **Cement Industry Energy and CO2 Performance**, Geneva, 2009.
- XIAO, J.; SHEN, J.; BAI, M.; GAO, Q.; WU, Y. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, 2021.
- XU, F.; WANG, S.; LI, T.; LIU, B.; LI, 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**, v. 27, p.2208-2216, 2020.
- YADAV, M.; MATHUR, A. Bamboo as a sustainable material in the construction industry: an overview. **Mater. Today Proc.**, v. 43, p. 2872-2876, 2021.
- YE, C.; HUANG, Y.; FENG, Q.; FEI, B. Effect of hygrothermal treatment on the porous structure and nanomechanics of moso bamboo. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.
- Zhang, X.; Xu, J.; Zhang, X.; Li, Y. Life cycle carbon emission reduction potential of a new steel-bamboo composite frame structure for residential houses. **J. Build. Eng.**, v. 39, 2021.