



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

JEFERSON FERNANDO CORRÊA ANTONELLI

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO, MECÂNICO E TÉRMICO DE
BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA COM A SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO
PORTLAND POR CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

BAURU

2022

JEFERSON FERNANDO CORRÊA ANTONELLI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO, MECÂNICO E TÉRMICO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA COM A SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", câmpus de Bauru, como requisito final para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Maximiliano dos Anjos Azambuja

BAURU
2022

Antonelli, Jeferson Fernando Corrêa

Avaliação do comportamento físico, mecânico e térmico de blocos de terra comprimida com a substituição do cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar /

Jeferson Fernando Corrêa Antonelli, 2022
110f.

Orientador: Maximiliano dos Anjos Azambuja

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Bauru, 2022

1. Bloco de terra comprimida. 2. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar. 3. Tijolo ecológico. 4. Tijolo solo-cimento. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE JEFERSON FERNANDO CORRÉA ANTONELLI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, DA FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES, COMUNICAÇÃO E DESIGN - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de fevereiro do ano de 2022, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JEFERSON FERNANDO CORRÉA ANTONELLI, intitulada **Avaliação do comportamento físico, mecânico e térmico de blocos de terra comprimida com a substituição do cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Associado MAXIMILIANO DOS ANJOS AZAMBUJA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo / FAAC/UNESP/Bauru, Prof.ª Dr.ª MARIA SOLANGE GURGEL DE CASTRO FONTES (Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo / FAAC/UNESP/Bauru, Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / UFSCar. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Associado MAXIMILIANO DOS ANJOS AZAMBUJA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Maximiliano dos Anjos Azambuja, muito obrigado pela oportunidade e toda solidariedade durante todo esse período.

A minha mãe, mesmo que em distância, me mantém em suas orações.

Agradeço a Thais, o seu carinho e amor me fortalecem.

Os professores de banca, André, João e Solange pelos ensinamentos e correções para melhorar a qualidade do trabalho.

Os colegas de laboratório, Leandro, Cláudio, Jhaber e Gustavo os dias de laboratório com as suas companhias foram mais alegres.

Aproveito para agradecer ao PPGARQ. Os funcionários do setor administrativo, sempre corteses no atendimento, os colegas da turma que iniciou em 2020, e os professores, por todos os ensinamentos durante as disciplinas.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa durante a realização desta pesquisa.

ANTONELLI, J.F.C. **Avaliação do comportamento físico, mecânico e térmico de blocos de terra comprimida com a substituição do cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar.** 110 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design (FAAC), UNESP (Universidade Estadual Paulista), Bauru, 2022.

RESUMO

As alternativas sustentáveis para produção de materiais de construção civil são cada vez mais exigidas pela sociedade como resposta às crescentes preocupações mundiais com o meio ambiente. O desenvolvimento de blocos de terra comprimida (BTC) é justificável para minimizar o impacto ambiental no setor de construção civil. O cimento Portland tem sido o material mais usado para estabilização do solo na produção de BTC, entretanto, para sua fabricação é necessário alto fornecimento de energia, e há liberação de grandes quantidades de gases contaminantes durante o processo, tornando a indústria do cimento uma das principais colaboradoras de emissões de CO₂, que contribuem para as mudanças climáticas. Diante deste cenário, a substituição parcial ou total do cimento Portland por outros aglutinantes pozolânicos é desejável. A presente pesquisa tem como objetivo avaliar se a substituição parcial de cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar produz blocos de terra comprimida similares aos confeccionados com cimento Portland em relação aos valores de desempenho físico e mecânico estabelecidos pela NBR 8491 (2012). O estudo de dosagem fixou o teor ideal de cimento para 10% em peso do solo (traço de referência-TR), avaliando os determinantes críticos como resistência à compressão e resistência à absorção de água. Posteriormente foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e de durabilidade de blocos com 10%, 20% e 30% de CBC (T10CBC, T20CBC e T30CBC) em substituição ao cimento. Além disso foi feita a classificação da CBC como material pozolânico através do índice de atividade pozolânica (IAP) por método físico com cimento. Os resultados demonstram que o IAP da CBC superou o valor de referência de 90% estabelecido pela NBR 12653 (2014), atingindo IAP de 113%, confirmando o seu potencial de adição em matrizes cimentícias. A substituição de 10%, 20% e 30% de cimento por CBC satisfaz o critério de resistência à compressão estabelecida pela norma técnica brasileira e outras internacionais. Após os ciclos de molhagem e secagem a resistência à compressão aumentou aproximadamente em 22%, 14%, 25% e 12% para TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC respectivamente, em comparação as amostras avaliadas aos 28 dias de idade. Os valores de condutividade térmica variaram de 0,607 à 0,905 (W/mK) e foi constatada a relação direta de densidade com a condutividade térmica. Em termos de resistência e durabilidade o solo argiloso siltoso com alto teor de finos - pobre para compactação – é adequado para produzir BTCs estabilizados com CBC em substituição ao cimento, reduzindo o consumo de cimento, a energia no processo de produção e contribuindo com a diminuição de emissões de poluentes.

Palavras-chave: Bloco de terra comprimida. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Tijolo ecológico. Tijolo solo-cimento

ANTONELLI, J.F.C. **Evaluation of the physical, mechanical and thermal behavior of compressed earth blocks with the replacement of Portland cement by sugar cane bagasse ash.** 110 p. Dissertation (Master of Architecture and Urbanism) – School of Architecture, Arts, Communication and Design (FAAC), UNESP (São Paulo State University), Bauru, 2022.

ABSTRACT

Sustainable alternatives for production of building materials are increasingly demanded by society as a response to growing global concerns about the environment. The development of compressed earth blocks (CEB) is justified to minimize the environmental impact in the construction industry. Portland cement has been the most commonly used material for soil stabilization in the production of CEB, however, its manufacture requires high energy supply, and there is the release of large amounts of contaminating gases during the process, making the cement industry a major contributor of CO₂ emissions, which contribute to climate change. Given this scenario, the partial or total replacement of Portland cement by other pozzolanic binders is desirable. The present research aims to evaluate whether the partial replacement of cement by sugarcane bagasse ash produces compressed earth blocks similar to those made with Portland cement in relation to the physical and mechanical performance values established by NBR 8491 (2012). The dosage study set the ideal cement content to 10% by weight of soil (reference mixture-TR), evaluating the critical determinants such as compressive strength and resistance to water absorption. Subsequently, the physical, mechanical, thermal, and durability properties of blocks with 10%, 20%, and 30% of SBA (T10CBC, T20CBC, and T30CBC) in cement substitution were evaluated. In addition, the classification of SBA as a pozzolanic material was done through the pozzolanic activity index (PAI) by physical method with cement. The results show that the IAP of SBA exceeded the reference value of 90% established by NBR 12653 (2014), reaching IAP of 113%, confirming its potential for addition in cementitious matrices. The substitution of 10%, 20% and 30% of cement by SBA satisfies the compressive strength criterion established by the Brazilian and other international technical standards. After the wetting and drying cycles, the compressive strength increased by approximately 22%, 14%, 25% and 12% for TR, T10CBC, T20CBC and T30CBC respectively compared to the samples evaluated at 28 days of age. The thermal conductivity values ranged from 0.607 to 0.905 (W/mK) and the direct relationship of density with thermal conductivity was found. In terms of strength and durability, the silty clayey soil with high content of fines - poor for compaction - is suitable for producing BTCs stabilized with SBA as a substitute for cement, reducing cement consumption, energy in the production process and contributing to the reduction of pollutant emissions.

Keywords: Compressed earth block. Sugarcane bagasse ash. Ecological brick. Soil-cement brick.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Construção com bloco de terra comprimida.....	22
Figura 2 - Códigos de construção em terra	24
Figura 3 - Produção de cana-de-açúcar no mundo de 1994-2019.....	25
Figura 4 - Produção de Cana-de-açúcar por região, de 1994-2019.....	26
Figura 5 - Maiores produtores de Cana-de-açúcar no mundo, de 1994-2019.....	26
Figura 6 - Diferentes geometrias de BTC	31
Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão: unidade de alvenaria e unidade individual	35
Figura 8 - Avaliação da condutividade térmica pelo método da caixa.....	42
Figura 9 - Diagrama de resultados de documentos encontrados na literatura	47
Figura 10 - Diagrama de desenvolvimento das atividades em laboratório	49
Figura 11 - Blocos produzidos no laboratório	50
Figura 12 - Processo de manufatura dos BTCs	51
Figura 13 - Detalhes do ensaio de energia de aplicação	52
Figura 14 - Análise granulométrica: sedimentação e peneiramento.....	53
Figura 15 - Ensaio de limite de liquidez e plasticidade.....	54
Figura 16 - Ensaio de Proctor normal.....	55
Figura 17 - Cinza retirada da caldeira para coleta.....	56
Figura 18 - Moagem e Queima da CBC	57
Figura 19 - Ensaio de finura da cinza.....	58
Figura 20 - Materiais para produção das argamassas	59
Figura 21 - Ensaio de massa específica da cinza	60
Figura 22 - Medição de corpo-de-prova	61
Figura 23 - Blocos imersos na água.....	62
Figura 24 - Tratamento com verniz acrílico	62
Figura 25 - Corte dos blocos e análise de consistência da argamassa.....	63
Figura 26 - Blocos cortados e superpostos	64
Figura 27 - Ensaio de resistência à compressão.....	64
Figura 28 - Detalhe do equipamento de avaliação da condutividade térmica	67
Figura 29 - Ensaio de condutividade térmica dos blocos	67
Figura 30 - Porcentagem que passa X diâmetro dos grãos	70
Figura 31 - Curva de compactação Proctor.....	71
Figura 32 - Beneficiamento da cinza - peneiramento, moagem e queima	72
Figura 33 - Resultado de resistência à compressão das argamassas	73
Figura 34 - Valores de densidade seca dos traços T1, T2 e T3.....	76

Figura 35 - Absorção de água de T1, T2 e T3. As barras de erro representam o desvio padrão	78
Figura 36 - Absorção de água de BTCs com proteção. As barras de erro representam o desvio padrão	82
Figura 37 - Resistência à compressão	83
Figura 38 - Resistência à compressão TR	84
Figura 39 - Resistência à compressão T10CBC	85
Figura 40 - Resistência à compressão T20CBC	85
Figura 41 - Resistência à compressão T30CBC	86
Figura 42 - Análise dimensional	89
Figura 43 - Resistência à compressão após ciclos de molhagem e secagem	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de produção de BTC.....	32
Tabela 2 - Resumo de resultados de trabalhos de revisão da literatura	43
Tabela 3 - Teor de cimento sugerido para compactação pela NBR 12253 (2012)....	50
Tabela 4 - Detalhes das proporções de materiais por massa	52
Tabela 5 - Resultado dos ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento	56
Tabela 6 - Análise granulométrica do solo	69
Tabela 7 - Índices de consistência do solo.....	70
Tabela 8 - Resumo dos resultados dos ensaios de solo	71
Tabela 9 - Resultado de massa retida na peneira 45 µm.....	73
Tabela 10 - Resultado da massa específica da cinza	74
Tabela 11 - Resultado da energia de compactação	75
Tabela 12 - Densidade seca e porosidade dos traços TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC.....	77
Tabela 13 - Valores de absorção de água para TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC..	79
Tabela 14 - Absorção de água com 28 dias em 17 tempos	80
Tabela 15 - Absorção de água com 28 dias em 17 tempos - Continuação	81
Tabela 16 - Média de resistência à compressão para todos os traços.....	86
Tabela 17 - Perda de massa dos CPS 2 e 3 após os ciclos.....	87
Tabela 18 - Absorção de água durante ensaio de molhagem e secagem	89
Tabela 19 - Resultados de condutividade térmica.....	91
Tabela 20 - Densidade seca dos CPs de condutividade térmica	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Transformações da CBC no processo de queima.....	28
Quadro 2 - síntese de trabalhos de beneficiamento da CBC	30

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGEITEC	Agência Embrapa de Informação Tecnológica
ANFOR	Association française de normalisation
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	ASTM International – American society for testing and materials
BIS	Indian Standard
BS	British Standards
CDI	Centro para o Desenvolvimento da Indústria
CRATerre	Centro Internacional de Construção em Terra
DEC	Departamento de Engenharia Civil
CV	Coeficiente de variação
EAG	Escola de Arquitetura de Grenoble
EN	European Standard
FEB	Faculdade de Engenharia Ambiental
HBR	Highway Research Board
IDC	Índice de desempenho com cimento Portland
NBR	Norma Brasileira Registrada
NZS	Standard New Zealand
NP	Norma Portuguesa
ODA	Overseas Development Administration
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
SLS	Sri Lanka Standard
SP	São Paulo
T1	Traço com 5% de cimento
T2	Traço com 7% de cimento
T3	Traço com 10% de cimento

TR	Traço de referência
TR10CBC	Traço com 10% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar
TR20CBC	Traço com 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar
TR30CBC	Traço com 30% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar
UNE	Normalización Española
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
a.C.	Antes de cristo
h.	Hora
min.	Minuto
s.	Segundo
Λ	Condutividade térmica
σ	Resistência à compressão simples
°C	Graus Celsius
A	Absorção da água
cm ³	Centímetro cúbico
CO ₂	Dióxido de carbono
g	Gramas
g/cm ²	Gramas por centímetro quadrado
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
K ₂ O	Óxido de potássio
Kg	Quilograma
Kg/cm ³	Quilograma por centímetro cúbico
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kN	Quilonewton
kWh	Quilowatt-hora
L/min	Litro por minuto
M	Massa
Mpa	Mega pascal
<i>M_s</i>	Massa seca

n	Porosidade
$N/mm^2/min$	Newton por milímetro quadrado por minuto
ρ_d	Densidade seca
μm	Micrômetro
Vol	Volume
$W/m. K$	Watt por metro por kelvin

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
1.1 Objetivos.....	20
1.1.1 Objetivo geral.....	20
1.1.2 Objetivos específicos	20
1.2 Estrutura da dissertação	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Produção de Bloco de Terra Comprimida (BTC)	22
2.2 Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC)	25
2.3 Métodos para produção de BTC	30
2.4 Energia de compactação aplicada	34
2.5 Desempenhos mecânico, físico, térmico e de durabilidade	35
2.5.1 Desempenho mecânico: resistência à compressão.....	35
2.5.2 Desempenho físico: resistência à absorção de água	38
2.5.3 Desempenho físico: durabilidade.....	39
2.5.4 Desempenho físico: condutividade térmica	41
2.6 Considerações sobre a revisão da literatura.....	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Bases de dados e palavras-chave	45
3.2 Programa Experimental	47
3.3 Energia de compactação aplicada.....	52
3.4 Materiais	53
3.4.1 Solo.....	53
3.4.1.1 Análise granulométrica	53
3.4.1.2 Ensaio de consistência	54
3.4.1.3 Ensaio Proctor normal	55
3.4.2 Cimento Portland	55
3.4.3 Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar.....	56
3.4.3.1 Beneficiamento da CBC.....	57

3.4.3.2 Atividade pozolânica da CBC por métodos físicos.....	57
3.5 Caracterização dos BTCs	60
3.5.1 Densidade seca	61
3.5.2 Absorção de água.....	61
3.5.3 Avaliação exploratória de absorção de água em BTCs com proteção de verniz acrílico	62
3.5.4 Resistência à compressão.....	63
3.5.5 Ensaio de durabilidade por secagem e molhagem	64
3.5.6 Determinação da condutividade térmica.....	66
3.6 Análise estatística ANOVA/Tukey.....	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 Caracterização do solo	69
4.1.1 Análise granulométrica	69
4.1.2 Ensaio de consistência	70
4.1.3 Ensaio Proctor normal	71
4.1.4 Resumo das propriedades físicas do Solo.....	71
4.2 Atividade pozolânica da CBC por métodos físicos	72
4.2.1 Massa específica da CBC.....	74
4.3 Energia de compactação aplicada.....	74
4.4 Densidade seca	76
4.5 Absorção de água.....	78
4.6 Avaliação exploratória de absorção de água em BTCs com proteção de verniz acrílico	82
4.7 Resistência à compressão.....	82
4.8 Durabilidade por molhagem e secagem	87
4.9 Condutividade térmica	91
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICES	106

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os Blocos de terra comprimida (BTC) são essencialmente adobes - um dos primeiros elementos de estruturas fabricadas pelo homem - porém produzidos utilizando compactação mecânica, o que lhes confere inovação para materiais de construção de alvenaria. O termo bloco de terra comprimida segundo o CRATERRE (1998) inclui todas as variações deste produto, esteja a terra estabilizada ou não. A literatura está recheada de denominações para os mesmos produtos, como por exemplo, tijolo solo-cimento, tijolo solo-cimento estabilizado, tijolo ecológico, etc.

Segundo a ASTM E2392/E2392M-10 (2016, p.3) com o desenvolvimento de novos materiais, os sistemas de construção em terra caíram em desprestígio em partes do mundo onde eram comumente usados. Ao mesmo tempo, a construção em terra vem experimentando um renascimento no mundo industrializado impulsionado por inúmeros fatores, dentre eles, o avanço tecnológico.

Em 1952 chegou ao mercado a prensa CINVA-RAM, a primeira prensa projetada especialmente para produção de blocos de terra comprimida. Durante os anos 80, a tecnologia atraiu a atenção das indústrias da construção em todo o mundo, surgindo uma nova gama de equipamentos de produção, incluindo cadeias de produção industrial de alta velocidade (CDI-CRATERRE-EAG / ODA, 1998).

Sekhar et al. (2018) mencionam como o processo de compactação aprimorado e a incorporação de estabilizadores contribuíram para o surgimento progressivo dos BTCs, pois ajudam a superar as limitações da terra para a fabricação de blocos, como por exemplo, a menor resistência à compressão, perda de resistência à saturação, durabilidade, fissuração por contração e baixa estabilidade dimensional.

O desempenho do BTC é regido pelas características do solo, sobretudo pela distribuição do tamanho de suas partículas, cada variação na graduação pode mudar a estrutura do solo, plasticidade, coesão e permeabilidade, impactando o comportamento mecânico (Kasinikota; Tripura, 2021, p.17). A curva granulométrica recomendada para BTC é determinada por várias normas técnicas (BIS IS 1725, 2013; NBR 10833, 2012; SLS 1382-1, 2009; UNE 41410, 2008; AFNOR XP P13-901, 2001; NZS 4298, 1998). Foram realizadas diferentes pesquisas sobre a influência da classificação do solo nas propriedades dos BTCs, Cottrell et al. (2021); Yatawara; Athukorala (2021); Kasinikota; Tripura (2021); Lavie Arsène et al. (2020); Azevedo et al. (2019); Serbah et al. (2018). De acordo com esses estudos, os melhores resultados

foram obtidos nas seguintes faixas granulométricas: argila 10-30%, silte 10-40%, areia 30-80% e cascalho 0-40%.

Como pode ser observado acima, segundo os estudos desenvolvidos e as recomendações normativas, a faixa de granulometria ideal para a produção de BTC está mais próxima de solos granulares (areias), já o solo com predominância de argila em sua composição é um grande problema para a qualidade dos BTCs, pois favorece o aparecimento de fissuras após o processo de hidratação (Azevedo et al., 2019, p. 336).

A principal novidade do presente estudo em relação aos estudos anteriores, se fundamenta na utilização de solo tropical argiloso siltoso formado por basalto, da cidade de Pederneiras, região do centro-oeste do estado de São Paulo, com predominância de argila e alto teor de finos, que geralmente não é utilizado pelo mercado, pois segundo a AASHTO esse solo é considerado pobre para compactação, uma vez que os solos comerciais mais comuns até o momento para produção de BTC são os granulares (arenosos).

Os autores Moura et al. (2021), Rivera et al. (2021), Yatawara; Athukorala (2021) e Kasinikota; Tripura (2021), demonstraram viabilidade técnica para BTCs produzidos com solos finos estabilizados com cimento, pozolânas ou feita a reestruturação da curva granulométrica com areia. No entanto, esses resultados não são consistentes especificamente para solo argiloso siltoso específico da região de Pederneiras com alto teor de finos e estabilizado com resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cimento, como uma alternativa aos tijolos tradicionais de argila queimada.

A Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBC), como material pozolânico, pode ser empregada na estabilização de BTC, em substituição ao cimento, contribuindo na redução de energia incorporada no seu processo de produção e na diminuição de emissões de gases poluentes (ALAVÉZ-RAMÍREZ et al., 2012 p. 297).

O cimento é um estabilizador amplamente utilizado no BTC devido a sua eficácia independentemente do tipo de solo, no entanto, do ponto de vista econômico e ambiental, o uso de cimento não é incentivado. A fabricação de cimento é relativamente cara e sua produção gera uma enorme quantidade de CO₂, o que é ameaçador para a sustentabilidade ambiental (Elahi et al., 2021; Bogas et al., 2017; Maia, 2016). Os autores Alavéz-Ramírez et al. (2012, p. 296) e Fairbairn et al. (2010, p. 1.864) expõem que a produção de cimento envolve emissões significativas de CO₂,

os mesmos autores ainda mencionam que cada tonelada de cimento produz aproximadamente uma tonelada de CO₂, e apontam a indústria de cimento como responsável por cerca de 5% das emissões globais, contribuindo assim para mudanças climáticas, segundo o relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) de 2021 a concentração na atmosfera do dióxido de carbono é a mais elevada dos últimos dois milhões de anos.

Autores como Cottrell et al. (2021); Jordan et al. (2019); Sekhar et al. (2018); Costa (2017); Kazmi et al. (2016); Alavéz-Ramírez et al. (2012); Lima et al. (2012); Hossain e Mol (2011); Fairbairn et al. (2010); Cordeiro et al. (2009) e Ganesan et al. (2007) demonstram que a substituição de cimento na estabilização do solo por subproduto é altamente desejável, especialmente se forem utilizados resíduos disponíveis localmente, contribuindo com construções mais sustentáveis.

Alguns resíduos foram estudados como material pozolânico, por exemplo, a cinza de casca de arroz foi investigada por Hany et al. (2021); Yatawara; Athukorala (2021); Rocha et al. (2021) e Ferreira; Cunha (2017). A cinza volante foi objeto de estudo de Elahi et al. (2020), Islam et al. (2020) e Minguela (2017). A escória granulada de alto forno, objeto de estudo de Sekhar; Nayak (2018) e Seco et al. (2017).

Fairbairn et al. (2010 p. 1.865) mencionam o Brasil como maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol; 45% da produção da cana-de-açúcar é destinada à fabricação do açúcar e ração animal, enquanto os outros 55% são reservadas à produção de etanol. Os mesmos autores apontam o bagaço da cana-de-açúcar como um subproduto importante da indústria da cana-de-açúcar, sendo a maior parte do bagaço queimado para produzir eletricidade na fábrica de etanol. Lima et al. (2012, p. 829) relatam que a cinza que permanece após a queima é o último resíduo gerado pela cadeia de cana-de-açúcar e que são gerados 25 kg de cinzas por tonelada de bagaço queimado.

Os autores Lima et al. (2012) e Cordeiro et al. (2009) alegam que o setor sucroalcooleiro ainda busca soluções para descartar os resíduos das cinzas, que são descartados em aterro ou utilizados como fertilizante nas plantações, no entanto, as cinzas não possuem nutrientes minerais adequados para esse fim, devido ao seu baixo índice de potássio e sua concentração considerável de metais pesados.

Segundo Alavéz-Ramírez et al. (2012) a maioria dos trabalhos relacionados à CBC se concentrou em seu uso como substituição parcial do cimento no concreto, os

autores ainda mencionam que essa substituição de cimento por CBC tem grande potencial para uso em outras aplicações.

Portanto, com o interesse renovado na terra como material de construção, devido às preocupações com a produção de materiais de construção mais sustentáveis, é apropriada a realização de pesquisas de produção de BTC com o uso da CBC, pois possibilita uma solução sustentável para descarte da CBC, a redução do consumo de cimento e de energia incorporada no processo e contribui com a diminuição de emissão de poluentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar se a substituição parcial de cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar produz blocos de terra comprimida similares aos confeccionados com cimento Portland em relação aos valores de desempenho físico e mecânico estabelecidos pela NBR 8491 (2012).

1.1.2 Objetivos específicos

- Beneficiar por moagem e queima a cinza de bagaço de cana-de-açúcar e avaliar o seu índice de atividade pozolânica pelo método físico com cimento Portland;
- Avaliar em termos de resistência e durabilidade a adequação de solo argiloso siltoso, com alto teor de finos - pobre para compactação – para produzir BTCs estabilizados com cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar;
- Determinar o coeficiente de condutividade térmica dos blocos de terra comprimida produzidos com cimento e cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação será estruturada em 5 seções, com múltiplas subseções para atender as necessidades de fundamentação teórica e prática da pesquisa.

Seção 1: Introdução - apresentação do objeto de estudo e justificativa da importância da pesquisa, como também a apresentação dos objetivos gerais e específicos.

Seção 2: Revisão Bibliográfica - fundamentação teórica por meio de revisão de literatura. Buscou-se identificar publicações relevantes para os temas tratados, por intermédio de quatro bases de dados - Scopus, Web of Science, Scielo e BDTD - as pesquisas foram segmentadas nas seguintes perspectivas: apresentação dos fatores pertinentes da produção de bloco de terra comprimida; caracterização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico e seu uso na produção de BTC; identificar métodos normativos e seus parâmetros de produção de BTC; a influência da energia de compactação aplicada na qualidade dos blocos, e por fim, a avaliação de desempenho físico, mecânico e de durabilidade e condutividade térmica de BTC.

Seção 3: Materiais e Métodos - exposição dos aspectos metodológicos, como os procedimentos de coleta e caracterização dos materiais, manufatura dos blocos e os ensaios tecnológicos.

Seção 4: Resultados e discussões - apresentação dos resultados, análise e discussões.

Seção 5: Considerações finais - apresentação das conclusões do trabalho.

Além disso, no fim do texto são exibidas sugestões para futuras pesquisas e as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo de revisão bibliográfica é estruturado de acordo com o procedimento metodológico de revisão de bibliografia PRISMA (2020) adaptado, que está apresentado com maiores detalhes na seção de métodos. As próximas subseções deste capítulo são dedicadas ao panorama atual das pesquisas em Blocos de terra comprimida, apresentando os diferentes parâmetros que influenciam a sua produção - o solo, os aglomerantes, e as normas técnicas. Além de métodos de caracterização da Cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico e sua aplicação em Blocos de terra comprimida.

2.1 Produção de Bloco de Terra Comprimida (BTC)

Os Blocos de terra comprimida (BTCs) são essencialmente adobes - um dos primeiros elementos de estruturas fabricadas pelo homem - porém produzidos utilizando compactação mecânica, o que lhes confere inovação para materiais de construção de alvenaria (Figura 1). A terra moldada e compactada é usada desde 8300 a.C. como material de construção para a antiga cidade de Jericó, onde atualmente é a Jordânia (ASTM E2392/E2392M-10, 2016).

Figura 1 - Construção com bloco de terra comprimida



Fonte: Jacob Snavelv. Disponível em: <https://www.rammedearthworks.com/modern-napa-rammed-earth-block-residence/4>. Acesso em jul. 2021.

Segundo a ASTM E2392/E2392M-10 (2016, p.3) com o desenvolvimento de novos materiais, os sistemas de construção em terra caíram em desprestígio em partes do mundo onde eram comumente usadas. Porém, a construção em terra vem experimentando um renascimento no mundo industrializado impulsionado por inúmeros fatores, dentre eles o avanço tecnológico, em 1952 chegou ao mercado a prensa CINVA-RAM, a primeira prensa projetada especialmente para produção de BTCs. Durante os anos 80, a tecnologia atraiu a atenção das indústrias da construção em todo o mundo, surgindo uma nova gama de equipamentos de produção, incluindo cadeias de produção industrial de alta velocidade (CDI e CRAterre-EAG / ODA, 1998).

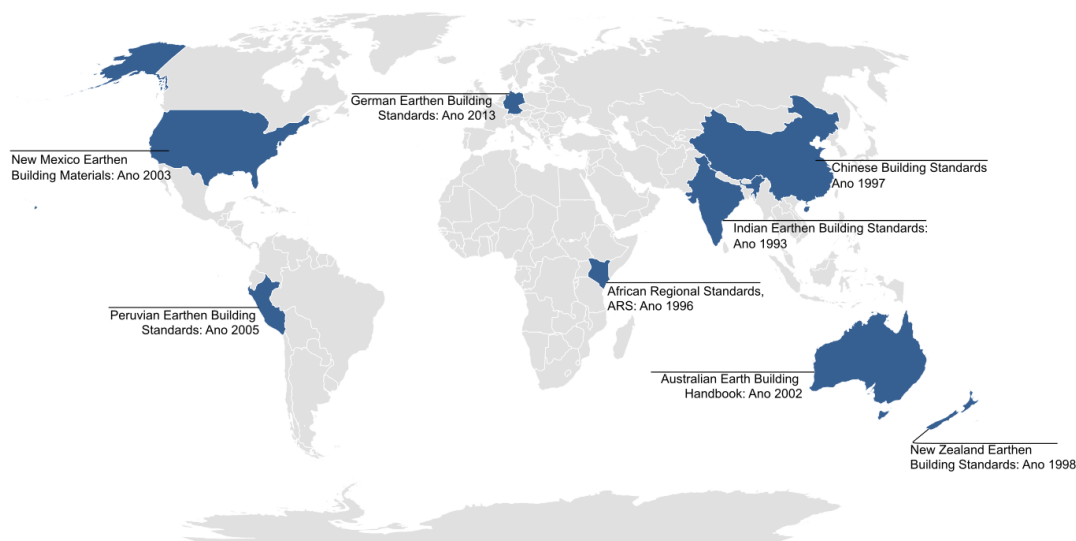
Com as cobranças dos códigos de construção por moradias sustentáveis, que atendam os parâmetros de eficiência energética e emissões de CO₂, torna-se cada vez mais necessário promover técnicas de construção com menor impacto ambiental.

Elahi et al. (2021) fizeram um estudo comparativo entre o BTC estabilizado com 5% de cimento e 20% de cinza volante e o tijolo queimado em relação ao consumo de energia e emissões de CO₂. O consumo total de energia para construção de uma parede de 3 metros de comprimento, 3 metros de altura e 0,25 metros de espessura com BTC aproximou-se de 839 kWh, já com o tijolo queimado apresentou um consumo de 3188 kWh. O resultado indica um consumo de energia muito maior para os tijolos queimados, já que esses precisam passar por tratamento térmico em fornos.

Referenciando o mesmo estudo, em relação ao aquecimento global, as emissões de dióxido de carbono na produção da parede (3x3x0,25) feita com BTC são emitidos 221,9 kg de CO₂, enquanto que para a produção da mesma parede com tijolo queimado são 1088,3 kg de CO₂, o que mais uma vez revelou a vantagem de usar o BTC em relação ao impacto ambiental.

Segundo a ASTM E2392/E2392M-10 (2016, p.4) os códigos de construção são ferramentas importantes para aplicar a técnica de forma confiável, assim nas últimas décadas foram lançados um grande número de códigos, diretrizes e normas de construção de terra, em todo o mundo, a Figura 2 apresenta os principais códigos de construção em terra.

Figura 2 - Códigos de construção em terra



Fonte: ASTM E2392/E2392M-10. Adaptado pelo autor (2021).

Em suma, esses documentos fornecem orientações sobre construção em terra para arquitetos, engenheiros, colaboradores de construção e agências reguladoras.

Para fabricação de BTC, os códigos enfatizam a importância da distribuição do tamanho de partícula e os limites de consistência do solo, como uma etapa fundamental na avaliação de sua aptidão.

Em relação aos limites de consistência do solo, Rivera et al. (2020) demonstraram que solos com índice de plasticidade, entre 15% e 30% têm uma taxa de sucesso de estabilização de 69%, enquanto que solos com índice de plasticidade menor que 15% têm uma estabilização maior de 93%, que pode ser aumentada para 100% se o solo tiver uma porcentagem de argila/silte entre 21 e 35%. Por outro lado, um solo com índice de plasticidade acima de 30% afeta negativamente a estabilização.

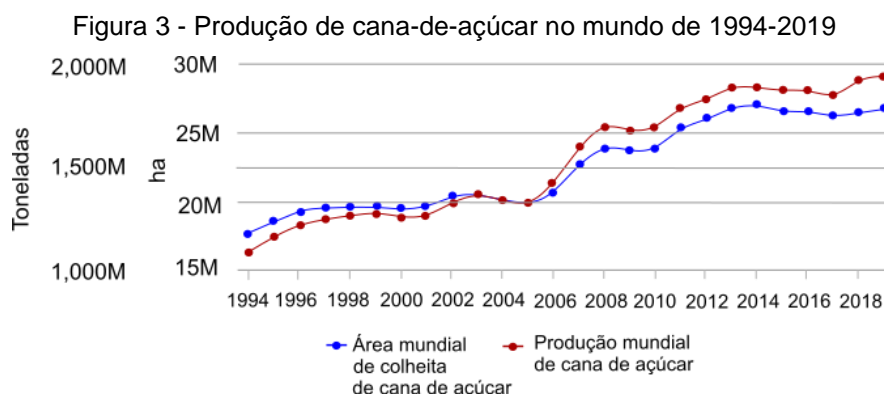
Assim como no estudo de consistência, a caracterização do tamanho dos grãos antes da fabricação é importante, se for necessário fazer correções, devem essas acontecer de forma antecipada, evitando retrabalhos e perda de material. Cottrell et al. (2021); Kasinikota; Tripura (2021); Azevedo et al. (2019); Serbah et al. (2018) utilizaram solo com predominância de argila em sua composição, porém um percentual elevado de argila é um grande problema para BTC, pois favorece o aumento de plasticidade e de absorção de água, e o aparecimento de microfissuras após o processo de hidratação devido a retração, que afetam a eficácia do produto final, de

modo que os autores no intuito da correção da curva granulométrica adicionaram areia à mistura.

Outra solução encontrada na literatura para solos incompatíveis com as normas técnicas é a estabilização por aglomerante hidráulico. O cimento Portland é o aglomerante mais utilizado para esse fim, pois aumenta a resistência dos blocos devido à presença de gel C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) que é formado devido à reação entre o cimento e o solo e esses géis preenchem os poros proporcionando maior resistência (ELAHI *et al.*, 2020 pág. 5). No entanto, a produção do Clínquer, matéria prima do cimento, envolve altas emissões de CO₂ ao meio ambiente, e atualmente com as preocupações ambientais, sobretudo com as mudanças climáticas, o cimento vem sendo substituído por subprodutos e resíduos com características pozolânicas, para substituição parcial ou total. Diante deste cenário, na próxima subseção serão apresentados os trabalhos que avaliaram a substituição do cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

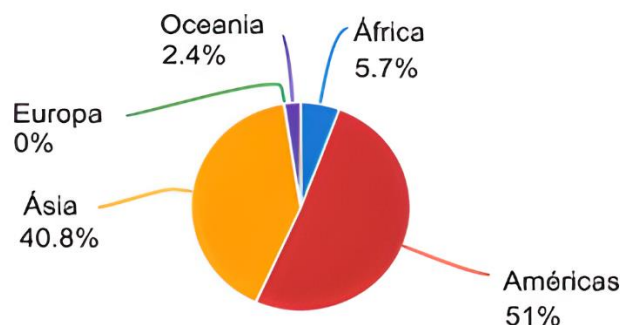
2.2 Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC)

A produção mundial de cana-de-açúcar em 2019 foi de 1.949.310.108 bilhão de toneladas (Figura 3). Com relação às regiões do mundo, pela média de produção de 1994-2019, o continente americano foi responsável por 51% da produção mundial (Figura 4) e o Brasil liderou a lista dos 10 maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo (Figura 5), responsável por produzir 538.879.130,38 toneladas, seguido pela Índia, China e Tailândia (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021).



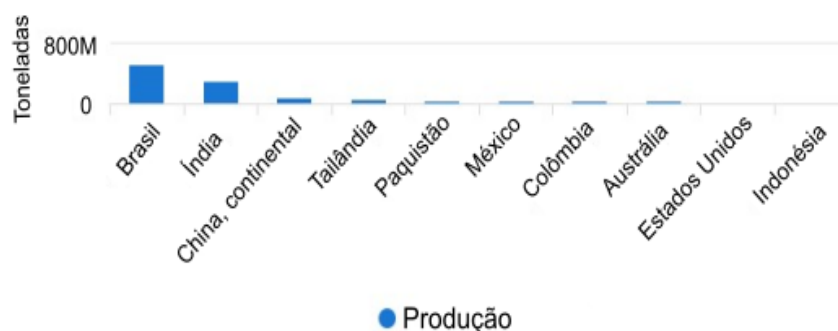
Fonte: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.

Figura 4 - Produção de Cana-de-açúcar por região, de 1994-2019



Fonte: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021

Figura 5 - Maiores produtores de Cana-de-açúcar no mundo, de 1994-2019



Fonte: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021

Segundo Lima et al. (2012) a cada tonelada de bagaço-de-cana são gerados 25 kg de cinzas, e de acordo com Neto et al. (2021) em 2018 aproximadamente 12,6 milhões de toneladas de cinzas foram geradas no mundo, sendo 4,9 milhões de toneladas somente no Brasil.

O bagaço da cana-de-açúcar é utilizado nas caldeiras para produzir energia elétrica para todas as etapas de produção da indústria sucroalcooleira, resultando a cinza como resíduo. Um grande problema enfrentado pelo setor é o descarte da CBC, pois essa cinza é o último resíduo da cadeia de produção, sem possibilidade de redução no seu processo produtivo.

Uma das práticas é utilizar as cinzas como fertilizantes, misturadas à torta de filtro da cana. O que eventualmente sustenta essa prática é o teor de 2% de potássio - principal nutriente necessário para a plantação de cana-de-açúcar – encontrado na CBC, porém esse teor é muito baixo em relação às doses altas necessárias, da ordem

de 80-150 kg de K_2O / hectare, que são utilizadas tanto para a cana-planta como para as soqueiras (AGEITEC; LIMA *et al.*, 2012).

A fim de aproveitar a cinza, o setor da construção civil vem avaliando a utilização da CBC como material pozolânico para substituição parcial, ou total do cimento Portland em matrizes cimentícia. Quando calcinada em temperaturas entre 600°C e 700°C, a CBC apresenta alta atividade pozolânica, que geralmente está associada à formação de grandes quantidades de sílica amorfa. Portanto, a CBC reage com a portlandita produzida durante a hidratação do cimento, resultando na formação de mais silicatos de cálcio hidratados - C-S-H (NETO *et al.*, 2021).

Nesse sentido, Moura *et al.* (2021) caracterizaram a CBC e utilizaram 10%, 20% e 50% em massa em substituição parcial do cimento na produção de tijolo solo-cimento. A cinza passou por beneficiamento de moagem e queima. Entre as composições estudadas, todas atenderam o critério de resistência à compressão da NBR 8491 (2012) que solicita média de 2 MPa. A substituição de 20% de cimento por CBC apresentou a maior resistência à compressão (3,73 MPa). A análise de Tukey indica que os grupos solo-cimento (referência – 100/0) e solo-cimento (substituição por CBC - 80/20) são estatisticamente iguais em um nível de 95% de confiança.

Jordan *et al.* (2019) adicionaram 0%, 30% e 40% de CBC sem tratamento de moagem e queima - utilizaram a cinza *in natura* – foi feito somente o peneiramento da cinza em uma peneira de malha de 4,8 mm e misturada ao solo para a fabricação do tijolo. A adição da cinza natural diminuiu a qualidade dos tijolos, os resultados foram de 1,88, 1,30 e 1,27 MPa para 0%, 30% e 40% de CBC respectivamente, não atingindo em nenhuma amostra os valores mínimos estabelecidos pela norma brasileira.

Ojeda-Farías (2020) realizaram substituições parciais de cimento por CBC, com tratamento de moagem, em porcentagens de 0%, 25%, 50% e 100%. Os resultados mostraram melhorias nas características de resistência à compressão para a substituição em 25%, comportamento semelhante a 100% de cimento, o que torna viável o uso da CBC como substituto parcial ao cimento.

Salim *et al.* (2014) investigaram o efeito da adição de 3%, 5%, 8% e 10% de CBC na resistência à compressão de BTC. A adição da cinza não apresentou prejuízo ao tijolo, ao passo que a adição de 10% de CBC obteve-se aumento de resistência à compressão de 65% em relação ao tijolo controle – 0% de CBC.

Ferrari et al. (2014) utilizaram a CBC em seu estado natural, modificando apenas o tamanho de diâmetro por peneiramento, utilizando a faixa granulométrica entre 0,006 mm e 0,6 mm de diâmetro, apresentando baixa atividade pozolânica. Foram produzidos traços de 6%, 7% e 8% de cimento com adições para cada tratamento de 0%, 10% e 20% de cinzas. Os resultados, neste contexto, apresentaram uma taxa ideal de incorporação de 10% de cinza, atendendo o valor mínimo recomendado pela norma NBR 8491 (2012), de 2,0 MPa.

Lima et al. (2012) produziram blocos com 6% e 12% de cimento além da terra, com níveis de adição de CBC de 0%, 2%, 4% e 8%. As cinzas foram trituradas até ser obtida dimensão máxima de 0,60 mm e apresentaram baixa atividade pozolânica, com capacidade de empacotamento. Os blocos com 12% de cimento e 8% de CBC atenderam o padrão brasileiro de valores acima de 2,0 MPa, com resultado de média de 2,89 MPa.

Frequentemente para a utilização da CBC em matrizes cimentícias é feito o beneficiamento de moagem e/ou queima, as pesquisas apontam que quanto menor for o tamanho da partícula maior é a atividade pozolânica da cinza (Moraes et al., 2021).

De acordo com Cordeiro et al. (2009) as cinzas apresentam cerca de 70% das partículas dos grãos entre 0,003 e 0,03 mm, faixa típica de tamanho de partículas de grande parte dos cimentos Portland produzidos no Brasil. Os autores ainda relatam que a temperatura mais apropriada para queima de CBC é de 600°C. As transformações ocorridas no bagaço durante o processo de queima estão apresentadas na (Quadro 1), de acordo com Macedo (2009).

Quadro 1 - Transformações da CBC no processo de queima

Temperatura °C	Transformações ocorridas
Até 100 °C	Perda de massa devido à evaporação da água
100 a 350 °C	Inicia a queima dos materiais com baixo ponto de ebulição
400 e 500 °C	Tem a maior perda de massa devido à oxidação do carbono
500 e 700 °C	Pode tornar-se rica em sílica amorfa
Acima de 700°C	Pode ocorrer a formação de quartzo
acima de 800°C	Toda a sílica se torna cristalina

Fonte: Macedo (2009)

Cordeiro (2006) menciona que a liberação de carbono aumenta o teor de sílica e conseqüentemente melhora a atividade pozolânica da CBC, e com a combinação da queima com a moagem, pode ser obtida CBC com alto teor de sílica amorfa, condição favorável para obtenção de cinzas com características pozolânicas. Ganesan et al. (2007), afirmam que para se obter sílica amorfa a temperatura de queima de resíduos agrícolas deve estar entre 600°C e 700°C.

A norma técnica brasileira NBR 12653 (2014) estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland. Para estar em conformidade ao requisito físico de índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland aos 28 dias deve-se utilizar o método de ensaio sugerido pela NBR 5752 (2014) que estabelece a produção de um traço de argamassa de controle com 100% de cimento e de outro traço com a substituição do cimento por 25% de material pozolânico e o resultado do IAP obtido deve ser igual ou maior que 90% em relação ao controle.

Molin et al. (2019) avaliaram o IAP da CBC com cimento Portland aos 28 dias, conforme o método da NBR 5752 (2014). O trabalho obteve excelente resultado de IAP de 120%. O autor relaciona o sucesso do experimento à moagem realizada em moinho de jato de ar, alcançando cinzas ultrafinas.

Mansaneira (2009) verificou a potencialidade do uso da CBC em substituição parcial ao cimento Portland, a CBC foi calcinada a 600°C por 6 horas e moída por 2 horas em um moinho contendo 118 bolas. A amostra atingiu IAP de 87,7%, e o autor relaciona o sucesso do resultado com a moagem.

De acordo com Vasconcelos (2013) a calcinação de 600°C a 700°C seguido de resfriamento lento é o melhor tratamento térmico, quando comparado ao resfriamento rápido, pois apresentou melhores resultados de IAP, alcançando valores de 81,38% e 82,44%, atendendo a norma vigente utilizada à época (NBR 5752, 1992), que determinava a substituição de cimento por CBC de 35% e IAP de 75%.

Sobre a requeima Ferreira (2003) demonstrou que foi eficaz para eliminação de matéria orgânica presente nas cinzas e para homogeneizar a massa específica. Os resultados apontaram que mesmo antes da requeima as cinzas apresentaram atividade pozolânica moderada, não sendo possível identificar a influência da requeima.

Sousa (2009) avaliou o IAP para amostra beneficiada por moagem em um moinho de bolas, com tempo de moagem padronizado de 4 horas. O ensaio de IAP

obteve resultado de 78,4%, atendendo a exigência normativa da edição da época. Soares (2010) atingiram IAP com cinza moída (muito finas) e alcançaram resistência à compressão dentro dos parâmetros de pozolânicidade, demonstrando mais uma vez a importância da redução do tamanho de partículas da CBC.

Desse modo o Quadro 2 demonstra a síntese de diferentes trabalhos sobre distintos tratamentos de cinza de bagaço de cana-de-açúcar para avaliação do índice de atividade pozolânico pelo método físico com cimento Portland.

Quadro 2 - síntese de trabalhos de beneficiamento da CBC

Estudo	Moagem	Queima	IAP (%)
Molin et al. (2019)	Moinho jato de ar	Não realizada	120,0
Moretti (2018)	Moinho de bolas, por 4 horas	Não realizada	73,3
Costa (2017)	Moinho de bolas, máximo de 3,5 horas	700 °C por 7h	207,7
Góis (2016)	Moinho de bolas, por 7 horas	600 °C por 3h	113,2
Pereira (2014)	Moinho de bolas, por 50 minutos	Forno não controlado, 24 horas	86,0
Vasconcelos (2013)	Moinho de bolas, tempo decorrido até alcançar massa específica de 400m ² /kg	600 °C por 3h	81,4
Soares (2010)	Moinho de bolas, por 12 horas	600 °C por 4h	≅ 90,0
Mansaneira (2009)	Moinho de bolas, por 2 horas	600 °C por 6h	87,7
Sousa (2009)	Moinho de bolas, por 4 horas	Não realizada	78,4

2.3 Métodos para produção de BTC

Com os materiais caracterizados e as proporções de mistura definidas, a próxima etapa é destinada a preparação de BTC, o processo de produção é desenvolvido seguindo recomendações normativas (Tabela 1). Os materiais misturados são transportados para moldes que variam de dimensões e geometria, influenciados pela máquina de compactação ou pela recomendação normativa (Figura 6).

Figura 6 - Diferentes geometrias de BTC



Fonte: Cottrell *et al.* (2021)

No Brasil, a NBR 8491 (2012) e NBR 10834 (2012) apresentam os requisitos para tijolo e bloco de solo-cimento, a NBR 8492 (2012) e NBR 10836 (2012) relatam o método de ensaio de determinação da resistência à compressão e de absorção de água. A NBR 10833 (2012) demonstra o processo de fabricação de tijolo maciço e de bloco vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica ou mecânica. As normas brasileiras deixaram de executar o ensaio de durabilidade por congelamento e degelo, uma vez que não há região brasileira onde esse efeito ambiental tenha peso considerável (ABCP, 2004).

Tabela 1 - Parâmetros de produção de BTC

Norma	Solo		Estabilizador	Dimensões (mm)	σ (MPa)	AA. (%)	MS.
NBR 10833 (2012) NBR 8491 (2012) BRASIL	LL: $\leq 45\%$	IP: $\leq 18\%$	Cimento	Tipo A: 200X100X50	Média $\geq 2,0$	Média ≤ 20	Nada consta
	100% $\leq 4,75$ mm 10% a 50% $\leq 0,075$ mm			Tipo B: 240X120X70	Individual $\geq 1,7$	Individual ≤ 22	
UNE 41410 (2008) ESPANHA	25% \geq LL \leq 35%	3% \geq IP \leq 25%	Cimento, Cal e Gesso $\leq 15\%$	Fabricante deve determinar, de acordo com a UNE- EN 772-16:2001	BTC-C1: 1,3 BTC-C3: 3,0 BTC-C5: 5,0	Nada Consta	6 ciclos: sem fissura, rachadura, inchaço, furos, fragmentos e eflorescência
	argila: $\geq 10\%$ matéria orgânica $\leq 2\%$ e sais solúveis $\leq 2\%$						
XP P13- 901(2001) FRANÇA	25 \geq LL \leq 50	2,5 \geq IP \leq 29	Ligante hidráulico, atender as normas NF P 15- 300 e NF P15-301	mais comuns 295x140x95	Seco BTC 20 \geq 2 BTC 40 \geq 4 BTC 60 \geq 6	Nada consta	Nada consta
	Cascalho: 0-40% Areia: 25- 80% Silte: 10-25% Argila: 8-30%			220x220x95	Úmido BTC 20 \geq 1 BTC 40 \geq 2 BTC 60 \geq 3		

Tabela 1 - Parâmetros de produção de BTC – Continuação

NZS 4298 (1998) NOVA ZELÂNDIA	Nada consta	Cimento ≤ 15%	290-300x140x90- 102	≥ 1.3 ≥ 3.2	Nada consta	6 ciclos: sem fissura, rachadura, inchaço, furos, fragmentos.
SLS 1382-1 (2009) SRI LANKA	IP ≤ 12	Cimento	230x110x75 240x115x90 290x140x90 220x140x130 220x220x130	Seco: Grau 1: ≥ 6 Grau 2: ≥ 4 ≤ 6 Grau 3: ≥ 2,8 ≤ 4	< 15%	Nada consta
	Areia + cascalho > 65% silte 5% - 20% argila 10% - 15%			Úmida: Grau 1: > 2.4 Grau 2: > 1.6 ≤ 2.4 Grau 3: > 1.2 ≤ 1.6		
BIS IS 1725 (2013) ÍNDIA	LL ≤ 30	Cimento Cal	190X90X90 190X90X40 290X190X90 290X140X90 240X240X90	3.5	≤ 18	Nada consta

2.4 Energia de compactação aplicada

A energia de compactação aplicada na fabricação de BTC é importante, pois influencia a resistência dos blocos. Hany et al. (2021) demonstraram essa questão através de duas pressões de compactação diferentes, de 9 MPa e 16 MPa. Foi demonstrado que o bloco compactado com 16 MPa apresentou melhores resultados.

Elahi et al. (2021) prepararam blocos com cinco energias de compactação diferentes, e com o acréscimo da energia de compactação, de 0,326 MPa para 0,761 MPa, aumentou a densidade das amostras de 4 a 9% e a resistência à compressão foi melhorada significativamente de 15 a 29%.

Bruno et al. (2017) aplicaram uma elevada energia de compactação de 100 MPa e obtiveram como resultado blocos com resistência à compressão de 14,6 MPa, resultado significativo se for comparado aos valores exigidos pelas normas técnicas disponíveis por toda parte do mundo. Os autores também relataram que a rigidez e resistência do bloco tendem a crescer à medida que o tempo de carga durante a fabricação aumenta em até 20 minutos. Para tempos de estabilização mais longos a rigidez e a força permanecem praticamente inalteradas. Isso sugere que, embora um tempo de consolidação muito longo seja geralmente desnecessário, uma compactação rápida de apenas alguns segundos, como acontece frequentemente na prática de fabricação atual, não pode garantir as melhores propriedades mecânicas.

Cottrell et al. (2021) projetaram uma prensa com um cilindro hidráulico posicionado abaixo da placa da base para medir a quantidade de pressão de compactação aplicada ao bloco durante a compressão. Os autores avaliaram qualitativamente os blocos em pressões diferentes:

- De 0,00 a 0,50 MPa: apresenta excessos de rachaduras, fissuras, vazios superficiais e sinais claros de compactação incompleta ao longo do comprimento, largura e profundidade.
- Para energia de 0,50 a 1,00 MPa: os blocos apresentaram acabamento de superfície liso nas laterais, poucas rachaduras superficiais observadas na parte inferior e superior dos blocos e ligeiros sinais de compactação incompleta.
- Quando compactados com 1,00 a 1,50 MPa: o acabamento se apresentou liso em todas as faces e uma boa uniformidade ao longo do comprimento largura e profundidade.

- Foi observado que ao compactar com 1,50 a 2,00 MPa o operador da prensa manual de compactação não consegue abaixar manualmente o braço da alavanca sem dificuldade.

De modo geral, os estudos utilizaram uma carga de no máximo 5 MPa, que são condizentes com as prensas manuais, mecânicas ou hidráulicas disponíveis no mercado.

2.5 Desempenhos mecânico, físico, térmico e de durabilidade

Para avaliação da viabilidade técnica de produção de BTC são realizados ensaios tecnológicos mecânicos, físicos, térmicos e de durabilidade.

Para os testes mecânicos, de forma unânime, são realizados ensaios de resistência à compressão. Em relação aos ensaios físicos são realizadas análises dimensionais, ensaios de densidade e de absorção de água, determinadas as propriedades térmicas, além dos testes de durabilidade, por exemplo, os ensaios de ciclo de molhagem e secagem, de resistência à erosão, entre outros.

2.5.1 Desempenho mecânico: resistência à compressão

A resistência à compressão dos BTCs é medida em uma unidade de alvenaria - blocos cortados ao meio e superpostos por argamassa - ou blocos inteiros (unidades individuais) Figura 7 (ARSÈNE et al., 2020).

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão: unidade de alvenaria e unidade individual



Cavalcanti Filho (2016)

Fonte: Jose; Kasthurba (2021)

O ensaio de resistência à compressão úmida e seca é conduzido com o bloco entre as placas de carregamento com folhas de madeira compensada ou placas de

aço que variam de 9 mm a 15 mm de espessura, para garantir uma carga distribuída uniformemente pela amostra.

Para o ensaio de resistência à compressão a seco, as amostras são secas em estufa até atingirem a massa constante e para o ensaio de resistência à compressão úmida, as amostras são imersas em água de 6 h a 24 h, dependendo de cada norma técnica.

Cottrell et al. (2021) utilizaram o segundo modelo, avaliaram 3 blocos por traço na resistência à compressão usando uma máquina de ensaio universal Losenheim 1000 kN. A carga foi aplicada a uma taxa de 0,05 MPa/s, até a falha do bloco. A deformação foi medida e registrada por medidores integrados na máquina de teste universal, esse procedimento de ensaio foi realizado de acordo com a norma BS EN 772-1 (2015).

Uma observação importante desta norma é que para blocos com rebaixo tendo uma área de carga líquida de mais de 35% da face da base não precisam ser preenchidos, diferentemente da norma brasileira NBR 8492 (2012) que determina que o rebaixo deva ser completado. Especificamente nesse trabalho os rebaiços não foram preenchidos, pois a área líquida carregada do bloco foi calculada em 78%.

De acordo com Elahi et al. (2020) a resistência à compressão é uma propriedade significativa para qualquer unidade de alvenaria, não só indica a resistência, como também é uma medida para avaliar a densidade e porosidade.

O teste de resistência à compressão realizado por Elahi et al. (2020) foi realizado de acordo com ASTM D5102 (2009). Foram utilizadas duas placas de aço em ambas as extremidades para garantir um contato e carregamento uniforme. A resistência é obtida dividindo a carga máxima que causa a falha dos blocos pela área dos blocos.

Além disso, Rivera-Gómez et al. (2021) e Teixeira et al. (2020) observaram uma correlação direta entre os resultados da densidade aparente seca do BTC e o seu desempenho mecânico, uma maior densidade obtida pela compactação aumenta significativamente a resistência à compressão dos blocos, no entanto os autores ressaltam a atenção com a retração do solo e problemas de cura.

Hany et al. (2021) realizaram o ensaio dos blocos em três casos: conforme recebido, seco em estufa até peso constante e úmido por imersão em água por 24 h. Os ensaios foram conduzidos seguindo o código Egyptian code for rammed earth, part. 1 (2016). Os blocos secos tiveram maior resistência à compressão que os

recebidos em cerca de 4% a 29%, isso pode ser devido à remoção de água. Para os blocos úmidos, houve uma diminuição de 2,5% a 41% em comparação com os recebidos.

Jose; Kasthurba (2021) conduziram o ensaio de acordo com especificações da norma indiana IS 3495 - Parte 1. Antes do ensaio, as amostras ficaram imersas em água por 24 horas, em seguida cada amostra foi colocada entre as placas de carregamento com folhas de madeira compensada de 9 mm de espessura em ambas as faces de carregamento. A carga foi aplicada a uma taxa de 14 N/mm²/min.

Sekhar; Nayak (2018) avaliaram a resistência à compressão com blocos secos e molhados. Após 28 dias de cura, as amostras foram mantidas imersas em água por 2 dias, depois as amostras foram colocadas na máquina de ensaio de compressão, em ambas as superfícies do bloco foram colocadas placas de ferro de 10 mm de espessura antes da aplicação da carga. O ensaio de resistência à compressão utilizou uma prensa hidráulica com capacidade de 300 kN, acoplada a um sistema de controle hidráulico, conforme NP EN 772-1 (2002).

Para o ensaio, foram utilizados dois transdutores, um pertencente à prensa e outro externo para medir o deslocamento vertical, também se usou controle de deslocamento, com velocidade de carga regular de 0,5 kN/s. O experimento consistiu em aplicar uma carga compressiva crescente até que a carga atingisse 40% a 50% do valor de falha após registrar o pico máximo de carga; seis amostras foram testadas para avaliar a resistência à compressão dos BTCs.

Cavalcanti Filho (2016) realizou o ensaio de resistência à compressão de acordo com os procedimentos descritos pela norma NBR 8492 (2012), no qual os tijolos foram cortados, sobrepostos e ligados por uma camada de argamassa, na sequência capeados por uma pasta de 2 mm a 3 mm, para nivelar suas faces, para haver um perfeito contato entre as superfícies de trabalho. Segundo a mesma norma, os corpos de prova devem ser imersos em água antes do ensaio por no mínimo 6 h antes. A aplicação da carga deve ser uniforme e à razão de 500 N/s. Método de ensaio realizado por Samson (2016), Marques (2015), Góis (2012), Milani (2005), Grande (2003), Ferreira (2003).

Portanto, para obter um bom resultado de resistência à compressão, devem ser atribuídas várias medidas de controle, por exemplo, no momento do ensaio deve ser observado o excelente nivelamento das faces dos blocos para obter um ótimo

contato com as placas de apoio do prato, bem como a aplicação da carga deve ser uniforme, atendendo as recomendações normativas.

O controle deve ser rígido principalmente durante a fabricação dos blocos, no projeto de mistura, no teor de água, na dosagem de material e na pressão de compactação (COTTRELL et al., 2021).

2.5.2 Desempenho físico: resistência à absorção de água

O indicador mais desafiador da durabilidade e estabilidade do BTC é a absorção de água, que afeta negativamente a resistência mecânica em condições úmidas (NSHIMIYIMANA et al., 2021).

Para avaliar a absorção de água, os blocos são secos completamente em uma estufa mantida entre 105°C e 110°C, em seguida suas massas são registradas, após a pesagem os blocos são imersos em água por 24 horas, então eles são pesados novamente para determinar a absorção de água. O limite máximo permitido varia de acordo com as normas técnicas, em geral de 15% a 20% (Sravan et al. 2017; Seco et al. 2017; Barros et al., 2020).

Os autores, Moura *et al.* (2021) e Ferrari *et al.* (2014) observaram uma diminuição da capacidade de absorção de água ao longo da substituição do cimento pela CBC. O aumento da adição de cinza nos corpos de prova reduziu a porosidade interna dos tijolos levando-os a uma menor capacidade de absorção de água. Ferrari *et al.* (2014) evidencia uma tendência de redução da capacidade de absorção de água dos tijolos com a evolução da idade, principalmente entre as idades de 14 e 21 dias.

González-López et al. (2018) demonstraram que a absorção de água está relacionada à quantidade e ao tipo de estabilizadores. As amostras estabilizadas com cal absorveram quantidades semelhantes de água mesmo com diferentes cargas de compactação. Em contrapartida, as amostras estabilizadas com cimento absorveram menos água, e a ação de compactação com maior força resultou em um decréscimo de até 38%.

Igualmente observado por Sekhar e Nayak (2018) no qual a absorção de água diminui com o aumento do teor de cimento. Isso ocorreu devido à redução dos espaços vazios entre as partículas de solo pela hidratação do cimento. Os autores ainda relatam que a diminuição da absorção de água dos blocos estabilizados deve-se às interações do cimento com os silicatos de alumínio no solo para formar produtos

cimentícios, que conseqüentemente unem as partículas do solo e endurecem com o tempo, reduzindo assim a interconectividade dos vazios.

Seco et al. (2017) observaram diferença significativa para os valores de absorção de água, que diminuíram com o aumento da porcentagem de areia, conforme aumentou a porcentagem de areia nas amostras, a absorção capilar de água foi mais rápida. Mas como a areia tem uma afinidade menor com a água em comparação à argila, a quantidade total de água absorvida foi menor.

Santos et al. (2020) observaram que o solo argiloso absorve mais água, em uma mistura argilosa foi necessária uma maior quantidade de água, o que também resultou em uma porosidade maior, no entanto houve uma ligeira diminuição na absorção de água quando o teor de cimento aumentou no solo. Lavie et al. (2020) reduziram a absorção de água do solo com a substituição de argila por agregados de menor absorção de água.

Outro fato observado sobre o teste de absorção de água pelos autores Gutiérrez-Orrego et al. (2017) é que a absorção de água não variou de forma detectável quando o tempo de imersão foi aumentado de 24 h para 96 h – houve apenas um aumento de absorção de água de 1% no período de 24 h para 96 h de imersão em água.

Por fim, vale ressaltar que a capacidade de absorção de água dos BTCs não é afetada apenas pelo tipo e quantidade de estabilizadores, mas também o tipo de solo, além dos parâmetros de produção, como a pressão de compactação, densidade e as condições de cura, portanto, a capacidade final de absorção de água dos blocos pode ser controlada pela otimização da produção inicial e condições de cura (Nshimiyimana et al., 2020; Jordan et al., 2019; França et al., 2018).

2.5.3 Desempenho físico: durabilidade

A durabilidade dos BTCs é outra propriedade importante que precisa ser investigada para avaliar a adequação dos blocos para serem usados como materiais de construção. Especialmente para o uso em locais com alta agressividade ambiental, a análise da propriedade de durabilidade é essencial (Elahi et al., 2020).

Referente aos estudos de durabilidade Kasinikota; Tripura (2021) realizaram o ensaio de molhagem e secagem, que foi executado de acordo com a norma IS 1725 (2013) que constitui um ciclo de doze repetições, no qual a perda de massa é determinada com base no peso seco inicial e final. Após a conclusão do ensaio, os

blocos foram examinados quanto a quaisquer furos, fissuras e rachaduras. Todos os blocos apresentaram pequena perda de partículas superficiais e danos nos cantos. Observação semelhante nos estudos de Nshimiyimana et al. (2021) que não identificaram degradação ou perda de massa ao longo dos ciclos de molhagem e secagem. Vilela et al. (2020), obtiveram valores de perda de massa de 0,24% à 0,37%.

Para analisar o efeito do envelhecimento acelerado no desempenho mecânico, Kasinikota; Tripura (2021) avaliaram os blocos após os ciclos de molhagem e secagem por ensaio de resistência à compressão, os resultados são superiores aos valores iniciais obtidos na cura ambiente de aproximadamente 37%. Esse fenômeno é atribuído à aceleração da hidratação do cimento, levando à produção de gel adicional de hidrato de silicato de cálcio (CSH) que melhorou ainda mais a rigidez da matriz dos blocos.

Rivera et al. (2021) e Seco et al. (2021) avaliaram BTC no ciclo de molhagem e secagem conforme a norma UNE 41410 (2008). Os resultados dos dois estudos após inspeção visual detalhada, não apresentaram nenhuma trinca, inchaço, perda de camadas ou qualquer outro defeito superficial. A boa qualidade dos blocos após o ensaio é atribuída à estabilização química do solo, e a cimentação de suas partículas foram muito eficazes, a ponto de a integridade física dos blocos não ser afetada pelas mudanças de volume intencionalmente induzidas pelo ensaio.

Azevedo et al. (2019) e França et al. (2018) utilizaram a norma brasileira NBR 13554 (2012) - na qual cada ciclo de molhagem e secagem dura 48h, devendo ser repetido por cinco vezes. A duração dos ciclos está correlacionada ao tempo médio de degradação dos materiais de construção em situações críticas de exposição ao ar.

A norma internacional ASTM D559/D559M-15 (Método de ensaio de molhagem e secagem para solo-cimento) determina que para solos argilosos, classificados como A-6 e A-7 pela ASHOTO, retém no máximo 3,5% de água no momento em que os blocos são moldados e a perda de massa dos blocos após o ensaio deve ser de 0% e 1,1% para teores de cimento 10% e 7% respectivamente. A ABCP ET-38 (2004) estabelece perda de massa máxima para esse mesmo tipo de solo de 7%. A norma brasileira NBR 13554 (2012) determina perda de massa inferior a 10%, pois valores maiores prejudicam a integridade visual e a estabilidade estrutural.

2.5.4 Desempenho físico: condutividade térmica

A condutividade térmica é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, na qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de $1\text{W}/\text{m}^2$, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 kelvin por metro² (NBR 15220-1, 2005).

Este parâmetro de medida é muito importante para o conforto térmico das edificações, sobretudo em países tropicais, onde é preferível manter a condutividade térmica dos materiais de alvenaria a mais baixa possível (HANY et al., 2021).

A condutividade térmica do BTC depende dos constituintes do solo, umidade e geometria do bloco (Saidi et al. 2018). Segundo Oke (1987) a faixa de valores de condutividade térmica para solos finos, como argila e silte é de 0,25 a 1,58 W/ (m.K), e a NBR 15220-2 (2005) no anexo B na tabela B.3 estipula valor de condutividade térmica de 1,00 W/ (m.K) para tijolos de barro com densidade entre 1600-1800 Kg/m³.

Jose; Kasthurba (2021) avaliaram a condutividade térmica dos BTCs utilizando o aparelho Hot Disk (TPS 500 S). Os autores relataram que a densidade dos blocos tem relação direta com sua condutividade térmica, os valores variaram de 0,9 a 1,1 W/(m.K).

Akinyemi et al. (2021) também utilizaram um Hot Disk. Os resultados apresentaram melhor desempenho térmico à medida que a proporção de cimento foi reduzida, a condutividade térmica mínima foi de 0,621 W/ (m.K) e a máxima de 0,632 (W/mK). Os autores relataram que existe uma forte conexão entre a resistência à compressão a seco e a condutividade térmica dos blocos. Essa observação se baseia no fato de que o tijolo com maior resistência à compressão a seco apresentou o menor desempenho térmico e o bloco com menor resistência à compressão a seco apresentou o maior desempenho de condutividade térmica, resultados também observados por Hany et al. (2021).

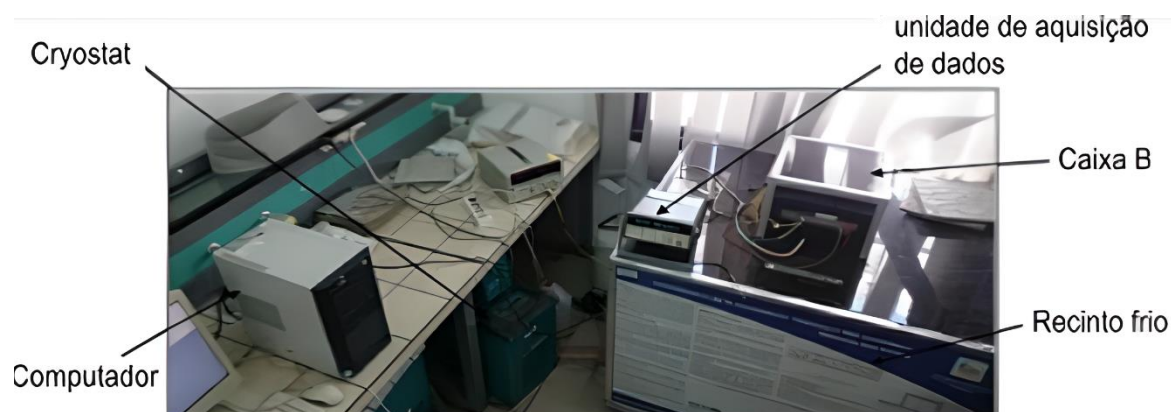
Narayanaswamy et al. (2020) e Bogas et al. (2019) mediram as propriedades térmicas usando o dispositivo ISOMET 2114, e uma sonda de superfície IPS 1105. A faixa geral de condutividade térmica para Narayanaswamy et al. (2020) foi de 0,74-1,38 W/(m.K). Bogas *et al.* (2019) obtiveram valores de: bloco seco 0,58-0,65 W/(m.K) e saturado 0,7-1,5 (W/mK). A influência mais evidente na condutividade térmica foi o tipo de agregado, quanto mais porosa a natureza do agregado, mais baixos foram os valores de condutividade térmica.

Vilela et al. (2020) utilizaram o método da câmara, que foi produzida com painéis de MDP (aglomerado de densidade média). Os resultados obtidos variaram entre 1,42 W/(m.K) e 1,59 W/(m.K), os blocos produzidos com maior densidade e menor índice de vazios obtiveram aumento da condutividade térmica.

Sore et al. (2018) produziram BTC com 8% de cimento e o resultado para condutividade térmica foi de 1,22 (W/mK). Os autores enfatizam que os resultados estão intimamente relacionados aos parâmetros físicos, particularmente a densidade e porosidade dos materiais estudados.

Saidi et al. (2018) utilizaram o método da caixa (Figura 8), utilizando molde, com dimensões de 27cm de comprimento x 27 cm de largura x 3 cm a 7cm de altura.

Figura 8 - Avaliação da condutividade térmica pelo método da caixa



Fonte: Saidi et al. (2018)

Os resultados mostram que a condutividade térmica dos BTCs depende do teor de cimento e densidade seca. A condutividade térmica para os blocos foi de 0,798, 0,801, 0,963, 1,077 e 1,1 W/ (m.K), e para teores de cimento de 0%, 5%, 8%, 10% e 12%, respectivamente.

Minguela (2017) atingiu um estado estacionário de transferência de calor com uma temperatura média de 60°C no interior e 25°C no exterior da caixa. A umidade relativa média fora da caixa foi de 45%. Os resultados apresentados pelo autor também mostraram a forte correlação entre a condutividade e a densidade.

Balaji et al. (2017) avaliaram a condutividade por instrumento de teste QTM-500, com base no método de fio quente, realizado de acordo com ASTM C1113-99. De acordo com a análise de regressão múltipla, o teor de cimento e da densidade seca tem uma influência dominante na condutividade térmica com um coeficiente de correlação de 0,740.

Os autores também avaliaram a condutividade térmica dos blocos em temperaturas variáveis de 25, 35, 45, 55 e 65°C. Conforme a temperatura do bloco aumentou, a umidade diminui, resultando em aumento da condutividade térmica dos BTCs.

2.6 Considerações sobre a revisão da literatura

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos resultados dos autores do referencial teórico para avaliação de resistência à compressão, absorção de água e condutividade térmica.

É importante mencionar que na tabela são apresentados estudos correlatos ao objeto da presente pesquisa, esses trabalhos não utilizaram a CBC como estabilizador Hany et al. (2021); Rivera-Gómez et al. (2021) e Jose; Kasthurba (2021) entretanto eles auxiliam no desenvolvimento do trabalho, principalmente com os resultados de condutividade térmica de BTC.

Em relação aos resultados de resistência à compressão, apresentados na tabela, quando o estudo avalia a resistência dos blocos seco e saturada, são apresentados somente os valores saturados, pois no Brasil o ensaio é dessa maneira, conforme orientações da NBR 8492 (2012).

Tabela 2 - Resumo de resultados de trabalhos de revisão da literatura

Estudo Ano	Dosagem	σ (MPa)				λ W/ (m.K)	A (%)			
		TR	10	20	50		TR	10	20	50
Moura et al. (2021)	Solo	TR	10	20	50	-	TR	10	20	50
	Cimento 10%	$\cong 4,0$	$\cong 3,3$	$\cong 3,7$	$\cong 2,2$		9,6	9,4	7,4	3,6
	CBC 10%, 20% e 50% (substituídos ao cimento)									
Jordan et al. (2019)	Solo: 100, 70 e 60%	0	30	40	-	0	30	40		
	Cimento constante	1,88	1,3	1,27		17,3	19,0	18,2		
	CBC: 0%,30% e 40% (substituídos ao solo)									
Ojeda-Farías et al. (2020)	Solo	0	25	50	100	-	-			
	Cimento 7%	3,02	2,86	1,93	0					
	CBC: 0, 25, 50 e 100% (substituição ao cimento)									

Tabela 2 - Resumo de resultados de trabalhos de revisão da literatura - Continuação

Salim et al. (2014)	Solo	0	3	5	8	10	-	-				
	CBC 0,3,5,8,10% (adição ao solo)	≈2,1	≈2,3	≈2,5	≈3,1	≈3,8						
Ferrari et al. (2014)	Solo	10		20		-	10		20			
	Cimento 8%	2,18		1,48			≈14,5		≈12,9			
	CBC: 10 e 20% (substituição ao cimento)											
Lima et al. (2012)	Solo	0	2	4	8	-	0	2	4	8		
	Cimento: 12%	3,13	2,77	2,62	2,89		11,9	12,2	11,5	12,1		
	CBC: 0,2,4 e 8% (adição ao solo-cimento)											
Hany et al. (2021)	Solo: 90 %	≈6,0				1,215	≈7,8					
	Cimento: 9%											
	Cinza casca arroz: 1%											
Rivera-Gómez et al. (2021)	Solo: 96,75%	3,85				0,530	-					
	Alginato: 3%											
	Fibra lã de ovelha: 0,25%											
Jose; Kasthurba (2021)	Solo	1	2	3	4	5	1 a 5	1	2	3	4	5
	Cimento: 8%											
	Látex de borracha natural: 1, 2, 3, 4 e 5% (adicionado à água)	3,51	3,53	4,40	4,10	3,8	0,9 a 1,0	18, 9	18, 7	18, 5	18, 2	17, 9

Os resultados apresentados na tabela acima demonstram que os blocos dosados com CBC apresentam resistência à compressão e resistência à absorção de água satisfatórias em relação a exigência da norma brasileira NBR 8491 (2012). O teor máximo de 25% de CBC e de 8% a 12% de cimento obtiveram os melhores resultados físicos e mecânicos Moura et al. (2021), Ojeda-Farías et al. (2020), Salim et al. (2014), Ferrari et al. (2014), Lima et al. (2012). Os bons resultados são atingidos desde que a cinza seja beneficiada por moagem e/ou queima. Blocos produzidos com a cinza *in natura*, sem o devido tratamento, diminui a qualidade dos tijolos, conforme apresentado no estudo de Jordan et al. (2019) não alcançando em nenhuma amostra os valores mínimos de resistência estabelecidos pela norma brasileira. Em relação à condutividade térmica, os valores de Hany et al. (2021) destoaram dos demais, devido à alta densidade dos blocos, obtendo valor de 1,215 W/(m.K) considerado elevado para blocos de terra comprimida, entretanto obteve bons valores de resistência mecânica de 6,0 MPa, valor 66,67% maior do que o recomendado pela norma brasileira NBR 8491 (2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo do trabalho foi construído dois importantes protocolos de atividades, denominados de revisão de literatura (PRISMA modificado) e programa experimental com as etapas especificadas na figura 10.

Nessa seção são apresentados os materiais e métodos que subsidiaram a realização do presente trabalho, tais como: planejamento das atividades, coleta e caracterização dos materiais, dosagem e manufatura, ensaios tecnológicos físicos, mecânicos e de durabilidade.

3.1 Bases de dados e palavras-chave

Para executar a busca de documentos que retratassem o objetivo do trabalho, averiguaram-se os termos e definições divulgados sobre blocos de solo-cimento na norma brasileira ABNT NBR 10834 (2013) que estabelece os requisitos para o recebimento de blocos de solo-cimento (BSC). Com essas informações preliminares foram elaborados conjuntos de palavras-chave para busca por artigos científicos, dissertações e teses nos bancos de dados eletrônicos: Scopus, Web of Science, Scielo e Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD).

Na Scopus e Web of Science a busca dos documentos foi filtrada para o período de 2017 a 2021, com as seguintes palavras-chave:

- Compressed earth block (CEB), Soil-cement brick (SB), Soil-cement block (SBL): variações de termos utilizados para análise de documentos sobre produção de bloco de terra comprimida.
- Compressed earth block AND sugarcane bagasse ash (CEB/SBA), Soil-cement brick AND sugarcane bagasse ash (SB/SBA), Soil-cement block AND sugarcane bagasse ash (SBL/SBA): utilizadas para encontrar documentos que avaliaram especificamente BTC com incorporação de CBC.
- Sugarcane bagasse ash AND pozzolan (SBAP): utilizadas para encontrar documentos que caracterizaram a CBC como material pozolânico.

Na Scielo não houve recorte para o período de publicação em função do número baixo de documentos encontrados. Por se tratar de uma base de dados brasileira, foram utilizadas as palavras-chave em português:

- Bloco de terra comprimida (BTC), tijolo solo-cimento (TSC), bloco solo-cimento (BSC): utilizadas para avaliar a produção de BTC de modo geral.

- Tijolo solo-cimento E cinza de bagaço de cana-de-açúcar (TSC/CBC), solo-cimento E cana-de-açúcar (SC/CA): utilizadas para avaliação de BTC produzidos com a CBC.

Na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações, assim como na Scielo, não houve recorte de período por ano de publicação e foram utilizadas as seguintes palavras-chave:

- Bloco de terra comprimida (BTC), tijolo solo-cimento (TSC), bloco solo-cimento (BSC): utilizadas para encontrar teses e dissertações sobre a produção de bloco de terra comprimida.
- Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar e pozolâna (CBCP): utilizadas para encontrar documentos que caracterizaram a CBC como material pozolânico.

Os resultados de número de trabalhos encontrados foram delimitados por filtros, de F1 a F6, apresentados no diagrama (Figura 9) modelo PRISMA adaptado (McKenzie *et al.* 2020):

F1 - Campos selecionados: título do artigo, resumo e palavras-chave;

F2 - Período de publicação: Scopus e Web of Science: 2017 a 2021. Scielo e BDTD: Sem restrições por período de publicação.

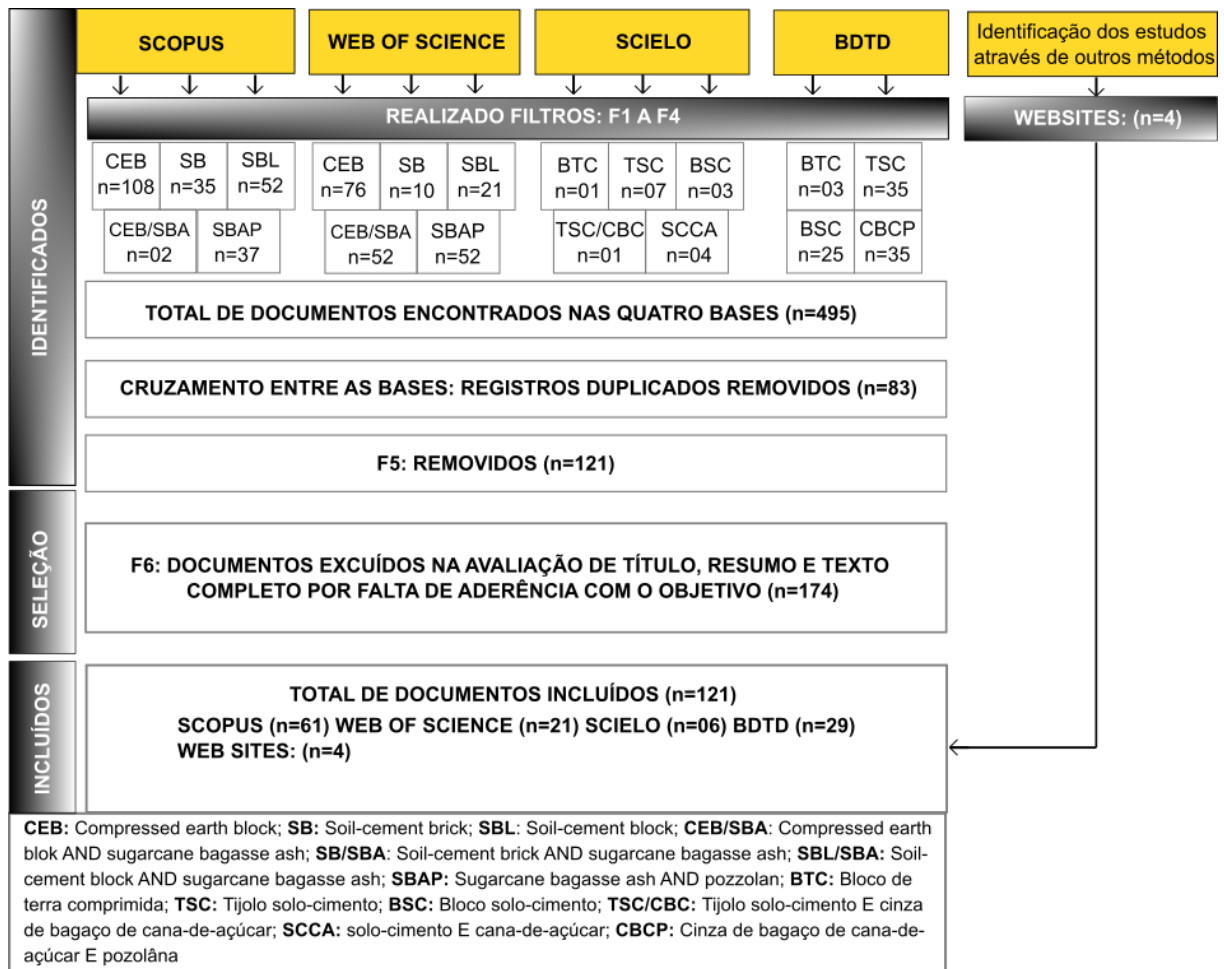
F3 - Tipo de documento: inclusão de artigos, dissertações e teses, e exclusão de trabalhos de conferências, capítulos de livros e revisões sistemáticas da literatura.

F4 - Área de conhecimento: trabalhos restritos às áreas de arquitetura, engenharia, ciência dos materiais, ciências sociais, artes e humanidades.

F5 - Classificação QUALIS: periódicos classificados como A1, A2, B1 e B2 pelo sistema brasileiro de avaliação da qualidade, QUALIS/CAPES, quadriênio 2013-2016.

F6 - Análise de elegibilidade: subtração de documentos por falta de aderência com o objetivo da pesquisa.

Figura 9 - Diagrama de resultados de documentos encontrados na literatura



Fonte: McKenzie *et al.* (2020), adaptado pelo autor (2022)

Motivos pelos quais os documentos sem aderência foram excluídos: avaliação de BTC com inclusão de fibras de madeira, papel Kraft, entre outros; Produção de paredes monolíticas; Substituição do solo por resíduo cerâmico, RCD, entre outros; Avaliação de mini paredes, desconsiderando a unidade; Análise econômica e social do material; Avaliação do conforto in loco; Avaliação de concreto: corrosão, carbonatação; utilização da cinza da folha da cana-de-açúcar.

3.2 Programa Experimental

Os ensaios de caracterização dos materiais e de testes destrutivos e não-destrutivos dos BTCs foram feitos nos laboratórios da FEB/UNESP, campus de Bauru.

Para realização da dosagem foram utilizadas as normas NBR 10833 (2012), NBR 12253 (2012) e ASTM D698 (2021). A NBR 10833 (2012) é direcionada para o procedimento de fabricação de tijolo e bloco solo-cimento de prensa manual ou

hidráulica. Essa norma determina a preparação de três traços de solo-cimento, e cada traço deve ter no mínimo 20 blocos (Figura 10), desse modo foram preparados três lotes de 20 unidades, com dimensões de 23x11x5,5 cm.

Os blocos foram ensaiados mecanicamente (compressão) e fisicamente (absorção de água) de acordo com a NBR 8492 (2012), e a partir dos resultados obtidos, foi feita a escolha do traço de referência que atendeu aos requisitos físicos e mecânicos prescritos na NBR 8491 (2012).

Para escolha dos teores de cimento para cada traço foi utilizada a NBR 12253 (2012), que estabelece os requisitos para a determinação da quantidade de cimento Portland capaz de estabilizar solos através da medida de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova. Essa norma sugere teores de cimento conforme a tabela de classificação do solo - HBR (Tabela 3). Os solos A4 segundo a HBR são classificados como siltosos e argilosos, com frações de grãos que passam pela peneira de 200 mm acima de 35%. Pelo fato de o solo aproximar-se da classificação A4 foi utilizada a recomendação normativa de 7% de cimento, e um traço pobre e outro rico em cimento para atender o estudo de dosagem da NBR 10833 (2012), por esse motivo, foram produzidos traços com 5%, 7% e 10% de cimento para encontrar o traço de referência.

Figura 10 - Diagrama de desenvolvimento das atividades em laboratório

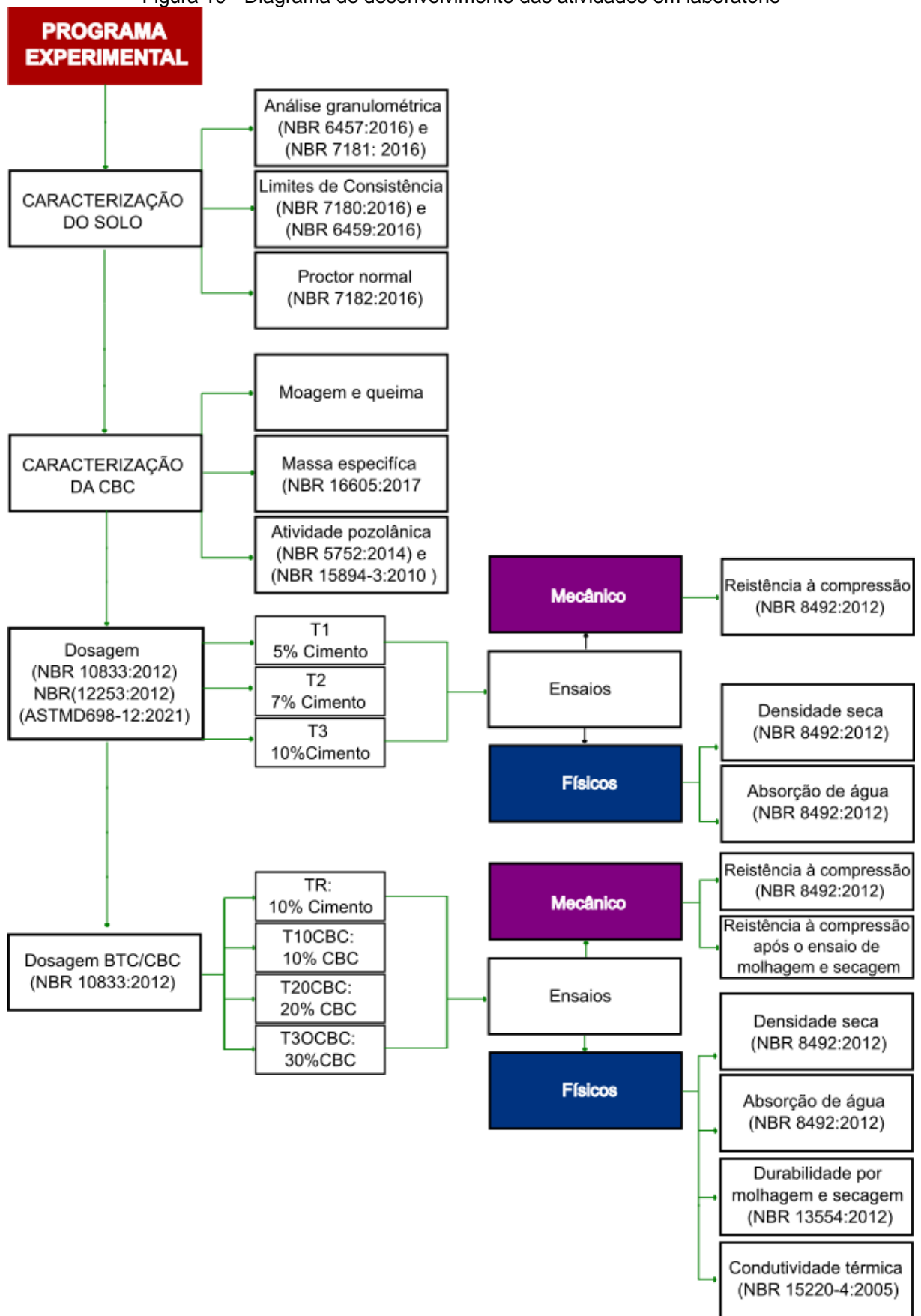


Figura 11 - Blocos produzidos no laboratório



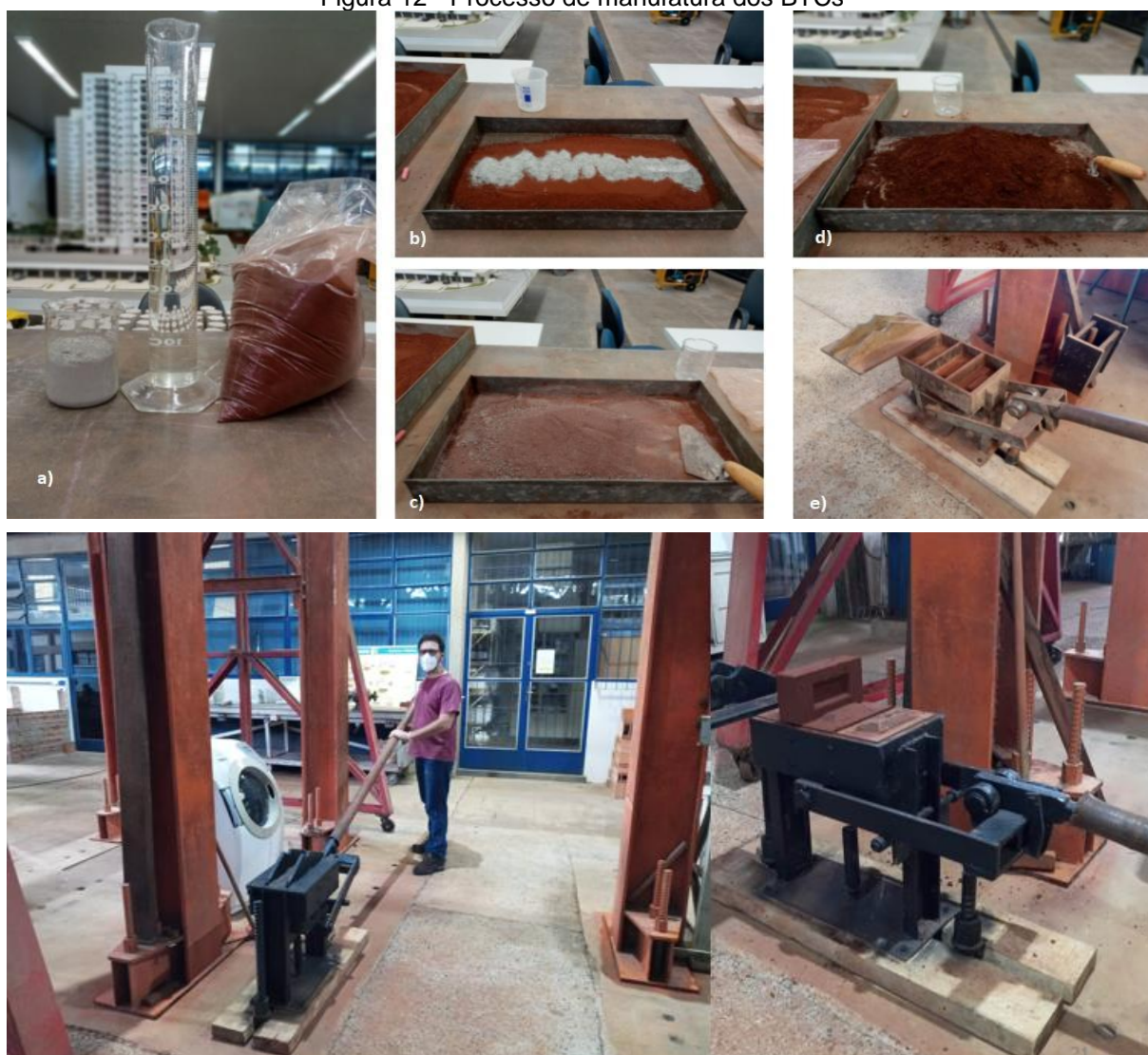
Tabela 3 - Teor de cimento sugerido para compactação pela NBR 12253 (2012)

Classificação do solo (HBR)	Teor de cimento (%) em massa
A1-a	4
A1-b	
A2	5
A3	7
A4	

Fonte: NBR 12253 (2012)

O solo antes de ser misturado com cimento foi destorroado e peneirado (peneira com abertura de 4,75 mm) para remoção de materiais estranhos, em seguida foi seco por 24 horas em estufa a 100 °C. A Figura 12 demonstra o processo de manufatura: (a) os materiais foram separados, (b) cimento foi adicionado ao solo, (c) homogeneizado, (d) a água foi adicionada até o teor ótimo e (e) o material foi lançado na prensa manual de compactação.

Figura 12 - Processo de manufatura dos BTCs



Após a avaliação física e mecânica das três dosagens, o teor de 10% de cimento foi escolhido como o traço de referência (TR), pois foi o teor que demonstrou atender os requisitos de absorção de água e resistência à compressão para os blocos. Segundo a ABCP em seu estudo técnico 45 de 2002, para o tipo de solo do presente estudo seria preferível utilizar 13% de cimento, no entanto, o estudo de dosagem inicial e o trabalho feito por Moura *et al.* (2021) confirmaram que a porcentagem de 10% de cimento para solo com alto teor de finos é o suficiente.

Foram produzidos outros 3 traços com CBC em substituição parcial ao cimento, nos teores de 10% (T10CBC), 20% (T20CBC), e 30% (T30CBC), conforme pode ser observado na Tabela 4. Nesta etapa foram produzidos 60 blocos por traço, sendo 20 blocos por idade, para serem avaliados por ensaios tecnológicos aos 14, 21, e 28 dias. Totalizando uma produção de 240 BTCs.

Tabela 4 - Detalhes das proporções de materiais por massa

Tratamento	Solo	Cimento	CBC	Água	Produção
	(g)	(g)	(g)	(g)	Unidade
TR	2160,0	216,0	0,0	594,0	60
T10CBC	2160,0	194,4	21,6	594,0	60
T20CBC	2160,0	172,8	43,2	594,0	60
T30CBC	2160,0	151,2	64,8	594,0	60

3.3 Energia de compactação aplicada

Para avaliar a energia de compactação dos BTCs produzidos foram preparadas 7 amostras cilíndricas com dimensões de 50x100 mm de solo com 10% de cimento (Figura 12). O consumo dos materiais foi calculado de acordo com o resultado do Proctor, para densidade máxima seca e teor ótimo de água. A energia de compactação foi calculada usando a Equação (1) fornecido pela ASTM D-698-12.

$$E_c = \frac{\text{No. decamadas} \times \text{No. degolpes por camadas} \times \text{peso do compactador (kg)} \times \text{altura da queda (cm)}}{\text{Volume domolde (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

Onde

E_c é a energia de compactação em Kg/cm²

A porosidade correspondente das amostras preparadas é calculada a partir da Equação (2).

$$n = 1 - \left\{ \left[\frac{\gamma_d}{1 + C + CBC} \right] \left[\frac{1}{G_{ss}} + \frac{C}{G_{sc}} + \frac{CBC}{G_{sCBC}} \right] \right\} \quad (2)$$

Onde

n é a porosidade em (%)

γ_d é a densidade seca do BTC

C e CBC é o teor de cimento e de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

G_s densidade especifica de cada matéria-prima (solo, cimento e cinza)

Figura 13 - Detalhes do ensaio de energia de aplicação



3.4 Materiais

3.4.1 Solo

O solo utilizado foi coletado na Pedreira de pedra basalto, Nova Fortaleza, localizada no município de Pederneiras, SP, coordenadas 22° 21' 34.160" S, 48° 47' 25.894"O. A decisão quanto à seleção deste solo considerou a necessidade de adotar um solo representativo da região do centro-oeste paulista, que é uma região caracterizada principalmente por solos arenosos. Após a coleta, o solo foi armazenado em sacos plásticos de 20 kg que foram guardados superpostos em paletes, no estoque do laboratório de construção civil. Uma amostra de solo foi avaliada no laboratório de mecânica dos solos para preparação dos ensaios de compactação e de caracterização, conforme a NBR 6457 (2016).

3.4.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada por uma combinação de sedimentação e peneiramento (Figura 13), conforme a NBR 7181 (2016). A sedimentação do solo foi realizada com a utilização de defloculante hexametáfosfato de sódio (45,7 g) com água destilada, em uma solução de 125 cm³, para evitar a sedimentação rápida. Após repouso de 12 h do material, a solução foi despejada no aparelho dispersor, na sequência foi transferida a dispersão para proveta e feitas as leituras com densímetro. Os grãos de tamanho acima de 0,074 mm foram classificados por peneiramento, com sete peneiras, desde peneira com diâmetro de 2,0 mm até a peneira mais fina de diâmetro de 0,074 mm.

Figura 14 - Análise granulométrica: sedimentação e peneiramento



3.4.1.2 Ensaio de consistência

O ensaio de consistência é a determinação dos limites de liquidez e plasticidade do solo (Figura 14).

O ensaio de determinação do limite de liquidez é realizado conforme a NBR 6459 (2016). Isto é, a concha apresentada na Figura 14 foi moldada após homogeneização do solo por 30 minutos, com consistência necessária para fechar a ranhura em 35 golpes. Na sequência a massa do solo foi dividida em duas partes com a ajuda do cinzel para abrir a ranhura e por fim, a concha foi golpeada contra a base pela manivela há duas voltas por segundo até a ranhura se unir a distância de 13 mm de comprimento, a fim de coletar uma pequena quantidade de material para determinar a umidade, conforme a NBR 6457 (2016).

Para a determinação do limite de plasticidade e para o cálculo do índice de plasticidade foi utilizada a NBR 7180 (2016), Figura 14 mostra que o solo em consistência plástica é rolado em uma placa de vidro, e se houver fragmentação na mesma geometria do gabarito de comparação - de diâmetro de 3 mm e comprimento de aproximadamente 100 mm – o material deve ser transferido a um recipiente para a determinação da umidade. Para obtenção do índice de plasticidade, foi utilizada a equação (3).

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

em que:

IP = índice de plasticidade;

LL = limite de liquidez;

LP = limite de plasticidade.

Figura 15 - Ensaio de limite de liquidez e plasticidade



3.4.1.3 Ensaio Proctor normal

Para determinação do teor de umidade ótimo e da massa específica aparente seca máxima quando compactada, foi utilizada a NBR 7182 (2016). A amostra foi preparada para ensaio com reuso do material, conforme a NBR 6457 (2016). Foi adicionada água destilada na amostra de forma a obter teor de umidade em torno de 5% abaixo do teor de umidade ótima presumível. Após a uniformização do material foi feita a compactação (Figura 15). Em seguida foi efetuada a pesagem do solo compactado e coletada uma pequena amostra de solo para tirar a umidade. Logo foi feito o destorroamento do corpo de prova por completo e o solo reutilizado para novos ciclos com adição de água para obter 5 pontos de umidade, sendo 2 no ramo seco, 1 próximo a umidade ótima e outros 2 úmidos.

Figura 16 - Ensaio de Proctor normal



Outro fator importante é que o ensaio determina o cálculo de dosagem dos BTCs, que demonstra a densidade e o teor ótimo de água.

3.4.2 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland - CPV-ARI Holcim que possui alta resistência inicial. Os resultados das características químicas, físicas e mecânicas entregues pelo fornecedor estão de acordo com a NBR 16697 (2018) que estabelece os requisitos para cimento Portland (Tabela 5).

Tabela 5 - Resultado dos ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento

Ensaio Químicos		Ensaio Físicos	
Ensaio	Valor médio	Ensaio	Valor médio
PF 950 °C (%)	4,10	Blaine (cm ² /g)	5115
SO ₃ (%)	3,01	RET #400 (cm ² /g)	4,2
Resíduo Insolúvel (%)	≤ 3.50	Início de pega	128
MgO (%)	1,11	Fim de pega	170
Ensaio Mecânico - Resistência à compressão			Valor médio
Resistência à compressão (MPa)		1 dia	28,9
Resistência à compressão (MPa)		3 dias	40,1
Resistência à compressão (MPa)		7 dias	43,6
Resistência à compressão (MPa)		28 dias	50,7

Fonte: Fábrica Barroso, pertencente ao grupo LafargeHolcim

3.4.3 Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar

A CBC foi coletada na Usina Diamante, Grupo Raízen, situada no distrito de Potunduva, que pertence ao município de Jaú, SP. A CBC foi coletada diretamente da caldeira em alta temperatura (Figura 16), após o resfriamento foi acondicionada em dois sacos de linha ráfia, de 50 Kg cada. Observou-se que a cinza apresentava pequenos pedaços de bagaço, devido à combustão incompleta.

Figura 17 - Cinza retirada da caldeira para coleta



Para realização dos procedimentos de beneficiamento, avaliação da atividade pozolânica da CBC por métodos físicos, e a produção dos blocos de terra comprimida, foram separados 5 Kg de cinza para serem moídos, pois para esse tipo de material é a carga abrasiva recomendada pela NBR 16974 (2021). Antes de o material ser beneficiado por moagem e queima, a cinza foi seca em estufa a 105 °C por 24h para retirar a umidade do tempo de estoque, conforme Vasconcelos (2013). Após retirar o

material da estufa, foi feito o peneiramento com a peneira com abertura de 850 μm para uniformizar e retirar material orgânico da cinza.

3.4.3.1 Beneficiamento da CBC

A moagem foi realizada em um moinho rotativo com 24 bolas, 12 bolas com diâmetro de 45 mm e com peso de 340 g e 12 bolas de diâmetro de 20 mm com peso de 90 g, com 33 rotações de moagem por minuto (Figura 17). Após a moagem as cinzas foram peneiradas, com uma peneira de abertura de 0,075 mm.

A queima foi realizada em um forno mufla do modelo Linn Elektro Therm (Figura 17) em temperatura de 600 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ por 4 horas, essa combinação de temperatura e tempo foi escolhida com base no trabalho de Soares (2010).

Figura 18 - Moagem e Queima da CBC



3.4.3.2 Atividade pozolânica da CBC por métodos físicos

A NBR 12653 (2014) estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland. Dentre os requisitos, os materiais devem atender às exigências físicas, para serem classificados e definidos como materiais pozolânicos. A norma apresenta três ensaios físicos para caracterização:

1 - Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μm deve ser $\leq 20\%$;

2 - Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento aos 28 dias, em relação ao controle deve ser $\geq 75\%$.

3 - Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias $\geq 6 \text{ MPa}$.

Os ensaios 1 e 2 foram realizados, no entanto o ensaio 3 não foi realizado devido a não utilização de cal no presente estudo.

Ensaio 1: Foi utilizada como referência a NBR 15894-3 (2010), foram pesados 20g de CBC e transferidos para uma solução de 400 ml de hexametáfosfato de sódio na concentração de 12,5 g/L até a dispersão total do material. Na sequência a peneira 45 µm foi colocada embaixo da torneira de água com vazão de 5L/min e a solução foi vertida na peneira, foram feitos movimentos circulares na cinza por 20 minutos (Figura 18). A finura da CBC foi calculada segundo a equação (4).

$$F_{45\mu m} = \frac{mf \cdot c}{mi} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde,

$F_{45\mu m}$ é a finura representada pelo teor de resíduo retido na malha de 45µm, expressa em porcentagem (%)

mi é a massa inicial da amostra de pozolâna, expressa em gramas (g)

mf é a massa do resíduo retido na malha de 45 µm após peneiramento via úmida e secagem em estufa a 105°C, expressa em gramas (g).

Figura 19 - Ensaio de finura da cinza



Ensaio 2: Foi conduzido conforme a NBR 5752 (2014) que determina o índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias. O ensaio verifica a atividade pozolânica por meio da determinação da resistência à compressão da argamassa de referência (4 corpos de prova cilíndricos 5x10 cm) e com substituição de 25% de cimento pelo material pozolânico (4 corpos de prova cilíndricos

5x10 cm), devendo atingir um IAP de 90%. Para produção das argamassas são indicados pela norma os seguintes materiais:

- **Cimento:** CP II-F-32 (468 ± 0,4 g)
- **CBC:** (156 ± 0,4 g)
- **Areia normal** do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), com quatro frações granulométricas, 1,2 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; e 0,15 mm. (1872 ± 0,4 g)
- **Água:** (300 ± 0,2 g)

A Figura 19 ilustra os materiais utilizados conforme NBR 5752 (1992). O IAP deve ser calculado pela equação (5).

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde,

f_{cB} Resistencia média, aos 28 dias, dos CPs moldados com cimento e cinza.

f_{cA} Resistencia média, aos 28 dias, dos CPs moldados só com cimento.

Figura 20 - Materiais para produção das argamassas



3.4.3.3 Massa específica

A determinação da massa específica da CBC foi realizada utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 20), conforme a NBR 16605 (2017). Foi vertido o xileno até a marca de 0,8 cm³ (a norma exige de zero a 1cm³ do frasco), na sequência o frasco foi colocado em banho de água em posição vertical e mantido submerso por 30 minutos, para equalização das temperaturas dos líquidos do frasco e do banho. Após o banho foi anotada a primeira leitura (V_1). Na continuação, foram colocados 60g de CBC no frasco, com auxílio de um funil de haste curta, e foi submerso novamente

em banho termostático dos materiais por 30 minutos, depois desse tempo foi registrada a segunda leitura (V_2). A massa específica foi calculada pela equação (6).

$$\rho = m/V \quad (6)$$

Onde,

ρ é a massa específica da CBC, expressa em g/cm^3

m é a massa da CBC, expressa em gramas

V é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2' - V_1'$), expresso em cm^3 .

Figura 21 - Ensaio de massa específica da cinza



3.5 Caracterização dos BTCs

Para primeira etapa (estudo de dosagem) os blocos foram caracterizados após 14 dias de idade. Para o traço de referência e os traços de substituição de cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar foram caracterizados os blocos aos 14, 21 e 28 dias. Durante os sete primeiros dias de idade foi feita a hidratação do BTC três vezes ao dia com um borrifador.

3.5.1 Densidade seca

A densidade foi avaliada segundo a NBR 8492 (2012) cada bloco foi seco em estufa a 105 °C até massa constante. Em seguida, os blocos foram deixados esfriar até a temperatura ambiente e obtida a massa por meio de balança eletrônica. O volume foi calculado medindo comprimento, altura e largura utilizando um paquímetro digital (Figura 21). A densidade seca foi calculada usando a Equação (7).

$$\text{densidade} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (7)$$

Figura 22 - Medição de corpo-de-prova



3.5.2 Absorção de água

Para determinar a absorção de água, de acordo com a norma NBR 8492 (2013), para cada traço foram utilizados três blocos para realização do ensaio, esses blocos foram secos por 24 horas na estufa a 105°C. Após a secagem os blocos foram pesados, e assim, determinou-se sua massa seca. Na sequência os blocos foram imersos na água por 1 minuto, 60 minutos e 24 horas, conforme Akinyemi et al. (2021) e Teixeira et al. (2021), e os blocos com 28 dias de idade foi feito um acompanhamento mais detalhado de absorção de água, com 1min, 2min, 3min, 4min, 5min, 10min, 15min, 20min, 30min, 45min, 1h, 1h30 min, 2h, 3h, 6h, 12h, 18h e 24 horas, para obtenção da massa saturada (Figura 22). O resultado de absorção de água do BTC é expresso pela equação (8).

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (8)$$

na qual:

A = absorção de água (%);

m_1 = massa do BTC seco (g);

m_2 = massa do BTC saturado (g).

Figura 23 - Blocos imersos na água



3.5.3 Avaliação exploratória de absorção de água em BTCs com proteção de verniz acrílico

Foi realizada a análise de absorção total de água nos BTCs por 24 horas, protegidos com verniz acrílico, para uso em alvenaria aparente, este ensaio não é normatizado, e foi executado com a intenção de avaliar a resistência à água da camada protetora para blocos de terra estabilizados com cimento e CBC.

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme a NBR 8492 (2012) para os blocos com 28 dias de idade. Foram aplicadas duas demãos de verniz acrílico em duas amostras por traço (Figura 23), com a ajuda de um pincel, com intervalos de 4 horas entre demãos, conforme as orientações do fornecedor.

Figura 24 - Tratamento com verniz acrílico



3.5.4 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 8492 (2012). Foram separados 7 blocos de cada lote para serem cortados ao meio através de uma máquina policorte (Figura 24) e suas duas metades foram sobrepostas e coladas por uma argamassa de resistência superior ao bloco, conforme orientação da norma. A confecção da argamassa foi com traço 1:2, utilizando areia fina, passante pela peneira de abertura de 1,18 mm e consistência de $\cong 340$ mm (Figura 24).

Figura 25 - Corte dos blocos e análise de consistência da argamassa



Após a produção das unidades de alvenaria os blocos aguardaram até a idade de ensaio (Figura 25). Os blocos foram testados saturados, ficaram imersos por 6 horas antes do ensaio. A resistência à compressão foi avaliada na máquina de ensaio universal Emic com capacidade máxima de 300 kN. A carga foi aplicada a uma taxa de 500 N/s, até a ruptura do bloco (Figura 26).

Pelo fato de os tijolos terem rebaxos, os mesmos foram fechados pela mesma argamassa de assentamento. O cálculo segue a equação (9).

$$f_t = \frac{F}{S} \quad (9)$$

onde:

f_t é a resistência à compressão simples, expressa em (MPa)

F é a carga de ruptura do corpo de prova, expressa em newtons (N)

S é a área de aplicação da carga, expressa em (mm²)

Figura 26 - Blocos cortados e superpostos



Figura 27 - Ensaio de resistência à compressão



3.5.5 Ensaio de durabilidade por secagem e molhagem

O ensaio de durabilidade é realizado conforme a NBR 13554 (2012), onde cada ciclo de molhagem e secagem dura 48h, devendo ser repetido por cinco vezes. As amostras foram submetidas à escovação após cada ciclo para retirada dos materiais soltos. A porcentagem de perda de massa foi calculada após cada ciclo como uma medida de desempenho de durabilidade. A duração do ciclo está correlacionada ao tempo médio de degradação dos materiais de construção em situações críticas. Os resultados são obtidos pelas seguintes equações (10, 11, 12):

Variação do volume:

$$Vv = \frac{(Vi - Vn)}{Vi} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

Vv , é a variação de volume do corpo de prova nº 1 em cada etapa, expressa em porcentagem (%);

V_i é o volume inicial do corpo de prova nº 1, expresso em centímetros cúbicos (cm³);

V_n é o volume do corpo de prova nº 1 em cada etapa, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

Variação de umidade:

$$V_{h,n} = \frac{(h_i - h_n)}{h_i} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

$V_{h,n}$ é a variação de umidade do corpo de prova nº1 em cada etapa, expressa em porcentagem (%);

h_i é a umidade inicial do corpo de prova nº 1, expressa em porcentagem (%);

h_n é a umidade do corpo de prova nº 1 em cada etapa, expressa em porcentagem (%).

Cálculo da perda de massa:

$$A = \frac{mf(1) - mi(1)}{mi(1)} \quad (12)$$

Onde:

A é a água retida no corpo de prova nº1, expressa em porcentagem (%);

$mf(1)$ é a massa seca final do corpo de prova nº1 após atingir massa constante, expressa em gramas (g);

$mi(1)$ é a massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem do corpo de prova nº1, expressa em gramas (g).

Na sequência devem-se corrigir as massas secas dos CPs nº 2 e nº 3, descontando a água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio e que permaneceu retida no corpo de prova nº1 a 110 °C, conforme a equação (13):

$$mfc(2,3) = \frac{mf(2,3)}{(A + 1,00)} \quad (13)$$

onde:

$mfc(2,3)$ é a massa seca final corrigida dos CPs nº 2 e nº 3, expressa em gramas (g);

$mf(2,3)$ é a massa seca final dos CPs n° 2 e n° 3 após atingir massa constante, expressa em gramas (g);

A é a água retida no corpo de prova n° 1, expressa em porcentagem (%).

Calcular a perda de massa dos corpos de prova n° 2 e n° 3, como porcentagem da massa inicial, conforme a equação (14).

$$Pm(2,3) = \frac{((mi(2,3) - mfc(2,3))}{mi(2,3)} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

$Pm(2,3)$ é a perda de massa CPs n° 2 e n° 3, expressa em porcentagem (%);

$mi(2,3)$ é a massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem do corpo de prova n° 1, expressa em gramas (g);

$mfc(2,3)$ é a massa seca final corrigida dos CPs n° 2 e n° 3, expressa em gramas (g).

3.5.6 Determinação da condutividade térmica

A avaliação da condutividade térmica foi realizada através da técnica da placa quente protegida, seguindo as recomendações da NBR 15220-4 (2005). Foi utilizado um equipamento de baixo custo, apresentado em detalhes na Figura 27, desenvolvido por Lucas et al. (2021). Para a determinação da condutividade térmica é necessário identificar o fluxo de calor atravessando o bloco e as temperaturas em sua extremidade, conforme a equação (15).

$$Ka = La \frac{q''}{Tq - Tf} = La \frac{(q/A)}{Tq - Tf} \quad (15)$$

Onde,

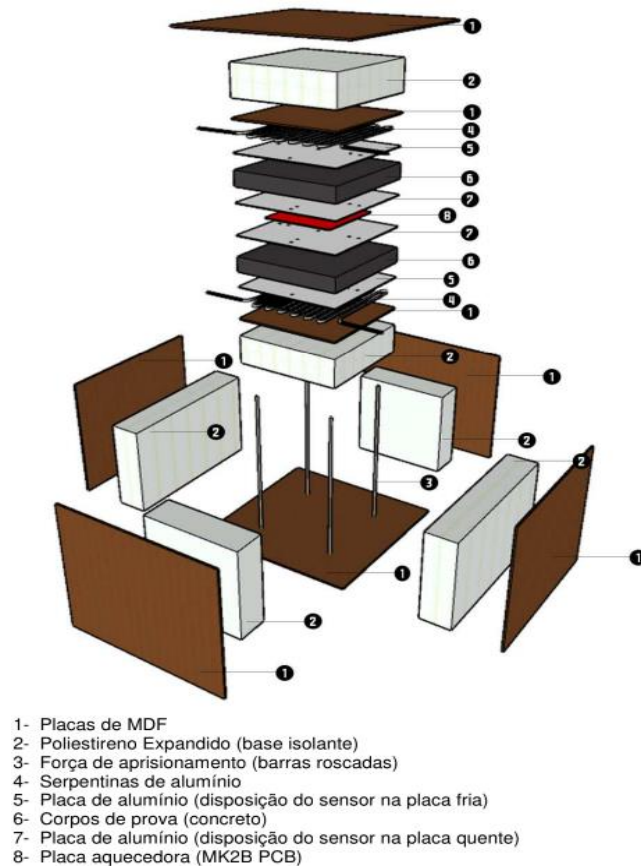
k_a é a condutividade térmica da amostra

L_a é a espessura do bloco

$q'' = q/A$ é o fluxo de calor cruzando a amostra

T_q e T_f são as medidas das temperaturas nas placas quente e fria, respectivamente.

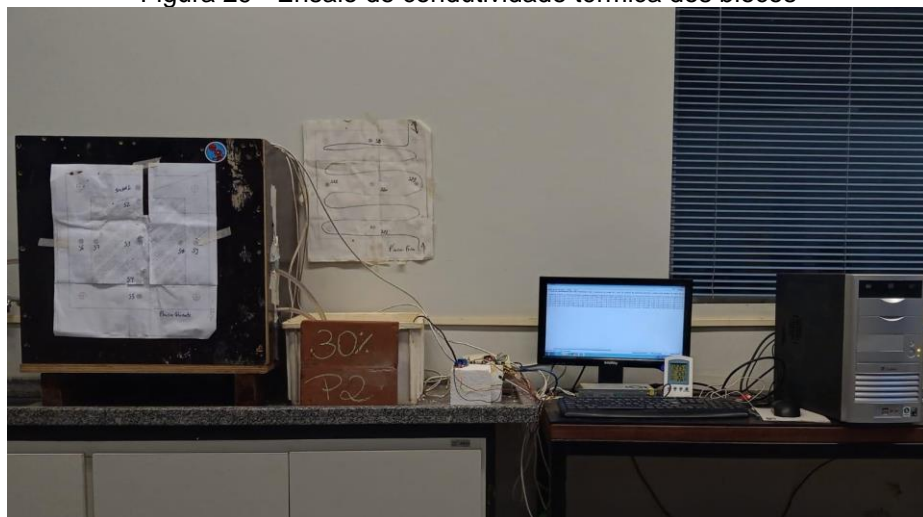
Figura 28 - Detalhe do equipamento de avaliação da condutividade térmica



Os corpos de prova que foram avaliados possuem geometria de 23x23x6 cm. Dois blocos foram unidos pela mesma argamassa feita para assentar a unidade de alvenaria de resistência à compressão (Figura 28).

A placa do Arduino foi configurada para desenvolver o ensaio em 2 temperaturas diferentes, com 45°C e 55°C.

Figura 29 - Ensaio de condutividade térmica dos blocos



3.6 Análise estatística ANOVA/Tukey

Para avaliar a significância estatística dos resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos, é realizada a análise estatística ANOVA com comparação de pares de Tukey com o software Past 4.03. Dentro dos resultados, as diferenças estatisticamente significativas são indicadas com valor de $p < 0,05$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção apresentará os resultados dos ensaios expostos na seção anterior. Serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização do solo, na sequência serão expostos e discutidos os resultados da atividade pozolânica da CBC e por fim, a caracterização física, mecânica e térmica do BTC.

4.1 Caracterização do solo

4.1.1 Análise granulométrica

Os resultados da análise granulométrica demonstram as proporções de cada fração de solo, conforme apresentado na (Tabela 6), observa-se um equilíbrio de distribuição granulométrica de 39% de argila, 37% de silte e 24% de areia, demonstrando um solo muito fino, o qual 85,1% de sua amostra passa na peneira de 0,075 mm.

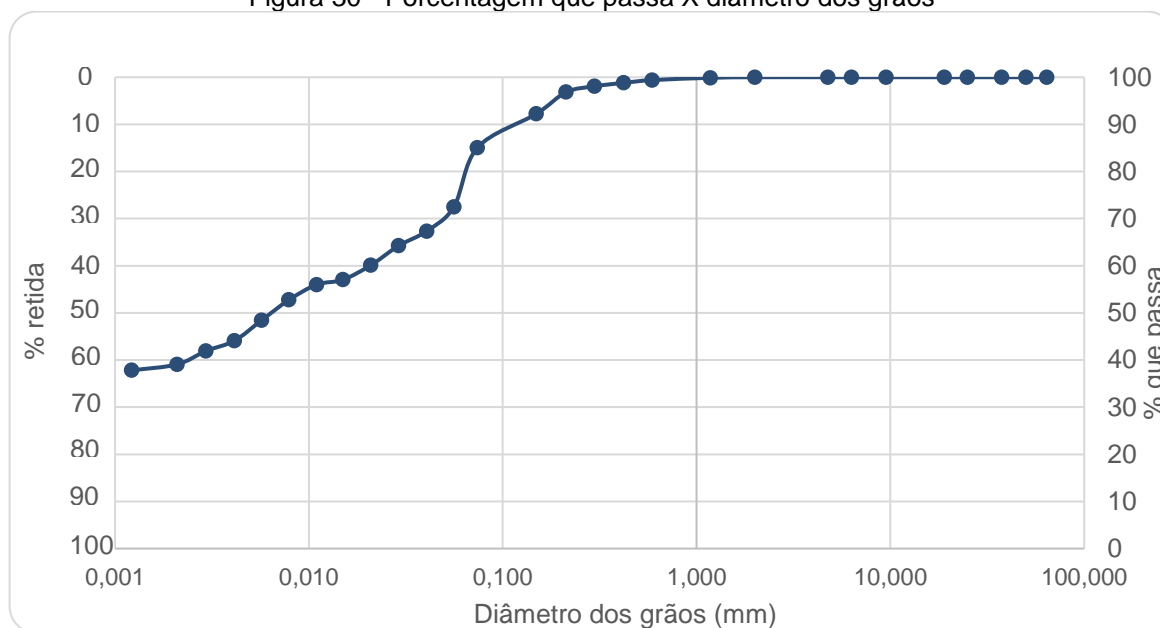
Tabela 6 - Análise granulométrica do solo

Material	Escala NBR 6502/95	Composição (%)
Argila	< 0,002 mm	39,0
Silte	0,002-0,06 mm	37,0
Areia fina	0,06-0,2 mm	20,0
Areia média	0,2-0,6 mm	3,50
Areia grossa	0,6-2,0 mm	0,50

A NBR 10833 (2012) estabelece que 100% do solo deve passar pela peneira de abertura de malha de 4,75 mm, e 10% a 50% de material necessita passar pela peneira com abertura de malha de 0,075 mm. O solo teve 100% de sua massa passando pela peneira 4,75 mm, satisfazendo a recomendação normativa. No entanto, em relação à porcentagem passante pela peneira 0,075 mm, o solo não atendeu esse critério, passando 85,1% (Figura 29). Nenhuma correção de classificação foi aplicada, pois Laborel-Preneron et al. (2017) demonstraram que é possível fabricar BTCs com essa granulometria, os autores produziram blocos com teor de 99% das partículas menores que 0,080 mm, conseguindo resposta de resistência à compressão de até 4,0 MPa.

Yatawara; Athukorala (2021) também tiveram incompatibilidade de textura do solo com as normas, os valores para o solo do trabalho foram de 33,9%, de argila, 27,8% de silte e 38,3% de areia, no entanto, os autores mencionam que para solo argiloso deve ser feita a estabilização química com cimento.

Figura 30 - Porcentagem que passa X diâmetro dos grãos



4.1.2 Ensaio de consistência

A análise de consistência do solo demonstra limite líquido de 56%, limite de plasticidade 36% e índice de plasticidade de 21% (Tabela 7).

Tabela 7 - Índices de consistência do solo

Ensaio	Valor (%)	Coefficiente de Variação (%)
Limite de Liquidez (LL)	56	8,72
Limite de Plasticidade (LP)	36	1,96
Índice de Plasticidade (IP)	21	-

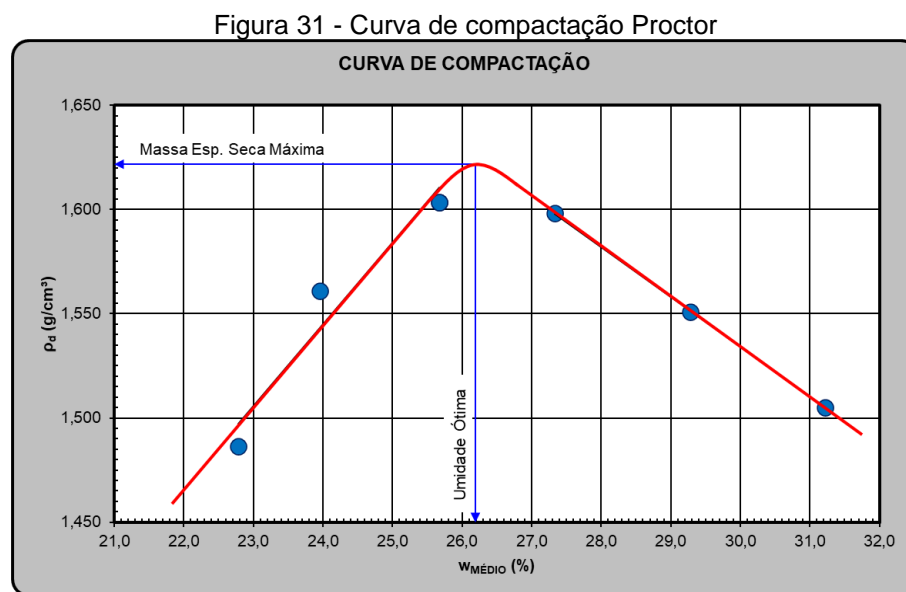
A NBR 10833 (2012) recomenda para produção de BTC limite líquido menor ou igual a 45% e índice de plasticidade menor ou igual a 18%, portanto o solo do presente estudo é incompatível com a norma vigente, no entanto Rivera (2020) demonstra que o tipo de solo com índices de plasticidade entre 15% e 30% tem uma taxa de sucesso de estabilização de 69%. Moura et al. (2021) obtiveram o resultado de consistência do solo próxima a do presente estudo, com valores aproximados de 54% para LL, 54% de LP e 21% IP, o que exigiu maiores quantidades de cimento (10%) para a estabilização do solo.

Com os resultados de granulometria e consistência é possível classificar o solo. De acordo com ABNT NBR 6502/1995 esse solo é classificado como argila silto arenosa roxa escura, segundo a HRB (Highway Research Board) adotada pela

AASHTO, é classificado A-7-5 e de acordo com a ASTM D2487-17 que segue o padrão USCS para fins de engenharia, o classifica como MH.

4.1.3 Ensaio Proctor normal

Para determinar a quantidade de água necessária a ser adicionada à mistura e a massa específica seca máxima, o ensaio de Proctor normal foi realizado com uma amostra de solo. Os resultados obtidos apresentaram teor de umidade ideal de 26,2% e a densidade seca máxima foi de 1.622 g/cm³ (Figura 30).



4.1.4 Resumo das propriedades físicas do Solo

A Tabela 8 apresenta de forma resumida os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física do solo.

Tabela 8 - Resumo dos resultados dos ensaios de solo

Propriedades		Unidade	Valor
Limites de Consistência	Limite Líquido (LL)	%	56
	Limite Plástico (LP)	%	36
	Índice de plasticidade (IP)	%	21
Distribuição granulométrica	Argila (< 0,002 mm)	%	39

Tabela 8 - Resumo dos resultados dos ensaios de solo - continuação

	Silte (0,002-0,06 mm)	%	37
	Areia (0,06-2,0 mm)	%	24
Massa específica seca máxima		g/cm ³	1,622
Teor de umidade ótimo		%	26,2
Massa específica dos sólidos		g/cm ³	3,084
Índice de vazios (na compactação)		-	0,90
Grau de saturação (na compactação)		%	89,6

4.2 Atividade pozolânica da CBC por métodos físicos

Após a moagem e a queima da CBC, percebe-se uma mudança na cor da amostra (Figura 31).

Figura 32 - Beneficiamento da cinza - peneiramento, moagem e queima



Segundo Cordeiro (2009) a diferença na cor é atribuída ao teor de carbono. Após ser retirada da caldeira devido à combustão incompleta, a CBC possui cor mais escura, e conforme a requeima, a cinza varia de cor avermelhada a branca, resultado da redução do percentual de carbono. Cordeiro (2006) menciona que a liberação de carbono aumenta o teor de sílica e conseqüentemente melhora a atividade pozolânica da CBC. Segundo Vasconcelos (2013) a temperatura de calcinação se mostrou relevante até 600°C, acima deste valor ocorre queda nos índices de pozolânicidade. A autora conclui que a moagem é de fundamental importância para o aumento do potencial pozolânico da CBC.

Portanto, com a combinação da queima e moagem, pode-se obter CBC com alto teor de sílica amorfa, condições favoráveis para obtenção de cinzas com características pozolânicas.

Em relação às exigências dos requisitos físicos para materiais pozolânicos pela NBR 12653 (1992) foram realizados os ensaios de finura da CBC através da peneira 45 μm , e o ensaio de índice de desempenho da CBC com cimento Portland aos 28 dias.

Os resultados para o ensaio da finura da CBC por meio da peneira 45 μm foi de 20,02% (Tabela 9), aproximando-se do valor de referência da NBR 12653 (2014) que determina que o material retido seja menor ou igual a 20%.

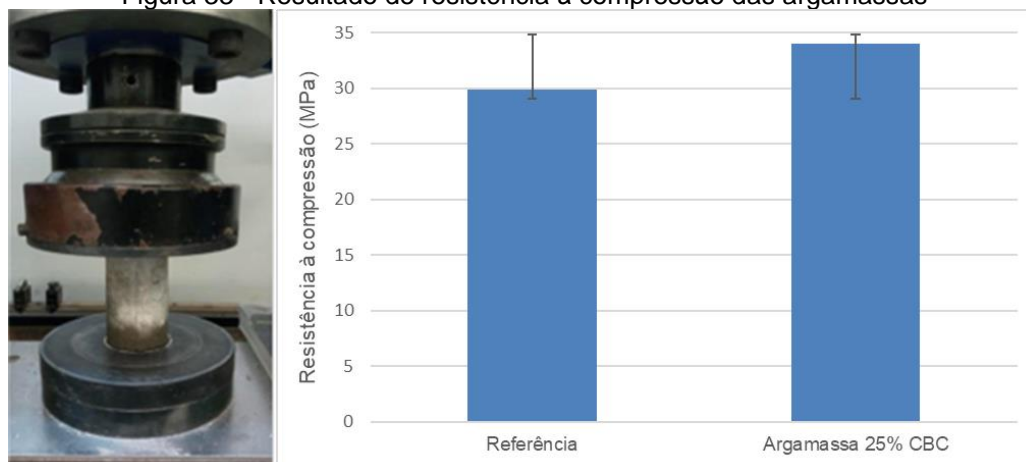
Tabela 9 - Resultado de massa retida na peneira 45 μm

Material retido na peneira de 45 μm			
Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Valor de material retido (%)
1	20,08	4,02	20,02

Os resultados para as argamassas produzidas com 100% de cimento Portland CII F-32 (referência) apresentaram resistência à compressão média de 29,93 MPa e as argamassas com 25% CBC em substituição ao cimento, 34,03 MPa (Figura 32).

A NBR 12653 (2014) exige percentual de resistência à compressão da argamassa com pozolâna em relação à de controle de no mínimo 90%. O presente estudo alcançou 113,7%, valor superior ao exigido, confirmando o seu potencial de adição em matrizes cimentícias.

Figura 33 - Resultado de resistência à compressão das argamassas



Costa (2017) alcançou IAP de 207,71%, a autora menciona a importância da moagem e queima da CBC, pois, a falta de beneficiamento torna o material menos reativo e com menor atividade pozolânica, devido a sua contaminação com partículas presentes no solo, obtendo CBC com forma cristalina.

De acordo com Góis (2016) a moagem tem grande influência no aumento do IAP, quanto menor a finura da CBC maior será sua capacidade de reação com o hidróxido de cálcio e conseqüentemente maior sua resistência mecânica.

Segundo Vasconcelos (2013) isso ocorre devido à maior área de contato da cinza com a pasta de cimento gerando grande número de pontos de nucleação para a reação pozolânica. Padua (2012) reforça essa influência em seus estudos, a CBC in natura obteve IAP de 10% menor que a cinza moída.

4.2.1 Massa específica da CBC

Os resultados da massa específica da CBC (Tabela 10) mantiveram-se com valores em torno de 2,73 g/cm³.

Tabela 10 - Resultado da massa específica da cinza

Amostra	Massa de CBC	Volume inicial	Volume final	Resultado
	(g)	(cm ³)	(cm ³)	(g/cm ³)
1	60	0,8	22,7	2,73

Esse valor está muito próximo ao de Costa (2019) que obteve massa específica de 2,65 g/cm³. A autora explica que esse valor é devido ao quartzo na composição da CBC, pois segundo ela é consensual que a massa específica do quartzo apresente o valor de 2,65 a 2,75 g/cm³, mesmo com a redução do tamanho das partículas através da moagem.

4.3 Energia de compactação aplicada

Para avaliar a energia de compactação dos BTCs produzidos, foram preparados três corpos de prova (50x100 mm), com consumo dos materiais calculados de acordo com o resultado do Proctor de densidade máxima seca e teor ótimo de água.

Foram necessárias 3 camadas com 25 golpes cada, para compactar o solo no molde, atingindo a densidade média de 1,60 Kg/cm³, energia de compactação de 3,98

kg/cm² e uma resistência à compressão média de 3,29 MPa (Tabela 11). A Figura 33 ilustra o procedimento de ensaio e a avaliação de resistência à compressão dos corpos de prova produzidos.

Tabela 11 - Resultado da energia de compactação

Amostras	Nº golpes	Nº camadas	<i>E_c</i>	<i>ρ_d</i> 14 dias	n	<i>σ</i>
			(kg/cm ²)	(g/cm ³)	(%)	(MPa)
1	25	3	3,98	1,59	49,68	3,50
2	25	3	3,98	1,57	49,32	2,93
3	25	3	3,98	1,59	49,68	3,44
Média	25	3	3,98	1,60	48,76	3,29
CV. (%)	-	-	-	0,86	0,42	9,52

Elahi et al. (2021) mencionam que com o aumento da energia de compactação de 3,33 kg/cm² para 7,77 kg/cm² aumenta a densidade das amostras em 4-9%. Embora a densidade e a resistência à compressão aumentem com a energia de compactação, a taxa de aumento da densidade diminui à medida que a energia de compactação passa de 5,55 kg/cm², os autores explicam que super compactar pode desintegrar ainda mais as partículas do solo, levando à quebra da ligação já existente entre as partículas.

A energia adotada no presente estudo de 3,98 kg/cm² está de acordo com os estudos de Elahi et al. (2021) para obter blocos com resistência à compressão acima do estipulado pela norma técnica de blocos de solo-cimento. Além disso, os autores constataram na prática que uma energia de compactação mais alta dificulta a fabricação, fato que já foi observado por Cottrell et al. (2021) já que para energia de compactação elevada o operador da máquina tem muita dificuldade de abaixar o braço da alavanca manualmente.

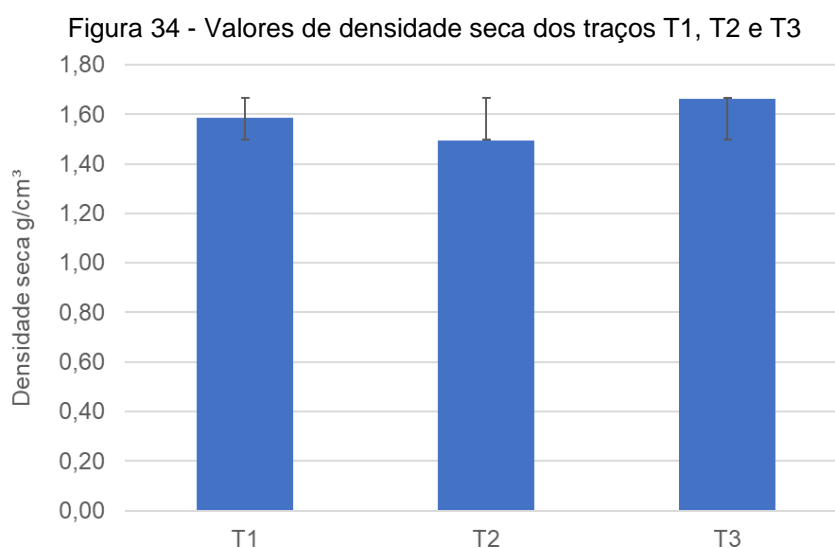
Os autores concluem que para uma baixa energia de compactação será necessário um teor maior de cimento para garantir uma resistência mecânica adequada em relação aos padrões normativos e para uma alta energia é necessária uma baixa adição de cimento.

4.4 Densidade seca

Os resultados apontam que o tratamento com 10% de cimento resultou no melhor valor médio de densidade de $1,66 \text{ g/cm}^3$ (Figura 33), esse aumento está relacionado com o fato de a redução do teor de cimento aumentar o índice de vazios e enfraquecer a ligação entre a pasta de cimento e as partículas de solo (Hany et al., 2021).

De modo geral, cada lote produzido (T1 com de 5% de cimento em massa do solo, 10% T2 com 7% de cimento e T3 com 10% de cimento) teve uma densidade constante. Cottrell *et al.* (2021) atribui isso ao método preciso de determinação da dosagem do material, no entanto ao comparar os três traços percebe-se redução de aproximadamente 12% do T1 e T2 para o T3, e a análise de comparação de pares pelo método de Tukey demonstra diferenças significativas de T1 para os demais traços, por sua vez o T2 difere de T3, ao mesmo tempo que para o traço T3 não há diferença significativa entre as médias de suas densidades com os demais traços. Esses comportamentos diferenciados estão relacionados ao fato dos dois primeiros lotes terem perdido massa no processo de produção, mas para o terceiro lote foi inserida uma caixa de extensão, aumentando a altura do molde da prensa e evitando perda de massa.

Outra explicação para redução de densidade, segundo Hany et al. (2021) é a diminuição do teor de cimento, que por sua vez diminui a densidade do BTC. Segundo Yatawara; Athukorala (2021) a densidade do BTC está na faixa de $1,500 - 2,000 \text{ g/cm}^3$, portanto os tratamentos de número 1 e 3 permanecem na faixa aceitável de produção.



Os blocos produzidos com os traços TR (traço de referência), T10CBC (10% de CBC), T20CBC (20% de CBC) e T30CBC (30% de CBC) foram determinadas suas densidades secas aos 14, 21 e 28 dias, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Densidade seca e porosidade dos traços TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC

Tratamento	Idade (dias)	Massa seca (Kg)	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)
TR	14	2,4345 ^(1,257)	1,611 ^(2,706)	48,01
	21	2,4588 ^(0,218)	1,651 ^(1,905)	46,71
	28	2,4463 ^(1,382)	1,655 ^(1,477)	46,58
T10CBC	14	2,4767 ^(0,783)	1,628 ^(1,351)	46,81
	21	2,4943 ^(0,778)	1,598 ^(0,710)	47,79
	28	2,4685 ^(0,631)	1,619 ^(1,834)	47,10
T20CBC	14	2,5033 ^(1,015)	1,629 ^(1,620)	46,13
	21	2,5758 ^(1,489)	1,699 ^(1,012)	43,81
	28	2,4877 ^(0,443)	1,634 ^(0,842)	45,96
T30CBC	14	2,5723 ^(0,426)	1,714 ^(1,274)	42,64
	21	2,5992 ^(0,437)	1,732 ^(0,0587)	42,03
	28	2,5929 ^(1,734)	1,726 ^(1,794)	42,23

(^{*)} Coeficiente de variação entre parênteses

A massa seca dos blocos manteve-se muito próxima, e a densidade média seca das amostras variou entre 1,598 g/cm³ para o traço T10CBC aos 21 dias e 1,732 kg/m³ para o traço T30CBC aos 21 dias, o que representa uma diferença percentual de 7,74% entre esses extremos. Com o acréscimo do teor de CBC a densidade dos blocos aumentou, Segundo Lima (2012) devido ao seu menor tamanho de partícula e alta área superficial a CBC tende a ocupar os vazios entre a terra e o cimento, permitindo o aumento da densidade e melhores propriedades mecânicas dos BTCs.

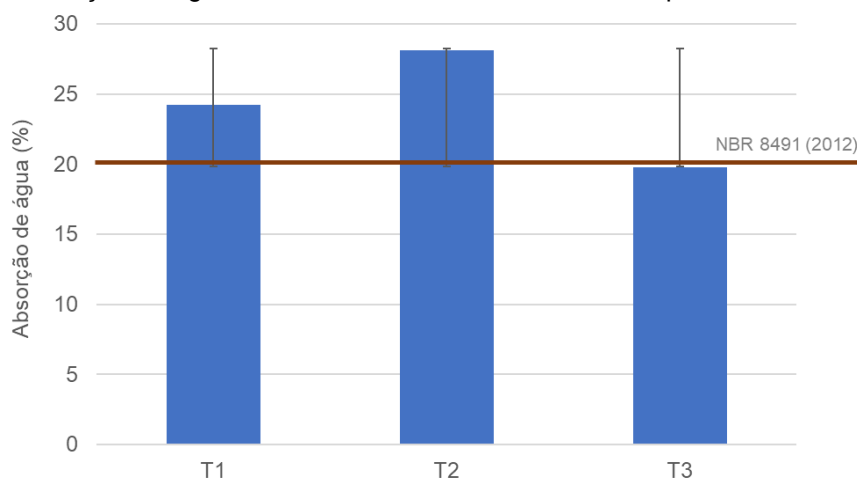
Os tijolos com 14, 21 e 28 dias de idade apresentaram diferenças significativas de densidade para os traços TR, T10CBC e T20CBC em relação ao T30CBC. O traço T30CBC não possui diferença significativa aos demais traços. De modo geral todos os tratamentos ficaram próximos da densidade seca alvo de 1,622 g/cm³ descoberta no ensaio Proctor.

A porosidade das amostras varia de 42% a 48% com base em diferentes teores de CBC, e a porosidade máxima é observada para amostras sem CBC. No entanto, a adição de 10 a 30% de CBC reduz a porosidade das amostras em 42 a 46% e a porosidade mínima é relatada para amostras com 30% de CBC, o que é semelhante aos resultados da consideração de densidade.

4.5 Absorção de água

A absorção de água para as misturas com 5%, 7% e 10% de cimento foi de 24,2%, 28,1% e 19,7% respectivamente (Figura 34). A NBR 8491 (2012) recomenda resistência à absorção de água igual ou menor a 20%, portanto o T3 foi o único a atender esse requisito.

Figura 35 - Absorção de água de T1, T2 e T3. As barras de erro representam o desvio padrão



O valor de absorção de água do T3 foi menor em relação ao T2 em cerca de 30% devido à presença de menos vazios, obtendo maior densidade, de 1,66 g/cm³. O resultado de Tukey demonstra que diferenças significativas aconteceram somente com a combinação dos tratamentos T2 e T3. Esse resultado pode ser explicado pela densidade dos blocos, onde o T3 obteve densidade superior ao T2 em 10%, reduzindo assim à presença de vazios. Segundo Sekhar e Nayak (2018) a densidade afeta significativamente as propriedades de resistência dos blocos de terra comprimida quando expostos à água.

Outro fator é a quantidade de cimento de cada traço, de acordo com González-López et al. (2018) e Sekhar e Nayak (2018) a absorção de água está relacionada à quantidade e tipo de estabilizante, quanto maior a quantidade de cimento menor a

absorção de água. Os autores mencionam que isso se deve às interações do cimento com os silicatos de alumínio no solo para formar produtos cimentícios, que consequentemente unem as partículas do solo e endurecem com o tempo, reduzindo assim a interconectividade dos vazios.

Santos et al. (2020) passaram pela mesma dificuldade de reduzir a absorção de água para BTC produzido com solo argiloso. Os autores observaram que o solo argiloso absorve mais água, em uma mistura argilosa foi necessária uma maior quantidade de água, o que também resultou em uma porosidade maior, no entanto houve uma ligeira diminuição na absorção de água quando ocorreu acréscimo de cimento, pois o cimento melhora a trabalhabilidade do solo argiloso, diminuindo sua plasticidade e reduz a capacidade de movimentação da água, melhorando sua durabilidade.

A Tabela 13 apresenta os resultados médios de absorção de água para o tratamento de referência e para os traços com CBC em substituição parcial ao cimento em 3 tempos diferentes, com 1 minuto, 120 minutos e 1440 minutos aos 14, 21 e 28 dias de idade.

Tabela 13 - Valores de absorção de água para TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC

Tratamentos	1 min.	120 min.	1440 min.	Idade (dias)
TR	3,31 ^(7,71)	20,85 ^(4,00)	24,17 ^(4,62)	14
	2,97 ^(6,25)	19,68 ^(2,10)	23,42 ^(3,60)	21
	2,71 ^(8,75)	19,61 ^(6,91)	22,79 ^(2,46)	28
T10CBC	3,61 ^(0,84)	22,48 ^(3,09)	24,13 ^(4,20)	14
	4,68 ^(11,96)	22,64 ^(0,28)	24,24 ^(0,93)	21
	4,49 ^(12,29)	22,86 ^(2,11)	23,91 ^(4,81)	28
T20CBC	3,86 ^(27,79)	22,63 ^(6,49)	23,38 ^(6,45)	14
	3,08 ^(14,11)	18,08 ^(8,80)	19,88 ^(6,63)	21
	3,52 ^(1,05)	20,33 ^(5,65)	22,96 ^(2,39)	28
T30CBC	3,21 ^(3,70)	17,07 ^(6,81)	19,24 ^(3,56)	14
	3,06 ^(8,90)	16,31 ^(5,32)	18,28 ^(1,82)	21
	3,16 ^(23,03)	16,99 ^(5,47)	19,88 ^(3,99)	28

(*) Coeficiente de variação entre parênteses

A porcentagem de absorção de água é maior nos primeiros minutos, com o passar do tempo o índice aumenta, porém em menor ritmo, o TR absorveu 13% com um minuto, 85% com 60 minutos em relação ao tempo total de absorção de água de 1440 minutos. Para os traços T10CBC, T20CBC e T30CBC a absorção de água em relação ao seu valor total, no primeiro minuto foi de 18%, 16% e 16% respectivamente, e aos 60 minutos T10CBC, T20CBC, T30CBC absorveram 94%, 92% e 88%, respectivamente.

À medida que a quantidade de CBC aumenta a absorção de água diminui, isso ocorre devido à redução dos espaços vazios entre as partículas de solo que são preenchidas pela formação de gel dos produtos pozolânicos e de hidratação do cimento. Esse resultado foi o mesmo para Moura et al. (2021).

O resultado da análise estatística ANOVA para os tratamentos com 28 dias de idade apresentou que existem diferenças significativas entre os traços. O teste de Tukey demonstrou que o traço T30CBC não difere significativamente dos demais tratamentos, no entanto os demais tratamentos diferem de T30CBC, o que condiz com a maior resistência a absorção de água do T30CBC em relação aos demais, sendo o único tratamento, com 28 dias de idade, a alcançar o valor estipulado pela norma, abaixo de 20%. A análise estatística se encontra no apêndice C.

A tabela 14 demonstra um acompanhamento mais detalhado de absorção de água. Foram avaliados 3 blocos por tratamento aos 28 dias de idade, com 1min, 2min, 3min, 4min, 5min, 10min, 15min, 20min, 30min, 45min, 1h, 1h30 min, 2h, 3h, 6h, 12h, 18h e 24 horas.

Tabela 14 - Absorção de água com 28 dias em 17 tempos

TR			T10CBC			T20CBC			T30CBC		
Minutos	A	(%)	Minutos	A	(%)	Minutos	A	(%)	Minutos	A	(%)
1	3,47	15,22	1	5,01	20,94	1	2,93	12,75	1	2,53	12,75
2	5,22	22,90	2	7,53	31,51	2	4,44	19,34	2	4,87	24,49
3	6,60	28,98	3	9,16	38,33	3	5,65	24,61	3	5,74	28,85
4	7,64	33,53	4	10,69	44,73	4	6,89	30,00	4	6,76	34,01
5	8,62	37,81	5	11,68	48,85	5	7,69	33,48	5	8,72	43,85
10	10,54	46,24	10	13,85	57,94	10	9,74	42,41	10	10,02	50,41
15	12,01	52,68	15	16,05	67,12	15	11,31	49,27	15	12,36	62,16
30	14,60	64,06	30	18,19	76,09	30	14,40	62,71	30	14,15	71,17
45	16,39	71,91	45	20,79	86,95	45	16,76	72,99	45	15,43	77,62
1h	17,31	75,96	1h	21,81	91,21	1h	18,31	79,76	1h	17,17	86,37

Tabela 15 - Absorção de água com 28 dias em 17 tempos - Continuação

1h30min	19,49	85,53	1h30min	22,42	93,76	1h30min	20,33	88,55	1h30min	18,14	91,24
2h	20,62	90,46	2h	23,05	96,42	2h	21,30	92,79	2h	19,15	96,30
3h	22,08	96,89	3h	23,33	97,56	3h	21,70	94,52	3h	19,62	98,69
6h	22,35	98,08	6h	23,39	97,82	6h	22,63	98,55	6h	19,62	98,69
12h	22,52	98,80	12h	23,57	98,56	12h	22,72	98,95	12h	19,72	99,18
18h	22,73	99,75	18h	23,84	99,73	18h	22,91	99,77	18h	19,86	99,89
24h	22,79	100	24h	23,91	100	24h	22,96	100	24h	19,88	100

No primeiro minuto do ensaio os valores de absorção de água se modificam de 2,53% a 5,01% sendo que os lotes produzidos com 20% e 30% de CBC absorveram menos água durante os primeiros 30 minutos. Após 45 minutos de imersão total na água os blocos de referência conseguiram resistir melhor a água em relação ao traço com 10% e 20% de CBC, no entanto, o traço com 30% de CBC resistiu melhor em relação ao traço de referência, cenário que se manteve até o final do ensaio.

A análise de média de resistência entre todos os tratamentos foi de 15% de absorção de água com 1 min, 25% com 2min, 30% com 3 min, 36% com 4 min, 41% com 5 min, 49% com 10 min, 58% com 15 min, 69% com 30 min, 77% com 45 min, 83% com 1 h, 90% com 1h30min, 94% com 2h, 97% com 12h, 99,8% com 18h em relação as 24 horas de ensaio.

A absorção de água progride mais rapidamente durante a fase inicial de 1min a 60 min do que na fase posterior de 1 a 24 horas, sendo que com 15 minutos já é absorvido mais do que 50% do total de 24h, segundo Akinyemi et al. (2021) isso ocorre devido à ruptura das ligações ativas entre as partículas de argila e os ligantes. Isso causa uma mudança irreversível na estrutura das partículas de argila pelo aparecimento de mais poros e conseqüentemente reduzindo a durabilidade.

Os valores de absorção total de água variaram entre 18,27% e 24,24%, sendo esses valores parecidos quando comparados com os resultados apresentados por Teixeira et al. (2020) para tijolos de argila queimada (0-30%), blocos de concreto (4-25%) ou tijolos de silicato de cálcio (6-16 %).

Segundo Sekhar e Nayak (2018) a densidade afeta significativamente as propriedades de durabilidade dos blocos de terra comprimida, os resultados de densidade comparados com de absorção de água demonstra que somente os blocos que atingiram densidade acima de 1,699 Kg/m³ obtiveram índice de absorção de água aos 1440 minutos abaixo do estipulado pela norma técnica NBR 8491 (2012) de valor $\leq 20\%$.

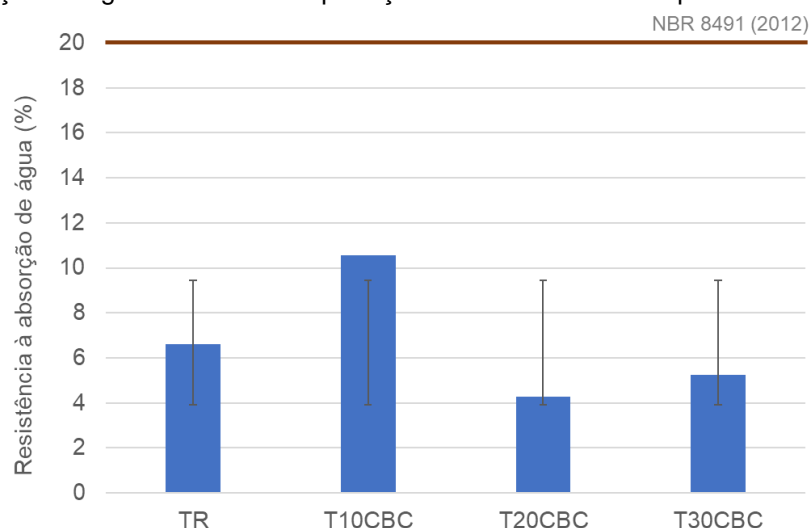
Concluiu-se que os blocos feitos com 30% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao cimento podem ser utilizados na construção de alvenaria em termos de resistência à absorção de água como sugerido pela norma brasileira NBR 8491 (2012) que determina média de valores menor que 20% e valores individuais menores que 22%.

4.6 Avaliação exploratória de absorção de água em BTCs com proteção de verniz acrílico

O estudo exploratório para avaliar a proteção dos blocos de terra comprimida com a adição de verniz acrílico após imersão total na água por 24 horas, demonstra que os blocos obtiveram resistência à água satisfatória em comparação com os blocos sem tratamento, obteve-se redução de absorção de água de 71% para o TR, 56% T10CBC, 81% T20CBC e 73% para o T30CBC.

Em comparação com a exigência do padrão de qualidade da NBR 8492 (2012), de absorção de água (menor que 20%) os resultados ficaram bem abaixo, com relativa segurança (Figura 35).

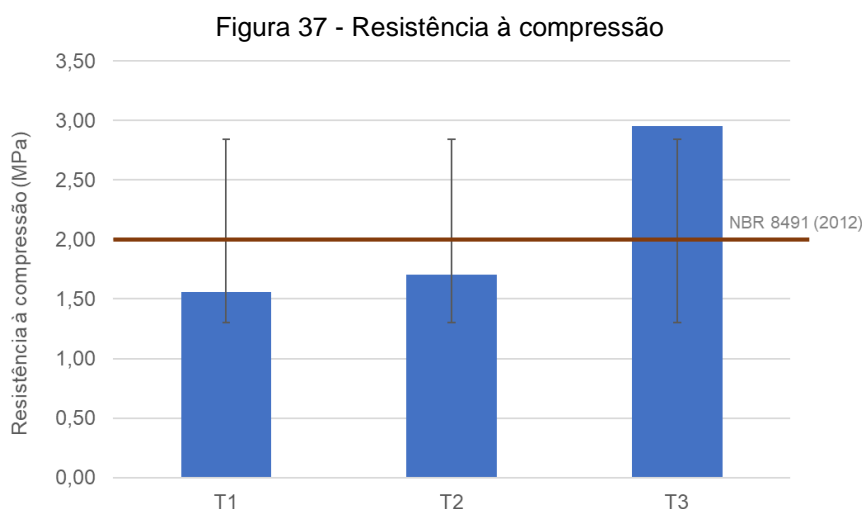
Figura 36 - Absorção de água de BTCs com proteção. As barras de erro representam o desvio padrão



4.7 Resistência à compressão

Pode-se observar que conforme o teor de cimento presente no traço associa-se um acréscimo de resistência à compressão, observando a Figura 36 obteve-se valor médios de 1,56 MPa, 1,70 MPa e 2,95 MPa nas adições de 5%, 7% e 10% respectivamente, sendo a amostra com 10% de cimento a única que atendeu a NBR

8491 (2012) que estipula valor médio igual ou maior que 2,0 MPa e valores absolutos acima de 1,7 MPa. Portanto, 10% de cimento foi o teor escolhido para o traço de referência (TR) para ser substituídos por CBC.



A análise estatística demonstra diferença significativa entre os traços T1 com T3 e T2 com T3, entretanto o T3 não difere dos demais, resultados que corroboram com a escolha do T3 para o traço de referência. Assim como no ensaio de absorção de água, as diferenças significativas entre os traços podem estar relacionadas com a densidade dos blocos.

Os autores Rivera-Gómez et al. (2021) e Teixeira et al. (2020) relatam a correlação direta entre os resultados da densidade aparente seca do BTC e o desempenho mecânico, uma maior densidade obtida pela compactação aumenta a resistência à compressão dos blocos. Os autores expõem que quanto maior for a resistência à compressão maior será sua resistência à água.

Os resultados também demonstram a importância do cimento para garantir melhor resistência a compressão, por exemplo, o T1 tem uma densidade maior que o T2 de aproximadamente 5%, no entanto os 2% a mais de cimento do T2 lhe conferiu um desempenho de resistência à compressão de 9% superior com relação ao T1.

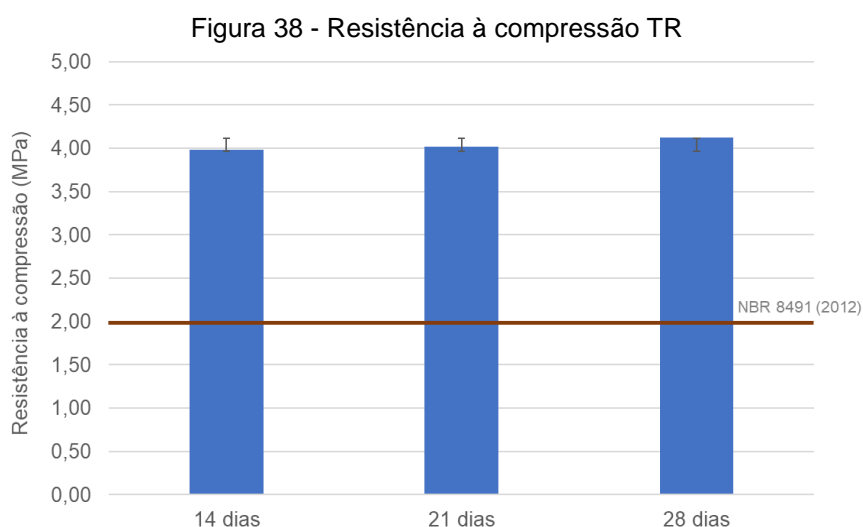
A resistência à compressão média para o traço de referência já aos 14 dias obteve valores de 51% acima do estipulado pela norma brasileira. Ao comparar os resultados com as normas internacionais, os blocos atendem a UNE 41410 (2008), norma espanhola, exigência de 3,0 MPa para a classe BTC-C3, atendem a norma francesa XP P13-901 (2001) e a de Nova Zelândia, NZS 4298 (1998), para todas as

classes em condição de tijolo úmido e também atende ao critério de 3,5 MPa estipulado pela norma indiana, BIS IS1725 (2013).

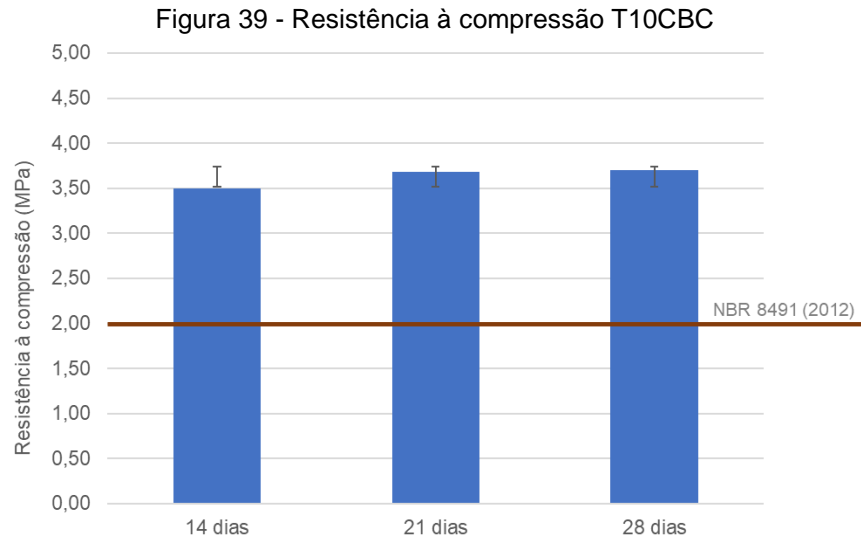
A Figura 37, Figura 38, Figura 39 e figura 40 apresentam os resultados de resistência à compressão dos blocos de referência (com 10% de cimento) e os blocos com teores de CBC em substituição ao cimento após períodos de cura de 14, 21 e 28 dias de idade.

Pelo fato de utilizar como estabilizador o cimento CPV ARI de alta resistência inicial a evolução da resistência dos blocos conforme o seu envelhecimento praticamente ficou estável no período de avaliação, com 2,5% de aumento de resistência à compressão de 14 dias de idade para 21 dias e de 2,66% de 21 dias para 28 dias de idade.

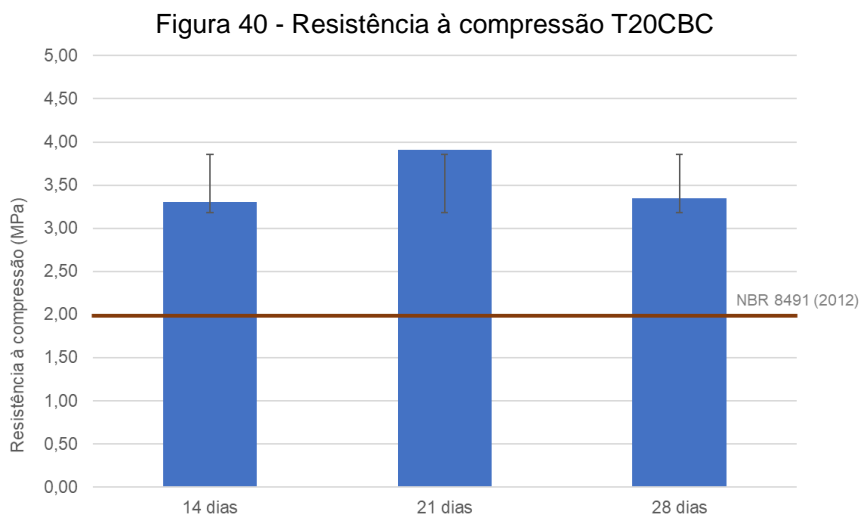
Os resultados para TR aos 14, 21 e 28 dias, percebe-se uma pequena diferença na média entre as idades, mas nenhuma diferença significativa foi identificada pelo teste de ANOVA, valor de p 0,9092, maior que 0,05.



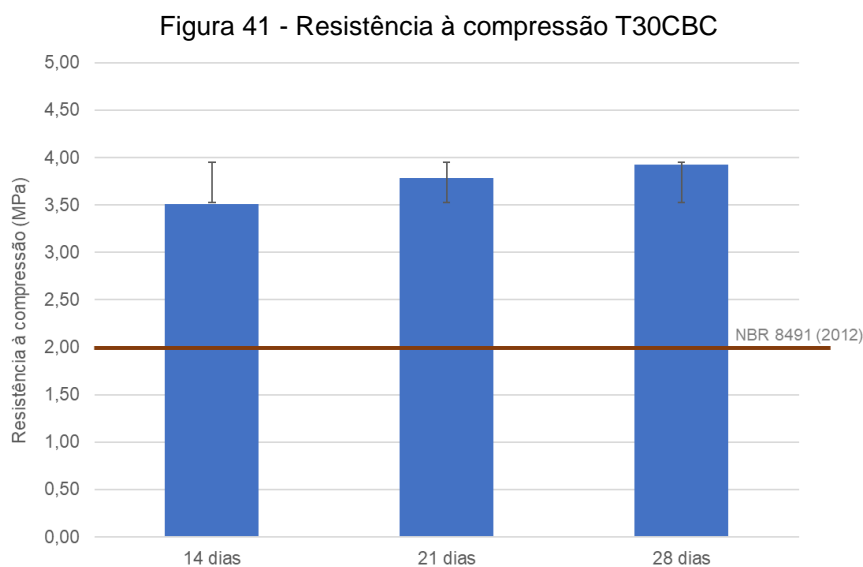
O traço com 10% de cinza em substituição ao cimento possui um decréscimo de resistência à compressão ao traço de referência de aproximadamente 7,4% aos 14 dias, 8,46% aos 21 dias e 8,48% aos 28 dias de idade. Nenhuma diferença significativa observada, valor de p 0,9361.



A comparação feita de cada idade de TR com T20CBC é de queda na resistência de 15,82% aos 14 dias, 2,99% 21 dias e 18,89% aos 28 dias. Não foi observado nenhuma diferença significativa entre as idades, p de 0,07491 acima dos 5% de significância.



O traço com 30% de CBC em substituição ao cimento obteve uma redução de 10,46%, 5,98% e 4,85% aos 14, 21 e 28 dias respectivamente em relação ao traço de referência. Também não foi identificada nenhuma diferença significativa dos resultados entre as idades, valor de p 0,3121.



Todas as dosagens de BTCs com CBC obtiveram uma boa resistência à compressão, em todas as idades avaliadas superando o valor de média de 2,0 MPa e valores individuais acima de 1,70 MPa estipulado pela NBR 8491 (2012), portanto todos os lotes são aptos para construção de alvenaria não estrutural (Tabela 15).

Entre as dosagens de substituição de cimento por CBC, o teor de 30% de CBC apresentou a maior resistência à compressão, de 3,93 MPa aos 28 dias, (51% superior ao estabelecido pela NBR 8491 (2012) seguido pelas dosagens de 20% de CBC aos 14 dias e 10% de CBC aos 28 dias.

Tabela 16 - Média de resistência à compressão para todos os traços

Tratamento	Símbolo/unidade	14 dias	21 dias	28 dias
TR	σ MPa	3,98	4,02	4,13
	CV (%)	13,99	19,34	13,61
T10CBC	σ MPa	3,63	3,68	3,78
	CV (%)	14,06	15,26	10,02
T20CBC	σ MPa	3,30	3,90	3,35
	CV (%)	13,24	17,54	10,55
T30CBC	σ MPa	3,51	3,78	3,93
	CV (%)	13,18	14,64	12,21

O resultado acima do estipulado pela norma brasileira e a manutenção da resistência à compressão conforme a substituição do cimento por CBC também foi alcançada por Moura *et al.* (2021), os autores atribuem tal comportamento ao aumento da área superficial da CBC quando comparado ao solo, além da atividade pozolânica. Elahi *et al.* (2021) explica que o hidróxido de cálcio reage com o material pozolânico

adicionado e forma silicato de aluminato de cálcio. O composto é responsável por endurecer a mistura e melhorar a capacidade de aderência interna da matriz do solo.

Para Ojeda-Farías et al. (2020) o melhor teor de substituição foi de 25%, Moura et al. (2021) e Ganesan *et al.* (2007) foi de 20%. Para Salim et al. (2014) e Ferrari et al. (2014) foi de 10% e Lima et al. (2012) 10%.

Os maiores valores de densidade de 1,72 kg/m³ para 30% de CBC, implicam o maior resultado de resistência à compressão, de 3,93 MPa, segundo Gómez et al. (2021) pode ser estabelecida uma relação direta entre a densidade seca e a porosidade em relação aos resultados de desempenho mecânico.

A análise de Tukey indica que os grupos de BTCs de referência com 100% de cimento e 0% de CBC - 100/0 e BTCs com 80% de cimento e 20% de CBC - 80/20 são diferentes estatisticamente aos 28 dias de idade. Os demais grupos são estatisticamente iguais em um nível de 95% de confiança.

4.8 Durabilidade por molhagem e secagem

Os resultados apresentados na (Tabela 16) são referentes à perda de massa dos blocos durante o ensaio de molhagem e secagem, em comparação com o peso inicial do corpo de prova, no momento de sua retirada da prensa, para diferentes teores de estabilizador.

Tabela 17 - Perda de massa dos CPS 2 e 3 após os ciclos

Tratamentos/CPs		Água retida	Massa seca	Massa corrigida	Perda de massa
TR	CP1	3,38	2,4591	-	-
	CP2	-	2,4492	2,3710	1,28
	CP3	-	2,3875	2,3112	3,77
T10CBC	CP1	3,36	2,4588	-	-
	CP2	-	2,4496	2,3697	1,26
	CP3	-	2,4508	2,3709	1,20
T20CBC	CP1	3,31	2,4575	-	-
	CP2	-	2,4508	2,3721	1,16
	CP3	-	2,4329	2,3547	1,88
T30CBC	CP1	3,12	2,4763	-	-
	CP2	-	2,4962	2,4207	0,55
	CP3	-	2,4799	2,4048	0,38

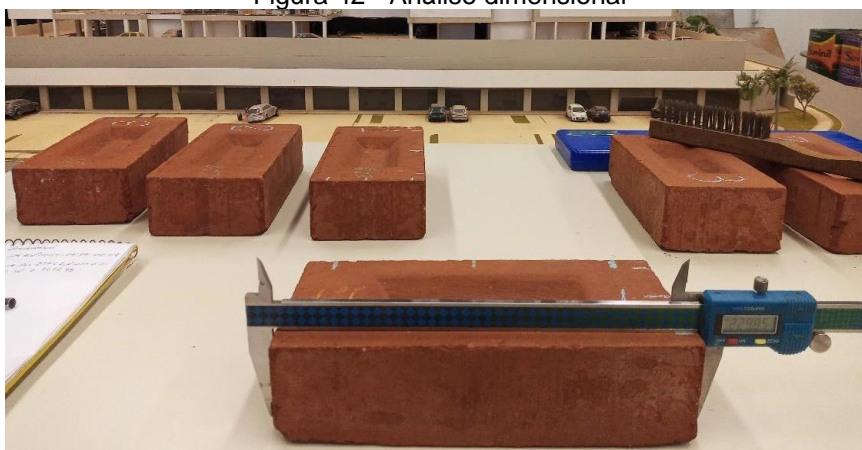
Os resultados mostram que a CBC é considerada eficaz para diminuir a perda de massa. Os valores de perda percentual de massa variam entre 0,38-3,77%. Segundo a ABCP ET-38 (2004) a perda de massa máxima admissível para o solo do presente estudo é de 7%, para a norma internacional ASTM D559/D559M-15 a perda de massa dos blocos - para solos argilosos - após o ensaio deve ser de 0% e 1,1% para teores de cimento 10% e 7% respectivamente.

Os resultados demonstram que todos os teores estudados estão de acordo com as condições dos padrões técnicos brasileiros com relativa segurança, no entanto quando comparados os resultados com a ASTM D559/D559M-15 somente os blocos com 30% de CBC atendem o critério normativo. Após a conclusão do ensaio, os blocos foram examinados quanto a fissura, rachadura, inchaço, furos, fragmentos e eflorescência. Todos os blocos apresentaram pequena perda de partículas superficiais e danos nos cantos. Segundo Azevedo et al. (2019) e França et al. (2018) a estabilização do solo e a cimentação de suas partículas são muito eficazes, a ponto de a integridade física dos blocos não ser afetada pelas mudanças de volume intencionalmente induzidas pelo ensaio.

Outro fator observado foi a variação volumétrica (Figura 41), os blocos não apresentaram nenhuma propensão a retração ou expansão de volume significativa, foram observadas pequenas alterações de retração volumétrico de 0,15%, 0,45%, para os traços TR e T20CBC e de expansão de 0,09% e 0,45% para os traços T10CBC e T30CBC. Os valores percentuais de variação de volume encontrados foram inferiores ao limite máximo determinado pela norma NBR 8491 (2012) que define 1% para tijolos de solo-cimento.

Segundo Akinyemi et al. (2021) a tendência ao encolhimento é função do limite plástico e da quantidade de água na argila, juntamente com o volume de água de amassamento. O autor relata que a perda de água dos poros leva à retração e quanto maior a plasticidade do solo, maior a retração seca. Para que os tijolos sejam duráveis e tenham integridade estrutural quando utilizados para fins de construção, é desejável que tenham um limite de retração baixo, pois assim há uma possibilidade muito baixa de falha ao longo do tempo.

Figura 42 - Análise dimensional



Foi possível observar que a cada ciclo de molhagem e secagem obteve-se um aumento de resistência à absorção de água dos blocos, conforme apresentado na (Tabela 17).

Tabela 18 - Absorção de água durante ensaio de molhagem e secagem

Ciclos	TR			T10CBC		
	Massa saturada (Kg)	Massa seca (Kg)	A (%)	Massa saturada (Kg)	Massa seca (Kg)	A (%)
1	3,019	2,492	21,15	3,049	2,471	23,39
2	3,012	2,502	20,38	3,049	2,481	22,89
3	3,017	2,505	20,44	3,048	2,475	18,80
4	3,019	2,520	16,54	3,019	2,492	17,45
5	3,018	2,522	16,45	3,050	2,509	17,72
6	3,021	2,534	16,12	3,053	2,507	17,89
Ciclos	T20CBC			T30CBC		
	Massa saturada (Kg)	Massa seca (Kg)	A (%)	Massa saturada (Kg)	Massa seca (Kg)	A (%)
1	3,050	2,492	22,39	3,063	2,524	21,35
2	3,047	2,487	22,52	3,045	2,527	20,50
3	3,049	2,492	18,27	3,056	2,532	17,21
4	3,050	2,519	17,40	3,058	2,560	16,30
5	3,050	2515	17,55	3,060	2,560	16,35
6	3,054	2,507	17,55	3,065	2,555	16,64

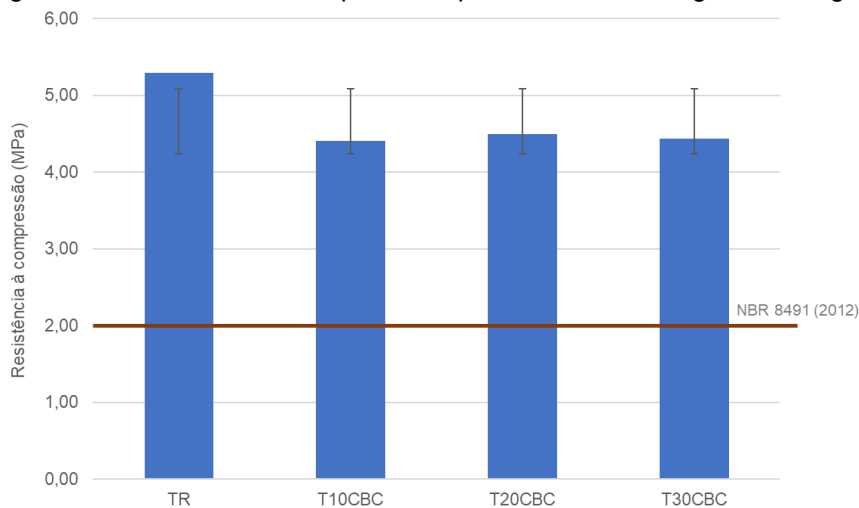
Os resultados mostram que a absorção de água após os seis ciclos atinge valores de 16,12%, 17,89%, 17,55% e 16,64% para os traços TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC respectivamente, valores menores do que o estipulado pela NBR 8491 (2012) de $\leq 20\%$. O envelhecimento acelerado dos blocos melhora a resistência à absorção de água, quando comparados com a avaliação após 14, 21 e 28 dias de

idade. Segundo Sekhar e Nayak (2018) esse acontecimento deve-se às interações do cimento com os silicatos de alumínio no solo para formar produtos cimentícios, que conseqüentemente unem as partículas do solo e endurecem com o tempo, reduzindo assim a interconectividade dos vazios.

Foi avaliado o efeito do envelhecimento acelerado sobre o desempenho mecânico dos blocos. Foram testados para determinar a resistência à compressão em condições úmidas. Os resultados são apresentados na Figura 42.

A resistência à compressão dos blocos após os ciclos de molhagem e secagem são maiores do que os valores iniciais obtidos na cura ambiente, e a comparação entre as médias de cada traço através demonstram que os tratamentos não diferem significativamente entre eles.

Figura 43 - Resistência à compressão após ciclos de molhagem e secagem



Verificou-se que a resistência dos blocos aumentou em todos os traços após o envelhecimento acelerado. O traço de referência, por exemplo, em comparação aos blocos curados naturalmente aos 28 dias de idade alcançou uma resistência superior em 21,93%. O T10CBC 14,29%, o T20CBC atingiu 25,39% e o traço com 30% de CBC obteve 12,48%.

Comparando os tratamentos pode-se observar que o traço de referência tem uma resistência à compressão superior aos demais, em relação ao T10CBC 16,64%, T20CBC 15,53% e T30CBC 16,07%. Segundo Kasinikota; Tripura (2021) isso indica que uma quantidade maior de cimento é eficaz em reter a resistência para suportar diferentes condições ambientais. No entanto todos os blocos desenvolvidos resistem

aos requisitos de molhagem e secagem, isso é muito importante para vida útil dos blocos quando aplicados em alvenaria.

4.9 Condutividade térmica

Foram testados um único bloco por conjunto de placas, e tirada a média. A Tabela 18 apresenta os resultados de condutividade térmica e a Tabela 19 apresenta a densidade seca dos corpos-de-prova avaliados no ensaio.

Os resultados mostram que a condutividade térmica dos blocos depende mais da densidade do que o teor de substituição de cimento por CBC, com o aumento da densidade ocorre o aumento do valor de condutividade. A relação direta de densidade com a sua condutividade térmica foi constatada por Jose; Kasthurba (2021), Vilela et al. (2020), Bogas *et al.* (2019), Sore et al. (2018), Minguela (2017).

Outro fator observado é que com o aumento da temperatura das placas quentes obtém-se maior condutividade térmica para os BTCs, também observado por Balaji et al. (2017) conforme a temperatura do bloco aumenta, o conteúdo de água diminui, resultando em aumento da condutividade térmica.

Tabela 19 - Resultados de condutividade térmica

Tratamento	λ (W/m.K)	λ (W/m.K)	λ (W/m.K)	λ (W/m.K)	λ (W/m.K)	λ (W/m.K)
	55 °C - P1	55 °C - P2	Média	65 °C - P1	65 °C - P2	Média
TR	0,642	0,684	0,663	0,660	0,709	0,684
T10CBC	0,647	0,662	0,654	0,607	0,675	0,641
T20CBC	0,696	0,757	0,726	0,743	0,811	0,777
T30CBC	0,710	0,622	0,666	0,905	0,830	0,867

P1 – Placa 1 / P2 – Placa 2 - (CV: TR 4,47; T10CBC: 1,62; T20CBC: 5,93; T30CBC: 9,34)

Tabela 20 - Densidade seca dos CPs de condutividade térmica

Tratamento	Placa	M_s	ρ_d	Placa	M_s	ρ_d	ρ_d
		Kg	g/cm ³		Kg	g/cm ³	Média
TR	P1	5,015	1,631	P2	5,080	1,653	1,642
T10CBC	P1	4,925	1,602	P2	5,075	1,651	1,626
T20CBC	P1	5,055	1,644	P2	5,085	1,654	1,649
T30CBC	P1	5,260	1,711	P2	5,015	1,631	1,671

CV: TR 0,94; T10CBC: 2,13; T20CBC: 0,43; T30CBC: 3,38

Os valores de condutividade térmica variaram de 0,607 à 0,905 (W/m.K) e foi constatada a relação direta de densidade com a condutividade térmica. Com o aumento da densidade de 1,631 g/cm³ da placa 1 do TR para 1,711 g/cm³ da placa 1 do T30CBC fez com que a porcentagem de isolamento térmico diminuísse 10% com a placa quente estabilizada em 55 °C. Se a comparação for feita para os mesmos blocos a 65 °C o aumento de condutividade térmica é de 27%.

Esses resultados obtidos estão abaixo do valor estipulado pela NBR 15220-2 (2005) de 1,00 W/(m.K) para tijolos de barro com densidade entre 1600-1800 Kg/m³.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo experimental foi conduzido para avaliar o comportamento do subproduto de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland dosadas com solo pobre para compactação em relação as propriedades física, mecânica e térmica de blocos de terra comprimida.

O principal resultado desta pesquisa foi comprovar que o solo com alto teores de fino, pobre para compactação de BTC, estabilizado com teores de até 30% de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, devidamente beneficiada, em substituição ao cimento Portland, produz blocos de terra comprimida similares aos confeccionados com cimento Portland em relação aos valores de desempenho físico e mecânico estabelecidos pela NBR 8491 (2012).

As análises do solo demonstram que o solo é classificado como A-7-5, segundo a HRB (Highway Research Board), e de acordo com a ASTM D2487-17 que segue o padrão USCS para fins de engenharia, o classifica como MH, considerado um solo de baixa resistência quando compactado para BTC, no entanto feita a estabilização com 10% de cimento em peso do solo e a substituição do cimento por 10%, 20% e 30% de CBC o solo atendeu os requisitos físicos e mecânicos das normas NBR 8491 (2012); UNE 41410 (2008); XP P13-901 (2001); NZS 4298 (1998); SLS 1382-1 (2009) e BIS IS 1725 (2013).

Em relação às exigências para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento, o resultado para a CBC pelo ensaio da peneira de 45 µm foi de retenção de 20% de CBC atendendo a recomendação da NBR 12653 (2014). As argamassas produzidas com cimento Portland (referência), apresentaram resistência à compressão média de 29,93 MPa e as argamassas com CBC 34,03 MPa. O índice de atividade pozolânica alcançou 113,7%, valor superior ao exigido pela NBR 12653 (2014) de 90%, confirmando seu potencial de adição em matrizes cimentícias.

A energia de compactação adotada no presente estudo de 3,98 kg/cm² foi o suficiente para obter a densidade alvo e blocos com resistência à compressão acima do estipulado pela norma técnica NBR 8491 (2012), de 2,0 MPa e obter blocos com acabamento liso em todas as faces e uma boa uniformidade ao longo do comprimento largura e profundidade; sem sinais de rachaduras, fissuras, vazios superficiais e compactação incompleta. Nessa energia de compactação o operador da prensa manual consegue abaixar manualmente o braço da alavanca sem dificuldade.

A adição de cimento é eficaz para aumentar a resistência à compressão e a resistência à absorção de água dos blocos. Os traços com 10% de cimento possuem resistência média superior aos de 5% de cimento em 56% e em relação a 7% de cimento 45%. Sendo que no estudo de dosagem o traço com solo (A7-5) + 10% de cimento foi o único a atender as especificações normativas.

Entre as dosagens de substituição de cimento por CBC, o teor de 30% de CBC apresentou a maior resistência à compressão, de 3,93 MPa aos 28 dias, (51% superior ao estabelecido pela NBR 8491 (2012) seguido pelas dosagens de 20% de CBC aos 14 dias com resistência de 3,90 MPa e 10% de CBC aos 28 dias com resistência de 3,78 Mpa.

À medida que a quantidade de CBC aumenta, a absorção de água diminui. Os valores de absorção total de água variaram entre 18,27% e 24,24%, sendo esses valores afetados significativamente pela densidade, somente os blocos que atingiram densidade acima de 1,699 Kg/cm³ obtiveram índice de absorção de água após 24 horas abaixo do estipulado pela norma técnica NBR 8491 (2012) de valor $\leq 20\%$.

A absorção de água progride mais rapidamente durante a fase inicial de 1min a 60 min do que na fase posterior de 1 a 24 horas, sendo que com 15 minutos já é absorvido mais do que 50% do total de 24h. A análise geral foi de 15% de absorção de água com 1 min, 25% com 2min, 30% com 3 min, 36% com 4 min, 41% com 5 min, 49% com 10 min, 58% com 15 min, 69% com 30 min, 77% com 45 min, 83% com 1 h, 90% com 1h30min, 94% com 2h, 97% com 12h, 99,8% com 18h em relação as 24 horas de ensaio.

Os valores de condutividade térmica variaram de 0,607 à 0,905 (W/m.K) e foi constatada a relação direta de densidade com a condutividade térmica. Os valores de condutividade térmica dos blocos de solo-cimento dependem mais da densidade do que o teor de substituição de cimento por CBC. Outro fator observado é que com o aumento da temperatura das placas quentes obtém-se maior condutividade térmica para os BTCs.

Os resultados do ensaio de molhagem e secagem demonstram valores de perda percentual de massa que variam entre 0,38-3,77%. Todos os teores estudados estão de acordo com as condições dos padrões técnicos brasileiros com relativa segurança, no entanto quando comparados os resultados com a ASTM D559/D559M-15 somente os blocos com 30% de CBC atendem o critério normativo.

A combinação de cimento e CBC foram eficazes na prevenção da retração. O solo argiloso do presente estudo não apresentou nenhuma propensão à retração ou expansão de volume, foram observadas pequenas alterações no ciclo de molhagem e secagem de encolhimento volumétrico e de expansão. Os valores percentuais de variação de volume encontrados foram inferiores ao limite máximo determinado pela norma NBR 8491 (2012) que define 1% para tijolos de solo-cimento.

O desempenho mecânico e físico de longo prazo dos blocos foi avaliado após o ensaio de molhagem e secagem e foi observado que a resistência à compressão dos blocos foi maior do que os valores iniciais de 14, 21 e 28 dias de idade. A absorção de água após o envelhecimento acelerado foi menor do que o estipulado pela NBR 8491 (2012) de $\leq 20\%$ para todos os traços. Após o seu envelhecimento todos os traços são semelhantes em relação à resistência à compressão e absorção de água, não diferem significativamente entre eles.

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Padronizar a densidade dos blocos de referência para obtenção de um teor ótimo de cimento para o traço de referência.

- Verificar se para esse tipo de solo (com alto teor de grãos finos) é possível aumentar a quantidade de CBC em substituição ao cimento.

- Realizar o ensaio de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura para investigar a composição mineralógica, microestrutura e morfologia.

- Análise do ciclo de vida – analisar os impactos ambientais e os aspectos econômicos associados à produção de BTC em relação aos tijolos queimados e blocos de concreto, considerando a extração de matéria-prima, fabricação e transporte, utilizando como indicadores de energia incorporada, aquecimento global e custo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. Dosagem das misturas de solo-cimento - normas de dosagem e métodos de ensaios. 3 ed. São Paulo: ABCP, Boletim Técnico ET-35, 2004.

AKINYEMI, B. A.; OROGBADE, B. O.; OKORO, C. W. The Potential of Calcium Carbide Waste and Termite Mound Soil as Materials in the Production of Unfired Clay Bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123693, jan. 2021.

ALAVÉZ-RAMÍREZ, R. et al. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. **Construction and Building Materials**. [S.l.] v. 34, p. 296-305, Sept. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5102-96**. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D698 – 12**: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2392 / E2392M-10**, Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ARSÈNE, M.I.L., FRÉDÉRIC C., FAGEL, N. Improvement of lifetime of compressed earth blocks by adding limestone, sandstone and porphyry aggregates. **Journal of Building Engineering**. V. 29, May. 2020, p. 101155.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro-RJ, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - 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 12253**: solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-4**: Desempenho térmico de edificações. Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16974**. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

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

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 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

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-RJ, 2012.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION. **XP P13-901**: Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de reception. France, 2001.

AZEVEDO, A. R. G. *et al.* Assessing the Potential of Sludge Generated by the Pulp and Paper Industry in Assembling Locking Blocks. **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 334–340, maio 2019.

BALAJI, N. C.; MANI, M.; VENKATARAMA REDDY, B. V. Thermal Conductivity Studies on Cement-Stabilised Soil Blocks. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 170, n. 1, p. 40–54, fev. 2017.

BARROS, M. M. et al. Ecological Bricks from Dimension Stone Waste and Polyester Resin. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117252, jan. 2020.

BOGAS, J. A.; SILVA, M.; GLÓRIA GOMES, M. Unstabilized and Stabilized Compressed Earth Blocks with Partial Incorporation of Recycled Aggregates. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 13, n. 4, p. 569–584, 19 maio 2019.

BRITISH STANDARDS. BSEN 772-1. Methods of test for masonry units. Determination of compressive strength. 2011.

BRUNO, A. W. et al. Mechanical Behaviour of Hyper compacted Earth for Building Construction. **Materials and Structures**, v. 50, n. 2, p. 160, abr. 2017. Buildings. Wellington, 1998.

CAVALCANTI FILHO, L.L. **Avaliação da resistência à compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de algaroba**. Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

CDI-CRATerre-EAG/ODA. (1998). **Compressed earth blocks standards, series technologies**. p.144.

CORDEIRO, G.C. *et al.* Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**. [S.l.] v. 39, p.110 - 115, Feb. 2009.

COSTA, M.R. **Análise da reatividade pozolânica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2017. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

COTTRELL, J. A. *et al.* An Investigation into the Influence of Geometry on Compressed Earth Building Blocks Using Finite Element Analysis. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121997, mar. 2021.

ELAHI, T. E. et al. Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122367, mar. 2021.

ELAHI, T. E. et al. Suitability of Fly Ash and Cement for Fabrication of Compressed Stabilized Earth Blocks. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120935, dez. 2020.

FAIRBAIRN, E.M.R. et al. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. **Journal of Environmental management**. [S.l.] v. 91, p. 2.864-1.871, Sept. 2010.

FERRARI, V. J. et al. Tijolos vazados de solo-cimento produzidos com solo da Região do Arenito Caiuá do Paraná. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 131-148, jul./set. 2014.

FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. Tese (Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FERREIRA, R. de C.; CUNHA, A. H. N. Quality Evaluation of Soil-Cement-Plant Residue Bricks by the Combination of Destructive and Non-Destructive Tests. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 543–549, ago. 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Culturas e produtos pecuários**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em jul. 2021.

FRANÇA, B. R. et al. Durability of Soil-Cement Blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble. **Materials Research**, v. 21, n. suppl 1, p. e20171118, 2018.

GANESAN, K.; RAJAPOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**. [S.l.] v. 29, p. 515-524, July. 2007.

GÓIS, L. C. **Estudo da incorporação da cal em composições binárias de solo-cimento para produção de tijolos maciços**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, J. R. et al. Compaction Effect on the Compressive Strength and Durability of Stabilized Earth Blocks. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 179–188, fev. 2018.

GRANDE, F.M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestre em Arquitetura) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GUTIÉRREZ-ORREGO, D. A.; GARCIA-ARISTIZABAL, E. F.; GOMEZ-BOTERO, M. A. Mechanical and Physical Properties of Soil-Cement Blocks Reinforced with Mineral Wool and Sisal Fiber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 3, p. 04016225, mar. 2017.

HANY, E. et al. Investigating the Mechanical and Thermal Properties of Compressed Earth Bricks Made by Eco-Friendly Stabilization Materials as Partial or Full

Replacement of Cement. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122535, abr. 2021.

HOSSAIN, K.M.A.; MOL, L. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. **Construction and Building Materials**. [S.I.] v.25, p. 3495-3501, Aug. 2011.

INDIAN STANDARD. **IS 1725**. Stabilized soil blocks used in general building construction – Specification. New Delhi, 2013.

IPCC, 2021: **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I.Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. InPress.

ISLAM, M. S. et al. Effectiveness of Fly Ash and Cement for Compressed Stabilized Earth Block Construction. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119392, set. 2020.

JORDAN, R. A. et al. MANUFACTURE OF SOIL-CEMENT BRICKS WITH THE ADDITION OF SUGARCANE BAGASSE ASH. **Engenharia Agricola**, v. 39, n. 1, p. 26–31, fev. 2019.

JOSE, A., KASTHURBA A.K. Laterite soil-cement blocks modified using natural rubber latex: Assessment of its properties and performance. **Construction and Building Materials**, V. 273, p. 121991 Mar. 2021.

KASINIKOTA, P.; TRIPURA, D. D. Evaluation of Compressed Stabilized Earth Block Properties Using Crushed Brick Waste. **Construction and Building Materials**, v. 280, p. 122520, abr. 2021.

KAZMI, S.M.S. et al. Manufacturing of sustainable Clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and Rice husk ashes. **Construction and building materials**. [S.I.] v. 120, p. 29-41, Sept. 2016.

LABOREL-PRENERON, A. et al. Effect of Plant Aggregates on Mechanical Properties of Earth Bricks. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 29, p. 04017244, dec. 2017.

LAVIE ARSÈNE, M.-I.; FRÉDÉRIC, C.; NATHALIE, F. Improvement of Lifetime of Compressed Earth Blocks by Adding Limestone, Sandstone and Porphyry Aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 101155, maio de 2020.

LIMA, S.A. et al. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**. [S.I.] v. 35, p. 829-837, oct. 2012.

LUCAS, C.N.M.; SCALON, V.L.; AZAMBUJA, M.A. Medição de condutividade térmica em concreto leve produzido com resíduo de pedra basáltica. In: V Simpósio Brasileiro online de Gestão Urbana. Online. p.869-883, jul.2021.

MACEDO, P.C. Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza de bagaço da cana-de-açúcar. Dissertação (engenharia civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha solteira, 2009.

MAIA, L. R. **Contribuição às construções em terra comprimida e compactada e influências no conforto**. 2016. 137 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MANSANEIRA, E. C. **Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana de açúcar em substituição parcial ao cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

MARQUES, S.K.J. **Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2015. 139 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

MCKENZIE, M.J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**. 2021;372:n71.

MILANI, A. P. S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz**. Dissertação (Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MINGUELA, A. F. Bio-Composites to Tackle UK Built Environment Carbon Emissions: Comparative Analysis on Load-Bearing Capacity, Hygroscopic and Thermal Performance of Compressed Earth Blocks with Addition of Industrial Hemp Waste. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v. 11, n. 1, p. 395–412, 30 nov. 2017.

MOLIN, R.G.D. Sugarcane Bagasse Ash Micronized Using Air Jet Mills for Green Pozzolan in Brazil. **International Journal of Chemical Engineering**. v. 2019, p. 10, may. 2019.

MORAES J.C.B. *et al.* Improving the reactivity of a former ground sugarcane bagasse ash produced by autogenous combustion through employment of two different additional grinding procedures. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121471, feb. 2021.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

MOURA, E. M. de *et al.* Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 69–80, jan. 2021.

NARAYANASWAMY, H. A. *et al.* Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. **Construction and Building Materials**, v.243 p. 118096 May 2020.

NETO, J. S. *et al.* Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 120959. Jan. 2021.

NEW ZEALAND STANDARD. **NZS 4298**. Materials and workmanship for earth

NORMA ESPAÑOLA. **UNE 41410:2008**. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid, 2008.

NORMA PORTUGUESA. **NPEN772-1**. Métodos de ensaio de blocos de alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão, 2002.

NSHIMIYIMANA, P.; MESSAN, A.; COURARD, L. Hydric and Durability Performances of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders: Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 6, p. 04021121, jun. 2021.

OJEDA-FARÍAS, O.; MENDOZA-RANGEL, J. M.; BALTAZAR-ZAMORA, M. A.. Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material. **Rev. ALCONPAT**. 2018, vol.8, n.2, pp.194-208. ago. 2020.

OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. Second ed. Vancouver. Routledge, 1987.

PADUA P. G. L. **Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cimentos aditivados com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas**. 2012. Tese (Engenharia de estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2012

PEREIRA, Adriana Maria. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. 207 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2014.

RIVERA, J. *et al.* Compressed Earth Blocks Stabilized with Glass Waste and Fly Ash Activated with a Recycled Alkaline Cleaning Solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124783, feb. 2021.

RIVERA, J. F. *et al.* Compressed and Stabilized Soil Blocks with Fly Ash-Based Alkali-Activated Cements. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120285, dez. 2020.

RIVERA-GÓMEZ, C. et al. Sample Key Features Affecting Mechanical, Acoustic and Thermal Properties of a Natural-Stabilised Earthen Material. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121569, feb. 2021.

ROCHA, J. H.A. et al. Physical-mechanical assessment for soil-cement blocks including rice husk ash. **Case Studies in Construction Materials**. v14, p.05-48, jun. 2021.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A.D. **Árvore do conhecimento cana-de-açúcar: Correção e adubação**. AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA (AGEITEC). Disponível em: < https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_6_711200516715.html# >. Acesso em: 10, dezembro de 2021.

ROSSI, M. 2017. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p. (inclui Mapas)

SAIDI, M. et al. Stabilization Effects on the Thermal Conductivity and Sorption Behavior of Earth Bricks. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 566–577, abr. 2018.

SALIM, W.R. et al. Improving the Bearing Strength of Sandy Loam Soil Compressed Earth Block Bricks Using Sugarcane Bagasse Ash. **Sustainability**. [S.l.] v.6, p. 3686-3696, jun. 2014.

SAMSON, B. P. **Gestão de resíduo e tecnologia ambiental na fabricação de tijolos solo-cimento**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

SANTOS, L. M. A.; SILVA NETO, J. A. da; AZERÊDO, A. F. N. de. Soil Characterization for Adobe Mixtures Containing Portland Cement as Stabilizer. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, p. e-12565, 2020.

SECO, A. et al. Estimated and Real Durability of Unfired Clay Bricks: Determining Factors and Representativeness of the Laboratory Tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 600–605, jan. 2017.

SEKHAR, D.; 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, mar. 2018.

SERBAH, B. *et al.* Dredged Sediments Valorisation in Compressed Earth Blocks: Suction and Water Content Effect on Their Mechanical Properties. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 503–515, jan. 2018.

SOARES, M. M. N. S. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar**. 2010. Dissertação (Construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SORE, S. O. et al. Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 333-345, mar. 2018.

SOUSA, L. R. L. de. **Feasibility of the use of sugar cane bagasse ash (CBC) from Goiás state to replace Portland cement**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

SRAVAN, M. V.; NAGARAJ, H. B. Potential Use of Enzymes in the Preparation of Compressed Stabilized Earth Blocks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017103, sept. 2017.

SRI LANKA STANDARDS INSTITUTE. **SLS 1382-1**. Specification for compressed stabilized earth blocks. Part 1: Requirements. Colombo, 2009.

TEIXEIRA, E. R. et al. Mechanical and Thermal Performance Characterisation of Compressed Earth Blocks. **Energies**, v. 13, n. 11, p. 2978, 10 jun. 2020.

VASCONCELOS, M. C.A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de Cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

VILELA A.P. et al. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**. v. 262, nov. 2020, p.120883.

YATAWARA, M.; ATHUKORALA, S. Potential of Replacing Clay Soil by Rice Husk Ash (RHA) in Enhancing the Properties of Compressed Earth Blocks (CEBs). **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 3, p. 3474–3486, mar. 2021.

APÊNDICES

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão aos 14 dias para T1, T2 e T3			
CPs	T1 σ (MPa)	T2 σ (MPa)	T3 σ (MPa)
1	1,49	0,89	1,97
2	0,94	3,08	2,38
3	1,41	2,74	2,73
4	2,63	2,11	2,84
5	1,28	1,36	3,87
6	1,86	1,54	5,19
7	1,47	1,80	6,20

Traço (TR) - Resistência à compressão			
CPs	σ_{14} MPa	σ_{21} MPa	σ_{28} (MPa)
1	3,90	3,92	4,51
2	3,54	3,29	3,29
3	4,58	3,60	4,27
4	3,03	5,63	3,40
5	3,99	3,78	4,56
6	4,50	4,29	4,68
7	4,34	3,60	4,17

Traço (T10CBC) - Resistência à compressão			
CPs	σ_{14} MPa	σ_{21} MPa	σ_{28} (MPa)
1	3,87	3,68	4,16
2	3,76	8,14	3,41
3	3,73	2,99	3,21
4	3,33	4,37	3,69
5	3,58	4,24	3,73
6	4,40	3,70	4,02
7	2,74	3,12	4,21

Traço (T20CBC) - Resistência à compressão			
CPs	σ_{14} MPa	σ_{21} MPa	σ_{28} (MPa)
1	3,56	4,74	3,32
2	2,94	4,07	3,13
3	3,22	3,68	3,65
4	2,79	2,53	3,16
5	3,83	3,97	3,03
6	3,82	4,12	3,16
7	2,94	4,22	4,01

Traço (T30CBC) - Resistência à compressão			
CPs	σ_{14} MPa	σ_{21} MPa	σ_{28} (MPa)
1	3,05	4,51	4,46
2	3,97	4,34	3,32
3	3,72	4,06	4,44
4	4,14	3,66	3,32
5	3,46	3,61	4,20
6	3,36	3,30	3,79
7	2,88	2,98	3,96

ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Traço (T1) - Absorção de água aos 14 dias					
CPs	M_s 14 dias (g)	M_{sat} 14 dias (g)	Vol (cm ³)	ρ_d 14º dia (g/cm ³)	A (%)
1	2336,60	2895,00	1471,04	1,588	23,90
2	2316,70	2889,30	1467,34	1,579	24,72
3	2325,10	2883,20	1458,99	1,594	24,00

Traço (T2) - Absorção de água aos 14 dias					
CPs	M_s 14 dias (g)	M_{sat} 14 dias (g)	Vol (cm ³)	ρ_d 14º dia (g/cm ³)	A (%)
1	2264,28	2892,86	1506,72	1,503	27,76
2	2254,28	2912,57	1548,08	1,456	29,20
3	2293,02	2923,23	1503,12	1,526	27,48

Traço (T3) - Absorção de água aos 14 dias					
CPs	M_s 14 dias (g)	M_{sat} 14 dias (g)	Vol (cm ³)	ρ_d 14º dia (g/cm ³)	A (%)
1	2482,69	2975,46	1494,69	1,611	19,85
2	2529,94	3021,57	1502,34	1,681	19,43
3	2484,41	2980,27	1501,15	1,655	19,96

Traço (TR) - Absorção total de água aos 14 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2400,78	3007,93	1531	1,568	23,90
2	2460,39	3027,69	1487	1,655	24,72
3	2442,59	3032,81	1517	1,610	24,00

Traço (TR) - Absorção total de água aos 21 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2459,04	3050,58	1531	1,62	24,06
2	2464,13	3017,71	1487	1,68	22,47
3	2453,43	3035,97	1517	1,65	23,74

Traço (TR) - Absorção total de água aos 28 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2479,11	3039,63	1476	1,68	22,61
2	2448,39	2995,40	1480	1,65	22,34
3	2411,59	2976,31	1478	1,63	23,42

Traço (T10CBC) - Absorção total de água aos 14 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2493,08	3076,69	1517	1,64	23,41
2	2465,67	3078,20	1529	1,61	24,84
3	2471,43	3064,36	1531	1,61	23,99

Traço (T10CBC) - Absorção total de água aos 21 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2472,25	3075,73	1535	1,61	24,41
2	2501,94	3101,99	1568	1,60	23,98
3	2508,75	3118,88	1580	1,59	24,32

Traço (T10CBC) - Absorção total de água aos 28 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2486,33	3062,14	1507	1,65	23,16
2	2457,25	3030,67	1519	1,62	23,34
3	2462,10	3083,36	1548	1,59	25,23

Traço (T20CBC) - Absorção total de água aos 14 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2474,03	3095,40	1547	1,60	25,12
2	2518,78	3087,29	1529	1,65	22,57
3	2517,25	3082,21	1533	1,64	22,44

Traço (T20CBC) - Absorção total de água aos 21 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2616,42	16,28	1531	1,71	18,54
2	2570,81	18,70	1504	1,71	19,93
3	2540,18	19,29	1513	1,68	21,18

Traço (T20CBC) - Absorção total de água aos 28 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2500,18	3059,56	1519	1,65	22,37
2	2479,32	3060,95	1514	1,64	23,46
3	2483,63	3056,23	1534	1,62	23,05

Traço (T30CBC) - Absorção total de água aos 14 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2561,36	3056,30	1507	1,70	19,32
2	2572,24	3083,64	1511	1,70	19,88
3	2583,29	3061,70	1486	1,74	18,52

Traço (T30CBC) - Absorção total de água aos 21 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2612,30	3080,60	1509	1,73	17,93
2	2594,10	3069,24	1499	1,73	18,32
3	2591,46	3073,14	1496	1,73	18,59

Traço (T30CBC) - Absorção total de água aos 28 dias					
CPs	M_s (g)	M_{sat} (g)	Vol (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	A (%)
1	2590,98	3083,64	1497	1,73	19,01
2	2549,00	3073,54	1506	1,69	20,58
3	2638,85	3167,57	1505	1,75	20,04

ANÁLISE ESTATÍSTICA ANOVA E TUKEY

ANOVA - Absorção de água após 24 horas com 28 dias de idade					
Teste de igualdade de meios	SQ	GL	QM	F	p
Entre os grupos:	27,336	3	9,11201	14,18	0,001443
Dentro dos grupos:	5,14027	8	0,642533	Permutação p (n=99999)	
Total:	32,4763	11	0,00522		
Componentes da variância (apenas para efeitos aleatórios):					
Var(grupo):	2,82316	Var(erro)	0,642533	ICC:	0,814602
omega2:	0,7672				
Teste do Levene para a homogeneidade da variância, a partir dos meios	p:	0,2971			
Teste do Levene, a partir de medianas	p:	0,9069			
Teste Welch F em caso de desvios desiguais: F=10,13, df=4,33, p=0,02036					

TUKEY - Absorção de água após 24 horas com 28 dias de idade				
	TR	T10CBC	T20CBC	T30CBC
TR		0,378	0,9934	0,0092
T10CBC	2,42		0,5054	0,001219
T20CBC	0,3673	2,053		0,006612
T30CBC	6,295	8,715	6,662	

ANOVA - Resistência à compressão com 14 dias de idade (T1, T2 e T3)					
Teste de igualdade de meios	SQ	GL	QM	F	p
Entre os grupos:	4,72372	2	2,36186	12,68	0,002409
Dentro dos grupos:	1,67645	9	0,186272	Permutação p (n=99999)	
Total:	6,40017	11	0,00317		

Componentes da variância (apenas para efeitos aleatórios):					
Var(grupo):	0,543897	Var(erro):	0,186272	ICC:	0,744892
omega2:	0,6606				
Teste do Levene para a homogeneidade da variância, a partir dos meios	p:	0,2234			
Teste do Levene, a partir de medianas	p:	0,4684			
Componentes da variância (apenas para efeitos aleatórios): F=7,666, df=5,259, p=0,02763					

TUKEY - Resistência à compressão com 14 dias de idade (T1, T2 e T3)			
	T1	T2	T3
T1		0,8845	0,003411
T2	0,6719		0,006745
T3	6,476	5,804	

ANOVA - Resistência à compressão com 28 dias de idade (TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC)					
Teste de igualdade de meios	SQ	GL	QM	F	p
Entre os grupos:	2,26773	3	0,75591	3,719	0,02506
Dentro dos grupos:	4,87857	24	0,203274	Permutação p (n=99999)	
Total:	7,1463	27	0,02754		
Componentes da variância (apenas para efeitos aleatórios):					
Var(grupo):	0,078948	Var(erro)	0,203274	ICC:	0,279737
omega2:	0,2256				
Teste do Levene para a homogeneidade da variância, a partir dos meios	p:	0,4981			
Teste do Levene, a partir de medianas	p:	0,6747			
Componentes da variância (apenas para efeitos aleatórios): F=3,839, df=13,16, p=0,03573					

TUKEY - Resistência à compressão com 28 dias de idade (TR, T10CBC, T20CBC e T30CBC)				
	TR	T10CBC	T20CBC	T30CBC
TR		0,4806	0,01822	0,8426
T10CBC	2,054		0,3162	0,9219
T20CBC	4,544	2,49		0,1064
T30CBC	1,165	0,8886	3,378	