

Avaliação mecânica de Blocos de terra comprimida estabilizados com cinza de bagaço de Cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland

Jeferson Fernando Corrêa Antonelli

Mestre, UNESP, Brasil
j.antonelli@unesp.br

Maximiliano dos Anjos Azambuja

Professor Doutor, UNESP, Brasil
m.azambuja@unesp.br

RESUMO

Este trabalho investiga a resistência mecânica de Blocos de Terra Comprimida (BTC) estabilizados com Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC) em substituição parcial ao cimento Portland, com o objetivo de valorizar os materiais de construção locais e a contribuir para a redução de custos de moradias especialmente em áreas rurais. Neste contexto, uma série de blocos foram fabricados usando solo, 10% de cimento em peso do solo (T1) e substituições do cimento por 10% (T2), 20% (T3) e 30% (T4) de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, compactados com uma energia de 3,98 kg/cm². A resistência à compressão dos blocos foi avaliada aos 14 dias de idade. Os resultados demonstram que a energia de compactação adotada de 3,98 kg/cm² foi o suficiente para obter blocos com acabamento liso em todas as faces e uma boa uniformidade ao longo do comprimento, largura e profundidade. Todos os tratamentos apresentaram excelente resistência à compressão com valores superiores ao exigido pela norma brasileira NBR 8491 (2012) de 2,00 MPa, com resultados de 3,98, 3,63, 3,30 e 3,51 MPa para os traços T1, T2, T3 e T4, respectivamente. De maneira geral, os resultados mostram a viabilidade técnica da fabricação de blocos alternativos para construção de alvenaria utilizando solos naturais estabilizados com cinza de bagaço de cana-de-açúcar contribuindo com construção de moradias seguras, eficientes e ambientalmente corretas.

PALAVRAS-CHAVE: Tijolo ecológico. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Habitações rurais.

1 INTRODUÇÃO

A demanda habitacional mundial continua aumentando, especialmente nos países em desenvolvimento. Para a maioria das populações desses países, a construção de moradias dignas e seguras é onerosa devido a fatores como, preço dos materiais de construção e seu transporte e técnicas de construção, tornando o acesso a uma casa um empreendimento caro, principalmente para quem está no meio rural (GUTIÉRREZ-ORREGO; GARCIA-ARISTIZABAL; GOMEZ-BOTERO, 2017). Extrair materiais da natureza e utilizar técnicas de autoconstrução representa uma estratégia de sobrevivência para famílias rurais de baixa renda (GARCEZ DE FARIAS; BURNETT, 2018). Segundo a United Nations Conference on Human Settlements (Habitat II, 1996) é de suma importância promover métodos e tecnologias de construção disponíveis localmente, apropriados, acessíveis, seguros, eficientes e ambientalmente corretos em todos os países, particularmente nos países em desenvolvimento.

O recente impulso da promoção do BTC vai ao encontro com as necessidades atuais por construção sustentável, uma vez que sua produção não tem processo de queima. Seus benefícios ambientais incluem a redução do consumo de energia e emissão de CO₂ na produção e uma menor demanda por recursos não renováveis. (HANAFI, 2021); (GUILLAUD, 2008). Essa tecnologia tem o potencial de substituir os tijolos atuais de argila queimada e blocos de concreto. O edifício construído de BTC apresenta um bom desempenho térmico, o que regula a umidade e a temperatura interior e melhorar o conforto dos residentes. Portanto, as construções de BTC podem ser amplamente utilizadas em áreas rurais (TURANLI; SARITAS, 2011)

A terra é um material de construção tradicional para construir casas em algumas partes do mundo. Uma das técnicas mais comuns é o uso de tijolos de adobe secos ao sol. Hoje, estima-se que cerca de um terço da população mundial viva em edifícios de adobe (GUILLAUD, 2008). Embora esta técnica seja de baixo custo, os tijolos variam muito em forma, resistência e durabilidade, e isso leva a casas fracas que sofrem danos consideráveis durante fortes chuvas e ventos. Para suprir essas deficiências pode-se adicionar estabilizadores químicos ao BTC na compactação dos blocos. O teor de estabilizador químico pode variar de 5% a 15% em peso do solo para atingir uma resistência à compressão superior a 2 MPa, conforme exigido por algumas

normas técnicas (STURM; RAMOS; LOURENÇO, 2015)

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, pois 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; SHAHRIAR; ISLAM, 2021); (BOGAS; SILVA; GLÓRIA GOMES, 2019))

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar, 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) (FAIRBAIRN et al., 2010) mencionam o Brasil como maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol e a cinza é o último resíduo gerado pela cadeia de cana-de-açúcar e são gerados 25 kg de cinzas por tonelada de bagaço queimado.

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.

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 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. Para alcançar o resultado estipulado pela norma os autores relacionam o sucesso do experimento à moagem, alcançando cinzas ultrafinas (MOLIN FILHO et al., 2019), (MANSANEIRA, 2010) e (SOUSA, 2009).

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, redução do consumo de cimento e de energia incorporada no processo e contribui com a diminuição de emissão de poluentes.

2 OBJETIVO

Avaliar se a substituição do cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar consegue estabilizar blocos de terra comprimida igualmente os blocos estabilizados com 100% de cimento Portland em relação a resistência à compressão aos 14 dias de idade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O solo utilizado para a produção dos BTCs foi coletado na cidade de Pederneiras,

interior do estado de São Paulo, Brasil. A curva de distribuição granulométrica foi traçada conforme a NBR 7181 (2016), ensaio de massa específica NBR 6458 (2016), limites de consistência NBR 6459 (2016), para limite de liquidez e limite de plasticidade utilizou-se a NBR 7180 (2016), o ensaio Proctor foi conduzido conforme a NBR 7182 (2016). Os resultados obtidos a partir desses testes são apresentados na Tabela 1. A distribuição do tamanho de grão do solo indica que o solo apresenta teor de argila de 39%, teor de silte de 37% e teor de areia de 24%. Limite de Liquidez de 56% e índice de plasticidade de 21%. A amostra de solo é identificada como argila silto arenosa roxa escura (ABNT NBR 6502 (1995)) e de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (CH) solo argiloso de alta plasticidade.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização do solo

Propriedade	Parâmetro	Valor
Distribuição granulométrica	Argila (%)	39
	Silte (%)	37
	Areia (%)	24
Limites de Consistência	Limite Líquido, LL (%)	56
	Limite Plástico, LP (%)	36
	Índice de plasticidade, IP (%)	21
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

Fonte: AUTOR, 2022

Os materiais de estabilização usados neste estudo incluem cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 1). O cimento utilizado foi o CPV-ARI fornecido pela LafargeHolcim, Brasil. As composições física, química e mecânica do cimento são mostradas na Tabela 2. O material de cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi coletado na caldeira da usina Diamante, situada no município de Jaú, São Paulo. Após secagem em estufa, as partículas que passaram pela peneira de abertura 850 µm foram retiradas para preparação da amostra. A cinza foi beneficiada por moagem e queima e caracterizada a sua massa específica, massa unitária e a sua finura por meio da peneira de 45 µm (Tabela 3) conforme (ANTONELLI; AZAMBUJA, 2021).

Tabela 2: Propriedades químicas, física e mecânica do cimento

Perda de Fogo 950 °C	SO ₃ (%)	Resíduo insolúvel (%)	MgO (%)	Retido #400 (cm ² /g)	σ ₇ (MPa)
4,10	3,01	≤ 3.50	1,11	4,2	43,6

Fonte: FÁBRICA BARROSO, PERTENCENTE AO GRUPO LAFARGEHOLCIM, 2021

Tabela 3 - Propriedades físicas da CBC.

Propriedades físicas	Valor
Massa específica	g/cm ³ 2,73
Finura por meio da peneira #45	% retida em gramas 20
Massa unitária	g/cm ³ 0,84

Fonte: AUTOR, 2022

Figura 1 - Matéria prima seca para produção de BTC



Fonte: AUTOR, 2022

3.1 Preparação de amostra

A fim de investigar o efeito da CBC na propriedade de resistência do solo cimentado, três faixas de teores de CBC foram utilizadas em substituição ao cimento. Foi preparado um lote de BTC com 10% de cimento (L1) em peso de solo seco e substituídos por 10% (L2), 20% (L3) e 30% (L4) de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Portanto, foram produzidas 4 condições de mistura no total, conforme mostrado na Tabela 4. A mistura dos materiais foi realizada manualmente, o solo e os aditivos foram homogeneizados, para os tratamentos com CBC, o cimento e a CBC foram misturadas antes de homogeneizar com o solo. Em seguida adicionou-se a água até o teor de umidade ótimo conforme descoberto no ensaio Proctor, e misturou-se novamente de forma manual a fim de obter as misturas uniformes. Os materiais recém misturados foram cuidadosamente pesados e colocados no molde medindo 230 × 110 × 60 mm para atingir uma densidade seca alvo de 1,622 g/cm³. A energia de compactação da prensa foi estipulada em 3,98 kg/cm².

Tabela 4 - Proporções de materiais por massa

Tratamento	Solo (g)	Cimento (g)	CBC (g)	Água (g)	Produção (UN)
T1	2160,0	216,0	0,0	594,0	20
T2	2160,0	194,4	21,6	594,0	20
T3	2160,0	172,8	43,2	594,0	20
T4	2160,0	151,2	64,8	594,0	20

Fonte: AUTOR, 2022

Uma vez prensados, os BTCs recém tirados da prensa foram pesados e na sequência realizada a cura em laboratório (Figura 2) por 14 dias quando o ensaio de resistência à compressão foi realizado. Durante este período, os BTCs foram pulverizados com água todos os dias.

Figura 2 - Blocos em cura no laboratório



Fonte: AUTOR, 2022

3.2 Ensaio de resistência à compressão úmida

O ensaio de resistência à compressão (Figura 3) foi realizado com 14 dias de idade pois a NBR 10833 (2012) menciona que os blocos devem ser utilizados após 14 dias de sua fabricação. A metodologia do ensaio foi realizada seguindo a norma brasileira NBR8492 (2012). Antes da aplicação da carga os blocos foram imersos na água por 6 horas para avalia-los em condições de umidade. A aplicação da carga foi uniforme a razão de 500 N/s. Antes do teste, as superfícies dos BTCs foram limpas e duas placas de aço com espessura de 35 mm foram colocadas em ambas as extremidades para garantir contato uniforme e carregamento uniforme. Enquanto a resistência à compressão é obtida dividindo-se a carga máxima que causa a falha dos blocos pela área dos blocos, a resistência à compressão característica é calculada usando a Equação (1) conforme recomendado pela norma brasileira.

$$f_t = \frac{F}{S} \quad (1)$$

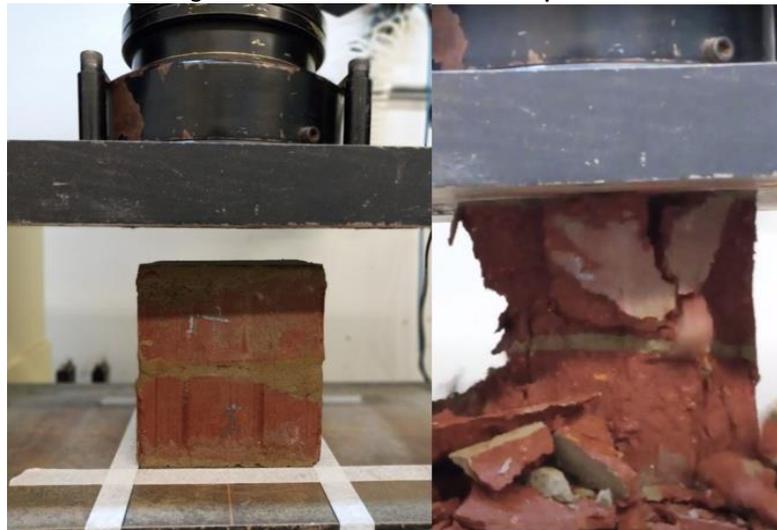
Onde,

f_t é a resistência à compressão simples, expressa em megapascals (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 milímetros quadrados (mm²)

Figura 3 - Ensaio de resistência à compressão



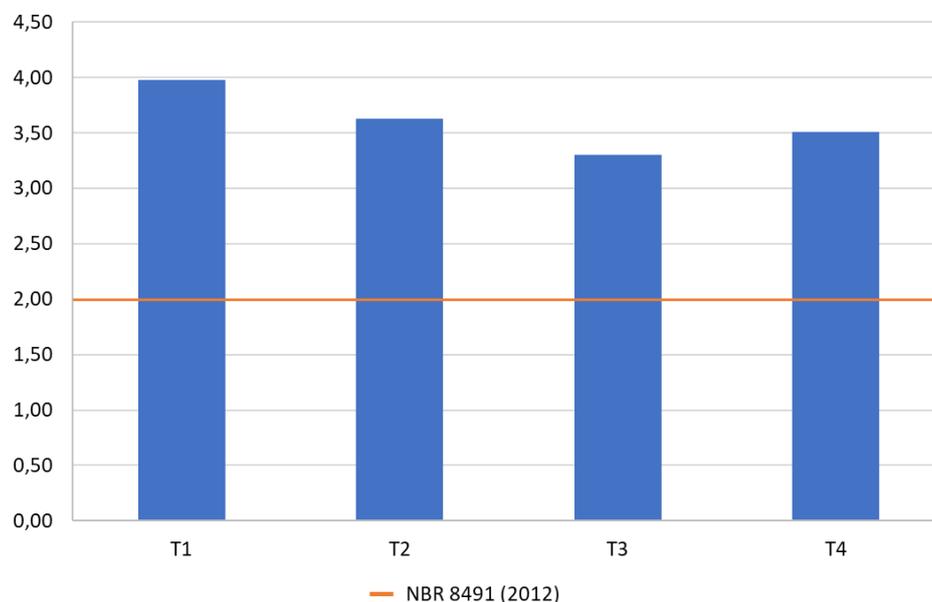
Fonte: AUTOR, 2022

4 RESULTADOS

4.1 Resistência à compressão úmida aos 14 dias de idade

A resistência à compressão úmida dos tratamentos T1, T2, T3 e T4 foram 3,98, 3,63, 3,30 e 3,51 MPa, respectivamente (Figura 4). Como esperado, o traço T1 teve o maior resultado devido ao teor de cimento em relação às demais misturas.

Figura 4 - resultado do ensaio de resistência à compressão



Fonte: AUTOR, 2022

À medida que o teor de CBC foi aumentado, observou-se um pequeno declínio na resistência à compressão úmida. Uma diminuição de 9% foi observada do traço T2 em comparação com o T1 (traço de referência) e a mesma porcentagem de redução de 9% foi

observada para T3 em relação a T2, enquanto o traço T4 teve uma diminuição de 3,31% na resistência quando comparada com a mistura T2.

Os resultados de resistência à compressão dos blocos úmidos aos 14 dias de idade atenderam aos critérios de resistência da NBR 8491(2012) de especificação mínima de 2,0 MPa. Segundo (AKINYEMI; OROGBADE; OKORO, 2021) a presença de cimento ajuda na formação de produtos de hidratação de C–S–H necessários para reduzir vazios e melhorar a resistência. No entanto, para cada diminuição do teor de cimento nas misturas, observou-se uma diminuição pouco expressiva na resistência à compressão úmida.

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.

Entre as dosagens de substituição de cimento por CBC, o teor de 30% de CBC apresentou resistência à compressão, de 3,51 MPa aos 14 dias de idade, 43% superior ao estabelecido pela NBR 8491 (2012) portanto todos os lotes são aptos para construção de alvenaria não estrutural.

A energia de compactação adotada de 3,98 kg/cm² foi o suficiente para 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.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou se a substituição do cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar consegue estabilizar blocos de terra comprimida igualmente aos blocos estabilizados com 100% de cimento Portland em relação à resistência à compressão aos 14 dias de idade. Com base nos resultados deste estudo experimental, pode-se concluir que a energia de compactação adotada de 3,98 kg/cm² foi suficiente para obter blocos com acabamento liso em todas as faces e uma boa uniformidade ao longo do comprimento largura e profundidade. O uso da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento é promissor na produção de blocos de terra comprimida, todos os tijolos produzidos atendem aos requisitos mínimos de resistência à compressão úmida dados pela norma brasileira de solo-cimento. O uso da CBC como substituto do cimento em proporções de 10%, 20% e 30%, praticamente mantiveram a estabilização dos tijolos, com resistência à compressão competitiva aos estabilizados por cimento.

REFERÊNCIAS

AKINYEMI, B. A.; OROGBADE, B. O.; OKORO, C. W. The Potential of Calcium Carbide Waste and Termitic 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**, v. 34, p. 296–305, set. 2012.

ANTONELLI, J. F. C., & AZAMBUJA, M. DOS A. (2021). Evaluación de la absorción de agua en bloques de tierra comprimida estabilizados con cenizas de bagazo de caña de azúcar como sustitución parcial del cemento Portland. **Revista Latino-Americana De Ambiente Construído & Sustentabilidade**, 2(8).

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 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 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 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 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro-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 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

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.

CORDEIRO, G. C. et al. Ultrafine Grinding of Sugar Cane Bagasse Ash for Application as Pozzolanic Admixture in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 2, p. 110–115, fev. 2009.

ELAHI, T. E.; SHAHRIAR, A. R.; ISLAM, M. S. Engineering Characteristics of Compressed Earth Blocks Stabilized with Cement and Fly Ash. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122367, mar. 2021.

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**, v. 91, n. 9, p. 1864–1871, set. 2010.

FARIAS, A.G.; BURNET, F.L. (2018) **Formas de convívio e moradia no povoado são Miguel dos Correias, Brasil**. In: Neves, C.; Gutierrez, Z. S; Faria, O. B. (eds) *Memórias La Antigua Guatemala*, Guatemala: USAC-CII/ PROTERRA. 796 p.

GUILLAUD, H. **Characterization of earthen materials**. In: Avrami, E, Guillaud, H, Hardy, M (eds) *Terra Literature Review—An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute, 2008, 21–31.

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.

HANAFI, W. H. H. Compressed Stabilized Earth Block: Environmentally Sustainable Alternative for Villages Housing. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 68, n. 1, p. 20, dez. 2021.

MANSANEIRA, E. C. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA. p. 116, 2010.

MOLIN FILHO, R. G. D. et al. Sugarcane Bagasse Ash Micronized Using Air Jet Mills for Green Pozzolan in Brazil. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 2019, p. 1–10, 23 maio 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, fev. 2021.

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.

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.

STURM, T.; RAMOS, L. F.; LOURENÇO, P. B. Characterization of Dry-Stack Interlocking Compressed Earth Blocks. **Materials and Structures**, v. 48, n. 9, p. 3059–3074, set. 2015.

TURANLI, L.; SARITAS, A. Strengthening the Structural Behavior of Adobe Walls through the Use of Plaster Reinforcement Mesh. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1747–1752, abr. 2011.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON HUMAN SETTLEMENTS. (1996, August 7). **Report of the United Nations Conference on Human Settlements (Habitat II)** (Report A/CONF.165/14). New York, NY.