

Submetido 17/09/2024. Aprovado 05/12/2024

Avaliação: revisão duplo-anônimo

Avaliação da resistência à compressão e da durabilidade de tijolos de solo-cimento com solo paraense da região de Tucuruí, Brasil

EVALUATION OF COMPRESSION STRENGTH AND DURABILITY OF SOIL-CEMENT BRICKS WITH SOIL FROM THE STATE OF PARÁ IN THE TUCURUÍ REGION, BRAZIL

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y DURABILIDAD DE LADRILLOS SUELO-CEMENTO CON SUELO DEL ESTADO DE PARÁ EN LA REGIÓN DE TUCURUÍ, BRASIL

Stephanie Leite Fonseca

Universidade Federal do Pará (UFPA)

tatalcunha@hotmail.com

Maria Gorett S. Marques

Universidade Federal do Amazonas (Ufam)

mgorettsmarques@yahoo.com.br

Rodrigo Rodrigues da Cunha

Universidade Federal do Pará (UFPA)

rodrigo.totalmix@gmail.com

Brunno Dourado Silva

Universidade Federal de Goiás (UFG)

douradobrunno@gmail.com

Edgar Bacarji

Universidade Federal de Goiás (UFG)

edgar@ufg.br

Andrielli Moraes de Oliveira

Universidade Federal de Goiás (UFG)

andriellimoraes@ufg.br

Resumo

Tijolos de solo-cimento (TSCs) são materiais de terra crua com adição de cimento. Eles representam uma alternativa interessante para sistemas de vedações verticais, pois agregam baixo investimento financeiro e têm baixo impacto ambiental. No estado do Pará, no Brasil, na região do lago da UHE de Tucuruí, famílias residentes em ilhas têm dificuldade para transportar materiais de construção, dessa forma os TSCs tornam-se viáveis como uma opção técnica e executiva apropriada. À vista disso, o objetivo do presente trabalho é avaliar a resistência à compressão, a absorção de água e a durabilidade, por meio de ciclos de molhagem e secagem de tijolos de solo-cimento produzidos de forma artesanal com material da região do Pará e com teores de substituição de solo por cimento de 5%, 7,5% e 10% em volume. Os resultados indicaram que os tijolos com 10% de cimento apresentaram melhor desempenho em termos de resistência e durabilidade, mas não alcançaram todos os requisitos para um desempenho ideal.

Palavras-chave: solo-cimento; blocos; tijolos de solo-cimento; sustentabilidade; durabilidade.

Abstract

Soil-cement bricks (SCC) are raw earth materials with the addition of cement. They are the obvious alternative to vertical fencing systems because they require low financial investment and have a low environmental impact. In the state of Pará/Brazil, in the region of the Tucuruí HPP lake, families living on islands find it difficult to transport building materials and SPTs are an appropriate technical and executive option. The aim of this study is to evaluate the compressing strength, water absorption and durability through wetting and drying cycles of soil-cement bricks produced by hand with material from the Pará/Brazil region, with 5%, 7.5% and 10% levels of soil substitution for cement. The results have indicated that the bricks with 10% cement performed better for strength and durability, but they did not meet all the requirements for optimum performance.

Keywords: soil-cement; blocks; soil-cement bricks; sustainability; durability.

Resumen

Los ladrillos de suelo-cemento (SBC) son materiales de tierra cruda con la adición de cemento. Son una alternativa interesante a los sistemas de sellado vertical ya que requieren una baja inversión financiera y tienen un bajo impacto ambiental. En el estado de Pará/Brasil, en la región del lago de la UHE Tucuruí, las familias que viven en islas tienen dificultades para transportar materiales de construcción y los TSCs son una opción técnica y ejecutiva adecuada. El objetivo de este estudio es evaluar la resistencia a la compresión, la absorción de agua y la durabilidad a través de ciclos de humedecimiento y secado de ladrillos suelo-cemento producidos artesanalmente con material de la región de Pará/Brasil, con niveles de sustitución de 5%, 7,5% y 10% de suelo por cemento. Los resultados indicaron que los ladrillos con 10% de cemento tuvieron mejor desempeño en términos de resistencia y durabilidad, pero no cumplieron todos los requisitos para un desempeño óptimo.

Palabras clave: suelo-cemento; bloques; ladrillos de suelo-cemento; sostenibilidad; durabilidad.

Introdução

Os tijolos de solo-cimento (TSCs) são produzidos por um processo relativamente simples, envolvendo a mistura de solo e cimento, compactados em moldes com a forma desejada. O processo de cura é simples e a fabricação é realizada com prensas hidráulicas ou manuais, dispensando a necessidade de queima em fornos, apresentando-se, por isso, como uma escolha ambiental interessante por não ser calcinada.

De acordo com Muñoz e Tenesaca (1995), a construção com solo é uma técnica ancestral utilizada em vários locais e diversas culturas. A história dessas construções remonta à pré-história com os povos primitivos. Com o passar dos milênios, diversas civilizações começaram a utilizar essa técnica em uma maior escala, como os egípcios, babilônios, persas, entre outros. Dentro dessas civilizações, surgiram diversas edificações, como a cidade da Babilônia, a necrópole de Tebas e a fortaleza de Van, na Turquia. Na Ásia, um exemplo conhecido é a Grande Muralha da China, além de construções na Índia e no Tibete.

Além disso, o material solo-cimento foi difundido por toda a Europa durante a ocupação turca até a Revolução Francesa. Nas Américas, o uso do solo como material de construção remonta às culturas pré-colombianas, como a cidade de Chan Chan, no Peru, além dos povos Maias e Astecas. Com a colonização europeia nas Américas, houve uma fusão dos sistemas construtivos, que foram transmitidos de geração em geração e entre continentes até a era moderna (Muñoz; Tenesaca, 1995).

Nesse sentido, Taveira (1987) apresenta um exemplo notável de construção com solo-cimento na cidade de Taos, no Novo México, Estados Unidos. A cidade foi construída no ano de 1609 pelos índios Pueblos. Outros exemplos de construções com solo-cimento são o Palácio dos Governadores em Santa Fé, também no Novo México, edificado no ano de 1610 e o Convento de San Francisco, na cidade Santa Fé, na Argentina, construído no ano de 1695. As Figuras 1a, 1b e 1c ilustram essas construções do século XVII que se tornaram marcos históricos para as respectivas cidades.



Figura 1 - (a) Cidade de Taos, (b) Palácio dos Governadores; (c) Convento San Francisco

Fonte: (a) Picorelly (2011), (b) Bellmore e Frances (2024) e (c) Petrina (2024).

Kouaku e Morel (2009) mencionam que, após a Revolução Industrial, a utilização do solo como material de construção sofreu impactos significativos e entrou em declínio. As inovações tecnológicas à época introduziram diversos e novos métodos para a produção de materiais com mais durabilidade, resultando na marginalização das técnicas de construção com solo. Consequentemente, a aplicação dessas técnicas ficou restringida a países em desenvolvimento.

Para Lôbo *et al.* (2020), especificamente no Brasil, as técnicas construtivas com solo emergiram da combinação das tradições construtivas europeias, introduzidas por Portugal em suas colônias e pelos imigrantes europeus, com práticas construtivas africanas trazidas pelos escravos durante o Período Colonial. Na década de 1940, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) utilizou técnicas de pavimentação asfáltica que incorporavam o TSC como base e sub-base em projetos de infraestrutura, incluindo a construção de um aeroporto em Petrolina, no estado de Pernambuco. A utilização do solo como material de construção foi uma prática comum até aproximadamente o século XIX, quando o cimento Portland passou a ganhar protagonismo como aglomerante em relação aos métodos tradicionais de construção com solo.

Nesse sentido, considerando as variações de solo no Brasil, é importante reconhecer que elas podem influenciar significativamente o desempenho e a durabilidade dos tijolos de solo-cimento. A norma NBR 8492 (ABNT, 2012b) estabelece a metodologia para ensaios de resistência à compressão, especificando os procedimentos a serem adotados. Já a NBR 8491 (ABNT, 2012a) define os requisitos mínimos de valores de resistência à compressão para os tijolos de solo-cimento, sendo de 1,7 MPa para tijolos individuais e de 2,0 MPa para a média das amostras. Além do mais, essa norma determina que os valores médios de absorção de água de TSL não devem exceder 20% e os valores individuais não devem ultrapassar 22%. Para garantir a precisão dos resultados, tanto os ensaios de resistência à compressão quanto os de absorção de água devem ser realizados após um período mínimo de sete dias de cura.

Mais recentemente, o interesse na utilização do solo-cimento na construção de edificações diminuiu com o surgimento de uma ampla gama de materiais modernos. Silva e Castro (2003) reiteram que atualmente sua aplicação é mais notável em obras

de infraestrutura de rodovias, nas quais cerca de 90% das rodovias utilizam o solo-cimento compactado como base. Além disso, o solo-cimento é amplamente empregado em reforços de pavimentos, no melhoramento de solos, em contenções de encostas e em barragens, em virtude das suas propriedades de durabilidade e resistência mecânica (Carvalho, 2017).

O uso de estabilizações químicas, como exemplifica Lima e Cruz (2016), tem sido empregado como uma alternativa eficaz para o reforço e a estabilização de erosões, operando a partir de princípios microscópicos, como a troca de íons, precipitação e polimerização. Essas técnicas são aplicadas de maneira a garantir que a suplementação forneça resistência suficiente para o uso pretendido. Um exemplo é o uso de solo-cal, no qual a adição de cal pode, a longo prazo, promover reações pozolânicas que aumentam a resistência e durabilidade do solo ou, a curto prazo, melhoram sua plasticidade (Nascimento *et al.*, 2019).

Oliveira (2018) explica que a aplicação da cal como método de reforço é especialmente eficaz na estabilização de erosões em reservatórios de água, que geralmente ocorrem por causa das ondas geradas pelo vento, alterando as características das bordas desses reservatórios ou ocasionando o desgaste delas. O uso da cal permite que os grãos de argila retenham água e formem ligações cimentícias, contribuindo significativamente para a estabilidade e resistência do solo. Outros estudos focam na mistura de solo com fosfogesso e bentonita (Moraes *et al.*, 2023; Borges *et al.*, 2023).

Com o crescente enfoque na sustentabilidade em edificações e construções, aliado às premissas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), os projetos do Instituto de Pesquisas Ecológicas (IPÊ) destacam-se pelo compromisso com o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Em específico o 11º objetivo, que se refere às cidades e comunidades sustentáveis, e o 15º, relacionado à vida terrestre para recuperar e proteger ambientes.

Nesse sentido, o uso de materiais que apresentam um impacto ambiental reduzido e com maior durabilidade tornou-se proeminente. Em concomitância, considerando o déficit habitacional no Brasil, os TSCs produzidos por cooperativas, empregando materiais de menor custo ou com reaproveitamento, podem proporcionar mais dignidade às famílias brasileiras, estimular a economia local e promover benefícios do ponto de vista socioeconômico e de economia circular.

Caldas e Toledo Filho (2021) realizaram uma avaliação ambiental do sistema construtivo de alvenaria de blocos de solo-cimento para diferentes especificações de projeto. Desse modo, foram comparados diferentes tipos de processo de produção de blocos de solo-cimento, considerando os processos manual e mecanizado. Compararam-se, ainda, dois tipos de cimento e diferentes tipos de revestimento. A alternativa de alvenaria com blocos de solo-cimento, utilizando processo manual e cimento Portland tipo CP-II-E-40, mostrou-se a mais vantajosa quando comparada com a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto. Diante da necessidade urgente de medidas e estudos que promovam a sustentabilidade na construção civil, este trabalho evidenciou a importância do sistema construtivo com blocos de solo-cimento nesse contexto.

Portanto, economia, sustentabilidade e segurança são alguns aspectos fundamentais para os sistemas construtivos, assim como a necessidade de sistemas construtivos com materiais duráveis. Diante disso, o presente estudo avaliou a resistência à compressão, a absorção de água e a durabilidade, por meio de ciclos de molhagem e secagem, de tijolos de solo-cimento produzidos de forma artesanal com material da região do lago da Usina hidrelétrica de Tucuruí no Pará. Além disso, também foram apresentados estudos atuais com enfoques semelhantes, permitindo a contextualização das pesquisas sobre o tema.

Referencial teórico

Diversos estudos atuais, além da fabricação convencional dos TSCs, utilizaram adições em massa ou substituições por meio de materiais diversos. No estudo de Ribeiro *et al.* (2021), foram adicionados resíduos de borracha de pneu em proporções de 10% e 20%. Em termos de resistência à compressão, os sete corpos de prova aos 28 dias de referência atingiram 0,4 MPa, com 10% de adição e de 0,5 MPa com 20% de adição. Esses valores não atenderam aos requisitos preconizados na NBR 8491 (ABNT, 2012a), que exige um mínimo de 1,7 MPa para o valor individual, e o maior valor encontrado foi de 0,5 MPa. Em relação à absorção de água, os valores obtidos foram superiores ao permitido pela NBR 8491 (ABNT, 2012a), que determina que o valor médio não pode ser maior que 22%. Os resultados de absorção de água foram de 35% para o TSC de referência, de 35% com adição de 10% e de 34% com adição de 20% de resíduos de borracha de pneu. Logo, as formulações de TSCs não atenderam aos requisitos normativos.

Na análise de Cristina *et al.* (2018) foram produzidos TSCs com adição de fibra vegetal (bucha vegetal) com porcentagens de 5% e 10%, além do grupo de referência sem adição, totalizando nove corpos de provas. A resistência à compressão dos TSCs foi de 1,6 MPa para o de referência, 0,4 MPa com adição de 5% e 0,3 MPa com 10% de adição. Em termos de absorção de água, os valores foram de 10,3% para o TSC de referência, de 10,5% com 5% e de 9,7% com 10%. No quesito resistência à compressão, os valores obtidos não atenderam a normativa NBR 8491 (ABNT, 2012b).

Neto, Nepomuceno e Ribeiro (2010) investigaram dois tipos de solo da região do lago de Tucuruí no Pará para pavimentação, utilizando o método *Transportation Research Board* (TRB). Nesse estudo, os corpos de prova foram confeccionados com teores de cimento de 3%, 5%, 7% e 9% em relação ao volume de solo. Aos 28 dias, as resistências médias para os solos tipo 1 e 2 foram, respectivamente, de 3 MPa e 3 MPa para 3% de cimento e 5 MPa e 6 MPa para 5%. No caso dos teores de 7% e 9%, o solo tipo 1 apresentou resultado de 7 MPa para os dois teores. Para o solo 2, os teores de 7% e 9% não foram testados em virtude da recomendação da ABCP (1980) que sugere $6 \pm 2\%$ de cimento para a estabilização de acordo com o tipo de solo chamado A-2-6.

A estabilização química dos TSCs é essencial para melhorar suas propriedades mecânicas e de durabilidade. À vista disso, a análise de Salomão, Silva e Barbosa (2019) demonstrou a eficácia da combinação de cal e cimento na produção de TSC, utilizando sete amostras de solo com porcentagens de cal variando entre 0% e 13%. Em cada amostra, a quantidade de cal foi de 3%, 5% e 7%, enquanto a quantidade de cimento foi aumentada progressivamente entre 0% e 13%, permitindo avaliar o impacto do cimento na estabilização da mistura solo-cal. Como resultado, a cal reduziu o índice de vazios no solo, criando uma base mais compacta, enquanto o cimento aumentou a resistência mecânica do conjunto. O objetivo foi determinar a quantidade mínima de cimento necessária para estabilizar o solo, mantendo a quantidade de cal fixa. No ensaio de resistência à compressão com 3% de cal e 7% de cimento, obtiveram-se valores individuais de 2 MPa, 3 MPa e 3 MPa, com média de 3 MPa. Para 5% de cal e 3% de cimento, a resistência individual foi de 0,6 MPa, 1 MPa e 2 MPa, com média de 1,2 MPa. Com 7% de cal e 3% de cimento, os valores individuais foram 1,77 MPa, 2,0 MPa e 2,0 MPa, com média de 1,9 MPa. Assim, os valores de 3% de cal e 7% de cimento mostraram-se interessantes, bem como com 7% de cal e 3% de cimento.

No estudo de Pinto (2016), utilizaram-se misturas de solo com teores de cimento de 1%, 3%, 6%, 10% e 15%. A resistência à compressão, determinada na idade de

7 dias, apresentou resultados médios de 0,4 MPa para 1% de cimento, 2,2 MPa para 3%, 3,8 MPa para 6%, 4,6 MPa para 10% e, por último, 7,4 MPa com 15% de cimento. No quesito absorção de água, as médias encontradas para 1% não foram determinadas, pois os corpos de prova se desfizeram em água. Para 3%, obteve-se um valor de 13% de absorção, para 6% de 11,7%, com 10% de 12,4% e, por fim, com 15% de 11,7% de absorção de água.

Outra consideração do estudo foi em relação aos blocos de solo-cimento com características de vedação, que com 3% de cimento apresentaram uma resistência à compressão de aproximadamente 2,0 MPa. Além disso, no presente estudo, estudaram-se paredes monolíticas não estruturais que obtiveram um valor de resistência à compressão de aproximadamente 1,0 MPa (PINTO, 2016).

O estudo de Grande (2003) comparou a produção de TSC com e sem adição de sílica ativa, substituindo 10% da massa de cimento por sílica ativa e submetendo os corpos de prova a 12 ciclos de molhagem e secagem em água. Para os TSC sem adição de sílica na idade de 120 dias e, após o ensaio de durabilidade, os valores de resistência a compressão foram de 3,3 MPa, 5,5 MPa e 2,7 MPa e com adição de sílica de 3,9 MPa, 5,0 MPa e 3,0 MPa. Nos ensaios de absorção de água foi utilizado um total de 9 TSC para as idades de 7, 28 e 91 dias. Aos 7 dias, sem adição, obtiveram-se valores de absorção de água de 17,7%, 12,4% e 15,9%. Aos 28 dias, valores de 13,3%, 11,0% e 14,0% e, ao final, com 91 dias, de 11,9%, 10,4% e 13,1% de absorção de água. Com a adição de sílica ativa, para 7 dias, obtiveram-se 13,9%, 13,6% e 13,1%, aos 28 dias de 13,8%, 12,5% e 12,7% e, aos 91 dias, de 12,9%, 11,3% e 11,6%. A Tabela 1 sintetiza as propriedades de pesquisa mencionadas.

Pesquisa	Adição/substituição no TSL	Proporção (%)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
Ribeiro <i>et al.</i> (2021)	Resíduo de borracha de pneu	20	0,48	35,44
		10	0,37	34,04
		0	0,45	35,13
Cristina <i>et al.</i> (2018)	Fibra vegetal (bucha vegetal)	10	0,44	10,35
		5	0,30	9,70
		0	0,30	10,31
Neto, Nepomuceno e Ribeiro (2010)	Solo-cimento sem adição	3	3,45	-
		5	5,03	-
		7	7,29	-
		9	9,33	-
Pinto (2016)	Solo-cimento sem adição	1	0,388	ND*
		3	2,22	13,10
		6	3,76	11,78
		10	4,62	12,39
		15	7,41	11,73
Grande (2003)	Sílica ativa	10	3,00 – 5,02	11,3 – 13,9
	Sem sílica ativa	-	2,71 – 5,52	10,4 – 17,7

*ND - a amostra se desfez durante o ensaio.

Tabela 1 - Comparação dos estudos sobre resistência à compressão e absorção de água em tijolos e blocos de solo-cimento

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

A comparação na Tabela 1 revela diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão e absorção total de água entre os diversos estudos de TSC. Os estudos que utilizaram resíduos na composição das pesquisas geralmente apresentaram resistência à compressão abaixo do padrão exigido pela NBR 8491 (ABNT, 2012a), embora alguns valores tenham se mostrado adequados para a absorção de água. Em contraste, os estudos com foco em uma caracterização mais tradicional dos tijolos de solo-cimento demonstraram melhorias na resistência à compressão e absorção de água. Portanto, isso sugere que a escolha da adição, a metodologia de dosagem e a caracterização impactam significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade dos TSCs.

Programa experimental

Solo

A coleta de solo foi realizada na Praia Queiroz Galvão, situada às margens do lago da usina hidrelétrica (UHE) de Tucuruí, PA. O solo coletado foi retirado abaixo da camada superficial, como especificado na Figura 2, para minimizar a presença de matéria orgânica, raízes, folhas e outros materiais em decomposição. Após a coleta do solo, este foi seco, preparado e armazenado (Figura 2b).



Figura 2 - (a) solo sendo retirado para a pesquisa e (b) solo em secagem
Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

A caracterização do solo foi conduzida em triplicata e o solo coletado foi preparado, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2024), para os ensaios de massa específica aparente, limite de liquidez pela NBR 6459 (ABNT, 2017), limite de plasticidade pela NBR 7180 (ABNT, 2016), granulometria pela NBR 7181 (ABNT, 2025a) e compactação pela NBR 7182 (ABNT, 2025b). Os resultados obtidos nesses ensaios estão apresentados na Tabela 2.

Amostra de Solo	Média
Limite de liquidez LL (%)	20*
Limite de plasticidade LP (%)	15,31 (5) [30%]
Índice de plasticidade IP (%)	4,70*
Teor de umidade higroscópica (%)	2,29*
Densidade (g/cm ³)	2,46 (0,9) [40%]

Massa específica (g/cm ³)	2,45
% de solo que passa na peneira ABNT 0,075 mm (%)	52,08 (2) [10%]
*apenas uma determinação.	

Tabela 2 – Resultados médios de caracterização do solo, desvio padrão entre parênteses e coeficiente de variação entre colchetes

*apenas uma determinação

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

A curva granulométrica do solo utilizado, mostrando as porcentagens passantes em cada peneira, pode ser observada na Figura 3.

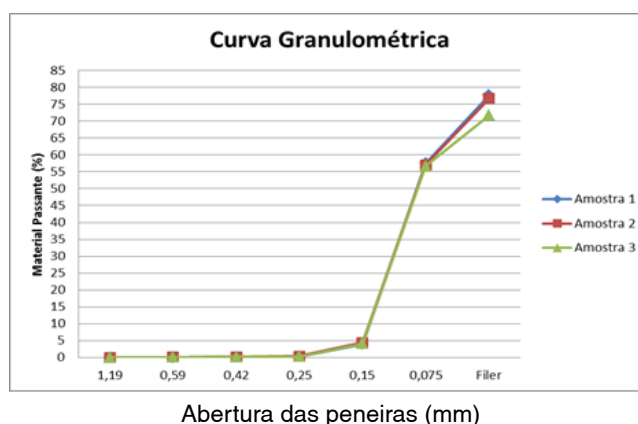


Figura 3 - Curva granulométrica do solo de estudo

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

A NBR 10833 (ABNT, 2013) preconiza que o solo utilizado para a confecção dos TSCs deve apresentar as características listadas na Tabela 2. Os resultados obtidos confirmam que o solo tem as características necessárias para a confecção dos TSCs, conforme evidenciado na Tabela 4. Essa conformidade com a norma permitiu o avanço para a fase de testes de dosagem de mistura. A quantidade ideal de água para a correta compactação do solo cru foi determinada por meio dos ensaios de compactação. Os resultados desses ensaios evidenciaram que a proporção de água necessária para a mistura de solo-cimento foi 10%. O percentual de solo que passou na peneira ABNT 0,075 mm ficou próximo ao máximo permitido e, por isso, os estudos avançaram.

Características	Requisito (%)	Resultados
% de solo que passa na peneira ABNT 4,8 mm	100	100
Limite de liquidez	< 40	20
Limite de plasticidade	< 18	4,70
% de solo que passa na peneira ABNT 0,075 mm	10 a 50	52,08

Tabela 2 - Critérios de seleção do solo para fabricação de blocos de solo-cimento conforme a ABNT NBR 10833 (2013)

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

Dosagem, produção e ensaios dos tijolos de solo-cimento

Para a confecção dos TSCs foi utilizado o cimento Portland CP II-32 E, disponível na região e composto com escória granulada de alto-forno (de 6% a 34%), adição de 51% a 94% de clínquer e sulfatos de cálcio e 0% a 15% de material carbonático (NBR 16697, 2018). A escolha dos teores de cimento de 5%, 7,5% e 10%, em massa, foi fundamentada na literatura e apresentada na Tabela 5.

Teor (%)	Cimento (g)	Quantidade de água (g)	Relação água/cimento (a/c)
5,0	300	720	2,4
7,5	450	910	2,0
10,0	600	970	1,6

Tabela 3 - Relação água/cimento adotada na mistura para produção dos TSCs

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

Dessa forma, as dosagens seguiram um procedimento metodológico padronizado para garantir que variações no processo não influenciassem as características dos TSCs. As misturas foram preparadas em um misturador do tipo argamassadeira com capacidade para 10 kg. Primeiramente, adicionaram-se os materiais secos, incluindo o cimento Portland e o solo previamente preparado, para cada dosagem de 5%, 7,5% e 10%, utilizando 6.000 g de solo para cada teor de cimento. Para todos os teores, os materiais foram homogeneizados durante aproximadamente dois minutos na velocidade 1 do misturador, antes da adição da água.

A adição de água foi realizada durante dois minutos, com o primeiro minuto e meio dedicado à adição gradual da água até alcançar o ponto ideal da mistura e os últimos 30 segundos para a completa homogeneização na velocidade 2. O tempo de mistura foi inicialmente determinado de forma visual, observando-se o tempo necessário para a homogeneização completa e então padronizado para garantir consistência a cada teor.

Para cada 6.000 g de solo foram produzidos dois tijolos. Apesar da quantidade pequena, foi considerada ideal em razão da capacidade da argamassadeira e do rápido uso da mistura, além de minimizar a perda de água do solo. Nesse sentido, a fabricação em pequenas porções foi crucial para evitar variações significativas entre tijolos.

Os TSCs foram produzidos usando uma prensa manual com dimensões da matriz de 250 x 125 mm e furos de 63,65 mm de diâmetro, conforme a NBR 10833 (ABNT, 2013). Além disso, cuidados rigorosos foram tomados para minimizar as diferenças entre os tijolos, incluindo a limpeza da prensa entre cada operação, a remoção de resíduos e a prensagem realizada pelo mesmo operador.

Os TSCs produzidos são exemplificados na Figura 4. Após a fabricação, os tijolos foram imediatamente armazenados em uma câmara úmida com temperatura controlada a 25 °C e umidade relativa de 95%, garantindo que não entrassem em contato direto com a água até o início dos testes.

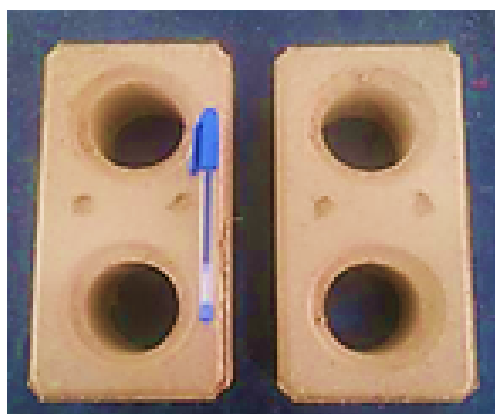


Figura 4 - Exemplo de TSC fabricado
Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

A Tabela 4 apresenta os detalhes das misturas utilizadas para a produção dos TSCs, incluindo os teores de cimento, a quantidade de solo e água, a relação água/cimento, o tempo de mistura e as dimensões dos TSCs produzidos

Teor (%)	Cimento (g)	Solo (g)	Água (g)	Relação Água/ Cimento (A/C)	Tempo de Mistura (min)	Dimensões (mm)	Diâmetro (mm)
5,0	300	6000	720	2,4	4	250 x 125	63,65
7,5	450	6000	910	2,0			
10,0	600	6000	970	1,6			

Tabela 4 - Relação água/cimento adotada na mistura para a produção dos TSCs
Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

A NBR 10836 (ABNT, 2013) preconiza os métodos para determinar a resistência à compressão de tijolos e blocos cerâmicos. O ensaio deve ser realizado após um período de cura definido e os corpos de prova devem ser moldados e curados, conforme NBR 12024 (ABNT, 2012c). A NBR 13554 (ABNT, 2012d) trata dos métodos para a avaliação da durabilidade dos TSCs e estabelece o procedimento de molhagem e secagem para simular as condições de envelhecimento. O ensaio inclui 6 ciclos de molhagem em água e secagem. Avaliou-se a perda de massa e a integridade estrutural dos blocos.

O método de ensaio 203 (DNER, 1994) também fornece diretrizes para testes com corpos de prova de TSC, incluindo o procedimento de durabilidade acelerada por meio de 12 ciclos de molhagem e secagem. Esse método especifica o número de ciclos e as condições para garantir uma avaliação precisa da durabilidade dos materiais – secos em estufa a temperatura de $70^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ durante 42 horas. Enquanto a NBR 13554 (ABNT, 2012d) descreve o uso de 6 ciclos de molhagem e secagem para a avaliação de durabilidade, o método de ensaio 203 (DNER, 1994) especifica um total de 12 ciclos para os testes de durabilidade acelerada. Essa diferença pode impactar o resultado.

Assim, os tijolos solo-cimento do estudo foram submetidos a diversos testes para avaliar sua resistência e durabilidade. Inicialmente, os tijolos foram avaliados quanto à resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias de idade, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 10836 (ABNT, 2013), NBR 13554 (ABNT, 2012b) e NBR 12024 (ABNT, 2012a). Outros corpos de prova foram avaliados quanto à absorção de água aos 28 dias de cura, conforme especificado pela NBR 10836 (ABNT, 2013). A

determinação da durabilidade foi feita pela perda de massa após ciclos de molhagem e secagem, de acordo com as normas mencionadas.

Para a avaliação da durabilidade acelerada, realizou-se uma adaptação do método descrito na norma DNER-ME 203 (Dner, 1994). Os tijolos foram submetidos a um ciclo de molhagem e secagem que incluiu a imersão dos corpos de prova em água à temperatura ambiente por 5 horas. Após a imersão, os tijolos foram secos em estufa a 70 ± 2 °C por 42 horas. Em seguida, foram submetidos a um processo de escovação repetida de 20 vezes, completando um ciclo. Este ensaio incluiu um total de 12 ciclos consecutivos para a avaliação da perda de massa, diferindo do número de ciclos recomendado pela NBR 13554 (ABNT, 2012d).

Para simular as condições de envelhecimento natural, os tijolos foram expostos ao ambiente externo durante um mês, passando por condições climáticas naturais, como radiação solar, calor, temperatura e chuva. Após esse período, os tijolos foram analisados, de forma residual, quanto à resistência à compressão simples, de acordo com a NBR 10836 (ABNT, 2013).

Sendo assim, os procedimentos adotados no estudo abrangem as normas para resistência e absorção, enquanto a adaptação do método de durabilidade e a exposição a condições naturais fornecem uma análise mais abrangente sobre o desempenho dos tijolos em situações reais.

Resultados

A Tabela 5 apresenta os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água, com base em três amostras para cada condição de estudo, conforme especificado pela NBR 10836 (ABNT, 2013).

Idade	Valor médio de resistência à compressão (MPa) e desvio padrão (entre parênteses)		
	5,0%	7,5%	10,0%
	0,50 (0,02)	0,57 (0,16)	1,19 (0,23)
7	0,29 (0,00)	0,82 (0,13)	1,17 (0,14)
14	0,46 (0,05)	1,32 (0,21)	1,93 (0,25)
28	0,35*	0,83 (0,09)	1,06 (0,44)
Após ciclos de envelhecimento acelerado	0,12 (1,0)	0,82 (1,0)	1,05 (1,05)
Após envelhecimento natural	1,9 (0,07)	1,5 (0,47)	1,5 (0,25)
Absorção de água (%)	20%	16%	15%
*apenas uma amostra pode ser ensaiada.			

Tabela 5 - Valores médios de resistência à compressão dos TSCs por idade e teor de cimento aos 7 dias, 14 e 28 dias de idade, após o ciclo de envelhecimento acelerado e natural e valores médios de índice de absorção de água. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

Os requisitos estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012b) determinam que a absorção de água média dos TSCs não deve exceder os 20% e os valores individuais devem permanecer abaixo de 22%. Conforme representado na Tabela 5, todos os teores atenderam a esses critérios de maneira satisfatória, sendo o teor de 5,0% o mais próximo do limite preconizado na norma.

A NBR 8491 (ABNT, 2012b) preconiza que, para que os tijolos confeccionados com a mistura de solo-cimento sejam considerados satisfatórios, eles devem apresentar uma resistência mínima individual de 1,7 MPa e uma média de 2 MPa aos 28 dias. A Figura 5 relaciona os teores de cimento, a absorção de água e a resistência à compressão obtidos dos TSCs estudados.

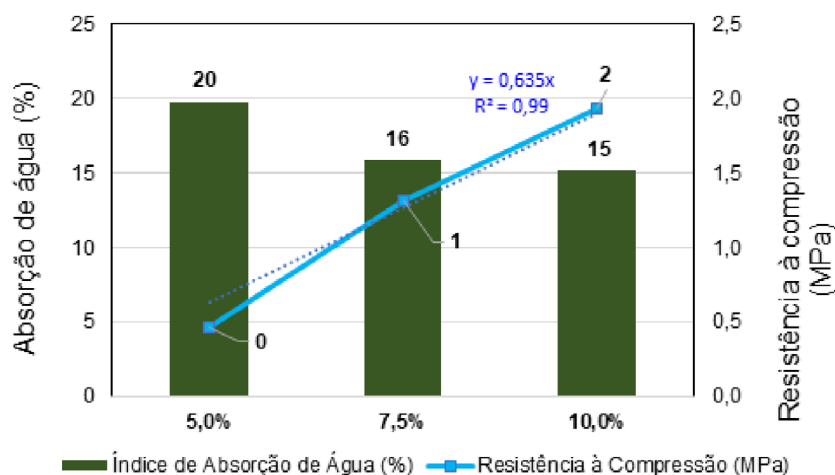


Figura 5 - Resistência à compressão e absorção de água dos TSCs aos 28 dias

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

Nos ensaios realizados, os tijolos com 5% de adição de cimento mostraram uma redução significativa na resistência após 7 dias em comparação com os tijolos com os teores de 7,5% e 10,0%. Isso sugere que o teor de adição pode ter sido insuficiente para atingir a resistência desejada.

Após os ciclos de molhagem, secagem e escovação, os corpos de prova apresentaram fragmentações para todos os teores testados (Figura 6a). Da mesma forma, ocorreu para os corpos de prova com envelhecimento natural (Figura 6b).



Figura 6 - TSC produzido e testado com aspectos de fragmentação após escovação mecânica: (a) antes e (b) após a exposição natural

Fonte: Elaborada pelos(as) autores(as).

Durante a execução dos testes de durabilidade, constatou-se que os TSCs não resistiram aos 12 ciclos estipulados, pois já evidenciavam sinais de quebra ao final do primeiro ciclo, conforme mostrado na Figura 6.

Os TSCs foram então preparados de acordo com a NBR 10836 (ABNT, 2013) e submetidos a testes de compressão para avaliar a variação dos resultados obtidos

para todos os teores. Os TSCs fabricados com 5,0% de cimento não resistiram ao teste de compressão, rompendo-se ao final do período de avaliação, conforme a Tabela 5. Entre as amostras testadas, apenas uma permaneceu compactada, sendo testada igualmente com o intuito de verificar a magnitude da redução na resistência. Portanto, foi possível constatar que os TSCs testados com os teores 5%, 7,5% e 10% não apresentaram resultados de forma satisfatória aos testes de compressão residual após os ciclos e a escovação mecânica.

Discussão geral

A NBR 10836 (2013) define os parâmetros mínimos para a aceitação dos blocos vazados de solo-cimento, incluindo os testes de compressão e absorção realizados no presente estudo. Para cada ensaio, realizaram-se três amostras, garantindo a quantidade mínima necessária para avaliação. Os ensaios de resistência à compressão com os teores de 5%, 7,5% e 10% demonstraram-se não satisfatórios, uma vez que não atingiram a resistência média mínima exigida pela norma.

Em contrapartida, os TSCs com 10% atingiram levemente acima da resistência mínima individual. Em contrapartida, no teste de absorção, os três teores testados apresentaram resultados satisfatórios. No entanto, os TSCs com 7,5% e 10,0% apresentaram resultados melhores em comparação aos 5,00%.

Nos testes de durabilidade por meio do envelhecimento acelerado, todos os teores estudados não conseguiram resistir aos ensaios realizados de acordo com o método de ensaio 203 (Dner, 1994), não sendo possível completar nenhum ciclo.

Quanto aos ensaios de durabilidade por envelhecimento natural, nenhum dos teores testados apresentou os valores mínimos exigidos nos ensaios de resistência à compressão.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que o teor de 5,0% sobre a massa de solo não é adequado para a confecção dos TSCs com o solo característico da região, pois não apresenta a resistência necessária aos 28 dias de cura e não resiste aos ensaios de durabilidade. Embora a absorção esteja abaixo do limite estabelecido, é mais alta que os teores de 7,5% e 10%.

Os TSCs de 7,5% também não apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios aos 28 dias nem nos testes de durabilidade. Já o teor de 10% apresentou os melhores resultados entre os teores, alcançando a resistência mínima individual aos 28 dias. No entanto, os testes de compressão utilizados para a avaliação da durabilidade, após o envelhecimento natural, não atingiram os valores mínimos de resistência.

A absorção de água dos TSCs mostrou baixa resistência após os testes de durabilidade natural e não sendo possível a realização por envelhecimento acelerado, pelos ciclos de molhagem e secagem. Apesar disso o TSC com adição de 10% apresentou as melhores características de desempenho geral entre os três teores testado, embora com as falhas de durabilidade apresentadas. Tais resultados, todavia, não inviabilizam uma eventual utilização dos blocos com o teor de 10,0%. Para tanto, duas condições se fariam necessárias: limitar o uso dos TSC a ambientes internos e secos, portanto, isento de intempéries e/ou utilizar aditivos impermeabilizantes, promovendo inspeções periódicas quanto à integralidade do material.

Considerações finais

Neste trabalho, investigou-se a influência do teor de cimento, expresso em massa (g) na mistura de solo-cimento, utilizando solo da região do lago da UHE Tucuruí, PA. Os ensaios incluíram resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água e durabilidade por envelhecimento acelerado e natural, com teores de 5%, 7,5% e 10% em massa.

A análise resultou em uma visão detalhada sobre o teor de cimento e seu impacto nas propriedades dos TSCs. A partir disso, algumas tendências puderam ser constatadas, com as seguintes conclusões gerais:

- o teor de 10% de cimento obteve os melhores resultados em resistência, absorção e durabilidade;
- o aumento do teor de cimento melhorou as propriedades dos tijolos; e
- os tijolos com 10% de cimento ainda apresentaram limitações na durabilidade a longo prazo.

Isso evidencia a necessidade de reformulação das misturas e a viabilidade dos TSCs como uma solução sustentável e econômica para a construção em regiões remotas, mas também ressalta a necessidade de ajustes nas proporções de cimento para alcançar melhores resultados.

Referências

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). *Dosagem das misturas de solo-cimento normas de dosagem e métodos de ensaios*. São Paulo: Publicações ABCP, 1980.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 6457: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. São Paulo: ABNT, 2024.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 6459 – Solo - Determinação do limite de liquidez. Método de ensaio*. São Paulo: ABNT, 2017.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 7180 – Solo - Determinação do limite de plasticidade. Método de ensaio*. São Paulo: ABNT, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica. Método de ensaio*. São Paulo: ABNT, 2025a.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação. Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2025b.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 8491:2012 – Tijolo de solo-cimento – Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 8492:2012* – Tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 12024:2012* – Solo-cimento: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 13554:2012* – Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012d.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 16697:2018* – Cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 10836* – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BELLMORE, A.; FRANCES, S. Palace of the Governors. From Old Santa Fe Today, 5th edition. *Historic Santa Fe*, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.historicsantafe.org/palace-of-the-governors>.

BORGES, Y.; OLIVEIRA, B.; BOSCOV, M. E. ; MASCARENHA, M. Technical feasibility analysis of using phosphogypsum, bentonite and lateritic soil mixtures in hydraulic barriers. *SOILS & ROCKS*, [s. l.], v. 46, p. e2023009622-10, 2023. DOI:10.28927/SR.2023.009622.

CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação ambiental do sistema construtivo de alvenaria de blocos de solocimento considerando diferentes especificações de projeto. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 16, n. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v16i2.161978>.

CRISTINA, P.; SALOMÃO, P. E. A.; CANGUSSÚ, L.; CARVALHO, P. H. V. de. Brick solo cement with vegetable fiber addition: an alternative in civil construction. *Research, Society and Development*, [s. l.], v. 7, n. 9, p. e779439, 2018. DOI: 10.17648/rsd-v7i9.439.

DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem). *DNER-ME 203*: Solo-cimento: determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem: Método de ensaio. Rio de Janeiro: Dner, 1994.

CARVALHO, J. C. *Solo como material de construção*. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, 2017.

GRANDE, F. M. *Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa*. 2003. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. DOI:10.11606/D.18.2003.tde-07072003-160408.

IPÊ (Instituto de Pesquisas Ecológicas). *Projetos do IPÊ estão comprometidos com a agenda global dos ODS*. São Paulo: IPÊ, 2022. Disponível em: <https://ipe.org.br/noticias/projetos-do-ipe-estao-comprometidos-com-a-agenda-global-dos-ods/>. Acesso em: 5 mar. 2025.

KOUAKU, C. H.; MOREL, J. C. Strength and elasto-plastic properties of non-industrial buildings materials manufactured with clay as a natural binder, *Applied Clay Science*, [s. l.], v. 44, n. 1-2, p. 27-34, 2009.

LIMA, A. C.; CRUZ, G. *Aplicação de cal hidratada em suspensão em um solo laterítico para mitigação de processos erosivos*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) — Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2016.

LÔBO, J. M. C.; FERNANDES, R. de O.; MORAIS, J. M. P. de; BARBOZA, E. N.; SILVA, E. M. da. Market analysis of soil-cement ecological brick in the Cariri Metropolitan Region. *Research, Society and Development*, [s. l.], v. 9, n. 8, p. e180984966, 2020. DOI:10.33448/rsd- v9i8.4966.

MORAIS, L. S.; LIMA JR., J. C.; MORAIS, G. F.; BORGES, Y. I. S.; ANTUNES, A. F. N. R.; MASCARENHA, M. M. A. Estudo do colapso de misturas solo, fosfogesso e bentonita visando o uso em camada de barreira hidráulica. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, Goiás, v. 19, p. 167-179, 2023.

MUÑOZ, J. E. A.; TENESACA, N. P. C. Factibilidad de la construcción con tierra en la ciudad de Loja. 1995. Trabajo de Titulación de Arquitecto. *RIUTPL*, [s. l.], 1995. Disponível em: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/18310>. Acesso em: 5 mar. 2025.

NASCIMENTO, R. O.; MASCARENHA, M. M. A.; ANGELIM, R. R.; OLIVEIRA, R. B.; SALES, M. M.; LUZ, M. P. Uso de solução de cal para mitigação de processos erosivos em um solo da UHE de Itumbiara. *Geociências*, São Paulo, v. 38, p. 279-295, 2019.

NETO, A. F. L.; NEPOMUCENO, C. L.; RIBEIRO, J. S. Estabilização de solos típicos da região do lago de Tucuruí - PA para utilização na pavimentação. In: 4º CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE, 2010, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo: Coninfra, 2010.

OLIVEIRA, L. M. *Estudo experimental de uso de solução de cal para estabilização de um solo saprolítico de talude de erosão*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) — Universidade Federal de Goiás, 2018.

PETRINA, A. Templo y Convento de San Francisco. *Argentina.gob.ar*, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.argentina.gob.ar/capital-humano/cultura/monumentos/templo-y-convento-de-san-francisco>. Acesso em: 5 mar. 2025.

PICORELLY, L. C. Construção de terra: Parte 2.7. *Cidades e monumentos de Adobe*, Novo México, 2025. Disponível em: <https://lecycpicorelli-bioarquitetura.blogspot.com/2011/08/construcao-de-terraparte-27-cidades-e.html>. Acesso em: 11 fev. 2025.

PINTO, E. S. *Solo-cimento compactado*: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), Bauru, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/147987>. Acesso em: 5 mar. 2025.

RIBEIRO, V. A. dos S.; WERDINE, D.; BARBOSA, L. F.; PINHEIRO, M. V.; OLIVEIRA, A. F.; ALVES, A. L. Q.; SILVA, L. R. R. Brick soil cement with addition of tire rubber waste. *Research, Society and Development*, [s. l.], v. 10, n. 12, p. e253101220504, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i12.20504.

SALOMÃO, P. E. A.; SILVA, B. A.; BARBOSA, F. A. Chemical stabilization of franco texture soil: addition of lime and cement. *Research, Society and Development*, [s. l.], v. 8, n. 5, p. e50851019, 2019. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1019>. Acesso em: 5 mar. 2025.

SILVA, F. S.; CASTRO, A. P. A. S. *Incentivo ao uso de produtos de baixo impacto ambiental por meio da disciplina de materiais de construção civil*. Salto: Centro Universitário Nossa Senhora do Patrocínio, 2003.

TAVEIRA, E. S. N. *O solo-cimento no campo e na cidade*. Construir, morar, habitar. 2. ed. São Paulo, SP: Ícone Editora, 1987.