



**INSTITUTO
FEDERAL**
Sergipe

INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CAMILLA MACHADO DOS SANTOS

A INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO, UMIDADE E DO TEOR DE
CIMENTO NAS PROPRIEDADES DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

ESTÂNCIA

2021

CAMILLA MACHADO DOS SANTOS

A INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO, UMIDADE E DO TEOR DE
CIMENTO NAS PROPRIEDADES DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

Trabalho de conclusão de curso (TCC II) apresentado
ao Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante
de Melo

ESTÂNCIA
2021

Santos, Camilla Machado dos.
S237i A influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento. / Camilla Machado dos Santos. - Estância, 2021.
74 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2021.

Orientadora: Profa. Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo

1. Sustentabilidade. 2. Tijolo. 3. Solo-cimento. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Melo, Fernanda Martins Cavalcante de. III. Título.

CDU: 624:608.32:502.131.1+615.463

CAMILLA MACHADO DOS SANTOS

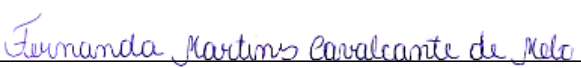
A INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO, UMIDADE E DO TEOR DE
CIMENTO NAS PROPRIEDADES DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

Trabalho de conclusão de curso (TCC II) apresentado
ao Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

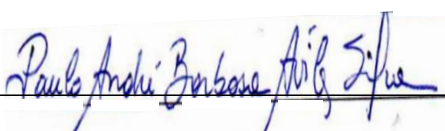
Orientadora: Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante
de Melo

Aprovado em: 10/09/2021

BANCA EXAMINADORA


Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo
(IFS – Campus Estância)


Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira
(IFS – Campus Estância)


Prof. Me. Paulo André Barbosa Ávila Silva
(IFS – Campus Lagarto)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me proporcionado chegar até aqui, e por tua graça sobre minha vida.

Aos meus pais, Valdete de Jesus Santos e José Carlos Machado dos Santos, por todo amor, intercessão, paciência e incentivo nessa longa jornada, a favor do meu crescimento.

Ao meu esposo e meu amigo, Jaaziel Ramon das Chagas Soares, por todo apoio, paciência, companheirismo, compreensão e incentivo durante essa trajetória. Por sempre acreditar em mim.

A minha orientadora Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo, por toda orientação, correção, paciência e dedicação na elaboração deste trabalho. Muito grata por ter acreditado em mim.

Ao Prof. Luciano Melo, por toda ajuda e desempenho durante os ensaios realizados no Laboratório.

Aos meus amigos conquistados durante o curso, Nora, Henrique, Jobson, Taiane, Rainara, Nayara e Silvia, por toda ajuda, estímulo e compreensão.

As minhas amigas, Rosy, Margarete, Naiara, Silviane e Cristina, por acreditarem em mim, e me instigarem a sempre melhorar.

Aos meus familiares, Josefa, Matheus, Lyzia, Valquiria, Joelma, Raimundo, por terem torcido por mim.

Aos colegas, Irla, Yuri, Emerson, Karol, Giovanna e Handellon, por toda ajuda no laboratório e na pesquisa.

Ao Laboratório da Empresa Mizu Cimentos Especiais, pela contribuição na análise química do solo e do cimento.

Ao Laboratório do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CUM/CCT/UDESC), pela colaboração na análise mineral do solo.

Por fim, ao Laboratório da Universidade Federal de Sergipe - Centro Multiusuário de Nanotecnologia (CMNano), pela contribuição na análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV),

“Todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus.”

Romanos 8:28

RESUMO

O tijolo de solo - cimento é considerado um produto ecológico e economicamente viável. A sua composição é constituída majoritariamente por matérias-primas que se encontram em abundância na natureza. Seu processo de fabricação não necessita da etapa de queima e seu uso proporciona um ambiente confortável termicamente e acusticamente, além de contribuir para redução do custo de energia. Diante do exposto, acerca das vantagens do uso deste produto, esta pesquisa tem por objetivo principal analisar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento. Foram definidas doze formulações, com dez amostras cada, onde sete foram utilizadas para analisar a resistência à compressão, e três para verificar a absorção de água e massa específica aparente seca dos tijolos. Para constituir essas formulações foram escolhidas três pressões de compactação (1,6 MPa, 4,9 MPa e 9,7 MPa), duas umidades (8% e 14%) e dois teores de cimento (12,5 %, para um traço de 1:8 e 8,3%, para um traço de 1:12). A caracterização do solo, do cimento e do tijolo foram determinadas conforme as especificações normativas. Os resultados mostraram que todas as propriedades dos tijolos sofreram influência das variáveis. Para a resistência à compressão, a pressão de compactação influenciou de forma significativa, onde para maiores pressões de compactação resultou em maiores resistência à compressão. A umidade de 14% resultou nos valores mais elevados de resistência, assim como as formulações com um maior teor de cimento (12,5%, traço de 1:8). Quanto à propriedade de absorção de água, constatou-se que à medida que a pressão de compactação aumentou, a absorção diminuiu. A umidade de 8% resultou em formulações com menores valores de absorção, e quanto a análise do teor de cimento, as formulações com menor teor de cimento (8,3%, traço de 1:12) resultaram em menores valores de absorção. Para a propriedade da massa específica aparente seca, observou-se que para todas as formulações, a maior pressão de compactação registrou um maior valor de massa específica aparente seca. A influência da umidade foi mais significativa para as formulações com baixa pressão de compactação. A umidade de 14% resultou em maiores valores para pressão de 1,6 MPa, enquanto, para a maior pressão, 9,7 MPa, a umidade que sucedeu em maior massa específica aparente seca foi a de 8%. Não houve variação significativa nos valores da massa específica aparente seca, em função do teor de cimento. Portanto conclui-se que os melhores resultados foram obtidos para a pressão de compactação de 4,9 MPa, o maior teor de cimento de 12,5% (traço de 1:8) e a umidade de 14%, correspondente a formulação de T_{1:8}U_{14%}P_{4,9}, onde resultou em uma resistência média à compressão de 2,8 MPa, absorção de água de 11,8% e massa específica aparente seca de 1,956 g/cm³.

Palavras-Chave: Sustentabilidade. Tijolo. Solo-cimento.

ABSTRACT

The soil-cement brick is considered an ecologically and economically viable product. Its composition consists mainly of raw materials that are abundant in nature. Its manufacturing process does not require the burning step and its use provides a thermally and acoustically comfortable environment, in addition to contributing to a reduction in energy costs. Given the above, this research aims to analyze the influence of compaction pressure, moisture and cement content on the properties of the soil-cement brick. Twelve formulations were defined, with ten samples each, where seven were used to analyze the compressive strength, and three to verify the water absorption and dry Bulk density of the bricks. To constitute these formulations, three compaction pressures (1.6 MPa, 4.9 MPa, and 9.7 MPa), two moistures (8% and 14%), and two cement contents (12.5%, for one mix) were chosen. of 1:8 and 8.3%, for a trait of 1:12). The characterization of the soil, cement, and brick was determined according to normative specifications. The results showed that all brick properties were influenced by the variables. For the compressive strength, the compaction pressure was influenced significantly, whereas for higher compaction pressures it resulted in higher compressive strength. The moisture content of 14% resulted in the highest strength values, as well as formulations with a higher cement content (12.5%, trace of 1:8). As for the water absorption property, it was found that as the compaction pressure increased, the absorption decreased. The moisture content of 8% resulted in formulations with lower absorption values, and as for the analysis of cement content, formulations with lower cement content (8.3%, 1:12 trait) resulted in lower absorption values. For the property of dry bulk density, it was observed that for all formulations, the highest compaction pressure registered a higher value of dry Bulk density. The influence of moisture was more significant for formulations with low compaction pressure. The moisture content of 14% resulted in higher values for the pressure of 1.6 MPa, while for the highest pressure, 9.7 MPa, the moisture that followed in higher dry Bulk density was 8%. There was no significant variation in the values of dry Bulk density, as a function of cement content. Therefore, it is concluded that the best results were obtained for the compaction pressure of 4.9 MPa, the highest cement content of 12.5% (trace of 1:8), and moisture of 14%, corresponding to the formulation T_{1:8}U_{14%}P_{4,9}, which resulted in average compressive strength of 2.8 MPa, water absorption of 11.8% and dry Bulk density of 1.956 g/cm³.

Keywords: Sustainability. Brick. Soil-cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ábaco do teor mínimo de cimento em massa	26
Figura 2 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa..	37
Figura 3 - Solo em torrões e solo após a moagem.....	39
Figura 4 - Ensaio de caracterização do solo, a) Ensaio de granulometria; b) Homogeneização da mistura; c) Amostra no aparelho de Casagrande; d) Diâmetro de 3 mm da amostra após ser rolada sobre a placa de vidro; e) Comprimento da amostra na ordem de 100 mm; f) Ensaio de densidade real; g) Mistura para o ensaio compactação(solo-cimento) e h) Tijolo prensado..	40
Figura 5 - Prensagem, a) Modelo da prensa; b) Tijolo prensado..	43
Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão, a) Tijolo posicionado na prensa; b) Tijolo rompido.....	44
Figura 7 - Ensaio de absorção de água, a) Tijolos em estufa; b) Tijolos imersos em água.....	45
Figura 8 - Difratoograma de raios-x do solo.	53
Figura 9 - Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV)..	54
Figura 10 - Influência da pressão de compactação na resistência à compressão dos tijolos.....	55
Figura 11 - Influência da umidade na resistência à compressão dos tijolos.....	56
Figura 12 - Influência do teor de cimento na resistência à compressão dos tijolos.	57
Figura 13 – Influência da pressão compactação na absorção de água dos tijolos.	59
Figura 14 - Influência da umidade na absorção de água dos tijolos.....	60
Figura 15 - Influência do teor de cimento na absorção de água dos tijolos	61
Figura 16 – Influência da pressão de compactação na massa específica aparente seca dos tijolos	62

Figura 17 - Influência da umidade na massa específica aparente seca dos tijolos. 64

Figura 18 - Influência do teor de cimento na massa específica aparente seca dos tijolos..... 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos e Dimensões nominais.....	23
Tabela 2 - Classificação dos solos Highway Research Board.....	26
Tabela 3 - Tipos de solo e teores de cimento	29
Tabela 4 - Tipo de solo e resultados experimentais de umidade	30
Tabela 5 - Resultados experimentais do ensaio de resistência à compressão	33
Tabela 6 - Resultados experimentais do ensaio de absorção de água	34
Tabela 7 – Resultados experimentais de ensaio de absorção de água	35
Tabela 8 - Ensaio de determinação da massa específica aparente seca.....	36
Tabela 9 - Testes para obtenção do teor de umidade e percentual areia - solo	39
Tabela 10 - Formulações dos tijolos de solo-cimento	42
Tabela 11 - Proporção individual da mistura do tijolo de solo-cimento	42
Tabela 12 - Propriedade físicas e químicas do cimento CP V-ARI	47
Tabela 13 - Composição química do cimento CP V-ARI	48
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de caracterização no solo.....	49
Tabela 15 - Resultados da umidade ótima correspondente a massa específica aparente seca ...	51
Tabela 16 - Resultados da umidade correspondente a resistência à compressão máxima	51
Tabela 17 - Composição química do solo	53

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHO – *Association of State Highway Officials*

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise Estatística Por Meio Da Metodologia De Análise De Variância

ASTM – American Society for Testing Materials

H.R.B – *Highway Research Board*

IFS – Instituto Federal de Sergipe

MEV– Microscopia eletrônica de varredura

NBR – Norma Brasileira

PCA – *Portland Cement Association*

PAST – *Paleontological Statistics*

T_{1:8}, T_{1:12} – Traço 1:8, Traço 1:12

U_{8%}, U_{14%} – Umidade de 8%, Umidade de 12%

P_{1,6}; P_{4,9}; P_{9,7} – Pressão de 1,6 MPa, Pressão de 4,9 MPa, Pressão de 9,7 MPa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL	19
2.2	SOLO - CIMENTO	20
2.3	TIJOLO DE SOLO – CIMENTO	21
2.3.1	Influência nas propriedades do tijolo de solo-cimento	23
2.3.1.1	<i>Influência da pressão de compactação</i>	23
2.3.1.2	<i>Influência do teor de cimento</i>	25
2.3.1.3	<i>Influência da umidade</i>	29
2.3.2	Principais propriedades do tijolo de solo-cimento	31
2.3.2.1	<i>Resistência à compressão</i>	31
2.3.2.2	<i>Absorção de água</i>	33
2.3.2.3	<i>Densidade (massa específica)</i>	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37

3.1	MATERIAIS	38
3.1.1	Cimento	38
3.1.2	Solo	38
3.1.3	Água	41
3.2	MÉTODOS	41
3.2.1	Procedimento para preparação das formulações e moldagem dos tijolos	41
3.2.2	Ensaio de caracterização do tijolo de solo - cimento	43
3.2.2.1	<i>Ensaio de resistência à compressão</i>	43
3.2.2.2	<i>Ensaio de absorção de água</i>	44
3.2.2.3	<i>Ensaio para determinação da massa específica aparente seca</i>	45
3.2.3	Tratamento e análise dos dados	45
3.2.4	Metodologia de análise estatística	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	47
4.1.1	Cimento Portland	47
4.1.2	Solo	49
4.1.2.1	<i>Resultados do ensaio de compactação (solo-cimento)</i>	50
4.1.2.2	<i>Resultados da composição química do solo</i>	53
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO NO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO	49
4.2.1	Ensaio para caracterização dos tijolos	49

4.2.1.1	<i>Resistência à compressão</i>	49
4.2.1.2	<i>Absorção de água</i>	58
4.2.1.3	<i>Massa específica aparente seca</i>	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
5.1	CONCLUSÕES	66
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da construção civil, a preocupação com o desenvolvimento sustentável se tornou gradativamente mais elevada, onde medidas ecológicas estão sendo adotadas, assim, promovendo a diminuição dos impactos ambientais (MOTTA, et al., 2014). O tijolo de solo-cimento é considerado um material sustentável, pois satisfaz algumas condições, sendo elas, o uso dos recursos naturais de forma racional, eficiência energética, eliminação ou redução dos resíduos gerados, baixa toxicidade, acessibilidade e conservação de água. Além disso, o estudo e desenvolvimento desse material ecológico está voltado para atender as necessidades essenciais de pessoas que enfrentam dificuldades financeiras quanto ao alto custo dos materiais convencionais (UZOEGBO, 2016).

O tijolo de solo-cimento não possui a etapa de queima da lenha ou óleo combustível em seu processo de produção, assim preservando o ecossistema, poupando o desmatamento das árvores e evitando a emissão de monóxido de carbono (MOTTA, et al., 2014). E segundo afirmaram Fay, Cooper e Morais (2014), o seu processo de fabricação é simples, o que permite economia de tempo devido o pouco nível de detalhes dos tijolos e do simples método de montagem, com a técnica de intertravamento, assim descartando os retoques, cortes e ajustes, diminuindo os desperdícios e retrabalhos.

A compactação dos tijolos de solo-cimento, na umidade ótima, resulta em um produto com elevada resistência, devido ao maior empacotamento das partículas que se obtém nessa umidade, além da contribuição da hidratação do cimento presente na formulação. Algumas características durante a produção do conjunto solo-cimento precisam ser consideradas, tais como, a classe do solo, o traço (proporção de cimento e solo), o tipo estabilizante, a compactação, a umidade do solo, a homogeneidade da mistura, a idade e o intervalo de cura, pois são alguns dos fatores que podem afetar diretamente no desempenho da mistura (SEGANTINI, et al., 2010).

Portanto, pesquisadores se propõem a explorar as características desse material. No estudo de Bryan (1988) o tipo de solo utilizado na mistura de solo-cimento tem influência significativa nas propriedades do tijolo de solo-cimento. Em sua pesquisa ele analisou os solos argilosos e arenosos e concluiu que a densidade alcançada variou para cada solo utilizado, e que a aplicação da pressão de compactação melhorou a densidade do solo argiloso, visto que ele é considerado

de difícil compactação, porém o solo argiloso apresentou resistências mais baixas em relação ao solo arenoso. Também, concluiu que a rigidez do tijolo é influenciada diretamente pela concentração de cimento.

Rodrigues e Holanda (2013) estudaram os tijolos de solo-cimento, e submeteram os corpos de prova em uma câmara úmida sob condições de 95% de umidade a 24 °C, durante 28 dias, para serem curados, onde posteriormente, eles observaram que os tijolos desenvolveram um bom desempenho termoacústico, boa resistência e demonstrou ser um material durável, além de ser considerado de baixo custo.

Motta, et al. (2014) analisaram as propriedades dos tijolos produzidos, por meio do ensaio de resistência à compressão simples e concluíram que a utilização desse material é vantajosa, seu processo é simples, econômico e sustentável, e sua característica de resistir a esforços de compressão simples atingi os padrões do tijolo de solo-cimento, especificados na ABNT NBR 10833:2013 - Fabricação de tijolo de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - procedimento. Ainda, verificou que o tijolo de solo-cimento apresentou uma economia de 21% com relação aos custos para construção da alvenaria, em relação ao tijolo convencional, eles citam também que o tijolo de solo-cimento é mais viável economicamente, pois em sua fabricação a energia utilizada é menor, visto que é dispensada a etapa da queima da lenha e do combustível.

Kolawole, Olalusi e Orimogunje (2020) observaram que os tijolos produzidos com misturas de argila e areia apresentaram melhores desempenhos de resistência, para unidades de alvenaria quando comparados a tijolos produzidos só com um desses dois materiais. Ainda, constatou-se que o teor de umidade é considerado um parâmetro importante, pois afeta diretamente a trabalhabilidade e o desempenho da mistura.

Assim, ante o exposto, o objetivo principal desta pesquisa é analisar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento. Para isso foram realizados os ensaios de caracterização no solo e no cimento. As dosagens foram definidas a partir de resultados experimentais obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais. Foram moldadas dez amostras para cada uma das doze formulações. Foram adotadas três pressões de compactação 1,6 MPa, 4,9 MPa e 9,7 MPa, duas umidades do solo - cimento

8% e 14%, e dois teores de cimento, um de 8,3% para o traço de 1:12 e 12,5% para o traço de 1:8. Por fim, nos tijolos produzidos foram realizados os ensaios de resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente seca.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em outros países, assim como no Brasil, o uso do solo-cimento está mais voltado para aplicação de pavimentação rodoviárias, porém, com a oportunidade na redução de custos vinculado com a conservação ambiental, a mistura solo-cimento tem sido direcionada com o propósito de construir casas com a aplicação de tijolos modulares. O avanço dos estudos tecnológicos direcionados para a produção dos tijolos ecológicos sucede em menores custos de fabricação, maior agilidade no processo construtivo. Por isso, é muito empregado na construção de moradias populares de baixo custo (MOTTA, et al., 2014).

O tijolo de solo-cimento é considerado um material sustentável, desta forma alguns estudos relatam que para fabricação desse tijolo existe uma variedade de solos adequados, que podem ser utilizados em sua moldagem, além da vantagem de poder ser produzido no local da obra e já ser utilizado na construção, possui reduzidas taxas de desperdícios, e também dispensa a etapa da queima do tijolo, como é utilizada em outros tipos de blocos, por fim, apresenta o atributo de uma maior durabilidade e segurança (SOUZA, et al., 2014).

Logo, a utilização do tijolo de solo-cimento é uma alternativa moderna e voltada para a preservação ambiental, desse modo preservar os recursos naturais e utilizá-los de maneira consciente é uma forma sensata de uma nação alcançar o bom desenvolvimento social e econômico. Nota-se que no Brasil essas questões vêm sendo mais visadas e implantadas, tendendo ao desenvolvimento sustentável das construções. Portanto, otimizar as propriedades do tijolo de solo - cimento é de suma importância para o avanço tecnológico desse material.

1.2 OBJETIVOS

A seguir, são apresentados os objetivos gerais e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Explorar o estado da arte acerca da influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento na resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente seca do tijolo de solo-cimento;
- Conhecer e determinar as propriedades dos materiais componentes do tijolo de solo-cimento, assim como sua influência nas propriedades do material produzido;
- Desenvolver formulações para a produção dos tijolos de solo-cimento;
- Analisar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento na resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente seca dos tijolos de solo-cimento produzidos;
- Comparar e analisar os dados experimentais obtidos nessa pesquisa, com os valores dispostos na literatura para metodologias semelhantes;
- Instigar o uso desse tipo de material sustentável na construção civil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão abordados neste capítulo alguns trabalhos científicos referentes ao tema explanado neste estudo. Visando estruturar a contextualização da pesquisa e seu embasamento teórico, que integrará no referencial deste trabalho na forma de uma revisão bibliográfica, a fim de analisar e comparar resultados de ensaios das diferentes literaturas abordadas.

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil é uma das principais contribuintes para o progresso social e econômico de um país, através dela é possível a geração de novos empregos, implantação da infraestrutura de uma cidade e a diminuição da deficiência habitacional (OLIVEIRA; RUPPENTHAL, 2020).

Porém, estima-se que essa indústria utiliza cerca de 40% dos recursos naturais de todo globo, sendo considerada a maior fonte de poluição ambiental, portanto, esse ramo da construção civil vem buscando introduzir em toda sua cadeia de produção, práticas e materiais sustentáveis. Com o desenvolvimento social voltado para a sustentabilidade, o mercado da construção civil, engenheiros e arquitetos estão progressivamente se atentando para seleção dos materiais sustentáveis e observando questões como contaminação do ar no interior da edificação, as taxas de ventilação ambiental, a durabilidade do material, os impactos que podem ser causados em caso de descarte e como eles podem ser reaproveitados (CASSA; CARNEIRO; BRUM, 2001).

Assim, o desenvolvimento sustentável deve estar vinculado com a ação humana sobre os recursos naturais, de forma que essas ações reflitam de maneira positiva sobre o meio ambiente e gerações futuras desfrutem desse meio natural de forma íntegra. Para alcançar a sustentabilidade faz-se necessário ter um equilíbrio entre as questões ambientais, sociais e econômicas (LIMA, et al., 2020).

Afirmaram Fiais e Souza (2017), em seu estudo, que a ação de construir sem gerar impactos ambientais não existe, contudo salientou que a substituição dos tijolos convencionais pelos tijolos ecológicos é uma solução viável para amenizar o grau de impacto ao meio ambiente. Assim, a utilização desses tijolos ecológicos necessita de certos cuidados, com objetivo de evitar o surgimento das patologias mais comuns, como percolação de umidade, através de paredes, fissuras, por efeito de retração, e desgaste superficial.

A substituição de materiais de alvenaria convencionais, como pedra, tijolos queimados e blocos de concreto, tornou-se imperativa nos últimos anos devido à preocupação com a exploração de recursos naturais, alta energia incorporada, alto custo, baixo desempenho térmico e impactos ambientais adversos (WALKER, 1995; MANSOUR, et al., 2016).

Assim, o solo-cimento como matéria-prima para materiais de construções pode ser considerado uma alternativa sustentável. Pois, podem ser produzidos com material em abundância na natureza, com a extração podendo ser realizada no próprio local da construção ou em jazidas próximas, assim, economizando no transporte do solo até a obra, além de apresentar baixo consumo de energia em seu processo de fabricação e baixo teor de cimento, para desenvolver suas propriedades mecânicas, conforme proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986). O tijolo de solo-cimento conhecido como ecológico, produzido com solo-cimento, possui uma menor taxa de emissão de carbono, quando comparado aos tijolos convencionais, por isso é considerado um material ecologicamente correto (BHAIRAPPANAVAR; LIU; SHAKOOR, 2020).

2.2 SOLO - CIMENTO

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986) define o solo-cimento como o resultado de uma mistura homogênea, compactada e curada, composta por cimento, água e solo, com dosagem em proporções adequadas. A boa combinação dessa mistura resulta em um produto com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, boa durabilidade e baixo índice de retração volumétrica. A quantidade de solo, utilizado na mistura, é bem maior que a do cimento, que deve estar entre 5% e 10% do peso total do solo, a fim de proporcionar boas propriedades de resistência.

Os primeiros relatos de trabalhos científicos acerca da utilização do solo-cimento deram início por volta do ano de 1932, na aplicação de 17.000 m² de pavimentação, na Carolina do Sul - EUA, no entanto, por volta de 1917 que se originou o conceito solo-cimento. E a partir do ano de 1944 que iniciou o processo de normatização de ensaios com solo-cimento, partindo da *American Society for Testing Materials* (ASTM), seguido da *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) e pela *Portland Cement Association* (PCA) (SEGANTINI, et al., 2010).

A normatização de experimentos envolvendo estudos sobre o solo-cimento iniciou-se no Brasil apenas no ano de 1936, onde a respeito do tema sucedeu regulamentações, estudos e aplicações, e sua padronização se concebeu por intermédio da ABCP. Em 1941, a mistura esteve presente na pavimentação no aeroporto de Petrolina, PE, em 1945, na construção da primeira casa de bombas em solo-cimento, no Aeroporto de Santarém - PA, no mesmo ano, efetuou-se construções de algumas casas com paredes monolíticas, em Petrópolis, e no ano de 1950, aconteceu a inauguração de uma obra de 10.800 m² utilizando o solo-cimento no hospital Adriano Jorge, em Manaus - AM. A grande aceitação da mistura de solo-cimento se deu no ano de 1960, sendo a mesma aplicada em diversas áreas, como na pavimentação de rodovias, de aeroportos, nas vias urbanas, nos pátios industriais, em locais de estacionamentos de veículos, na fabricação de blocos e tijolos e diversas outras áreas de aplicação (SEGANTINI, et al., 2010).

O uso do solo-cimento se difundiu nas diversas áreas e serviços da construção civil, isso devido o estudo e aperfeiçoamento de suas características, sendo utilizados em pavimentos rodoviários e aeroportuários, na fabricação de blocos para alvenaria, tijolos maciços, na segurança de taludes, de barragens de terra e proteção de canais etc. (NEVES, 1984, ABCP, 1986; SILVA, 1992; NASCIMENTO, 1994).

Para que a mistura de solo-cimento apresente bom desempenho, os solos coletados devem possuir características fundamentais, conforme descreve a ABNT NBR 10833:2013, com 100% dos grãos passando na peneira de 4,8mm (n. 4); de 10% a 50% dos grãos passando na peneira de 0,075mm (n. 200); limite de liquidez menor ou igual a 45%; índice de plasticidade menor ou igual a 18%. Segantini, et al. (2010), acrescenta que o solo arenoso é considerado o mais adequado no processo de mistura do solo com o cimento, este também deve conter uma fração fina, coesa, que favoreça a etapa de compactação do solo-cimento.

2.3 TIJOLO DE SOLO – CIMENTO

O tijolo de solo-cimento é produzido a partir de uma mistura composta por água, solo e cimento. Seu processo de fabricação é realizado com uso de uma prensa, podendo ela ser manual ou automática. Após a prensagem, o tijolo passa pela cura e secagem, não necessitando da queima para sua produção. Com isso o solo deverá ter uma maior proporção em relação ao cimento, e a escolha do tipo de solo deve ser baseado nos preceitos da ABNT NBR 10833:2013.

Utilizar esse tipo de material diminui o tempo de execução da obra e a quantidade de argamassa ou de cola empregada, pois o assentamento dos tijolos de solo-cimento é simplificado e se dá por encaixe, facilitando sua montagem. Outra característica peculiar do tijolo ecológico, é o bom isolamento acústico e térmico. Ele também pode possuir dois furos ao longo do seu formato, os quais possibilitam a passagem da rede elétrica e hidráulica nas paredes, evitando os recortes nas mesmas. Além disto, as paredes elaboradas com o solo-cimento possuem cargas menores e consequentemente, alicerces menos robustos (MOTTA, et al., 2014).

No estudo realizado por Vieira, et al. (2007) sobre métodos e observações acerca do uso e propriedades do solo-cimento, foi constatado a importância de seguir corretamente os procedimentos de dosagem, de mistura, hidratação, compactação e moldagem dos tijolos de solo-cimento, para obtenção de um produto com qualidade e com características significantes.

Os tijolos de solo-cimento podem ser empregados tanto na alvenaria estrutural quanto na de vedação, contando que cumpram todas as exigências, como os critérios de resistência, os cuidados e as manutenções, estabelecidos no método convencional. Uma das desvantagens ao utilizar o solo-cimento como matéria-prima é por causa do seu uso de forma indiscriminada, o que é capaz de propiciar processos erosivos ao meio ambiente, os quais são definidos como processos de desagregação e remoção de partículas do solo por ação antrópica, que podem modificar e prejudicar o curso natural do solo. Outro ponto é o surgimento de patologias na construção causadas por erro de dosagem dos materiais (MOTTA, et al., 2014).

Assim, diante da correta dosagem dos materiais a ABNT NBR 8491:2013- Tijolo de solo-cimento - requisitos, expõe que os tijolos de solo-cimento podem ser fabricados em diversos modelos e dimensões, ficando em concordância com a demanda de projeto, os materiais, equipamentos, e com a mão de obra. Os tijolos ecológicos devem apresentar arestas vivas, não podem apresentar fissuras, nem tão pouco fraturas ou qualquer outro defeito que possa comprometer o assentamento, a resistência e a durabilidade da alvenaria.

Na Tabela 1 da ABNT NBR 8491:2013 são especificados tipos e dimensões nominais dos tijolos de solo-cimento. Eles também podem ser fabricados com dimensões distintas, desde que sua altura permaneça menor que sua largura. Cabe ao fabricante atender às necessidades do comprador, quanto às características físico-mecânicas do tijolo a ser produzido. Eles podem ser

vazados ou maciços. O tijolo vazado de solo-cimento com furos verticais deve ter um volume total inferior a 85% do volume aparente e espessura mínima das paredes, no seu entorno, de 25 mm e a distância entre os dois furos de 50 mm.

Tabela 1 - Tipos e Dimensões nominais

Tipos	C - Comprimento(mm)	L - Largura(mm)	H - Altura(mm)
A	200	100	50
B	400	120	70

Fonte: ABNT NBR 8491:2013.

2.3.1 Influência nas propriedades do tijolo de solo-cimento

Bryan (1988) afirmou em seu estudo que alguns fatores interferem significativamente nas propriedades do tijolo de solo-cimento, apontando para pressão de compactação, umidade do solo e do teor de cimento, e concluiu que esses fatores são conhecidos como os principais influenciadores nas características final do tijolo e são usados como critérios de análise de suas propriedades.

2.3.1.1 Influência da pressão de compactação

A boa compactação da mistura de solo-cimento resulta em um tijolo com características determinantes. Sabe-se que na estabilização do solo com cimento ocorre reações de hidratação entre os aluminatos e silicatos, componentes presentes no cimento, preenchendo-se os espaços vazios da mistura e unindo os grãos do solo, obtendo uma boa resistência inicial (MILANI; FREIRE, 2006).

Segundo observou Milani (2008), o bom desempenho físico-mecânico da mistura de solo-cimento foi gerado pela importante etapa de compactação, pois nessa fase pode-se trabalhar umidades de moldagem em torno do teor ótimo, que através dessa umidade ótima, atinge-se a máxima densidade, assim como, a máxima resistência. E quanto mais estabilizado o solo estiver, menor será a quantidade de massa perdida.

Portanto, uma maior energia de compactação aplicada em um solo que se encontre com a umidade inferior a ótima, provoca o aumento da densidade seca. Caso a umidade do solo esteja

maior do que a umidade ótima e com uma elevada energia de compactação, pouco será o aumento da densidade, pois não será possível expulsar o ar dos vazios.

A boa compactação do material utilizado na moldagem do tijolo de solo-cimento resulta em superfícies mais regulares, coesas e homogêneas. No estudo de Vieira, et al. (2007), obteve-se resultados de resistência à compressão superior ao estipulado nas normas de tijolos de solo-cimento, chegando a atingir até 2,75 MPa, com o emprego da areia lavada na mistura com 9% de água, isso em virtude de uma maior granulometria em suas partículas, proporcionando um melhor empacotamento das partículas com a saída da água na cura. Assim, o emprego da areia lavada também favoreceu melhorias substanciais nas propriedades de resistência mecânica à compressão e absorção de água do solo-cimento, obtendo-se resultados melhores que os estipulados nas normas brasileiras. Para o tijolo ecológico produzido com areia feldspática, a resistência aproximou-se de 1,7 MPa, com apenas 2 % de água introduzida em sua mistura, essa baixa porcentagem de água é devido a elevada umidade presente na areia feldspática, contudo, os tijolos produzidos com os dois tipos de areia, citadas anteriormente, atenderam aos padrões normativos dos tijolos de solo-cimento.

Segundo Marques (2010), o intervalo de tempo entre a mistura e a compactação não deve ultrapassar mais de duas horas, pois pode influenciar tanto na massa específica seca máxima, quanto na resistência final do produto. Onde a diminuição dessa massa é ocasionada pelo aumento do pH da água, quando entra em contato com o cimento, e caso o tempo de mistura e de compactação sejam elevados serão produzidas partículas de argila floculada, que absorverão a energia de compactação, assim, sugere-se que após a etapa de mistura, a compactação seja realizada dentro de duas horas.

Em relação ao fator pressão de compactação, na maioria dos artigos pesquisados, nota-se a ausência dessa informação e poucos investigaram a influência desse parâmetro em suas análises experimentais. Nos raros artigos encontrados, a pressão de compactação é mencionada de forma sucinta, onde retratam sua influência nas propriedades do tijolo de solo-cimento, mas não apresentam dados de monitoramento desse fator.

Uzoegbo (2016), abordou em seu estudo que as pressões de compactação utilizadas para a produção dos blocos/tijolos variaram entre 1 MPa e 20 MPa, porém a pressão de compactação

que influenciou de forma positiva na resistência à compressão do tijolo produzido foi a de 10 MPa, sendo a adotada para estudo dos tijolos. Ele também observou que a maioria das prensas mecanizadas são programadas para produzir blocos com pressão de 10 MPa, em faixa de alta pressão, logo o equipamento utilizado já vem programado com determinado potencial de compactação.

Em seu estudo, Bhairappanavar, Liu e Shakoore (2020), observou que o aumento na pressão de compactação de 2 MPa para 4 MPa, utilizada no ensaio juntamente com o acréscimo no tempo de cura, provocou uma melhora na resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento. Constatou também que o aumento na pressão de compactação acarretou uma diminuição na absorção de água dos corpos de prova, atendendo às especificações estabelecidas pelo método C67 da ASTM (2020), de no máximo 20 % de absorção de água.

2.3.1.2 *Influência do teor de cimento*

Segundo análise realizada por Marques (2010), o tipo de solo influencia diretamente no teor de cimento, já que o solo depende da quantidade de silte e argila presentes em sua composição, com isso o teor de cimento aumentará de modo a equilibrar a mistura de solo-cimento, dessa forma, para alcançar o teor ideal de cimento para determinado tipo de solo, deve-se seguir os procedimentos de dosagem, pois o excesso de cimento na mistura pode ocasionar inconveniências técnicas, como favorecer o surgimento de patologias na construção, além de acarretar desvantagens econômicas.

A dosagem da mistura de solo-cimento, segundo a ABNT NBR 12253:2012, utiliza-se da classificação *Highway Research Board* (H.R.B.), conforme está exposto na Tabela 2, com restrição para estudo apenas dos solos A1, A2, A3 e A4, eliminando os solos dos grupos A5, A6 e A7 (siltosos e argilosos).

A incorporação do teor de cimento na mistura para o ensaio de compactação é realizada de acordo com a classificação do solo, sendo que para solos A1, o teor recomendado é de 4 %, para solos A2, é de 5 %, e de 7 %, para solos do tipo A3 e A4. Após essa etapa, envolvendo o solo e teor de cimento, tem-se os valores da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima. Assim, a mistura de solo-cimento adotada deve ter resistência mínima de 2,1 MPa, para que a norma seja atendida.

Tabela 2 - Classificação dos solos Highway Research Board

Classificação Geral	Solos Granulares (<i>P</i> 200< 35%)							Solos siltosos – argilosos (<i>P</i> 200 > 35%)			
Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5; A-7-6
P10	<50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P40	<30	<30	>50	-	-	-	-	-	-	-	-
P200	<15	<25	<10	<35	<35	<35	<35	>35	>35	>35	>35
LL	-	-	-	<40	>40	<40	>40	<40	>40	<40	>40
IP	<6	<6	NP	<10	<10	>10	>10	<10	<10	<10	>10
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	<4	<4	<8	<12	<16	<20
Materiais Constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia		Areia Fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas				Solos Siltosos		Solos Argilosos	
Classificação como subleito	Excelente a Bom						Regular a mau (Obs.: Grupo A-7-5: IP≤LL-30)				

Fonte: Adaptado de Zica, 2010.

A ABCP (1986) cita a “Norma simplificada” para dosagem de solo-cimento, que estipula o percentual de teor de cimento necessário para estabilização da mistura de solo e areia natural, a partir de um ábaco, como exposto na Figura 1. O teor de cimento é estimado com base no percentual de silte mais argila e o peso específico aparente seco máximo do solo. É possível notar na Figura 1 que à medida que cresce o teor de “silte + argila” na mistura, para um mesmo peso específico aparente seco máximo, aumenta a necessidade de incorporação de cimento. E caso aumente o peso específico e fixe um teor de “silte + argila”, nota-se a diminuição do teor de cimento na mistura, por consequência da redução dos vazios.

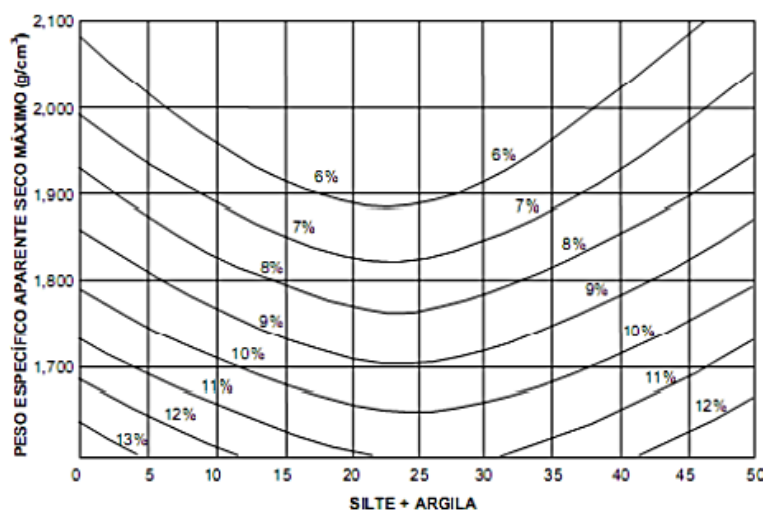


Figura 1 - Ábaco do teor mínimo de cimento em massa (ABCP, 1986).

O teor de cimento a ser incorporado na mistura depende de critérios como a resistência e durabilidade, além da questão econômica. A resistência à compressão aumenta em função do aumento do teor de cimento e do tipo do solo utilizado na mistura de solo-cimento, e essa boa combinação se dá devido às alterações físico-químicas geradas pela relação entre as partículas do solo e do cimento hidratado (MILANI, 2008).

Segundo observou Ouedraogo, et al. (2019), a utilização de mais de 4% de cimento para produção do tijolo de solo-cimento, no aspecto econômico, é considerada inviável e, na questão ambiental, é desfavorável. Dessa forma, para obtenção de um tijolo com propriedades otimizadas faz-se necessário equilibrar o teor de cimento, com o tipo de solo empregado e a energia de compactação, além do tipo de cimento. Assim, por meio do experimento ele certificou tijolos com resistências suficientes para serem empregados na construção de moradias de um até dois andares, porém, não recomendou a utilização desses tipos de tijolos com baixos percentuais de cimento em estruturas de maiores portes. Também, constatou que os tijolos apresentavam o atributo de manter sua inércia térmica inalterada, estejam os tijolos estabilizados ou não, ou seja, classificou-os como um material de excelente conforto térmico.

Bhairappanavar, Liu e Shakoore (2020), em sua pesquisa sobre o tijolo de solo-cimento, observou que o aumento do teor de cimento de 8% para 12% no traço favoreceu um acréscimo de 41 %, na resistência à compressão, no 28º dia, e responsabilizou essa maior resistência a adição do teor de cimento na mistura, sendo que esse aumento pode ser atribuído às reações químicas que ocorrem no cimento mediante a sua hidratação. Com isso, ele concluiu que o solo arenoso utilizado na mistura de solo-cimento apresentou uma boa trabalhabilidade quando adicionado aos outros componentes da mistura. Assim, ele observou que o solo arenoso apresentou um coeficiente de uniformidade (C_u) = 3,5 e um coeficiente de curvatura (C_c) = 1,14.

Segundo estudou José e Kasthurba (2020) a adição de mais de 15% de cimento é considerada inviável economicamente; assim o teor de cimento ideal se modificava de acordo com o tipo de solo e que não poderia ser inferior a 5%, assim ele analisou que para solos arenosos o teor de cimento variava entre 5% e 9%, para o siltoso entre 7% e 10% e o argiloso requer entre 8% e 12%.

José e Kasthurba (2020) estudaram o teor ideal de cimento para compor a mistura para se produzir tijolo de solo-cimento. Os autores afirmaram que 8% é a porcentagem ideal, pois a partir desse percentual avaliou como boa propriedade de resistência ao intemperismo e pode-se alcançar uma resistência à compressão de 3,5 MPa, atingindo aos padrões normativos de resistência de tijolos de solo-cimento, além dessas características positivas, pode-se concluir que o tijolo produzido apresentou um bom isolamento térmico, propício para construções em climas tropicais. O solo predominante no experimento foi a laterita, conhecido por ser um tipo de solo predominante na Índia, e que está presente em todo o mundo em regiões tropicais da África, América do Sul e em algumas regiões da Ásia.

Em sua análise experimental, Uzoegbo (2020) observou que a resistência à compressão foi superior a 2 MPa, após os 28 dias do tijolo de solo-cimento estabilizado com 8% de cimento e determinada quantidade de argila. Afirmou-se que um maior teor de argila na mistura de solo-cimento melhora a união do solo com a água, consequentemente, a argila diminui a resistência do tijolo. Para um teor de 12% de cimento, obteve-se uma maior resistência, de 4 MPa. Ainda, observou-se que o aumento de cimento reduziu a porosidade e as características de absorção do tijolo de solo-cimento.

Os resultados dos estudos abordados nos parágrafos anteriores acerca do teor de cimento na mistura de solo-cimento, estão apresentados na Tabela 3, juntamente com outras porcentagens de cimento, abordadas em outros artigos. Observa-se na Tabela 3 que os percentuais de cimento adotados variaram entre 4,8% e 15%, e que os teores mais usuais foram os de 8, 10 e 12%. O solo arenoso foi o mais empregado nos experimentos, por ter apresentado boas características de trabalhabilidade, favorecendo a obtenção das melhores propriedades.

Milani e Freire (2006) observaram que o solo arenoso foi considerado o ideal em seu estudo para compor e estabilizar a mistura de solo-cimento, pois apresentava granulometria desuniforme, e apresentando uma melhor interação entre o solo e o aglomerante, além de possuir uma quantidade de argila + silte suficiente para garantir uma maior plasticidade da mistura.

Tabela 3 - Tipos de solo e teores de cimento

Autores	Solo utilizado	Teor de cimento (%)
Reddy (1994)	Arenoso	5 a 10
Mellace; Alderete e Arias (2002)	Arenoso e Siltoso	9
Milani e Freire (2006)	Arenoso	4,8 a 18
Vieira, et al. (2007)	Arenoso	5
Alexandre, Jonas, et al. (2014).	Arenoso	12
Donkor e Obonyo (2016)	Arenoso	8
Uzoegbo (2016)	Arenoso	6 e 8
Barros, et al. (2020)	Arenoso	9
Uzoegbo (2020)	Arenoso	12
Vilela, et al. (2020)	A-4 (AASHTO)	5 e 10
José e Kasthurba (2020)	Laterita	8
Bhairappanavar, Liu e Shakoor (2020)	Arenoso	8, 10 e 12
Kongkajun, et al. (2020)	Arenoso	10 a 15
Kasinikota e Tripura (2021)	Arenoso	10

Fonte: O autor, 2021.

2.3.1.3 *Influência da umidade*

A mistura de solo-cimento necessita de uma umidade que leve a formação da massa específica seca máxima, com determinada energia de compactação, assim como exigido nos solos naturais. Ao adicionar cimento na mistura, a umidade aumenta e diminui a massa específica seca máxima, devido a ação flocculante do cimento. Sabe-se que o teor de umidade ótima que conduz a máxima massa específica seca não é obrigatoriamente o mesmo teor que alcança a máxima resistência, depende do tipo de solo utilizado, onde para solos arenosos, a máxima resistência é atingida no ramo seco, e, para o solo argiloso no ramo úmido (MARQUES, 2010).

O estudo realizado por Mellace, Alderete e Arias (2002) foi voltado para observação dos ensaios aplicados em tijolos de solo-cimento, visando obter as melhores propriedades, assim utilizou-se o solo arenoso e o siltoso, com proporção em volume de 1:10 (cimento: solo), para fabricação de tijolos de solo-cimento, e teores de umidade para moldagem de 19% e 22%, respectivamente. Foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples e a tração na compressão diametral. Eles observaram que além dos resultados serem influenciados a partir do tipo de solo e da relação água/solo-cimento, utilizados na compactação, observou-se que a

umidade de moldagem que mais se aproximou do teor de umidade ótima foi a que apresentou maiores valores de resistência.

Na Tabela 4 são apresentados os teores de umidades abordados nos artigos, cujos valores variaram entre 5 % e 22 %, nota-se que são valores distantes, e que foram estudados por diferentes autores com assuntos semelhantes, no entanto, em todas as pesquisas foi possível alcançar o objetivo de cada estudo. Reforçando que é a combinação de vários parâmetros que influenciam nas propriedades do tijolo de solo-cimento.

Tabela 4 - Tipo de solo e resultados experimentais de umidade

Autores	Tipo de solo	Teor de umidade (%)
Mellace, Alderete e Arias (2002)	Arenoso e Siltoso	16 e 22
Milani e Freire (2006)	Arenoso	14,88
Vieira, et al. (2007)	Arenoso	9
Alexandre, Jonas, et al. (2014)	Arenoso	7
Donkor e Obonyo (2016)	Arenoso	9
Uzoegbo (2016)	Arenoso	5
Uzoegbo (2020)	Arenoso	5
Vilela, et al. (2020)	A-4 (AASHTO)	16,58
José e Kasthurba (2020)	Laterita	16
Kolawole, Olalusi e Orimogunje (2020)	Arenoso	15
Bhairappanavar, Liu e Shakoor (2020)	Arenoso	10

Fonte: O autor, 2021.

Segundo observou Uzoegbo (2016) não há um teor de água padrão ou preestabelecido para produção do bloco/tijolo estabilizado, já que a quantidade de água, é influenciada diretamente pela proporção de argila e silte presentes na mistura. Em sua pesquisa, o autor analisou o teor de umidade ideal para produção de tijolos de solo-cimento, contemplando diferentes teores de cimento entre 5% e 20%, assim, observou que um teor de 5% era o mínimo para proporcionar uma resistência entre 3 e 5 MPa, e que 20% de cimento resultaria na maior resistência, porém, foi considerado economicamente inviável. Portanto, um teor mínimo de cimento de 5% atenderia a resistência requerida acima da estabelecida por norma. Logo, concluiu que a

resistência aumentou à medida que ocorreu um aumento na pressão de compactação, também observou, que a umidade é um fator muito relevante em estudos envolvendo solos, já que ela propicia boas condições de trabalhabilidade, maiores densidades, uma boa compactação do material, uma maior resistência e maior durabilidade.

No estudo realizado por Kolawole, Olalusi e Orimogunje (2020) o teor de umidade ideal apontado em seu experimento foi de 15 %, para um solo de laterita, que possui esse mesmo teor de água em seu estado natural, favorecendo uma boa trabalhabilidade. Ele notou que o teor de umidade no tijolo deve ser equilibrado, pois quando o tijolo fica muito seco, a água pode ser sugada para fora da mistura, afetando a boa aderência e hidratação do cimento, e quando o tijolo está com excesso de água, a mistura tende a flutuar por cima da superfície, sem adquirir adesão adequada. Esses teores de umidade quando adicionados de forma desproporcional afetam a mistura de solo-cimento, gerando descascamento na face dos tijolos, além de afetar a resistência deles.

2.3.2 Principais propriedades do tijolo de solo-cimento

Os principais quesitos de propriedade do material do tijolo de solo - cimento, também conhecido como bloco de terra estabilizado, são apontados pela resistência à compressão, densidade, durabilidade, absorção de água e condutividade térmica (UZOEGBO, 2020).

2.3.2.1 Resistência à compressão

Outra propriedade do tijolo é a resistência à compressão, esta depende do tipo de solo, do estabilizante e sua quantidade, e da pressão de compactação (UZOEGBO, 2020).

É possível obter uma boa resistência à compressão na produção de tijolos de solo – cimento. Motta, et al. (2014) no seu estudo experimental, comparou a resistência à compressão dos tijolos ecológicos com os convencionais, o tijolo de solo-cimento apresentou 3,8 MPa, enquanto o convencional chegou a atingir aproximadamente 2,0 MPa.

Hany, et al. (2021), expõe em seu estudo, que as partículas do solo têm relação direta com a resistência à compressão do tijolo, pois à medida que essas partículas de solo diminuem, a resistência aumenta. Eles estudaram que o tipo de solo e sua plasticidade também influenciam

nessa propriedade, afirmou que o aumento na plasticidade diminui a resistência à compressão, assim pontuaram que os teores ideais de argila presente na mistura devem estar entre 5 % e 10 %. Em seu experimento foi possível produzir tijolos com resistências entre 2,5 e 3,5 MPa, para um teor de 8 % de cimento.

A propriedade de resistir a esforços de compressão foi estudada por Reddy e Kumar (2011), onde concluíram que o aumento da densidade e a taxa de água na moldagem elevam a resistência à compressão. Eles produziram tijolos com teores de cimento variando entre 1 % e 10 %, mediante a isto eles obtiveram com a variação do cimento diferentes resistências à compressão, porém, optaram por um tijolo com resistência de 6,43 MPa na proporção de 10 % de cimento. A escolha desses valores foi baseada nos melhores resultados apresentados pelos tijolos, sendo que um dos critérios foi o aumento da resistência, além da baixa proporção de cimento incorporada na mistura, resultando em um produto de baixo custo, onde mediante a isto, eles concluíram que uma proporção adequada de cimento eleva a resistência à compressão do tijolo.

Para a produção dos tijolos de solo-cimento o solo arenoso é considerado o mais adequado para ser incorporado na mistura, pois ele apresenta uma granulometria desuniforme, causando uma melhor interação entre o solo e o aglomerante. Pois a resistência atribuída aos tijolos de solo-cimento é decorrente da hidratação do cimento, da união das partículas de solo e do preenchimento dos vazios no tijolo (JOSÉ; KASTHURBA, 2020).

Grande (2003) afirmou que para obter tijolos de solo-cimento resistentes, com baixas idades de cura, indica-se o emprego do aglomerante hidráulico tipo CP V ARI, pois são obtidas boas resistências, em menor tempo de cura. Em sua pesquisa, ele realizou a cura dos corpos de prova de solo-cimento em uma câmara úmida controlada, e salientou que a resistência à compressão tende a ser inferior caso os corpos de prova sejam curados em condições descontroladas, expostas ao ar, e essa queda ocorre devido a perda de água do tijolo por evaporação.

Nota-se na Tabela 5, valores obtidos de resistência à compressão para tijolos de solo-cimento, esses estão entre uma faixa de 2 MPa até 16 MPa, logo, nenhuma dessas resistências ficou abaixo do valor mínimo de 2,0 MPa, estabelecido pela ABNT NBR 8491:2013 de resistência à

compressão para tijolo de solo-cimento, porém, é válido ressaltar que os valores acima de 8 MPa são resultados de tijolos produzidos com a incorporação de diferentes tipos de resíduos.

Tabela 5 - Resultados experimentais do ensaio de resistência à compressão

Autores	Tipo de solo	Teor de cimento (%)	Resistência à compressão (MPa)
Mellace, Alderete e Arias (2002)	Arenoso e Siltoso	9	2,0
Vieira, et al. (2007)	Arenoso	5	2,75
Reddy e Kumar (2011)	Arenoso	5 e 10	6,43
Alexandre, Jonas, et al. (2014).	Arenoso	12	1,71 a 2,23
Uzoegbo (2016)	Arenoso	6 e 8	3 e 5
Barros, et al. (2020)	Arenoso	9	2,5
Uzoegbo (2020)	Arenoso	12	5
Vilela, et al. (2020)	A-4 (AASHTO)	5 e 10	2,79
José e Kasthurba (2020)	Laterita	8	3,5
Bhairappanavar, Liu e Shakoor (2020)	Arenoso	8 e 12	11,3 a 16
Kongkajun, et al.	Arenoso	10 e 15	10,64 e 10,38
Kasinikota e Tripura (2021)	Arenoso	10	8,20 a 9,57
Hany, et al. (2021)	Arenoso	8	2,5 e 3,5

Fonte: O autor, 2021.

2.3.2.2 Absorção de água

A absorção de água é definida pela capacidade do material em absorver e transmitir água por capilaridade, que é consequência da força de sucção capilar, sendo essa ação da sucção capilar uma medida de engenharia da microestrutura de um material, considerada como uma propriedade importante para a durabilidade (UZOEGBO, 2016).

Segundo concluiu Vilela, et al. (2020) os tijolos de solo-cimento mais resistentes e densos, com elevados valores de durabilidade apresentaram baixos teores de absorção de água. Eles observaram que a redução da taxa de absorção de água nos tijolos de solo-cimento após o envelhecimento, foi por consequência da redução do volume (porosidade) do tijolo, devido a

prolongação do tempo de cura, já que essa extensão propiciou reações de hidratação do cimento, o que dificultou a entrada de água no tijolo, provocada por uma redução dos seus poros.

Ainda, Bhairappanavar, Liu e Shakoore (2020), citou que o teste de absorção de água aplicada nos tijolos, para medição do volume de vazios presente nos corpos de prova, indica que quanto menor a quantidade de vazios, menor será a absorção de água por parte dos tijolos, resultando em um produto de alta qualidade. Os valores de absorção de água oscilaram entre 13 % e 18 %, essa variação da absorção é causada pelo aumento da pressão de compactação e do teor de cimento, bem como a redução dos vazios, logo, concluiu que quanto menor a absorção de água maior será a resistência à compressão do tijolo.

Barros, et al. (2020) estudou a absorção de água nos tijolos de solo-cimento e concluiu que essa propriedade é muito importante no momento da moldagem dos corpos de prova, pois afeta diretamente a estabilidade e durabilidade dos tijolos. Observa-se na Tabela 6, os valores de absorção de água determinados em pesquisas experimentais; a menor taxa de absorção de água foi de 6,8 %, e a máxima foi de 18 %, sendo que a taxa máxima exposta está abaixo dos 20 % permitido pela ABNT NBR 8491:2013. A absorção de 12 %, registrada por Kongkajun, et al. (2020), foi a ideal para obter resistência à compressão acima das estabelecidas nas normas e manteve-se com a condutividade térmica constante, também, observou que a relação de absorção foi inversamente proporcional a densidade dos tijolos.

Tabela 6 - Resultados experimentais do ensaio de absorção de água

Autores	Absorção de água (%)
Mellace, Alderete e Arias (2002)	10
Vilela, et al (2020)	17
Barros, et al. (2020)	6,8 a 18
José e Kasthurba (2020)	6,8
Bhairappanavar, Liu e Shakoore (2020)	13 a 18
Alexandre, Jonas, et al. (2014).	14,5 a 15,9
Kasinikota e Tripura (2021)	8,41 a 10,52
Kongkajun, et al. (2020)	10 a 12

Fonte: O autor, 2021.

Motta, et al. (2014), no seu estudo experimental, comparou os índices de impermeabilidade dos tijolos ecológicos com os convencionais, e analisou os valores da capacidade total de absorção desses dois diferentes tipos de tijolos, conforme exibido na Tabela 7. Assim, conclui-se que o tijolo de solo-cimento apresenta maior impermeabilidade, e menor índice de absorção de água, com 15,33 %, enquanto o convencional apresentou 45,38 %.

Tabela 7 – Resultados experimentais de ensaio de absorção de água

Materiais	Peso do material seco (Kg)	Peso do material saturado (Kg)	Absorção (%)
Bloco	10,78	14,783	37,134
Tijolo convencional	3,025	4,398	45,388
Tijolo ecológico	3,685	4,25	15,332

Fonte: Motta, et al., 2014.

2.3.2.3 Densidade (massa específica)

A densidade dos tijolos de solo-cimento, é considerada relativamente alta, apontada como desvantagem quanto ao transporte desses materiais por longas distâncias, contudo essa densidade geralmente propicia boas propriedades térmicas e acústicas, tornando vantajoso o uso desse tipo de tijolo em climas quentes e secos, onde temperaturas intensas podem ser moderadas dentro da edificação, quando elaborada com esse tipo de material (UZOEGBO, 2020).

Em seu estudo, José e Kasthurba (2020) produziram tijolos de solo-cimento seguindo todas as etapas para a moldagem, desde a coleta do solo, peneiramento até a etapa de cura onde foi realizada em estufa a 105 ° C. No experimento, a densidade seca foi determinada obtendo-se o peso e o volume seco a partir das dimensões medidas. Eles concluíram que a densidade seca dos blocos tem uma relação direta com a condutividade térmica, mediante essa característica, o solo de laterita utilizado no tijolo de solo-cimento apresentou uma condutividade térmica maior do que os outros solos arenosos, que foram coletados em locais diferentes. Assim, registrou-se que a densidade seca máxima do tijolo produzido com solo de laterita foi de 1,61 g/cm³, sendo esse valor intermediário entre 1,59 g/cm³ e 1,67 g/cm³.

Os valores apresentados na Tabela 8, exibe diferentes massas específicas estudadas por alguns autores, com valores variando entre 1,59 g/cm³ a 2,2 g/cm³, percebe-se que não há uma discrepância entre os valores das densidades abordadas e que essa propriedade atribuída ao tijolo de solo-cimento é grandemente explorada e quantificada na maioria dos trabalhos abordados.

Tabela 8 - Ensaio de determinação da massa específica aparente seca

Autores	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
Reddy (1994)	1,71 a 1,86
Milani e Freire (2006)	1,75
Vilela, et al. (2020)	1,67
José e Kasthurba (2020)	1,61
Raavi e Tripura (2020)	1,59 a 1,78
Bhairappanavar, Liu e Shakoor (2020)	1,7 a 2,2

Fonte: O autor, 2021.

Raavi e Tripura (2020) estudaram e compararam os tijolos de solo-cimento com massas específicas de 1,59 a 1,78 g/cm³. Nos tijolos de solo-cimento eles observaram que os valores da densidade seca foram superiores aos valores do Proctor Padrão, isso por causa da correta hidratação da mistura de solo-cimento, e devido o bom preenchimento dos vazios devido à cura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico serão apresentados os materiais e métodos empregados nesta pesquisa, onde foram utilizados para analisar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento, após a sua produção utilizando três pressões de compactação 1,6 MPa, 4,9 MPa e 9,7 MPa, duas umidades 8% e 14% e dois traços de cimento 1:8 (teor de cimento de 12,5 %) e 1:12 (teor de cimento de 8,3%).

O programa experimental esquematizado na Figura 2, decorreu na realização dos ensaios no Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos do Instituto Federal de Sergipe Campus – Estância, onde iniciou-se com a caracterização da areia, solo e cimento para confecção dos tijolos de solo-cimento.

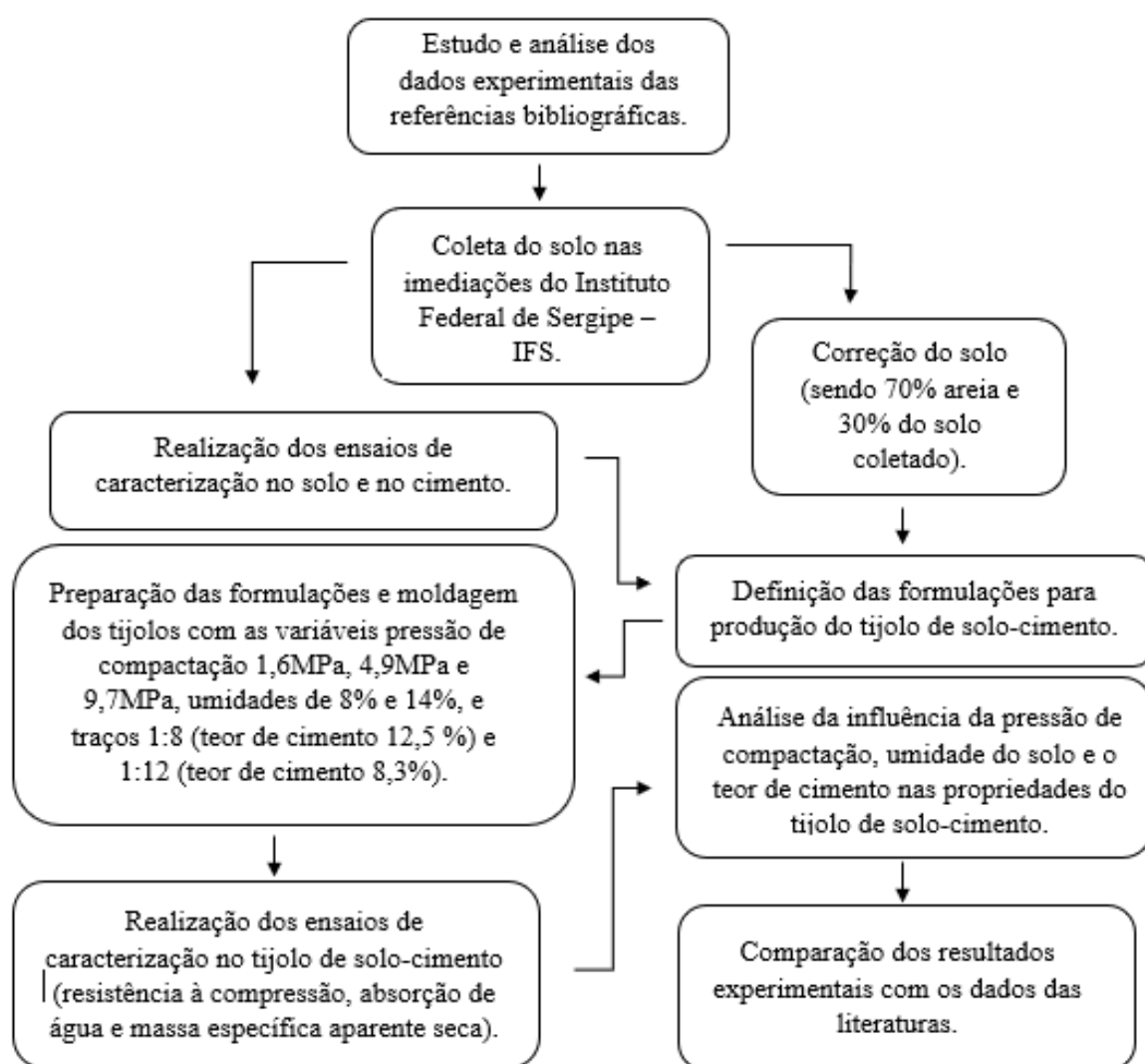


Figura 2 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa (O autor, 2021).

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram determinados conforme as normas apresentadas a seguir.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na produção da mistura de solo-cimento foi o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), cujo a sua caracterização foi realizada seguindo as normas descritas no Quadro 1, enquanto para análise da sua composição química, os dados apresentados foram fornecidos pela empresa Mizu Cimentos Especiais. De acordo com a ABNT NBR 16697:2018, esse tipo de cimento apresenta a peculiaridade de atingir 34 MPa aos primeiros 7 dias de sua aplicação, portanto, os ensaios de caracterização dos tijolos foram realizados após os 7 dias de cura.

Características	Normalização
Índice de finura	ABNT NBR 11579:2013
Expansibilidade Le Chatelier	ABNT NBR 11582:2016
Massa específica real	ABNT NBR 16605:2017
Pasta de Consistência	ABNT NBR 16606:2018
Tempos de pega	ABNT NBR 16607:2018
Resistência à compressão	ABNT NBR 7215:2019

Quadro 1 – Propriedades físicas e químicas do cimento Portland (O autor, 2021).

3.1.2 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado nas imediações do terreno do Instituto Federal de Sergipe Campus – Estância. Após a coleta, os materiais foram depositados em recipientes metálicos, onde seguiram para a secagem em estufa à 110 °C por 48 h. Após a secagem, o solo coletado foi destorroado para redução dos diâmetros dos grãos no moinho de bolas (Figura 3). Por seguinte, o solo foi corrigido com areia, adquirida no comércio local, na proporção de 30% de solo coletado, passante na peneira de 600 µm, e 70% de areia, passante na peneira de 1,18 mm, considerando os dados experimentais obtidos na pesquisa de Nascimento (2019) e Souza (2019), como apresentado na Tabela 9. A partir deste momento o termo solo utilizado nesta pesquisa refere-se à composição de 70% de areia e 30% de solo coletado.



Figura 3 - Solo em torrões e solo após a moagem (O autor, 2021)

Tabela 9 - Testes para obtenção do teor de umidade e percentual areia - solo

Areia (%)	Solo (%)	Umidade (%)	Resistência à compressão (MPa)
30	70	18	0,9
40	60	14	1,0
50	50	16	1,8
60	40	16	1,5
70	30	14	2,2

Fonte: Nascimento, 2019 e Souza, 2019

A análise da composição química do solo utilizado foi realizada no laboratório da empresa Mizu Cimentos Especiais. A identificação mineral através da caracterização da estrutura cristalina do solo, foi realizado por meio do difratograma de raios-x, no Laboratório do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CUM/CCT/UDESC), enquanto para a análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV), o ensaio foi realizado no Laboratório da Universidade Federal de Sergipe - Centro Multiusuário de Nanotecnologia (CMNano).

Os ensaios de caracterização do solo, ilustrados na Figura 4, foram realizados conforme as especificações das normas. A seguir estão as descrições dos ensaios.

A granulometria foi determinada através dos procedimentos da ABNT NBR 7181:2018, por meio do peneiramento mecânico de 200 g da amostra de solo e areia, onde posteriormente seguiu para a pesagem o material retido nas peneiras descritas na norma. Na Figura 4a está exposto o peneiramento mecânico da amostra.

O Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade, foram determinados conforme os preceitos da ABNT NBR 6459:2017 e a ABNT NBR 7180:2016, respectivamente. A ilustração do ensaio de liquidez está apresentada na Figura 4b: a mistura homogeneizada e na Figura 4c: a mistura no aparelho de Casagrande. Para o ensaio de plasticidade estão representadas na Figura 4d: o diâmetro de 3 mm da amostra após ser rolada sobre a placa de vidro e na Figura 4e: o comprimento da amostra na ordem de 100 mm.

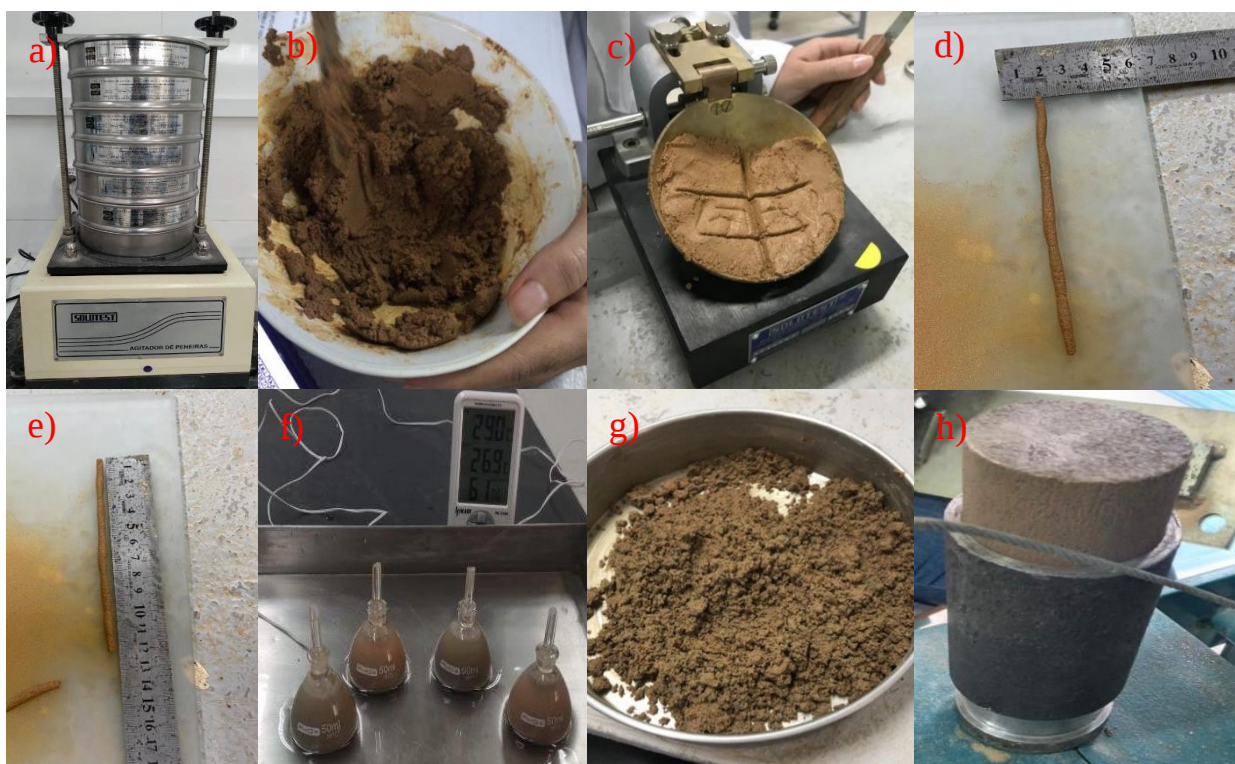


Figura 4 - Ensaio de caracterização do solo. a) Ensaio de granulometria; b) Homogeneização da mistura; c) Amostra no aparelho de Casagrande; d) Diâmetro de 3mm da amostra após ser rolada sobre a placa de vidro; e) Comprimento da amostra na ordem de 100mm; f) Ensaio de densidade real; g) Mistura para o ensaio compactação(solo-cimento) e h) Tijolo prensado (O autor, 2021).

O ensaio de densidade real foi determinado seguindo os procedimentos da DNER-ME-093:1994, como está representado na Figura 4f.

Para realização do ensaio de compactação (solo-cimento) foi seguido as especificações descritas na ABNT NBR 12023:2012, como está apresentado na Figura 4g: a mistura para o ensaio compactação (solo-cimento) e na Figura 4h: o tijolo prensado.

3.1.3 Água

A água empregada na mistura para produção dos tijolos foi coletada no Laboratório de Solos do IFS, no município de Estância, a qual foi fornecida pelo Sistema Autônomo de Água e Esgoto – SAAE. Foi utilizado no processo de fabricação do tijolo de solo-cimento água potável, para que ela não prejudicasse a hidratação do cimento, nem o surgimento de manifestações patológicas, conforme ABNT NBR 10833:2013 e NBR 8491: 2013.

3.2 MÉTODOS

O procedimento para preparação de moldagem, bem como os ensaios de caracterização do tijolo de solo-cimento serão apresentados nos tópicos seguintes.

3.2.1 Procedimento para preparação das formulações e moldagem dos tijolos

Para moldagem dos tijolos de solo-cimento foram elaboradas doze formulações, para cada formulação, foram produzidas 10 amostras totalizando cento e vinte corpos de prova, com diâmetro de 6,3 cm e altura variando conforme a aplicação das diferentes pressões de compactação, conforme estão descritas na Tabela 10. As variáveis definidas nesta pesquisa foram: três pressões de compactação com 1,6 MPa, 4,9 MPa e 9,7 MPa, duas umidades, sendo uma de 8 % e a outra 14 % e dois teores de cimento sendo 12,5 % (traço de 1:8) e 8,3 % (traço de 1:12), estas variáveis foram definidas após a realização dos ensaios de caracterização dos materiais componentes. Para os cento e vinte corpos de prova, sete foram utilizadas no ensaio de resistência à compressão, e três nos ensaios de absorção de água e massa específica aparente seca. A proporção em massa utilizada para a mistura de cada tijolo está disposta na Tabela 11.

Para avaliação das propriedades do tijolo de solo-cimento, definidas no programa experimental, foram moldados tijolos com formato cilíndrico (Figura 5b), diâmetro de 62,6 mm e altura variável, em função da pressão de compactação aplicada. Optou-se por amostras cilíndricas, a fim de determinar a pressão de compactação, visto que, é uma das variáveis desta pesquisa, porém, na maioria das literaturas abordadas essa pressão é pouco quantificada.

Tabela 10 - Formulações dos tijolos de solo-cimento

Nomenclatura	Traço – Teor de cimento (%)	Umidade do solo-cimento (%)	Pressão de compactação (MPa)
T _{1:8} U _{14%} P _{1,6}	1:8 – 12,5%	14	1,6
T _{1:8} U _{8%} P _{1,6} *	1:8 – 12,5%	8	1,6
T _{1:8} U _{14%} P _{4,9}	1:8 – 12,5%	14	4,9
T _{1:8} U _{8%} P _{4,9}	1:8 – 12,5%	8	4,9
T _{1:8} U _{14%} P _{9,7}	1:8 – 12,5%	14	9,7
T _{1:8} U _{8%} P _{9,7}	1:8 – 12,5%	8	9,7
T _{1:12} U _{14%} P _{1,6}	1:12 – 8,3%	14	1,6
T _{1:12} U _{8%} P _{1,6}	1:12 – 8,3%	8	1,6
T _{1:12} U _{14%} P _{4,9}	1:12 – 8,3%	14	4,9
T _{1:12} U _{8%} P _{4,9}	1:12 – 8,3%	8	4,9
T _{1:12} U _{14%} P _{9,7}	1:12 – 8,3%	14	9,7
T _{1:12} U _{8%} P _{9,7}	1:12 – 8,3%	8	9,7

Fonte: O autor, (2021).

Legenda:

* T_{1:8}U_{8%}P_{1,6}: traço 1:8 (teor de cimento de 12,5 %), umidade de 8% e pressão de compactação de 1,6 MPa .

Tabela 11 - Proporção individual da mistura do tijolo de solo-cimento

Traço	Areia (g)	Solo (g)	Cimento (g)	Água (g)
1:8	201,60	86,40	36 (12,5%)	25,92 (8%)
1:12	209,33	89,71	24,92 (8,3%)	45,35 (14%)

Fonte: O autor, 2021.

A preparação da mistura foi realizada de forma manual, após as etapas de destorroamento e peneiramento. Em um recipiente metálico, efetuou-se a homogeneização do solo, da areia, do cimento e da água, até apresentar uma coloração uniforme, logo em seguida, os corpos de prova foram conformados em uma prensa manual de tijolos ecológicos, modelo MARCON – MPH – 15, conforme está na Figura 5a.

Após a moldagem por prensagem e anotação da massa, altura e o diâmetro, os corpos de prova passaram por um período de cura durante sete dias, onde foram mantidos úmidos por meio duas

etapas de molhagem por dia, em um intervalo de 12 horas entre cada uma, sendo realizada com auxílio de um borrifador, onde a quantidade de água aplicada foi equivalente a 8,75 g correspondente a vinte e nove borrifadas em torno de todo o corpo de prova.

Os corpos de prova permaneceram em um local plano e protegidos do sol por sete dias, com intuito de garantir a cura necessária, conforme prescrições da ABNT NBR 10833:2013, e segundo Ribeiro (2017) durante a cura os tijolos necessitam ser molhados pelo período de sete dias para que os mesmos se conservem úmidos e sem trincas.



Figura 5 - Prensagem, a) Modelo da prensa; b) Tijolo prensado (O autor, 2021).

3.2.2 Ensaios de caracterização do tijolo de solo - cimento

A seguir, serão apresentados os ensaios de caracterização dos tijolos de solo-cimento, após os 7 dias de cura, determinados a partir das recomendações descritas nas normas correspondentes às suas propriedades.

3.2.2.1 Ensaio de resistência à compressão

No ensaio de resistência à compressão foi utilizada a ABNT NBR 8492:2013 - Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, para determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Para esse ensaio foram produzidos 7 corpos de prova para cada uma das doze formulações, totalizando em 84 corpos de prova, onde permaneceram na etapa de cura por um período de sete dias. A ruptura dos corpos de prova, como apresentada na Figura

6b, foi realizada na prensa Pavitest HD-200T, da marca Contenco, esse modelo está apresentado na Figura 6a, juntamente com o tijolo posicionado.

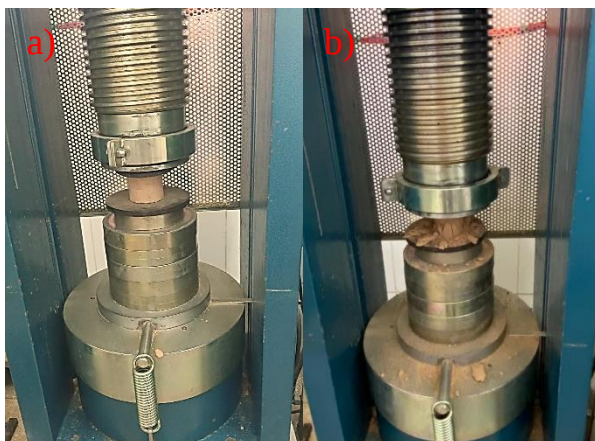


Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão, a) Tijolo posicionado na prensa; b) Tijolo rompido (O autor, 2021).

3.2.2.2 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água realizado nos tijolos, seguiu os procedimentos da ABNT NBR 8492:2013, onde iniciou com a colocação dos tijolos na estufa até constância de massa e assim foi definida a massa seca, como está exposto na Figura 7a. Posteriormente, foram imersos em água em recipiente plástico, durante 24 horas, conforme está exposto na Figura 7b, por seguinte, foram retirados do recipiente com água e foram enxutos com um pano levemente umedecido, logo em seguida foram pesados para determinação da massa úmida. Com o valor das massas foi determinada a absorção de água de cada tijolo de solo-cimento, onde para isso, foram utilizados três corpos de prova, com idade de sete dias de cura. A absorção de água foi estabelecida por meio da Equação 1:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad (1)$$

Onde:

A - Absorção de água, expressa em porcentagem.

m_1 - Massa do corpo de prova seco em estufa, expresso em gramas (g).

m_2 - Massa do corpo de prova saturado, expresso em gramas (g).



Figura 7 - Ensaio de absorção de água a) Tijolos em estufa; b) Tijolos imersos em água (O autor, 2021).

3.2.2.3 Ensaio para determinação da massa específica aparente seca

O ensaio para determinação da massa específica aparente seca foi realizado com a utilização dos dados obtidos no ensaio de absorção de água utilizando a ABNT NBR 8492:2013, e a metodologia de cálculo foi baseada na ABNT NBR 12023:2012. Foram utilizadas as Equações 2 e 3 para o cálculo da massa específica aparente e da massa específica aparente seca, respectivamente.

$$\rho = \left(\frac{m_h}{V} \right) \quad (2)$$

$$\rho_s = \left(\frac{\rho}{\omega + 100} \right) * 100 \quad (3)$$

ρ - Massa específica aparente da amostra compactada, expresso em gramas (g/cm³).

m_h - Massa da amostra compactada, expresso em gramas (g).

V – Volume do molde do tijolo, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

ρ_s - Massa específica aparente seca da amostra compactada (g/cm³).

ω - Teor de umidade da amostra (%)

3.2.3 Tratamento e análise dos dados

Os dados dos ensaios de caracterização dos tijolos de solo-cimento foram apresentados considerando a média aritmética dos corpos de prova, seguido pelo desvio padrão. Após os resultados obtidos nos ensaios, verificou-se a normalidade dos dados e por seguinte aplicou-se

a análise estatística por meio da metodologia de análise de variância (ANOVA), por meio do software *Paleontological Statistics* (PAST), adotando-se uma probabilidade de significância (valor-p) menor que ou igual a 0,05 ($p \leq 0,05$), seguida do Teste de Tukey.

3.2.4 Metodologia de análise estatística

Através dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos tijolos, foi possível verificar:

- a) A influência das pressões de compactação (1,6 MPa, 4,9 MPa e 9,7 MPa) nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente seca do tijolo de solo-cimento. Mantendo-se constante o teor de cimento (traço) e a umidade.
- b) A influência da umidade (8 % e 14 %) nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente seca do tijolo de solo-cimento. Mantendo-se constante o teor de cimento (traço) e a pressão de compactação.
- c) A influência do teor de cimento de 12,5% (traço 1:8) e 8,3% (traço 1:12) nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente seca do tijolo de solo-cimento. Mantendo-se constante a pressão de compactação e umidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises realizadas nos ensaios de caracterização dos materiais componentes e dos tijolos de solo-cimento, produzidos nesta pesquisa.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados nos materiais empregados nesta pesquisa para produção do tijolo de solo-cimento.

4.1.1 Cimento Portland

Os resultados dos ensaios de caracterização do Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), atendeu aos requisitos mínimos exigidos pela ABNT NBR 16697:2018, desse modo os valores dos ensaios estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedade físicas e químicas do cimento CP V-ARI

Características	Unidade	Resultado	Requisitos normativos
Índice de Finura	%	1,9	$\leq 6,0$
Água (Consistência normal)	%	30,4	-
Tempo de pega (início)	Min	170	≥ 60
Massa específica real	g/cm ³	3,1	-
Expansibilidade Le Chatelier	Mm	3,9	$\leq 5,0$
Resistência à compressão	-----	-----	-----
1 dia	MPa	20,7	$\geq 14,0$
3 dias	MPa	30,5	$\geq 24,0$
7 dias	MPa	35,7	$\geq 34,0$

Fonte: O autor, (2021).

Para o índice de finura pontua-se a importância de se conhecer o valor da finura do cimento utilizado, pois caso esse valor seja alto, indica que ocorreu hidratação do cimento e consequentemente, perda de suas características. Quanto mais fino for o cimento melhor será

sua reação de hidratação e consequentemente sua resistência mecânica e, de acordo com a Tabela 12, o índice de finura atende aos critérios normativos.

Quanto ao tempo de pega, nota-se que resultou em um valor maior do que o mínimo estabelecido por norma, o que demonstra que para esse tipo de cimento não houve um comprometimento na reação de endurecimento.

O ensaio de Expansibilidade Le Chatelier é considerado de suma importância para análise do cimento, pois ele calcula a expansibilidade a quente e a frio da pasta de cimento de consistência normal (água), tendo como resultado a verificação de tensões internas presentes no cimento, onde essas tensões podem gerar a desagregação do material e ocasionar a micro fissuração, logo o cimento empregado seguiu os requisitos normativos.

É possível observar na Tabela 12 que os valores das resistências à compressão aumentam significativamente à medida que os dias avançam. Essa peculiaridade se dá a esse tipo de cimento devido uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, assim como pela moagem mais fina do cimento, de modo que ao reagir com água, adquire elevadas resistências com maior velocidade. Portanto, conforme está exposto na Tabela 12, os resultados das resistências cumpriram os requisitos normativos.

Para análise dos componentes químicos presentes no cimento CP V-ARI, é válido ressaltar que, de acordo com os dados expostos na Tabela 13, o cimento apresentou baixo teor de sílica (19,45 %), baixos valores de óxido de ferro (2,67 %), e elevados valores de óxido de cálcio (59,99 %), esse último elemento é conhecido como cal virgem, que cumpre a função de dá liga ao conjunto, reduzindo o atrito entre os grãos da areia e compondo uma pasta que pode ser empregada em pisos e paredes. O elemento presente no CPV-ARI que leva a elevadas resistências logo nos primeiros dias é o calcário, e é a partir desse material que se origina o óxido de cálcio, logo, é de suma importância para o cimento. Os resultados descritos na Tabela 13 mostraram-se coesos e dentro dos critérios normativos.

Tabela 13 - Composição química do cimento CP V-ARI

Matéria prima	SiO₂	Al₂O₃	CaO	Fe₂O₃	K₂O	Na₂O	MgO	S₀₃	TOTAL
Cimento	19,45	4,25	59,99	2,67	0,72	-	4,27	3,30	100,00

Fonte: O autor, (2021).

4.1.2 Solo

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados no solo estão apresentados na Tabela 14, assim como os resultados do ensaio de compactação na Tabela 15 e 16.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de caracterização no solo

Parâmetros	Abertura (mm)	Passante acumulado (%)
Distribuição granulométrica (%)	1,8	100
	0,6	86,28
	0,42	73,05
	0,25	44,85
	0,15	31,28
	0,075	13,23
	Limite de liquidez (%)	17
	Índice de plasticidade (%)	7
Índice físico	Densidade real dos solos (g/cm ³)	2,62

Fonte: O autor, (2021).

Na Tabela 14 são apresentados os resultados do ensaio de granulometria realizado no solo, que foi utilizado na produção do tijolo de solo-cimento. A proporção empregada neste ensaio foi de 70 % de areia e 30 % de solo, para um total da amostra de 200 g, o ensaio foi realizado no agitador mecânico e as massas retidas foram calculadas com auxílio de uma balança digital de alta precisão.

Após análise granulométrica, verificou-se que o solo adotado atendeu as especificações da ABNT NBR 10833:2013, em que 100 % de material deve passar na peneira com abertura de malha de 4,8 mm (nº 4), 10 % a 50 % de material deve passar na peneira com abertura de malha de 0,075 mm (nº 200).

O limite de liquidez e de plasticidade, foram obtidos através da NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. Na Tabela 14, estão descritos os resultados obtidos para esses ensaios realizados no solo. O índice de plasticidade (IP) foi resultado da diferença do limite de liquidez pelo limite de plasticidade, em porcentagem, e essa expressão é conhecida

como a equação de Atterberg. Os resultados obtidos atestaram que o solo utilizado atendeu aos requisitos normativos, resultando em um $LL \leq 45 \%$ e $IP \leq 18 \%$. O solo estudado pode ser classificado como um material de baixa plasticidade, por ter apresentado um índice de plasticidade no valor de 7 %, dessa forma, segundo Ribeiro (2017) é considerado ideal para a mistura de solo-cimento.

O resultado da densidade real do solo está representado na Tabela 14. Determinado segundo a DNER – ME – 093 (1994), foi constatado que esse índice físico não sofreu variação significativa, e que a resistência à compressão encontrada tijolos não sofreu influência por conta deste parâmetro.

4.1.2.1 Resultados do ensaio de compactação (solo-cimento)

Para o ensaio de compactação foram produzidos 35 corpos de prova, os quais foram utilizados para determinar a umidade ótima, para cada pressão aplicada. Foi tomado como referência para definição das pressões de compactação da pesquisa desenvolvida por Uzoegbo (2020), cita seis classificações, para diferentes pressões de compactação, como está exposto no Quadro 2.

Pressão	Unidade
Muito baixa	1- 2 MPa
Baixa	2- 4 MPa
Média	4 - 6 MPa
Alta	6 - 10 MPa
Hiper	10 - 20 MPa
Mega	< 20 MPa

Quadro 2 - Classificação em função da pressão de compactação
(Adaptado de Uzoegbo, 2020).

Os resultados do ensaio de compactação estão expostos na Tabela 15, com a quantidade de pontos de umidade utilizados para cada pressão adotada. A umidade ótima estabelecida foi dada em função da maior massa específica aparente seca calculada. Nota-se que o valor da umidade ótima mais elevado foi o de 16,3%, para uma pressão de 1,6 MPa, contudo, o valor mais elevado da massa específica aparente seca foi 1,92 g/cm³, para uma umidade de 8,1 % e pressão de 9,7 MPa. Ainda, foi observado a redução do valor da umidade ótima com o aumento da pressão de compactação.

Tabela 15 - Resultados da umidade ótima correspondente a massa específica aparente seca

Pressão (MPa)	Forças (T)	Umidade (%)	Total de pontos	Umidade ótima (%)	Massa específica * aparente seca (g/cm³)
1,6	0,5	8, 10, 14, 18, 19 e 20	6	16,3	1,810
3,2	1,0	10, 12, 14, 18 e 20	5	12,5	1,871
4,9	1,5	12, 14, 16, 18 e 19	5	14,1	1,880
9,7	3,0	8, 10, 12, 14, 18 e 20	6	8,1	1,917
16,2	5,0	6, 8, 10, 12, 14, 18 e 20	7	9,5	1,816
24,4	7,5	6, 8, 10, 14, 18 e 20	6	8,2	1,783

Fonte: O autor, (2021).

Legenda: *Massa específica aparente seca, correspondente a umidade ótima.

Na Tabela 16 estão representados os resultados da umidade correspondente à resistência à compressão máxima. Constata-se que para menores pressões a variação de umidade é maior, e quando aumenta a pressão a tendência é ter apenas uma umidade específica, tomando como referência a pressão de 1,6 MPa, observa-se que no intervalo de 1,4 MPa e 1,5 MPa de resistências, as umidades variaram entre 8 % e 14 %, já para pressão de 4,9 MPa a máxima resistência à compressão foi de 1,9 MPa, para uma umidade de 14%.

Tabela 16 - Resultados da umidade correspondente a resistência à compressão máxima

Pressão (MPa)	Forças (T)	Umidade (%)	Total de pontos	Resistência à compressão máxima (MPa)	Umidade * (%)
1,6	0,5	8, 10, 14, 18, 19 e 20	6	1,4 – 1,5	8 – 14
3,2	1,0	10, 12, 14, 18 e 20	5	1,2 – 1,3	10 – 14
4,9	1,5	12, 14, 16, 18, 19 e 20	6	1,9	14
9,7	3,0	8, 10, 12, 14, 18 e 20	6	1,7	10
16,2,	5,0	6, 8, 10, 12, 14, 18 e 20	7	1,8 e 1,9	10 e 14
24,4	7,5	6, 8, 10, 14, 18 e 20	6	2,3	12

Fonte: O autor, (2021).

Legenda: *Umidade correspondente a resistência máxima.

Foi possível observar durante a prensagem dos corpos de prova que as menores umidades (6 % e 8 %) resultavam em uma mistura mais seca, o que facilitou no manuseio e na retirada dos corpos de prova do molde do tijolo de solo-cimento, logo após a sua prensagem. Enquanto, para

as maiores umidades (18 %, 19 % e 20 %), a mistura apresentava uma consistência muito pastosa, a qual dificultou o manejo dos corpos de prova após a prensagem.

Baseada na classificação listada do Quadro 2, dos resultados apresentados na Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 e da experiência com a moldagem dos tijolos para o ensaio de compactação, definiu-se as três pressões de compactação, duas umidades e os dois teores de cimento a serem adotadas na produção dos tijolos de solo-cimento.

Em relação a pressão de compactação, adotou-se a menor pressão de compactação possível de ser medida no equipamento, que foi de 1,6 MPa, a pressão de 4,9 MPa foi selecionada em virtude da explanação abordada na literatura, a qual cita o intervalo entre 4 e 6 MPa como sendo uma pressão usual aplicada nos equipamentos de prensa manual de tijolos. Por fim, o estudo de Uzoegbo (2020) abordou também que a maioria das prensas mecanizadas eram programadas para produzir tijolos com pressão de 10 MPa, assim, adotou-se a pressão de 9,7 MPa. Logo, as pressões utilizadas nesta pesquisa para produção de tijolos foram: 1,6 MPa (muito baixa: 1 - 2 MPa), 4,9 MPa (média: 4 - 6 MPa) e 9,7 MPa (alta: 6-10 MPa).

Em relação a definição das duas umidades, observa-se (Tabela 15) que a umidade ótima para as pressões definidas de 1,6 MPa, 4,9 MPa e 9,7 MPa, foram 16,3 %, 14,1 % e 8,1 %, respectivamente. Portanto, foram definidas as umidades de 8 % e 14 %, pois menores pressões resultaram em uma maior facilidade de moldagem, conforme já relatado.

Quanto à determinação dos teores de cimento, foram definidos dois traços 1:8 e 1:12, que correspondem a um teor de 12,5 % e 8,3 %, respectivamente. O traço de 1:8, foi escolhido a fim de comparar os resultados experimentais desta pesquisa com os apresentados por Nascimento (2019) e Souza (2019), que utilizaram o solo e o cimento semelhantes ao deste estudo, porém, com a utilização de prensa manual para tijolos, sem a medição da pressão de compactação. Já o traço de 1:12 (teor de cimento de 8,3 %), foi estabelecido de acordo com o ábaco apresentado na Figura 1- Ábaco do teor mínimo de cimento em massa (ABCP, 1986), considerando o teor de silte + argila igual a 13,23 % (Tabela 14) e massa específica aparente seca de 1,81 g/cm³ (Tabela 15), escolhida por ser o menor valor de massa específica aparente seca das pressões selecionadas (1,6 MPa, 4,9 MPa e 9,7 MPa).

4.1.2.2 Resultados da composição química do solo

Para análise dos componentes químicos presente no solo, é válido ressaltar que, segundo está descrito na Tabela 17 o solo apresentou elevados teores de sílica 89,33 % e presença de óxido de alumínio (7,17 %). O elevado teor de sílica torna o solo potencialmente pozolânico.

Segundo observou Bhairappanavar, Liu e Shakoore (2020) em seu estudo, a análise química realizada no material degradado demonstrou que um teor relativamente alto para o SiO_2 , indicou alto teor de areia, e o 0,63 % de CaO presente no material indicou que a amostra não era calcária.

Tabela 17 - Composição química do solo

Matéria prima	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	S_2O_3	TOTAL
Solo	89,33	7,17	0,63	1,97	0,41	-	-	0,33	99,84

Fonte: O autor, (2021).

Além da composição química realizada no solo, foi feita a identificação mineral por meio da caracterização da estrutura cristalina do solo. Na Figura 8 está apresentado o difratograma de raios-x, onde a partir desse ensaio foi possível observar a predominância da fase de quartzo, seguida pela illita e em menor porcentagem o feldspato.

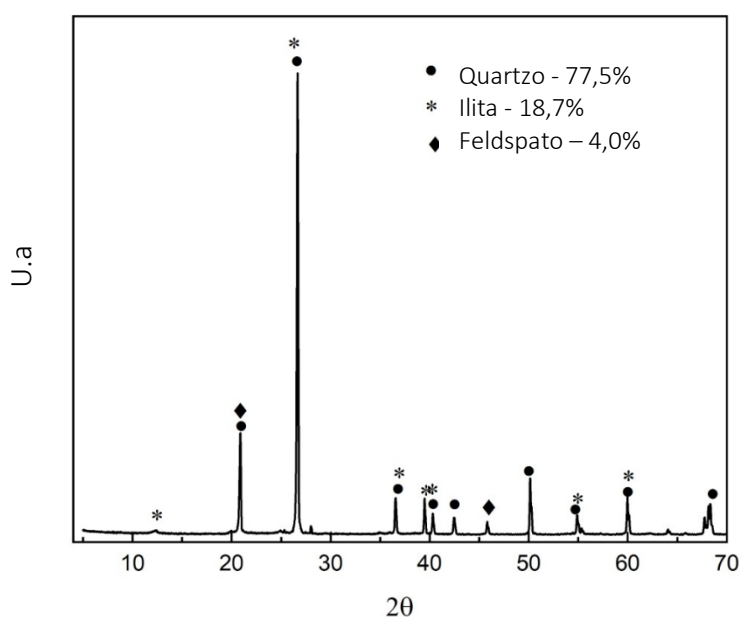


Figura 8 - Difratograma de raios-x do solo (O autor, 2021).

Os aspectos morfológicos das partículas do solo foram obtidos através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), como está ilustrado na Figura 9.

Observou-se que o solo é composto por partículas de formatos irregulares. Como também foi relatado na pesquisa de Kolawole, Olalusi e Orimogunje (2020) onde as partículas do solo utilizado apresentaram uma boa formação com superfície um tanto não lisa e esponjosa.

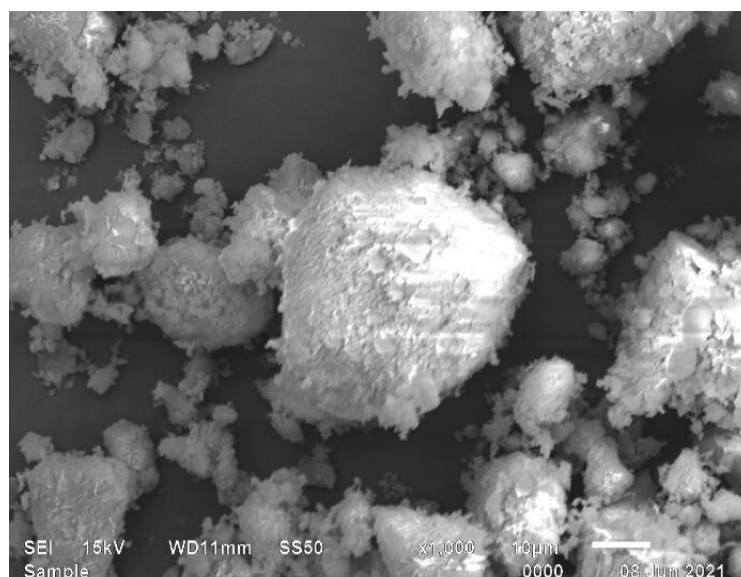


Figura 9 - Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV) (O autor, 2021).

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO NO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos tijolos. Para melhor entendimento da análise comparativa recomenda-se revisão do tópico 3.2.2.

4.2.1 Ensaios para caracterização dos tijolos

4.2.1.1 Resistência à compressão

Nas Figuras 10, 11 e 12 estão ilustrados os gráficos com os resultados médios das resistências à compressão aos sete dias, obtidos nos ensaios realizados nos corpos de prova após a cura.

Os resultados obtidos por cada uma das formulações foram comparados por meio da análise de variância, $F = 35,96$; $f_{\text{crítico}} = 1,95$ e valor- $p = 2,62 \cdot 10^{-22}$, foi possível observar uma variação significativa nos valores das resistências à compressão das formulações ensaiadas. Através do

teste de Tukey, algumas observações serão apresentadas, quanto à influência da pressão de compactação, da umidade e do teor de cimento na resistência à compressão dos tijolos.

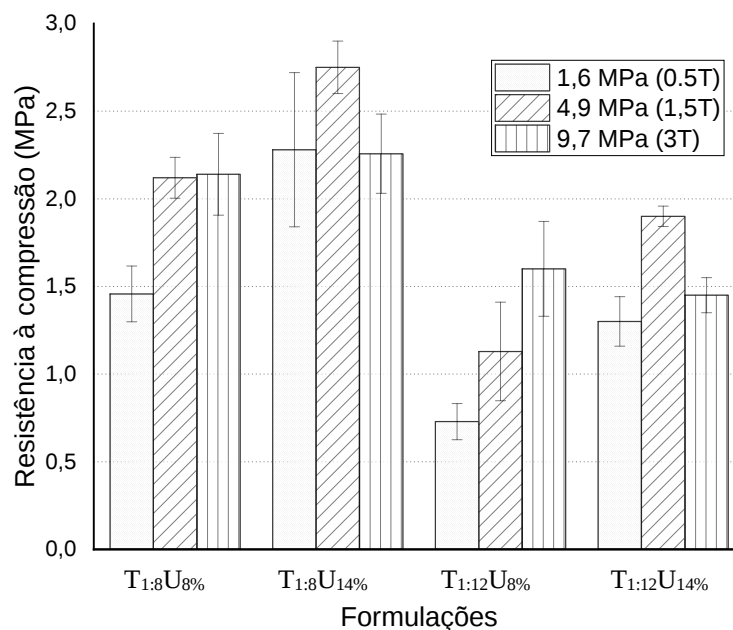


Figura 10 - Influência da pressão de compactação na resistência à compressão dos tijolos (O autor, 2021).

- a) Para as formulações T_{1:8}U_{8%}, T_{1:12}U_{8%}, a menor pressão de compactação 1,6 MPa resultou em menores resistências, contudo, para formulação de T_{1:8} U_{8%}, os valores das resistências não apresentaram variações significativas para as pressões de 4,9 MPa e 9,7 MPa. Nota-se que as maiores pressões resultaram em maiores resistências.

Para as formulações T_{1:8}U_{14%} não se constatou variação significativa nos valores das resistências para as três pressões de compactação estudadas, considerando o desvio padrão. Com relação às formulações de T_{1:12}U_{14%}, observa-se que da pressão de 4,9 MPa para a 9,7 MPa ocorreu a diminuição na resistência, uma possível justificativa para esse decréscimo pode ser devido a possibilidade da ocorrência da deformação do grão com o aumento da pressão aplicada, no entanto, esse fenômeno só poderia ser constatado através da análise de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Por fim, as maiores pressões de compactação 4,9 MPa e 9,7 MPa resultaram em maiores resistências.

Uzoegbo (2020) abordou em seu estudo que utilizou as pressões de compactação entre 1 MPa e 20 MPa para produção dos tijolos, e observou que a pressão de compactação que influenciou de forma positiva na resistência à compressão do tijolo produzido foi a de 10 MPa, sendo a adotada para estudo dos tijolos. As pressões de compactação adotada nesta pesquisa apresentaram valores de resistência à compressão elevados, validando a explanação abordada na literatura. Desta forma, depreende-se que o aumento na pressão de compactação resulta em maiores resistências à compressão.

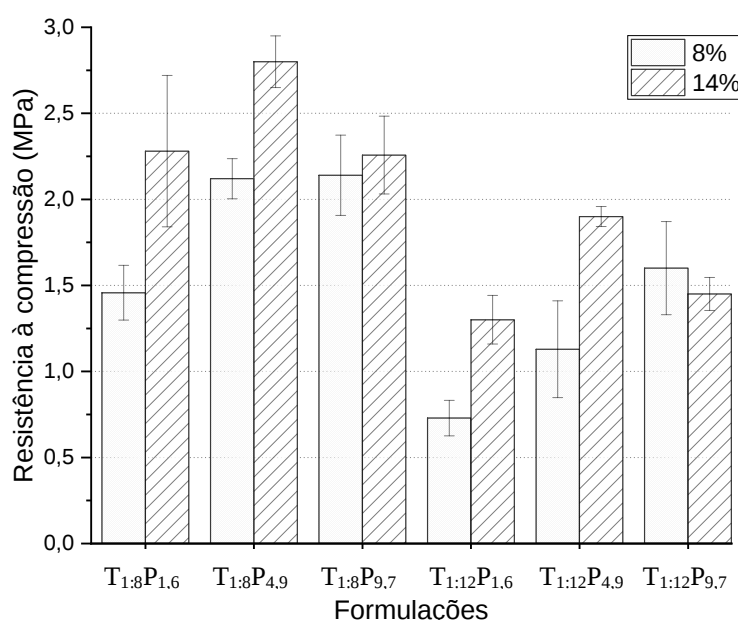


Figura 11 - Influência da umidade na resistência à compressão (O autor, 2021).

- b) A partir da análise da Figura 11, depreende-se que para a maioria das formulações, a umidade de 14% resultou em maiores resistências, com exceção de quando ocorre o aumento da pressão para 9,7 MPa, que a umidade não apresentou influência significativa na resistência à compressão. Observa-se que para essa pressão de 9,7 MPa ocorreu a diminuição na resistência com relação a pressão de 4,9 MPa, e esse decréscimo pode ter ocorrido devido o fenômeno do esmagamento do grão, que poderia ser constatado através das imagens da Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

No estudo realizado por Kolawole, Olalusi e Orimogunje (2020) o teor de umidade ideal apontado em seu experimento foi de 15%, favorecendo uma boa trabalhabilidade,

observaram também que os tijolos produzidos com misturas de argila e areia apresentaram melhores desempenhos de resistência, para unidades de alvenaria quando comparados a tijolos produzidos só com um desses dois materiais. A umidade citada no estudo abordado anteriormente resultou em elevadas resistências e boa trabalhabilidade, assim como os resultados descritos nesta pesquisa para umidade de 14%. Dessa forma, entende-se que o emprego do solo apropriado, a umidade ideal e uma proporção de cimento adequada, resultam em elevadas resistências.

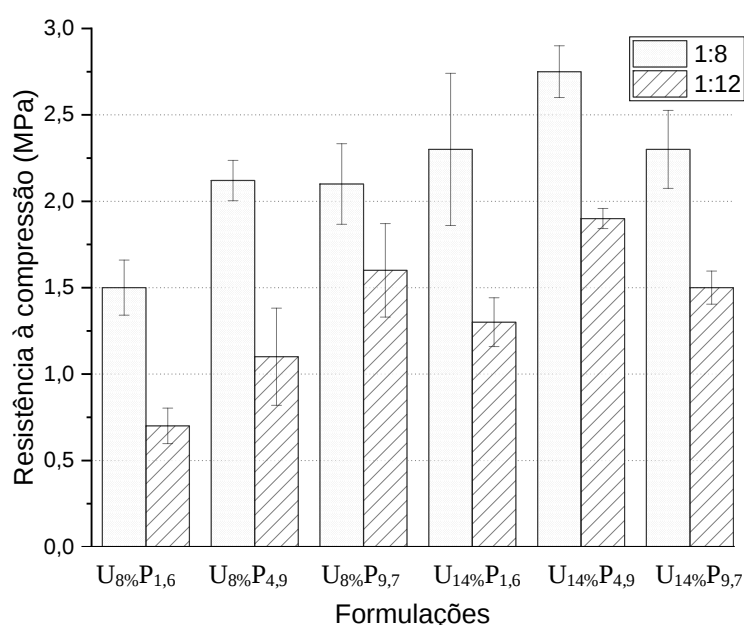


Figura 12 - Influência do teor de cimento na resistência à compressão dos tijolos
(O autor, 2021)

- c) Como esperado, todas as formulações com traço de 1:12 com teor de cimento de 8,3% em relação ao traço de 1:8 com teor de cimento de 12,5%, apresentaram diferenças significativas, resultando em menores valores de resistência para um menor teor de cimento. Essa diferença foi menos expressiva para o conjunto de formulações U8%P9,7, ou seja, para a menor umidade e a maior pressão de compactação.

Portanto, os resultados desta pesquisa validam o que já foi abordado na fundamentação teórica por Milani (2008), onde constata-se que a resistência à compressão aumenta em função do aumento de cimento e do tipo do solo utilizado na mistura de solo-cimento,

e essa boa combinação se dá devido às alterações físico-químicas geradas pela relação entre as partículas do solo e do cimento hidratado.

O traço 1:8 com teor de cimento de 12,5 %, definido neste estudo, foi o mesmo utilizado nas pesquisas de Nascimento (2019) e Souza (2019), onde as suas resistências médias obtidas foram de $1,8 \text{ MPa} \pm 0,2 \text{ MPa}$, com umidade de 14% e material semelhante ao estudado. Os resultados desta pesquisa apresentaram desempenho semelhante às formulações $T_{1:8}U_{14\%}P_{1,6}$ e $T_{1:8}U_{14\%}P_{9,7}$ da pesquisa citada anteriormente considerando o respectivo desvio padrão.

Todas as formulações de $T_{1:8}U_{14\%}$ atenderam as especificações da ABNT NBR 8491:2013, onde a média dos valores não poderia ser menor que 2,0 MPa de resistência à compressão, nem valor individual menor que 1,7 MPa, contudo as formulações de $T_{1:8}U_{8\%}$ apenas as de maiores pressão atenderam, e todas as formulações de $T_{1:12}$ não atenderam os requisitos normativos, com idade mínima de sete dias.

Portanto, considerando as variáveis adotadas neste estudo e para idade de 7 dias, o teor mínimo de cimento (7-8%) estabelecido de acordo com o ábaco recomendado pela ABCP (1986), não resultou em formulações que atendessem as especificações da ABNT NBR 8491:2013 quanto a resistência à compressão.

Observa-se que o maior valor médio de resistência à compressão foi obtido pela formulação de $T_{1:8}U_{14}P_{4,9}$ seguido das formulações $T_{1:8}U_{14}P_{1,6}$, e $T_{1:8}U_{14}P_{9,7}$ que não apresentaram variação significativa, considerando o respectivo desvio padrão.

4.2.1.2 Absorção de água

Nas Figuras 13, 14 e 15 estão os resultados das médias obtidas através do ensaio de absorção de água realizados nos tijolos de solo-cimento.

Para cada formulação os resultados foram comparados pelo método de análise de variância, $F = 66,43$; $f_{\text{crítico}} = 2,31$ e valor-p = $2,85 \cdot 10^{-13}$. Assim, foi possível observar uma variação significativa nos valores de absorção de água das formulações ensaiadas. Através do Teste de

Tukey, a seguir estão elencadas as observações, quanto a influência da pressão de compactação, da umidade e do teor de cimento na absorção de água dos tijolos.

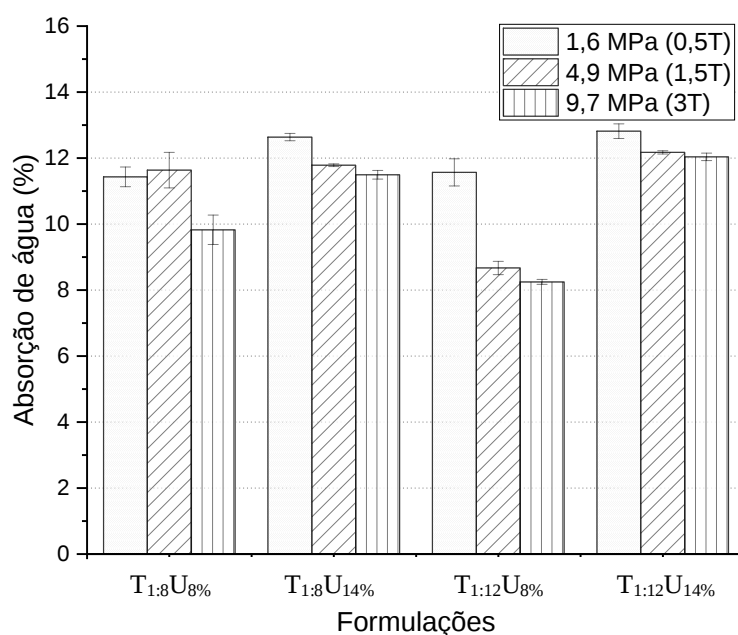


Figura 13 – Influência da pressão compactação na absorção de água dos tijolos (O autor, 2021).

- a) A partir da análise da Figura 13, constata-se que os menores resultados de absorção foram alcançados para as maiores pressões de compactação 4,9 MPa e 9,7 MPa. Apenas para T_{1:8}U_{8%} a pressão de 4,9 MPa resultou em valores, de resistência, semelhantes aos obtidos para pressão de 1,6 MPa. Observa-se que a pressão de compactação provocou o mesmo comportamento na resistência à compressão, ou seja, as maiores pressões resultaram em melhores resultados da propriedade, apresentando menores valores de absorção.

Logo, uma maior pressão de compactação, resultou em menores valores de absorção. Bhairappanavar, Liu e Shakoore (2020), em sua pesquisa, constataram que o aumento na pressão de compactação acarretou uma diminuição na absorção de água dos corpos de prova, atendendo às especificações estabelecidas pelo método C67 da ASTM (2020), de no máximo 20% de absorção de água. Os resultados apresentados nesta pesquisa apresentaram comportamento semelhante ao que foi citado no estudo anterior.

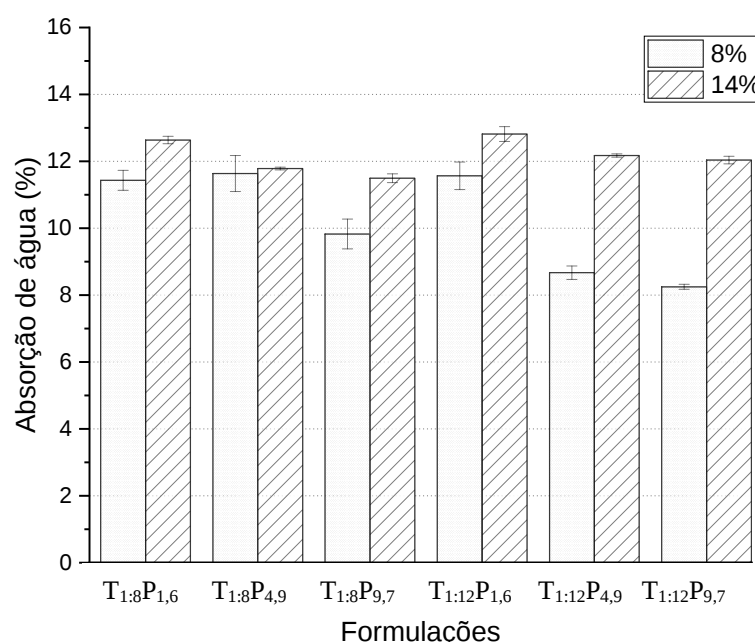


Figura 14 - Influência da umidade na absorção de água dos tijolos (O autor,2021)

- b) Nota-se que para a maioria das formulações a umidade de 8% resultou em menores valores de absorção, com exceção da formulação T_{1:8} P_{4,9}, que não apresentou variação significativa. Observa-se que a umidade influenciou de forma semelhante na resistência à compressão, porém os melhores valores foram obtidos com a umidade de 14%.

Barros, et al. (2020) estudou a absorção de água nos tijolos de solo-cimento e concluiu que essa propriedade é muito importante no momento da moldagem dos corpos de prova, pois afeta diretamente a estabilidade e durabilidade dos tijolos, os seus resultados de absorção variaram entre 6,8 e 18% chegando a um valor de 2,5 MPa de resistência, ele citou que essa variação da absorção é causada pelo aumento da pressão de compactação e do teor de cimento, bem como a redução dos vazios, logo, concluiu que quanto menor a absorção de água maior será a resistência à compressão do tijolo. Nesta pesquisa os valores de absorção de água variaram entre 8,2% e 12,6%, e apresentaram resultados semelhantes ao do estudo citado anteriormente.

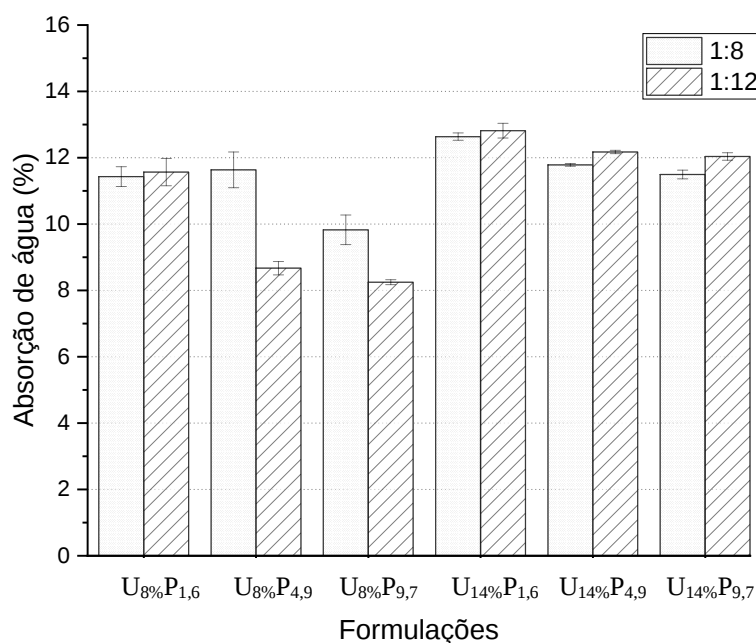


Figura 15 - Influência do teor de cimento na absorção de água dos tijolos (O autor, 2021)

- c) Para os três grupos de formulações U_{14%} e nas três pressões adotadas P_{1,6}, P_{4,9} e P_{9,7}, o teor de cimento não influenciou significativamente na variação dos valores de absorção de água.

Já para a U_{8%} apenas para as maiores pressões P_{4,9} e P_{9,7} observaram-se variações significativas em função do teor de cimento, onde para um menor teor, correspondente a T_{1:12}, sucedeu em menores taxas de absorção. Logo, para um menor teor de cimento, menor absorção.

O traço 1:8 com teor de cimento de 12,5 %, definido neste estudo, foi baseado nas pesquisas de Nascimento (2019) e Souza (2019), onde os menores valores de absorção obtidos foram de aproximadamente $7,3 \pm 0,9$ %, para a formulação de T_{1:8}U₁₄, que também foi adotada nesta pesquisa.

Os resultados de absorção de água obtido nesta pesquisa, atenderam as especificações da ABNT NBR 8491:2013, ficando com uma média dos valores abaixo de 20% e para os valores individuais abaixo de 22%.

O segundo traço de 1:12 com teor de cimento de 8,3 %, foi estabelecido de acordo com o ábaco do teor mínimo de cimento em massa, citado pela ABCP (1986). Esse traço escolhido apresentou os menores resultados de absorção de água.

A formulação que apresentou menores valores de absorção foi $T_{1:12}U_8P_{9,7}$, seguido da formulação $T_{1:12}U_8P_{4,9}$, que não apresentou variação significativa considerando o desvio padrão. Logo, o menor teor de cimento resultou em menores valores de absorção. Observa-se que as variações mais significativas ocorreram para as formulações de $T_{1:12}P_{4,9}$ e $T_{1:12}P_{9,7}$.

4.2.1.3 Massa específica aparente seca

Os resultados médios da massa específica aparente seca obtidos nos ensaios realizados nos tijolos de solo-cimento são apresentados nas Figuras 16, 17 e 18.

Para cada formulação os resultados foram comparados pelo método de análise de variância ($F = 109,19$; $f_{\text{crítico}} = 2,22$ e valor- $p = 1,00 \cdot 10^{-17}$); assim, foi possível observar variação significativa nos valores da massa específica aparente seca das formulações ensaiadas e através do teste tukey, foram realizadas algumas análises a seguir, quanto a influência da pressão de compactação, da umidade e do teor de cimento na massa específica aparente seca.

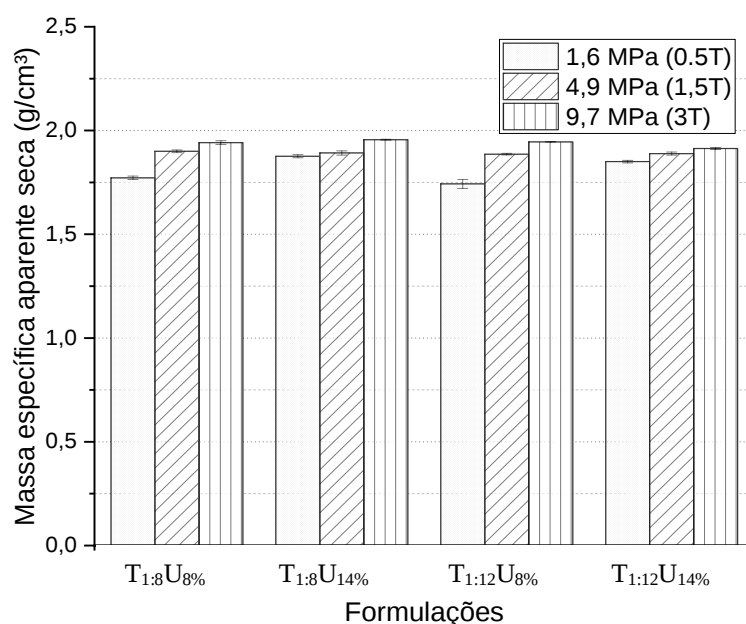


Figura 16 – Influência da pressão de compactação na massa específica aparente seca dos tijolos (O autor, 2021).

- a) Nota-se que para a maioria das formulações a maior pressão de compactação de 9,7 MPa, apresentou maior valor médio de massa específica aparente seca. Para as formulações T_{1:12}U_{14%}, a pressão de 4,9 MPa resultou em valor semelhante de massa específica aparente seca em relação a pressão de 9,7 MPa, o que resultou nessas duas pressões sendo as promissoras do maior valor de massa específica aparente seca para essa formulação.

A pressão de compactação provocou comportamento semelhante nos resultados obtidos da massa específica aparente seca, resistência à compressão e absorção de água, onde para essas três propriedades os melhores resultados foram alcançados pelas pressões de 4,9 MPa e 9,7 MPa.

Somente para as formulações com teor de umidade de 8%, T_{1:8}U_{8%} e T_{1:12}U_{8%} os valores de massa específica aparente seca apresentaram variação significativa para cada pressão de compactação adotada.

Bhairappanavar, Liu e Shakoar (2020), em sua pesquisa, abordou que houve uma variação nos resultados da massa específica entre 1,7 e 2,2 g/cm³, o que levou a valores satisfatórios de resistência. Nesta pesquisa os resultados da massa específica aparente seca variaram entre 1,743 e 1,956 g/cm³, dentro do intervalo descrito na pesquisa anterior, que obteve resultados satisfatórios de resistência à compressão.

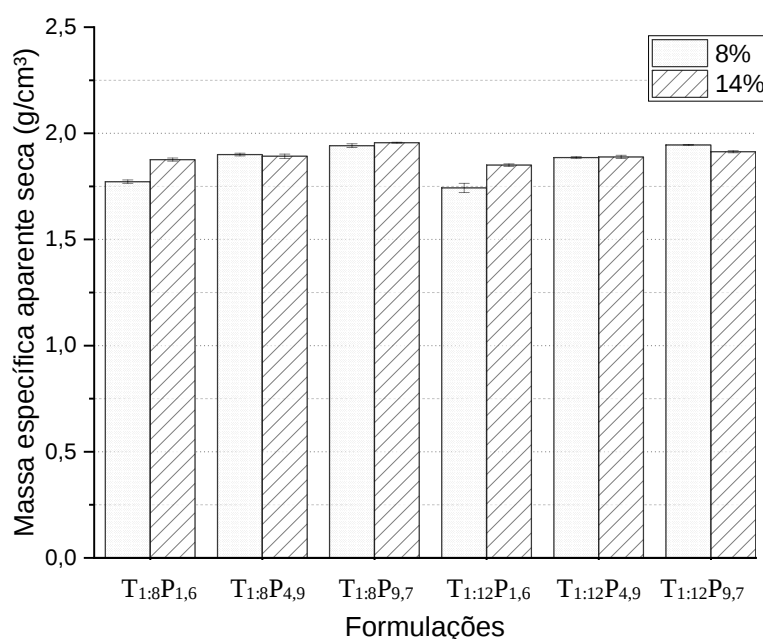


Figura 17 - Influência da umidade na massa específica aparente seca dos tijolos
(O autor, 2021)

- b) Conforme a Figura 17, a umidade só teve influência para a menor pressão de compactação de 1,6 MPa, sendo os maiores valores obtidos para umidade de 14%, no entanto para a maior pressão 9,7 MPa a umidade que sucedeu em maior massa específica aparente seca foi a de 8%.

Foi possível analisar que não houve variação significativa para a pressão de 4,9 MPa tanto para o traço de 1:8 quanto para o de 1:12. Nota-se que o comportamento da massa específica aparente seca, influenciado pela umidade foi semelhante ao de absorção, onde para T_{1:8} e T_{1:12} não houve variação para a pressão de 4,9 MPa.

Raavi e Tripura (2020) estudaram e compararam os tijolos de solo-cimento com massas específicas de 1,59 a 1,78 g/cm³.

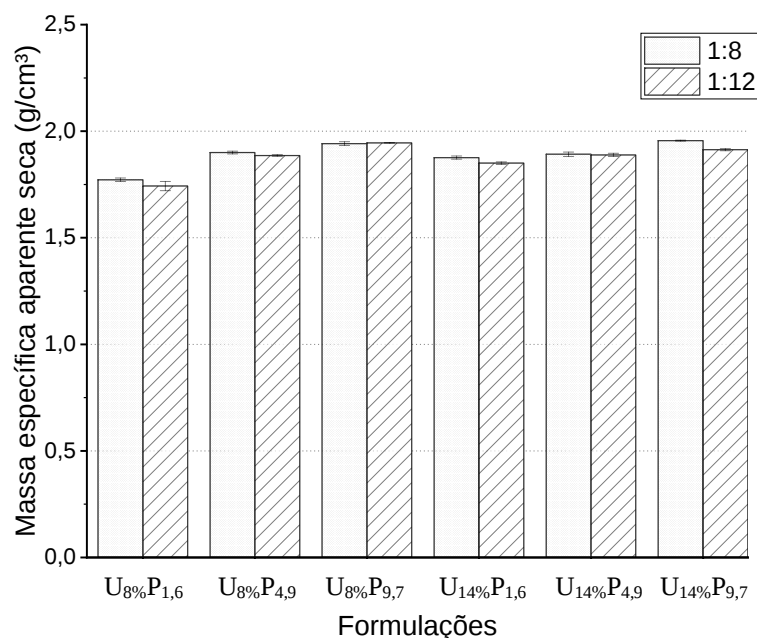


Figura 18 - Influência do teor de cimento na massa específica aparente seca dos tijolos (O autor, 2021).

- c) Para as formulações apresentadas na Figura 18, constata-se que não houve variação significativa nos valores da massa específica aparente seca, em função do teor de cimento. Somente para as formulações U14%P9,7 foi verificada variação significativa.

José e Kasthurba (2020) estudou o teor ideal de cimento para compor a mistura de solo-cimento e afirmou ser 8 %, pois a partir desse percentual avaliou como boa propriedade de resistência ao intemperismo e pode-se alcançar uma resistência à compressão de 3,5 MPa, atingindo aos padrões normativos de resistência de tijolos de solo-cimento, além dessas características positivas, pode-se concluir que o tijolo produzido apresentou um bom isolamento térmico, propício para construções em climas tropicais. Nota-se que a umidade de 8% trabalhada nesta pesquisa também apresentou uma elevada massa específica aparente seca.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão explanadas as principais conclusões obtidas nesta pesquisa, após análise dos resultados dos diversos ensaios de caracterização estudados, assim como sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal desta pesquisa foi analisar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento.

Os procedimentos experimentais para realização dos ensaios de caracterização nos materiais e nos tijolos foram realizados no Laboratório do Instituto Federal de Sergipe Campus Estância, onde os ensaios seguiram as especificações normativas para determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Os resultados obtidos e expostos no tópico 4 propiciaram diversas considerações. Para os corpos de prova ensaiados, foi possível concluir que:

A pressão de compactação influenciou de forma significativa a resistência à compressão dos corpos de prova, conclui-se que, para as maiores pressões de compactação, resultou em maiores resistência.

A variação da umidade teve influência na resistência à compressão das amostras, as formulações com umidade de 14% apresentaram valores mais elevados de resistência à compressão, comparadas às formulações com 8% de umidade. No entanto, com o aumento da pressão para 9,7 MPa, a umidade não apresentou influência significativa na resistência à compressão. Observa-se que para essa pressão de 9,7 MPa ocorreu a diminuição na resistência com relação a pressão de 4,9 MPa, e esse decréscimo pode ter ocorrido devido o fenômeno do esmagamento do grão, que poderia ser constatado através das imagens da Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Em relação ao teor de cimento, observou-se que todas as formulações com traço de 1:12 com teor de cimento de 8,3% em relação ao traço de 1:8 com teor de cimento de 12,5%, apresentaram diferenças significativas, resultando em menores valores de resistência para um menor teor de cimento.

Quanto a propriedade de absorção de água dos corpos de prova, constatou-se que os menores resultados de absorção foram alcançados para as maiores pressões de compactação, conclui-se que à medida que a pressão de compactação aumentou a absorção de água diminuiu, e esse fato se deu por conta de uma menor quantidade de vazios presentes nos corpos de prova, após receber uma elevada força durante sua prensagem.

A umidade de 8% resultou em formulações com menores valores de absorção. Quanto à análise do teor de cimento, para as formulações com umidade de 14% o teor de cimento não influenciou significativamente na variação dos valores de absorção de água. Já para a umidade de 8%, apenas para as maiores pressões observaram-se variações significativas.

Para a propriedade da massa específica aparente seca, observou-se que para todas as formulações a maior pressão de compactação registrou um maior valor médio de massa específica aparente seca.

A influência da umidade foi mais significativa para as formulações com baixa pressão de compactação. A umidade de 14% resultou em maiores valores para pressão de 1,6 MPa, enquanto, para a maior pressão 9,7 MPa, a umidade que sucedeu em maior massa específica aparente seca foi a de 8%.

Ainda, constatou-se que não houve variação significativa nos valores da massa específica aparente seca, em função do teor de cimento.

Por fim, observa-se que o maior valor médio de resistência à compressão foi obtido pela formulação de $T_{1:8}U_{14\%}P_{4,9}$ seguido das formulações $T_{1:8}U_{14\%}P_{1,6}$ e $T_{1:8}U_{14\%}P_{9,7}$; que não apresentaram variação significativa. Já os menores valores de absorção foram alcançados pelas formulações $T_{1:12}U_{8\%}P_{9,7}$, seguido da formulação $T_{1:12}U_{8\%}P_{4,9}$, que não apresentou variação significativa. O maior valor de massa específica aparente seca foi obtido para formulação $T_{1:8}U_{14\%}P_{9,7}$, seguida das formulações que não apresentaram diferenças significativas: $T_{1:8}U_{8\%}P_{9,7}$ e $T_{1:12}U_{8\%}P_{9,7}$.

Logo, considerando que as formulações com teor de cimento de 8,3% (traço 1:12) não atenderam, aos 7 dias, a resistência mínima estabelecida na ABNT NBR 8491:2013 (média $\geq 2,0$ MPa); que todas as formulações atenderam ao limite máximo estabelecido para absorção de água (média $\leq 20\%$), para as variáveis adotadas e as propriedades analisadas neste estudo, o

melhor teor de cimento foi de 12,5% (traço 1:8), umidade de 14% e pressão de compactação de 4,9 MPa, correspondente a formulação $T_{1:8}U_{14\%}P_{4,9}$ que resultou em resistência média à compressão de 2,8 MPa, absorção de água de 11,8% e massa específica aparente seca de 1,956 g/cm³.

Assim, constata-se, neste estudo, que para alcançar melhores propriedades do tijolo de solo-cimento é indispensável o estudo das variáveis que influenciam as propriedades desse material.

5.2 SUSGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A prática desta pesquisa proporcionou uma grande visão quanto ao estudo envolvendo esse tipo de material, o solo-cimento, porém por conta do curto prazo disponível para a realização da pesquisa, impossibilitaram o aprofundamento dos resultados. Desta forma, sugere-se para futuros trabalhos:

- a) Realizar o ensaio de durabilidade dos tijolos de solo-cimento, considerando as variáveis contempladas nessa pesquisa;
- b) Ampliar a quantidade de variáveis, outras pressões de compactação, umidades e teores de cimento;
- c) Contemplar outras variáveis, a exemplo do tipo de solo, tipo de cura e idade dos ensaios.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP 1986**: Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 2017.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2018.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 8491**: Tijolo de Solo-Cimento-Requisitos. Rio de Janeiro. 2013.

_____. **NBR 8492**: Tijolo de Solo-Cimento – Análise Dimensional, Determinação da Resistência à Compressão e da Absorção de Água – Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 2013.

_____. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento. Rio de Janeiro.2013.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do Índice de finura por meio da peneira de 75 m (nº 200). Rio de Janeiro. 2013.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12023**: Solo-cimento-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2012.

_____. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Rio de Janeiro. 2012.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal(água)(água). Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

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

American Society for Testing and Materials. **ASTM C67 / C67M-20**: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. EUA. 2020.

ALEXANDRE, Jonas, et al. Processing and properties of soil-cement blocks incorporated with natural grit. **Materials Science Forum**. v. 798-799, 2014, p. 343-346.

BARROS, Maicon M. et al. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin, **Construction and Building Materials**. v. 232, 2020, 117252.

BHAIRAPPANAVAR, Shruti; LIU, Rui; SHAKOOR, Abdul. Eco-friendly dredged material-cement bricks. **Construction and Building Materials**. v. 271, 2020, 121524.

BRYAN, A.J. Soil/cement as a walling material-I. Stress/strain properties. **Building and Environment**. v. 23, 1988, p. 321-330.

CASSA, José C.; CARNEIRO, Alex P.; BRUM, Irineu A.S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**: Projeto entulho bom. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2001. 312 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093: Determinação da Densidade Real. Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

DONKOR, Peter; OBONYO, Esther. Compressed soil blocks: Influence of fibers on flexural properties and failure mechanism, **Construction and Building**. v. 121, 2016, p. 25-33.

FIAIS, Bruna B.; SOUZA, Danilo S. Construção sustentável com tijolo ecológico. **Revista Engenharia em Ação Uni Toledo**. v. 2, 2017, p. 94-108.

FAY, Liliana; COOPER, Paul; MORAIS, Henrique F. Innovative interlocked soil–cement block for the construction of masonry to eliminate the settling mortar. **Construction and Building Materials**. v. 52, 2014, p. 391-395.

GRANDE, Fernando M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 180 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos**. 135f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

HANY, Engy, 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, 2021, 122535.

JOSÉ, Alex; KASTHURBA, A. K. Laterite soil-cement blocks modified using natural rubber latex: Assessment of its properties and performance. **Construction and Building Materials**. v. 273, 2020, 121991.

KASINIKOTA, Pardhasaradhi; TRIPURA, Deb D. Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste. **Construction and Building Materials**. v. 280, 2021, 122520.

KOLAWOLE, John T.; OLALUSI, Oladimeji B.; ORIMOGUNJE, Ademola J. Adhesive bond potential of compressed stabilised earth brick, **Structures**. v. 23, 2020, p. 812-820.

KONGKAJUN, Nuntaporn, et al. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. **Case Studies in Construction Materials**. v. 13, 2020, p. 1-10, e00448.

LIMA, Luanda, et al. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literatura. **Journal of Cleaner Production**. v. 289, 2020, 125730.

MANSOUR, Mohamed B. et al. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). **Construction and Building Materials**. v. 104, 2016, p. 44-51.

MARQUES, Geraldo L. O. **Estabilização dos solos para fins de pavimentação**. Juiz de Fora, MG, 2010. Não paginado.

MELLACE, Rafael F.; ALDERETE, Carlos E.; ARIAS, Lúcia E. Optimización de mezclas de suelo-cemento para la producción de BTC, *In: Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra*, 3, 2002, Salvador. **Anais eletrônico...**Salvador: Projeto PROTERRA, 2004. p. 246-259.

MILANI, Ana P. S.; FREIRE, Wesley J. Características Físicas e Mecânicas de Misturas de Solo, Cimento e Casca de Arroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 26, 2006, p.1-10.

MILANI, Ana P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica**. 2008. 195 f. Trabalho de conclusão de curso (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

MOTTA, Jessica C. S. S. et al. Tijolo de Solo e Cimento: Análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **Revista E-xacta**. v. 7, 2014, p. 13-26.

NASCIMENTO, A.A.P. Um estudo sobre fissuras em alvenarias: solo-cimento. **Revista Thécne**. v. 10, 1994, p. 23-27.

NASCIMENTO, Elvia S. **Tijolo de solo - Cimento com reaproveitamento de resíduo de corte de granito**. 2019. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Sergipe, Estância, 2019.

NEVES, Célia M. M. **Manual de construção com solo-cimento**. 3. ed. São Paulo: CEPED, 1984. 147 p.

OLIVEIRA, Marcos L.; RUPPENTHAL, Janis E. Certificação leed: O incremento da inovação no ambiente construído em relação a sustentabilidade. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**. v. 12, 2020, p. 17-31.

OUEDRAOGO, Kouka A. J. et al. Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? **Construction and Building Materials**. v. 236, 2019, 117578.

RAAVI, Satya S. D.; TRIPURA, Deb D. Predicting and evaluating the engineering properties of unstabilized and cement stabilized fibre reinforced rammed earth blocks. **Construction and Building Materials**. v. 262, 2020, 120845.

REDDY, B.V.Venkatarama. Pressed soil-cement block: an alternative building material for masonry. **Indian Institute of Science Bangalore**. v. 6-9, 1994, p. 425-433.

REDDY, B.V.Venkatarama; KUMAR, P. Prasanna. Cement stabilised rammed earth. part a: Compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils. **Materials and structures**. V. 44, 2011, p. 681-693.

RIBEIRO, Simone V. **Reutilização de resíduo de cinza de madeira na Produção de tijolo solo-cimento: formulação, Propriedades e microestrutura**. 2017. 105 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

RODRIGUES, L.P.; HOLANDA, J.N.F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Revista Cerâmica**. v. 59, 2013, p. 551-556.

SEGANTINI, A. A. et al. **Materiais de construção civil: e princípios de ciência e engenharia**. 2 ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia. 2010. p. 863-892.

SILVA, E.T. **Solo-cimento e solo-vinhaça no revestimento de canais de irrigação para transporte de vinhaça: adequação física e parâmetros hidráulicos**. 1992. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 1992.

SOUZA, Álvaro H.C. et al. Fabricação de tijolos de solo-cimento com adição de cinza proveniente do bagaço da cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 43, 2014, Campo Grande, MS. **Anais eletrônico...**Campo Grande, MS: 2014.

SOUZA, Patrícia C. **Estudo da incorporação de cinza de madeira em tijolo de solo-cimento**. 2019. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Sergipe, Estância. 2019.

UZOEGBO, H.C. Dry-stack and compressed stabilized earth-block construction. In UZOEGBO, H.C. **Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, properties and applications**. Joanesburgo: Kent A. Harries e Bhavna Sharma, 2016. p. 205-249.

UZOEGBO, H.C. Dry-stack and compressed stabilized earth-block construction. In UZOEGBO, H.C. **Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, properties and applications** 2 ed. Joanesburgo: Kent A. Harries e Bhavna Sharma. 2020. p. 305-350.

VIEIRA, Arnon, et al. Estudo do processo de obtenção e caracterização de tijolos solo-cimento. **Cerâmica Industrial**. v. 12, 2007, p. 47-50.

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

WALKER, P.J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks, **Cement and Concrete Composites**. v. 17, 1995. p. 301-310.

ZICA, Elizeu S. **Estudo Comparativo Entre Energias De Compactação Do Subleito Para Subsidiar Projetos De Pavimentação**. 2010. 190 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2010.