

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO EM TIJOLOS DE  
SOLO-CIMENTO**

**AMANDA DE OLIVEIRA AGUIAR**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO  
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ**

**2024**

# **AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

**AMANDA DE OLIVEIRA AGUIAR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Jonas Alexandre

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO  
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ**

2024

ii

## FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

A282

Aguiar, Amanda de Oliveira.

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO /  
Amanda de Oliveira Aguiar. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.

73 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2023.

Orientador: Jonas Alexandre.

Coorientador: Niander Aguiar Cerqueira.

1. Tijolo de solo-cimento. 2. Resíduo cerâmico. 3. Sustentabilidade. I. Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

# AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

AMANDA DE OLIVEIRA AGUIAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO**  
Data: 16/05/2024 11:51:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Afonso Rangel Garcez de Azevedo – (D.Sc, LECIV/UENF)  
Avaliador

Documento assinado digitalmente  
 **EUZÉBIO BERNABÉ ZANELATO**  
Data: 16/05/2024 20:36:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Euzébio Bernabé Zanelato – (D. Sc., IFF)  
Avaliador

Documento assinado digitalmente  
 **MARKSSUEL TEIXEIRA MARVILA**  
Data: 16/05/2024 14:15:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Markssuel Teixeira Marvilla – (D. Sc., UFV)  
Avaliador

Documento assinado digitalmente  
 **NIANDER AGUIAR CERQUEIRA**  
Data: 16/05/2024 11:45:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Niander Aguiar Cerqueira – (D. Sc., LECIV/UENF)  
Coordenador

Documento assinado digitalmente  
 **JONAS ALEXANDRE**  
Data: 17/05/2024 11:33:05-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Jonas Alexandre (D.Sc.) – UENF  
Orientador

Dedico à minha família.

Ninguém liberta ninguém, ninguém se liberta sozinho: os homens se libertam em comunhão. (Paulo Freire, *Pedagogia do Oprimido*, 1987).

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades concedidas a mim.

Aos meus pais, Samuel e Cláudia, que me incentivaram e proporcionaram meios para que eu pudesse atingir meus objetivos.

Às minhas irmãs, Natália e Vanessa, pelo companheirismo, amizade e ciladas de sempre que só vocês podem proporcionar.

Aos meus sobrinhos, Cecília, Martina e Gael, que possam me perdoar pelas vezes que estive ausente nos últimos anos.

Ao meu esposo, Marcelo, pelo amor incondicional, apoio e paciência (muita paciência).

À Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realizar esse mestrado.

Ao professor e orientador Dr. Jonas Alexandre, pela orientação, paciência e atenção que me foi dada durante essa empreitada.

Ao coorientador, Niander, pela orientação e apoio que me foi dada.

Aos amigos de laboratório, Válber e Ramon que tornaram a jornada mais leve.

Ao grande amigo “Cimar” que me ajudou a confeccionar cada tijolo desta pesquisa sempre com muita alegria e disposição, tornando o trabalho pesado em algo leve.

Ao Sr. Rodolfo Sardinha e seus funcionários, deixando sua empresa, ArteCerâmica Sardinha, sempre de portas abertas, nos atendendo com muita atenção e boa vontade.

Aos amigos do IMTT, em especial Ana e Nelson, que me incentivaram e me proporcionaram seguir essa jornada.

Aos grandes amigos do grupo NEBA que fizeram parte da minha terapia diária.

Ao meu grande amigo, Luciano, que torna meu dia muito mais feliz nas ligações diárias, provando que distância não é problema para nossa amizade.

## RESUMO

Os tijolos de solo-cimento são uma alternativa construtiva importante por serem versáteis, dispensarem argamassa de assentamento e permitirem que as tubulações de elétrica e hidráulica sejam embutidas. Os tijolos são produzidos com solo, cimento e água, podendo incorporar outros materiais sem comprometer suas propriedades. O objetivo da presente pesquisa foi a produção de tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico em substituição do solo em diferentes proporções (10%, 20% e 30%). O solo e o resíduo cerâmico foram caracterizados por ensaios químicos e físicos, por meio de análise granulométrica, limites de Atterberg, ensaio de compactação, massa específica, EDX (espectroscopia de raio-x) e atividade pozolânica. Após a produção dos tijolos, foram avaliadas as propriedades tecnológicas, a resistência à compressão, absorção a água aos 7 e 28 dias de cura e durabilidade aos 7 dias de cura. Os resultados mostraram que todos os tijolos apresentaram as composições adequadas para a fabricação de tijolos de solo-cimento. A incorporação de resíduo cerâmico não comprometeu as propriedades tecnológicas, os tijolos de composição T1 (10% de resíduo em substituição ao solo) e T2 (20% de resíduo em substituição ao solo), apresentaram resultados significativos em comparação ao traço de referência. No ensaio de resistência à compressão simples os tijolos atingiram valores exigidos pela NBR 8492 (2,0 MPa). Em relação a absorção de água todos os tratamentos alcançaram os valores médios abaixo de 20%, conforme NBR 8492 (2012). Para o ensaio de durabilidade, todos os tijolos apresentaram valores abaixo de 10%, como preconiza a norma. Os resultados experimentais demonstram que a utilização de resíduos cerâmicos na fabricação de tijolos de solo-cimento é uma alternativa eficiente e sustentável para destinação final desses resíduos.

**Palavras-chave:** tijolo de solo-cimento, resíduo cerâmico, sustentabilidade.

## ABSTRACT

Soil-cement bricks present a promising alternative in construction due to their versatility, elimination of the need for laying mortar, and the ability to embed electrical and hydraulic pipes. These bricks are composed of soil, cement, and water, and can incorporate additional materials without undermining their properties. This research aimed to produce soil-cement bricks by incorporating ceramic waste as a replacement for soil in varying proportions (10%, 20%, and 30%). The soil and ceramic residue underwent chemical and physical characterization through particle size analysis, Atterberg limits, compaction tests, specific mass determination, EDX (x-ray spectroscopy), and pozzolanic activity assessment (exclusive to the ceramic residue). Following the production of the bricks, their technological properties, compressive strength, and water absorption were evaluated at 7 and 28 days of curing, along with durability at 7 days of curing. The results indicated that all bricks possessed compositions suitable for the manufacture of soil-cement bricks. The incorporation of ceramic waste did not affect the technological properties, with bricks of composition T1 (10% waste replacing soil) and T2 (20% waste replacing soil) demonstrating significant results compared to the reference mix. In the simple compressive strength test, the bricks met the requirements of NBR 8492 (2.0MPa). Regarding water absorption, all treatments achieved average values below 20%, in accordance with NBR 8492 (2012). For the durability test, all bricks exhibited values below 10%. The experimental findings suggest that the incorporation of ceramic waste in the production of soil-cement bricks provides an efficient and sustainable solution for the final disposal of this waste.

**Keywords:** soil-cement brick, ceramic waste, sustainability.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVAS .....	2
1.2	OBJETIVOS.....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
2.1	SOLO-CIMENTO .....	5
2.1.1	FATORES QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DO SOLO-CIMENTO...6	
2.1.2	VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO SOLO-CIMENTO .....	7
2.2	TIJOLO DE SOLO-CIMENTO.....	7
2.2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO TIJOLO SOLO-CIMENTO .....	11
2.2.2	MATÉRIAS PRIMAS UTILIZADAS .....	13
2.2.2.1	SOLO.....	13
2.2.2.2	CIMENTO PORTLAND.....	15
2.2.2.3	ÁGUA.....	16
2.3	RESÍDUOS SÓLIDOS .....	16
2.3.1	RESÍDUOS CERÂMICO .....	19
2.3.2	POLO CERÂMICO EM CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ .....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	MATERIAIS.....	28
3.2	MÉTODOS.....	28
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	29
3.2.1.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	30
3.2.1.2	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO E TEOR DE UMIDADE.....	30
3.2.1.3	LIMITES DE ATTERBERG (LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE).....	30
3.2.1.4	ANÁLISE MINERALÓGICA DOS MATERIAIS .....	31
3.2.1.5	ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	31
3.2.2	DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES .....	32
3.2.3	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	32
3.2.4	ENSAIOS TECNOLÓGICOS .....	33
3.2.4.1	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	33

3.2.4.2	<i>ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA</i> .....	34
3.2.4.3	<i>ENSAIO DE DURABILIDADE MODIFICADO</i> .....	35
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>36</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	36
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS .....	36
4.1.1.1	<i>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</i> .....	36
4.1.1.2	<i>TEOR DE UMIDADE</i> .....	38
4.1.1.3	<i>LIMITES DE ATTERBERG</i> .....	40
4.1.1.4	<i>MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS</i> .....	41
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS.....	41
4.1.3	ATIVIDADE POZOLÂNICA .....	42
4.2	ENSAIOS TECNOLÓGICOS .....	43
4.2.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	43
4.2.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	45
4.2.3	DURABILIDADE MODIFICADO.....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>49</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	50
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 - Influência dos tipos de cura (CEPED, 1999).....	7
Figura 2-2 - Modelo de tijolo solo-cimento .....	8
Figura 2-3 - Processo de Fabricação do Tijolo Solo-Cimento .....	9
Figura 2-4 - Fabricação do Tijolo Solo-Cimento .....	12
Figura 2-5 – Proposta de uma fábrica de tijolo solo-cimento.....	12
Figura 2-6 - Classificação de materiais cerâmicos com base na cor e na natureza das matérias-primas.....	24
Figura 2-7 - Indústrias cerâmicas no município de Campos dos Goytacazes   RJ....	26
Figura 3-1 - Preparo do resíduo cerâmico: a) descarte de tijolo, b) moinho de bolas e c) material ensacado .....	28
Figura 3-2 - Metodologia de pesquisa .....	29
Figura 3-3 - Prensa Hidráulica 7000 Turbo .....	33
Figura 3-4 - Etapas do ensaio de resistência: Submerso em água (a) e Máquina Solotest (b).....	34
Figura 3-5 – Etapas do ensaio de absorção: Tijolos submersos (a) e Tijolos na estufa (b).....	35
Figura 4-1 – Curva granulométrica da areia coletada e do solo coletado, respectivamente .....	36
Figura 4-2 - Granulometria do Solo padrão e resíduo cerâmico.....	37
Figura 4-3 – Curva granulométrica dos traços .....	38
Figura 4-4 – Ensaio de compactação Proctor Normal.....	40
Figura 4-5 – Etapas do ensaio de Chapelle .....	43
Figura 4-6 - Valores médios do ensaio de resistência à compressão .....	45
Figura 4-7 - Valores médios de absorção de água de todos os traços aos 7 e 28 dias .....	47
Figura 4-8 - Valores de durabilidade .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Características técnicas .....	9
Tabela 2-2 - Estabilização do solo .....	14
Tabela 2-3 - NBR 10833 (ABNT, 2013).....	15
Tabela 2-4 - Pesquisas de tijolo solo-cimento com diversos tipos de resíduos.....	18
Tabela 2-5 - Transformações físico-químicas de produtos cerâmicos .....	20
Tabela 2-6 - Composição química de resíduos cerâmicos (%) .....	22
Tabela 2-7 - Massa salarial em percentual da indústria de transformação e de produtos cerâmicos (2010-2019 em R\$ milhões e %)......	26
Tabela 3-1 - Composição dos traços.....	32
Tabela 4-1 - Granulometria dos materiais .....	37
Tabela 4-2 - Granulometria dos traços definidos.....	38
Tabela 4-3 - Teor de umidade e densidade máxima .....	39
Tabela 4-4 - Limites de Atterberg .....	41
Tabela 4-5 - Espectroscopia de raios-X .....	42
Tabela 4-6 - Ensaio de Luxán .....	42
Tabela 4-7 - Valores médios de resistência à compressão dos corpos de prova.....	44
Tabela 4-8 - Anova para resistência aos 7 dias de cura .....	44
Tabela 4-9 - Anova da resistência aos 28 dias de cura.....	45
Tabela 4-10 - Absorção de água .....	45
Tabela 4-11 - Anova Absorção para 7 dias de cura .....	46
Tabela 4-12 - Anova Absorção para 28 dias de cura .....	46
Tabela 4-13 - Valores do ensaio de Durabilidade .....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRAINCC – Associação Brasileira de Incorporadoras e Imobiliárias
- ABRECON – Associação Brasileira Reciclagem e Resíduos da Construção Civil
- CP V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
- EDX – Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPCC – Painel Intergovernamental para a Mudança Climática
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
- LAMAV – Laboratório de Materiais Avançados da UENF
- LECIV – Laboratório de Engenharia Civil da UENF
- NBR – Norma Brasileira
- PCA – Portland Cement Association
- PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
- RAIS – Relação Anual de Informações Sociais
- RCC – Resíduo da Construção Civil
- UENF – Universidade Estadual Norte Fluminense

# 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha papel de destaque na economia global e seu progresso está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento e produção de um país. A construção foi o segundo setor que mais gerou empregos formais no país, no acumulado do ano (janeiro/2023 a outubro/2023), o equivalente a 14,2% do saldo de empregos do Brasil neste ano (ABRAIN, 2023). Contudo, o ônus desse desenvolvimento se encontra no consumo excessivo de recursos naturais.

De acordo com o sexto relatório do Grupo de Trabalho I do IPCC, o mundo alcançará ou excederá 1,5°C de aquecimento nas duas próximas décadas, antecipando o que relatórios anteriores previam (Relatório IPCC, 2021). Cientistas alertam que apenas com reduções drásticas de CO<sub>2</sub> pode-se prevenir piores impactos climáticos. Nesse sentido, a busca por novos conceitos e técnicas construtivas faz-se necessária a fim de mitigar os efeitos negativos provocados ao meio ambiente.

Além da construção civil, sua cadeia fornecedora de insumos também é geradora de resíduos sólidos em áreas urbanas, desencadeando diversos problemas no meio ambiente. De acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON), 98% das sobras da construção civil são recicláveis, sendo que os resíduos da construção civil (RCC) representam de 50% a 70% de todos os resíduos sólidos no ambiente urbano (Gomes *et al.*, 2021).

A indústria cerâmica é um ator relevante na geração de passivos ambientais, devido ao excesso de desperdício de materiais ao longo de sua cadeia de produção. Esses desperdícios podem ser atribuídos a diversos fatores, que vão desde a qualidade da matéria-prima utilizada, controle de qualidade, tecnologia empregada, dentre outros. Além disso, trincas e rachaduras provenientes da queima, quebras e outros fatores podem inviabilizar sua comercialização, fazendo com que sejam considerados descartes (Gouveia & Spoto, 2009). Os resíduos cerâmicos triturados, inutilizados são comumente chamados de chamote, sendo esse um material com grande potencial para incorporação em massas cerâmicas, proporcionando uma melhoria no grau de empacotamento.

Os tijolos de solo-cimento se encaixam no cenário atual como uma opção eco-friendly em comparação aos tijolos convencionais (Sena *et al.*, 2017). Os tijolos convencionais são produzidos a partir de argila, recurso natural extraído de jazidas,

além de passar por processo de queima, consumindo grande quantidade de energia e emitindo poluentes na atmosfera (Oliveira *et al.* 2019). Já os tijolos de solo-cimento, possuem em sua composição uma baixa quantidade de cimento e argila comparada à de areia. Para Elahi *et al.* (2021) tijolos com incorporação de 20% de cinzas volantes podem reduzir significativamente o teor de cimento, podendo variar de 5% a 7%.

Os tijolos de solo-cimento proporcionam uma redução no consumo de energia, principalmente por dispensar o processo de queima. No entanto, a utilização de Cimento Portland na produção dos tijolos impede que se considere um produto sustentável. Diversos estudos estão sendo realizados a fim de reduzir a utilização de cimento Portland nesse tijolo, tornando-o um produto mais sustentável.

Uma das vantagens do tijolo solo-cimento, é incorporação de resíduos em sua composição, diminuindo, assim, as proporções dos demais componentes (solo ou cimento) e não interferindo nas suas propriedades. Ademais, esse tipo de tijolo possui um fácil processo de fabricação com equipamentos de manuseio simples, não sendo necessária mão de obra especializada, proporcionando, assim, mais celeridade ao processo de fabricação e construtivo com custo reduzido.

O déficit habitacional é um problema grave e persistente no Brasil. De acordo com o relatório da Associação Brasileira de Incorporadores Imobiliários (ABRINC) em colaboração com a Fundação Getúlio Vargas (FGV), em 2023, o país registrava aproximadamente 8 milhões de moradias deficitárias. Para solucionar esse problema, é preciso buscar alternativas eficazes e perenes. A construção de casas populares com tijolos de solo-cimento emerge como uma solução pragmática capaz de mitigar o déficit habitacional.

Dessa forma, partindo da premissa que o resíduo cerâmico é um material de baixo custo e pode ser facilmente incorporado em outros materiais, como em argamassa por exemplo, esta pesquisa buscou caracterizar e produzir tijolos de solo-cimento com este resíduo incorporado. Neste trabalho, buscou-se evidenciar que os tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduos cerâmicos podem ser utilizados para construção habitacional.

## **1.1 JUSTIFICATIVAS**

A construção civil é um dos setores que mais contribui para o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos sólidos no Brasil, sendo o tijolo cerâmico,

um dos principais materiais utilizados na construção civil, portanto com grande contribuição no consumo de matéria prima e geração de resíduos.

Diante do cenário atual, a busca por novos materiais para reduzir os impactos ambientais tem se intensificado. Nesse contexto, o tijolo solo-cimento se destaca como uma opção considerada menos degradante, uma vez que sua produção não envolve a queima direta do produto final e, principalmente, ele possui a capacidade de incorporar diferentes resíduos.

No município de Campos dos Goytacazes, localizado no Estado do Rio de Janeiro, encontra-se um aglomerado com mais de cem empresas de médio e pequeno porte do ramo ceramista em plena atividade, que empregam mais de dois mil trabalhadores diretamente, de acordo com dados da RAIS (2021). Esses números não incluem os empregos indiretos. A indústria ceramista desempenha um papel de grande relevância para o município, principalmente para a região denominada baixada campista, onde se concentra o maior número de empresas. (Oliveira *et al.*, 2021). O município é considerado o maior polo ceramista do Estado do Rio de Janeiro, sendo destaque entre os maiores do país em relação a números de estabelecimentos e empregos (Souza e Arica, 2006, RAIS 2021).

A produção de tijolos tradicionais, como os cerâmicos, gera impactos ambientais significativos, como a emissão de gases do efeito estufa e a extração de recursos naturais. Nesse contexto, a produção de tijolos de solo-cimento surge como uma alternativa com menor impacto ambiental, especialmente no município de Campos dos Goytacazes, que possui grande potencial para essa atividade uma vez que tem solo arenoso e areia em abundância.

## **1.2 OBJETIVOS**

Tendo em vista o alto potencial do resíduo cerâmico descartado pela indústria ceramista, bem como sua alta disponibilidade no município, esta pesquisa teve como objetivo geral produzir tijolo de solo-cimento incorporando resíduo cerâmico em diferentes porcentagens em substituição do solo e avaliar a influência da sua adição nas propriedades tecnológicas dos tijolos fabricados. Para garantir que o objetivo principal seja atingido, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

Para tal, os objetivos específicos foram os seguintes:

- a. Analisar a resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico e sem resíduo;
- b. Avaliar a absorção de água dos tijolos;
- c. Avaliar as composições dos tijolos com incorporação de resíduo cerâmico que garanta suas propriedades tecnológicas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SOLO-CIMENTO

O solo-cimento é definido como um produto endurecido proveniente da mistura compactada de solo, cimento e água, o qual adquire resistência e durabilidade em decorrência das reações de hidratação do cimento, conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004).

O emprego do solo-cimento no Brasil remonta à década de 1940, com exemplos notáveis como o Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, e em rodovias de Minas Gerais e Bahia. A partir da década de 1960, pesquisas aprofundadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) impulsionaram a difusão técnica, consolidando seu uso em diversas aplicações construtivas (Sampaio e Nunes, 2017).

O solo-cimento é considerado uma das soluções para o recorrente problema em construções de terra crua, que possui como ponto nevrálgico a vulnerabilidade à água (Laborel-Préneron *et al.*, 2016), provocando deterioração e influenciando na durabilidade do material. Para Seco *et al.* (2018), essa suscetibilidade pode ser resolvida através de técnicas de estabilização do solo, como uso de aditivos cimentícios, alta energia de compactação e até mesmo eficiência granulométrica do solo (Mansour *et al.*, 2016).

A classificação do solo-cimento se dá em duas categorias, sendo a primeira o solo-cimento compacto (SCC) e a segunda o solo-cimento plástico (SCP); a diferença substancial entre elas é a quantidade de água acrescentada na mistura e sua aplicabilidade. Na categoria SCC, a água deve ser adicionada de modo a obter a compactação máxima, contribuindo para as reações de hidratação do cimento. Na categoria SCP, tem-se a adição de modo que se obtenha uma mistura plástica, semelhante a uma argamassa de emboço (Ferraz, 2004, Vilela *et al.*, 2020).

A mistura solo-cimento é um material versátil que pode ser utilizado em diversas aplicações na construção civil, incluindo contrapisos, fundações, fabricação de tijolos, blocos, paredes monolíticas e pavimentação.

### 2.1.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DO SOLO-CIMENTO

Dentre os inúmeros fatores que podem influenciar a qualidade do solo-cimento, destacam-se o tipo de solo, o método de mistura e o grau de compactação. De acordo com Murmu e Patel (2018), o tipo de solo é um fator crucial na qualidade do produto, embora outros fatores como a cura, a densidade e a homogeneização da mistura do solo com o cimento também sejam relevantes (Estabragh *et al.*, 2022).

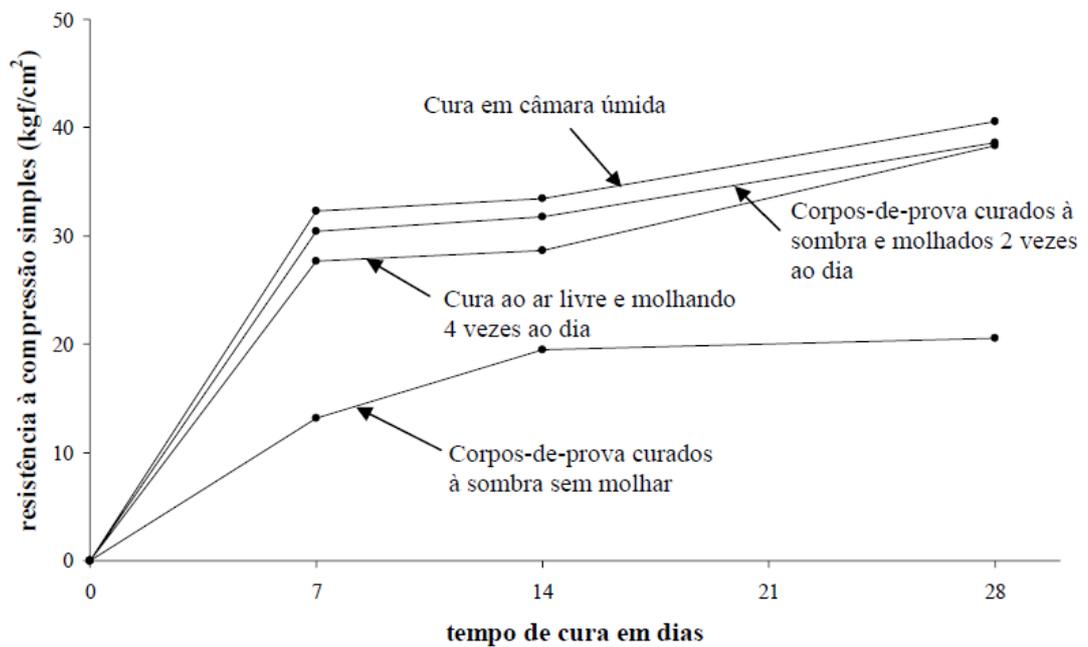
De acordo com Akinwumi *et al.* (2016), a estabilização de solos é uma técnica muito difundida, devido a carência do solo em propriedades como resistência e durabilidade para fins da construção civil, e, diante disso, a estabilização tem a finalidade de melhorar suas características, atingindo, assim, as especificações necessárias para utilização. A estabilização envolve técnicas que são divididas em três categorias básicas, quais sejam: mecânica, granulométrica e química (Dulal *et al.*, 2023).

A qualidade do solo-cimento também é influenciada pela forma como a mistura é preparada. Segundo Castro (2008), o processo de mistura envolvendo aglomerante hidráulico, requer uma homogeneização do material pulverulento preliminar, antes da hidratação, já que os aglomerantes iniciam as reações químicas logo após entrarem em contato com a água.

O teor de umidade ótima também é um fator importante e é definido em função da densidade máxima identificada através do ensaio de compactação, preconizado pela NBR 12023 (ABNT, 2012).

O processo de cura também requer atenção, para os solos estabilizados com aglomerante hidráulicos, o processo de cura deve ser semelhante à cura de concreto. A NBR 12024 (ABNT, 1992) especifica que após a moldagem, os corpos-de-prova de solo-cimento devem ser depositados em câmara úmida com uma temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C e umidade relativa do ar não inferior a 95%. Diversos tipos de cura são amplamente difundidos nos processos de solo-cimento, e, de acordo com ensaios realizados pelo CEPED (1999), é possível avaliar a relação da resistência à compressão simples em corpos de prova a alguns tipos de cura, conforme Figura 2-1.

Figura 2-1 - Influência dos tipos de cura (CEPED, 1999)



Fonte: CEPED, 1999

### 2.1.2 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO SOLO-CIMENTO

Quando comparados a outros materiais de construção convencionais, os tijolos de solo-cimento apresentam inúmeras vantagens, especialmente para a construção residencial de baixo custo. Dentre essas vantagens, destacam-se a utilização de materiais locais, o que reduz os custos de transporte e logística. É um método construtivo relativamente simples, podendo ser realizado por mão de obra não especializada.

## 2.2 TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

O solo é o principal componente do tijolo de solo-cimento, seguido pelo cimento, que atua como agente estabilizador. A literatura aponta que teor de cimento na mistura pode variar de 4% a 30% em massa. No entanto, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) recomenda um teor mínimo de 5%.

O tijolo de solo-cimento tem como característica baixa porosidade e alta densidade devido à função do empacotamento dos grãos do solo após a compactação (Zhang *et al.*, 2018). O tijolo solo-cimento possui baixo custo de energia na construção (Gandia *et al.*, 2018), demanda menor quantidade de água, possui baixo custo de

produção e facilidade de construção, conforme Figura 2-2, se põe no mercado como uma opção de construção com menor impacto ambiental (Corrêa *et al.*, 2006; Pacheco-Torgal e Jalali, 2012). Atinge resistência similar correspondente a dos tijolos cerâmicos, conforme NBR 10833 (ABNT, 2013).

Figura 2-2 - Modelo de tijolo solo-cimento



Fonte: Adaptado da Cartilha Eco Produção - Tijolos

Esse tipo de tijolo é visto como uma alternativa a fim de mitigar o desperdício na construção civil e está em sintonia com o desenvolvimento sustentável. Há baixo consumo energético na extração da matéria-prima, dispensa de queima e facilidade de fabricação no próprio local da construção; logo, não há necessidade de transporte. Há também a facilidade de manuseio dos equipamentos, reduzindo os custos operacionais (Ali *et al.*, 2016; Segantini, e Wada, 2011).

De acordo com Carneiro *et al.*, (2001), os tijolos de solo-cimento prensados possuem comportamento térmico e durabilidade equivalentes aos tijolos ou blocos cerâmicos, seja prensa manual ou automática. Outra vantagem do tijolo de solo-cimento é a opção de empregá-lo como alvenaria aparente, dispensando processos tradicionais como chapisco, emboço, reboco, massa e pintura, exigindo apenas impermeabilização (Kasinikota e Tripura, 2021, Jayasinghe, Fonseka e Abeygunawardhene, 2016).

Os tijolos são fabricados por meio de prensas manuais ou hidráulicas. Seu processo de fabricação é simples, conforme Figura 2-3, e segue da seguinte forma, segundo Reis e Reis, (2020a):

- a. Preparação do solo: destorroar e peneirar;
- b. Preparação da mistura;
- c. Moldagem dos tijolos: utilizar prensas manuais ou hidráulicas;

d. Cura e armazenamento: manter os tijolos úmidos por sete dias.

Figura 2-3 - Processo de Fabricação do Tijolo Solo-Cimento



Além de todas as vantagens econômicas, esse tijolo também possui características ambientalmente sustentáveis quando comparados com os tijolos convencionais, como já dito anteriormente, pois não há queima em fornalhas em comparação com os tijolos tradicionais. Apesar de utilizar cimento na sua composição, a proporção é muito pequena em relação ao montante de massa. (Sena *et al.*, 2017).

De acordo com a NBR 8491 (2012), os tijolos e blocos devem apresentar alguns requisitos mínimos, conforme apresenta a Tabela 2-1. Os ensaios comumente utilizados na fabricação dos tijolos de solo-cimento são os de resistência à compressão e o de absorção de água, conforme NBR 8492 (2012).

Tabela 2-1 Características técnicas

Classificação	Observações	
Tolerância dimensional	Largura, altura e comprimento	±1mm,
Resistência à compressão	Valores médios Valores individuais	≥ 2,0 MPa ≥ 1,7 MPa
Absorção de água	Bloco e tijolo	≤ 20% para valores médios ≤ 22% para valores individuais

Fonte: NBR 8491 (ABNT, 2012).

O tipo de solo é um dos fatores mais importantes, pois define as propriedades do tijolo. A NBR 10833 (2012) preconiza índice de plasticidade menor ou igual a 18% e limite de liquidez menor ou igual a 45%, apresentam o estado de trabalhabilidade

do solo, a granulometria variando entre 100% do solo passante na peneira de 4,8 mm e 10 a 50% passante na peneira de 0,075 mm (ABCP, 1985).

De acordo com Bueno e Vilar, (1999), a umidade ótima é um parâmetro primordial para pesquisas utilizando solo-cimento, pois ela propicia condições favoráveis de trabalhabilidade e máxima compactação, obtendo, assim, maiores valores de densidade, resistência e durabilidade. O engenheiro Ralph Roscoe Proctor, em 1933, demonstrou seus estudos relacionados a mecânica dos solos associando a densidade diretamente com a quantidade de água presente. Enunciando que o excesso de água pode provocar um afastamento das partículas sólidas e, já a falta de água, acarreta menor lubrificação das partículas, dificultando o agrupamento destas. Esse parâmetro é normatizado pela NBR 7182 (2020), conhecido como Ensaio Normal de Proctor (Restelli *et al.*, 2021, Souza, *et al.*, 2008).

Para Siqueira (2013), o ensaio de compactação de Proctor é um método científico que se obtém o teor de umidade de compactação necessária para a fabricação dos tijolos, não havendo necessidade de fazer empiricamente técnicas como “bolo na mão”.

Para Fraga (2016), a utilização de tijolos de solo-cimento possibilita uma economia em até 70% de concreto e argamassas e 50% em ferragens. Para Gomes, (1980), a utilização desses tijolos proporciona uma redução entre 30% e 40% no custo final da obra, pois há economia em argamassa de assentamento e dispensa revestimentos e pintura. Já para Kats *et al.*, (2010), essa redução pode chegar a 25% no custo total da obra, além da redução significativa de matéria-prima não renovável nas construções.

Segundo Oliveira *et al.* (2014), o tijolo de solo-cimento é uma alternativa na construção civil urbana e rural por possuir consideráveis vantagens em seu emprego como alvenaria e por permitir a incorporação de resíduos. Como exemplo, podem ser citados tijolos com incorporação dos seguintes materiais: politereftalato de etileno (PET) (Silva *et al.*, 2021), resíduo de calcário (França *et al.*, 2018), coprodutos siderúrgicos (Castro *et al.*, 2016), resíduos industriais, como casca de ovos em substituição parcial ao cimento (Siqueira *et al.*, 2016), manipueira em substituição à água (Souza, 2019), resíduos de construção civil em substituição parcial ao solo (Seco *et al.*, 2018), rejeitos de scheelita (Oliveira, Meira e Chagas, 2021), resíduo de minério

de ferro em substituição parcial do solo (Vilela *et al.*, 2020), adição de cinza de bagaço da cana de açúcar (SBCA) (Jordan *et al.*, 2019), dentre outros.

### 2.2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO TIJOLO SOLO-CIMENTO

Os ensaios em laboratórios recomendados para análise do solo, devem seguir os parâmetros estabelecidos pelas normas a seguir:

- NBR 6457: Preparação de amostra para ensaio de compactação e ensaio de caracterização (ABNT, 2016c);
- NBR 6458: Determinação da massa específica dos grãos de solos (ABNT, 2016d);
- NBR 6459: - Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016e);
- NBR 7180 – Solo - Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016b);
- NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica (ABNT, 2017);
- NBR 7182 – Solo – Ensaio de Compactação (ABNT, 2020).

De acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012), o tijolo solo-cimento pode ser produzido através de prensa manual ou hidráulica. A Figura 2-4 ilustra o processo de fabricação, as etapas são bem definidas e de fácil execução.

Para a retirada do solo, a escolha da jazida é crucial, pois sua localização influenciará no custo do produto fabricado. Após a escolha do solo, deve-se realizar o peneiramento para a retirada de torrões, pedregulhos, material orgânico e demais materiais que não conferem melhoria ao tijolo produzido. Após, faz-se o preparo da mistura: o solo seco peneirado é misturado ao cimento até que haja uma mistura homogênea e uniforme; posteriormente, é adicionada água, novamente homogeneizada e peneirada, para que todos os tijolos sejam iguais (Pisani, 2004), Restelli *et al.*, 2021)

Figura 2-4 - Fabricação do Tijolo Solo-Cimento



Fonte: Adaptado de Gomes (1980) e Restelli *et al.*, (2021)

Em seguida, a massa uniformizada é colocada no molde da prensa para a produção do tijolo, conforme ilustra a Figura 2-5, a pressão de compactação é controlada com o objetivo de otimizar e padronizar suas características.

Figura 2-5 – Proposta de uma fábrica de tijolo solo-cimento



Fonte: Restelli *et al.*, (2021)

Após a conformação, os tijolos são armazenados em local plano e coberto para seguir o processo de cura, por um período mínimo de 7 dias, até que atinjam a

resistência desejável; essa etapa é primordial para que o produto final apresente bons resultados.

## 2.2.2 MATÉRIAS PRIMAS UTILIZADAS

### 2.2.2.1 SOLO

Os solos se constituem da parte superficial da crosta terrestre, sendo um conjunto de partículas sólidas com água e ar nos espaços intermediários. São resultantes da transformação de uma rocha por meio de ações químicas, físicas ou biológicas. As partículas geradas pelo intemperismo dependerão principalmente da composição da rocha matriz (Silva, 2015; Campos e Borga, 2017).

A utilização do solo como material de construção é milenar e diversas construções de eras passadas ainda possuem estrutura eficiente. Seu uso como material de construção possui propriedades físicas consideráveis, pois existe em abundância na natureza, oferece conforto térmico, possui bom comportamento acústico e economia energética, e pode ser reciclado. Vale ressaltar também sua capacidade de receber a inserção de resíduos sem que sua eficiência seja comprometida; de fato, algumas vezes a inserção de resíduos pode até melhorar suas propriedades (Reis, R. e Reis, 2020b).

Segundo Silva *et al.* (2015), a seleção do solo correto para o tipo de construção é crucial, sendo imprescindível o conhecimento de sua composição, suas propriedades e seu comportamento. Caso o material não atinja as características necessárias, é possível corrigi-lo através de estabilização (Silva *et al.*, 2015). Para Hidalgo, Carvajal e Muñoz, (2019), a estabilização do solo tem como função aumentar a resistência mecânica, melhorar a estabilidade dimensional, reduzir a permeabilidade, controlar a fissuração por retração por secagem, aumentar a resistência à erosão e à abrasão superficial e, dessa forma, prolongar sua durabilidade.

Ainda de acordo com Hidalgo, Carvajal e Muñoz, (2019), a estabilização do solo confere a ele um maior preenchimento, ou seja, reduz o volume de vazios, conseqüentemente levando-o a uma maior densidade e fazendo com que sua porosidade e permeabilidade sejam diminuídas, aumentando a aderências dos grãos. Para Estabragh *et al.* (2022), existem diferentes processos de estabilização, destacando-se as estabilizações mecânica, física e química, conforme Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Estabilização do solo

Estabilização	Características
Mecânica	Compactação do solo através de uma energia mecânica. Esse método altera a densidade, a resistência, a compressibilidade, a permeabilidade e a porosidade.
Física	Age diretamente no solo ao adicionar frações de grãos de diferentes granulometrias. Melhora as proporções entre areia, silte e argila, proporcionando melhor empacotamento.
Química	Acontece quando outros materiais são adicionados ao solo, alterando suas propriedades, ou quando grãos e materiais reagem, aglutinam-se e cobrem os grãos.

Fonte: Adaptado de Estabragh *et al.*, (2022b)

Conforme Al-Jabri *et al.*, (2017), as estabilizações mecânica, física e química são comumente utilizadas na confecção de tijolos prensados. A estabilização mecânica proporciona maior compactação do solo, aumentando a resistência ao cisalhamento, compressibilidade, permeabilidade e porosidade. Já a estabilização física está relacionada à alteração da textura e das propriedades do solo, a métodos de cura diferentes, ao ar ou à umidade. Por último, a estabilização química é obtida pela adição de produtos químicos ao solo, como, por exemplo, o cimento, melhorando suas propriedades físico-químicas.

Para misturas de solo-cimento específicas para tijolos prensados, os solos devem possuir um teor mínimo de fração fina, aproximadamente 20% de silte e argila. Estabragh *et al.*, (2022), constataram que essa fração é necessária para dar coesão suficiente à mistura solo-cimento.

Para Ferreira, Luso e Cruz (2018), o solo não deve possuir uma quantidade acima de 30% de argila, devido à grande absorção de água por parte das partículas, entretanto, quantidades pequenas são benéficas para garantir a coesão dos tijolos moldados. Nos casos de solo argiloso, faz-se necessária a correção utilizando solo arenoso ou areia. O material também deve estar isento de matéria orgânica, haja vista que sua presença influencia negativamente as propriedades dos tijolos (Silva, 2005).

Os solos com baixa proporção de argila e fração areia alta são ideais para estabilização do solo com cimento. Para Venkatarama Reddy e Latha, (2014), a fração argila de 10% e de 14% gera uma mistura com máxima resistência e boa durabilidade. A presença de areia grossa e pedregulho é propício, já que são materiais inertes e

que possuem função de enchimento, proporcionando a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar os grãos menores.

Segundo Silva, Segantini e Wada (2011), o solo para fabricação de tijolos de solo-cimento deve ter quantidade de areia entre 45% e 50%. Já para Fraga *et al.*, (2016), o solo deve conter de 10% a 20% de argila, 10% a 20% de silte, e 50% a 70% de areia.

Em regra, o solo ideal para as misturas de solo-cimento deve ter uma parcela de areia para adequada estabilização com o cimento e também uma parcela de fração fina, composta por argila e silte, responsável pela coesão da mistura quando umedecida e compactada. A NBR 10833 (ABNT, 2013) sugere que o solo utilizado seja constituído das propriedades mencionadas na Tabela 2-3:

Tabela 2-3 – NBR 10833 (ABNT, 2013)

<b>Material</b>	<b>Características</b>
Solo	100% passando pela peneira 4,75 mm (N.º 4) 10% a 50% passando pela peneira 0,075 mm (Nº 200) Limite de Liquidez (LL) menor ou igual a 45% Índice de plasticidade (IP) menor ou igual a 18%

Fonte: Adaptado ABCP (2016)

#### 2.2.2.2 CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland é caracterizado como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, o qual quando em contato com a água encrua e não sofre mais decomposição, ainda que em meio aquoso, conforme ABCP (2002). É considerado um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer com adição de gesso (utilizado para regular o tempo de início e hidratação ou tempo inicial de “pega”) além de outras substâncias que servem para determinar o seu tipo.

O cimento Portland é o segundo material mais utilizado no planeta (ABCP,2002). Ele possui boa resistência mecânica, tem um custo relativamente baixo, é facilmente adquirido e apresenta rapidez na execução, tornando-se um produto de

extrema relevância em obras civis como barragens, estradas, edificações, pontes, artefatos de concreto e até mesmo em obras de arte Pereira Junior, (2011).

No Brasil, há diversos tipos de cimento Portland e estes são classificados de acordo com a NBR 16.697, a qual classifica os cimentos Portland referentes às adições e propriedades específicas. Essa mesma norma ainda determina sua identificação e siglas: os números no final representam a classe de resistência, 25, 32, 40 ou ARI (alta resistência inicial) e são identificados da seguinte forma:

- CP I e CP I-S: Cimento Portland comum e com adição;
- CP II-E, F ou Z: Cimento Portland composto com adição de escória de alto forno, material pozolânico ou carbonático;
- CP III: Cimento Portland de Alto-Forno;
- CP IV: Cimento Portland Pozolânico;
- CP V - ARI: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial;
- CP B: Cimento Portland Branco.

### 2.2.2.3 ÁGUA

Conforme recomendação da ABNT (1992), a fração de água na mistura é uma variável estipulada entre 5% e 20%, e a umidade ótima é determinada como o valor da umidade referente ao valor da massa específica aparente seca máxima, isto é, a quantidade de água ideal para a obtenção de compactação estável obtendo o melhor grau de compactação (Campos *et al.*, 2017).

Ainda que utilizada em pequena proporção, seu controle é crucial, pois garante melhor resistência final devido ao fato de atingir melhor uma compactação mais eficiente, além de atribuir plasticidade à mistura, garantindo ao solo resistência mecânica suficiente para sua formação. Dessa forma, evitam-se trincas, quebras e aderência excessivas na prensa (Silva, Brito e Veiga, 2007).

O controle de umidade e temperatura de cura são fatores de extrema relevância, pois estão intrinsecamente implicados na resistência do material, afirma Hidalgo, Carvajal e Muñoz (2019).

## 2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a NBR 10.004 (2004) - Resíduos Sólidos, os resíduos sólidos são determinados como resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que são

provenientes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Somam-se lodos oriundos de sistema de tratamento de água, resíduos gerados por equipamentos e instalações de controle de poluição, como também líquidos que exijam soluções técnicas e economicamente inviáveis que tornem possível seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos hídricos.

De acordo com o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), segundo a Resolução 307, os resíduos da construção civil são:

[...] os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliças ou metralha” (BRASIL, 2002).

A destinação final dos resíduos sólidos é um tema em voga em todo o mundo e a construção civil é um ator importante na geração de resíduos sólidos, pois está ligada diretamente ao crescimento desordenado da população do planeta, à alta densidade demográfica nos centros urbanos e, conseqüentemente, ao crescente desenvolvimento econômico. Os resíduos da construção civil representam de 13% a 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos, conforme Geraldo Filho *et al.*, (2022). No Brasil, a partir da aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – (PNRS (Brasil, 2010), surge um novo cenário com a regulamentação adequada dos resíduos e a inclusão de questões relativas ao desenvolvimento econômico e social.

A degradação ambiental e social é um dos principais desafios da humanidade. A pesquisa científica e tecnológica pode ajudar a encontrar soluções para esses problemas, preservando o meio ambiente e melhorando a qualidade de vida das pessoas.

Uma das formas de contribuir para a sustentabilidade é a reciclagem de resíduos. Esses resíduos podem ser utilizados para produzir novos materiais, como tijolos, blocos e pisos. Isso reduz a necessidade de extrair mais recursos naturais e ajuda a reduzir a poluição.

Há um esforço crescente para reaproveitar os resíduos da indústria cerâmica. O volume de resíduos a ser gerenciado e tratado é significativo e nesse contexto, algumas pesquisas estão sendo realizadas para avaliar a viabilidade de usar esses

resíduos em diferentes tipos de materiais de construção. São apresentados diversos tipos de resíduos passíveis de utilização em tijolos de solo-cimento, conforme evidenciado na Tabela 2-4.

Tabela 2-4 - Pesquisas de tijolo solo-cimento com diversos tipos de resíduos

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Resíduo</b>	<b>Revista</b>	<b>Ano</b>
<b>Silva et al.</b>	Soil-cement blocks: a sustainable alternative for the reuse of industrial solid waste	PET	ABES	2021
<b>Jose et al.</b>	Laterite soil-cement blocks modified using natural rubber latex: Assessment of its properties and performance	Latex	Construction and Building Materials	2021
<b>Luhar et al.</b>	Assessment of the Suitability of Ceramic Waste in Geopolymer Composites: An Appraisal	Geopolímeros	Materiais	2021
<b>Wang et al.</b>	Synthesis and characterization of sustainable ecofriendly unburned bricks from slate tailings	Resíduo de ardósia	Journal of materials research and technology	2021
<b>Elahi et al.</b>	Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash	Cinza volante	Construction and Building Materials	2021
<b>G. Araya-Letelier et al.</b>	Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers	Fibra de juta	Construction and Building Materials	2021
<b>Kasinikota and Tripura</b>	Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste	Resíduo cerâmico	Construction and Building Materials	2021
<b>Alam et al.</b>	Incinerated municipal solid waste bottom ash bricks: A sustainable and cost-efficient building material	Cinza de resíduos sólidos urbanos	Materials Today: Proceedings	2021
<b>Filho et al.</b>	Ecological bricks produced from scheelite residue, stone powder, and cassava wastewater for nonstructural masonry	Manipueira	Revista Príncipia	2021
<b>Jordan et al.</b>	Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane bagasse ash	Bagaço da cana de açúcar	Engenharia Agrícola	2019
<b>França et al.</b>	Durability of Soil-Cement Blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble	Resíduo de Calcário	Materials Research	2018

<b>Seco et al.</b>	Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes	RCC	Construction and Building Materials	2018
<b>Ferreira and Cunha</b>	Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests	Resíduos vegetais	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	2017
<b>Ali et al.</b>	Investigation of compressed earth brick containing ceramic waste	Resíduo cerâmico	ARN - Journal of Engineering and Applied Sciences	2016

### 2.3.1 RESÍDUOS CERÂMICO

A Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM) define a cerâmica como todo material inorgânicos, não metálico, obtido geralmente após tratamento térmico, e, a classifica como:

- Cerâmica vermelha;
- Materiais de revestimento (Placas cerâmicas);
- Cerâmica Branca;
- Materiais Refratários;
- Isolantes térmicos;
- Abrasivos;
- Vidros, cimento e cal.

O fabrico de produto cerâmicos, de forma global, são divididos em três etapas: a seleção e preparação da matéria-prima, a moldagem e a queima. Para Silva (2006), a primeira etapa consiste na seleção e dosagem das argilas, determinada em função das propriedades pretendidas, em seguida a limpeza e tratamento para preparação da pasta, onde adiciona-se água a fim de obter a consistência desejada. E em seguida, é executada a moldagem, corte e seca para iniciar o processo de queima. O autor também demonstra as transformações físico-químicas que ocorrem durante o processo de fabricação dos tijolos de cerâmica, como ilustrado na Tabela 2-5.

Tabela 2-5 - Transformações físico-químicas de produtos cerâmicos

Temperatura (°C)	Transformações/Reações físico-químicas		
100	Secagem final do material ou evaporação da água residual (água higroscópica)		
110-120	Separação da água (zeolítica) que acompanha alguns mineiras		
350-600	Decomposição da matéria orgânica ou componentes carbonosos (libertação de CO <sub>2</sub> )		
500	Separação da água de cristalização (por exemplo, da água estrutural da caulinita)		
573	Transformação alotrópica do quartzo ( $\alpha$ - $\beta$ ), com variação de volume (por influência das tensões de aquecimento)		
>600	Libertação de flúor (caso faça parte da composição mineralógica da pasta)		
700-800	<b>Reações químicas</b>	700 - T <sub>máx</sub>	<b>Reações físicas</b>
	Decomposição e separação dos minerais micáceos		Aumento da resistência mecânica
	Decomposição dos sulfuretos e sulfatos		Redução de porosidade
800-950	Decomposição dos sulfuretos e sulfatos		Variações dimensionais
800-1100	Decomposição dos sulfuretos e sulfatos		
T <sub>máx</sub> -900	Arrefecimento rápido		
573	Transformação alotrópica do quartzo ( $\alpha$ - $\beta$ ), com variação de volume (influência das tensões de arrefecimento)		

Fonte: Silva (2006)

Atualmente, a indústria cerâmica é responsável pela criação de uma quantidade significativa de resíduos. A maioria das fábricas rejeita um grande volume de material resultante do produto final, resultante de diversos fatores. Os desperdícios podem ser ocasionados por diferentes causas, esse setor é caracterizado por empresas familiares, com mão de obra não qualificada, falta de qualidade dos produtos, não utilização de técnicas modernas de produção.

O resíduo cerâmico, designa o material cerâmico resultante do descarte pós-queima, sendo posteriormente submetido a um processo cominuição para transformação em uma substância pulverulenta. De acordo com Vieira e Monteiro (2006), em virtude do processo de queima, o material adquire características não

plásticas. Para Donde *et al.* (1997), o resíduo cerâmico é considerado o subproduto proveniente dos rejeitos do material cerâmico após sua sinterização.

Pesquisas para reaproveitar os resíduos da indústria cerâmica estão em curso, com algumas empresas reintroduzindo-os na produção. No entanto, a maioria das empresas ainda não possui capacidade, resultando em um volume significativo de resíduos a serem gerenciados e tratados. Diversas pesquisas avaliam a viabilidade de usar os resíduos em diferentes materiais de construção. As áreas mais pesquisadas segundo Matias (2014) são em argamassas e concretos, mas encontram-se também estudos com pavimento, cimentos, placas de revestimentos, blocos e tijolos, como o da presente pesquisa.

Torkittikul e Chaipanich (2012) avaliaram a produção de argamassas e concretos com substituição dos agregados naturais finos por resíduo cerâmico recolhido em indústrias locais. Observaram que a trabalhabilidade reduziu, mas o aumento da porcentagem de substituição do agregado até 50% levou ao aumento da resistência mecânica, reduzindo a partir desse valor.

Para Dallacort *et al.* (2002), materiais cerâmicos são fabricados com argila, que, no seu estado natural, possui baixa pozolanicidade e quando calcinada a temperaturas na faixa de 700°C a 900°C, torna-se reativa. Essa temperatura altera a estrutura cristalina da argila transformando-a em uma estrutura sílico-aluminosa amorfa. Esse material quando moído possui uma composição físico-química que o qualifica como adição mineral em misturas com cimento Portland.

De acordo com Silva *et al.* (2014), os resíduos cerâmicos possuem elevado teor de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro, que caracterizam 89,1% da sua composição, excedendo o valor mínimo de 70% da soma dos óxidos de materiais da classe pozolana. A Tabela 2-6 apresenta a composição química de vários resíduos de cerâmica vermelha.

Tabela 2-6 - Composição química de resíduos cerâmicos (%)

Composição (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	MnO
Vieira <i>et al.</i> (2004)	55,98	25,36	9,57	1,32	2,24	-	0,37	-
Melo <i>et al.</i> (2006)	52,79	26,57	7,55	0,51	3,65	-	1,7	-
Gouveia (2008)	64,06	17,62	10,89	1,67	1,23	-	0,61	-
Melo <i>et al.</i> (2020)	45,59	35,69	7,82	0,94	2,38	0,59	1,46	0,07
Mendes <i>et al.</i> (2021)	49,74	30,55	5,29	0,01	0,23	-	7,4	-

Theodoridou *et al.* (2016), alegam que a utilização de tijolo triturado misturado com cal, na ausência de pozolanas naturais, é utilizado desde a pré-história, como substituto parcial para o cimento Portland na produção de argamassa. Os autores adicionaram nanosílica e nanotitânio como aditivos em tijolos com resíduo cerâmico em sua massa, e avaliaram as propriedades. Ainda em concordância com os autores, a adição de resíduo cerâmico à mistura de tijolos de solo-cimento faz com que a resistência à compressão aumente em relação à mistura natural de solo-cimento, comprovando a potencialidade do uso do resíduo cerâmico.

A incorporação de resíduos de cerâmica vermelha nos tijolos de solo-cimento emerge como uma alternativa viável, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Essa abordagem se destaca pela redução do consumo de matéria-prima, atenuando a necessidade de extração, ao mesmo tempo em que previne o descarte inadequado desses resíduos no meio ambiente. (Azevedo *et al.*, 2019)

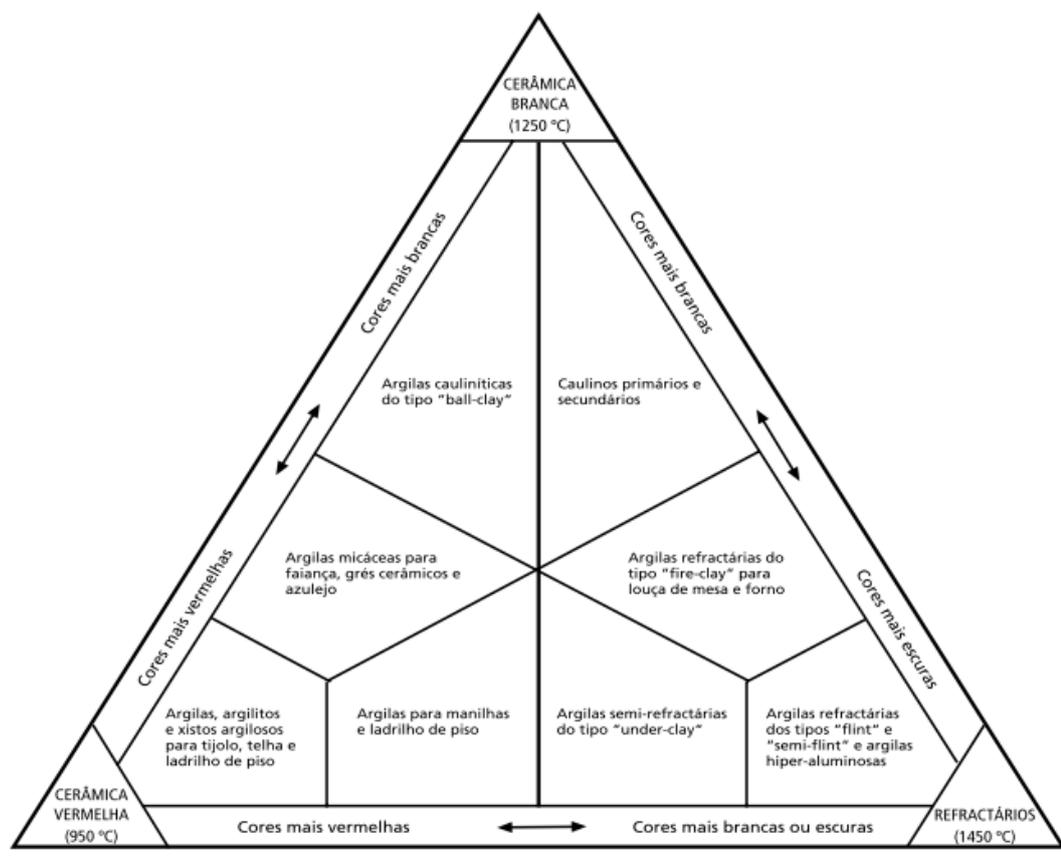
A utilização granular de resíduos cerâmicos em substituição aos agregados convencionais apresenta a vantagem de diminuir o consumo de agregados naturais, resultando na mitigação das extrações em jazidas. A incorporação desse resíduo em argamassas revela-se vantajosa tanto do ponto de vista econômico quanto energético, conforme mencionado. Naceri e Hamina (2009).

Kunuthia e Nizdam (2011) afirmam que a utilização desse resíduo em tijolos de solo-cimento aumenta a resistência do tijolo. Kumar *et al.* (2017) estudaram blocos de alvenaria cru estabilizados com cimento e adição de resíduo cerâmico e constataram que a resistência à compressão e o grau de absorção de água superaram os requisitos mínimos.

Kasinikota *et al.* (2021) afirmam que o resíduo cerâmico tem elevado potencial para substituir a areia na mistura solo-cimento sem comprometer o desempenho mecânico e a durabilidade, ressaltando, ainda, a influência da granulometria das partículas e a substituição. Para os autores supramencionados, a resistência à compressão é melhorada com a adição de até 24% de resíduo cerâmico.

Uma característica muito importante desse resíduo é a coloração final dos tijolos. A maioria dos resíduos cerâmicos possui cor laranja, tornando o produto peculiar quando comparado ao tijolo de solo-cimento sem adições, dispensando utilização de tintas ou outros produtos de acabamento, caracterizando, assim, uma economia para a construção. A tipologia das cerâmicas e a cor após a queima, de acordo com Gomes (2002) está apresentado na Figura 2-6.

Figura 2-6 - Classificação de materiais cerâmicos com base na cor e na natureza das matérias-primas



Fonte: Gomes 2002

Outra característica de extrema relevância do resíduo cerâmico é o seu potencial como material pozolânico. Materiais que possuem em sua composição alto teor de sílica e/ou alumina reativas, com granulometria fina, podem, normalmente ser utilizados como pozolanas em argamassas e concretos (Pontes, Silva, Faria, 2012). Pozolana é definido como um material sílicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes, conforme NBR 12653 (2014).

A atividade pozolânica é caracterizada pela capacidade que uma determinada pozolana tem de reagir com o hidróxido de cálcio, ou seja, quanto maior o percentual de  $\text{Ca(OH)}_2$  transformado em silicato de cálcio hidratado pela pozolana, maior será a sua atividade (ABNT, 2014b). Para Milani (2008), as pozolanas podem ser empregadas para reduzir o consumo de clínquer e, quando aplicadas com cimento

Portland, reduzem o calor de hidratação da reação, evitando assim possíveis fissuras nas argamassas, concretos e misturas de solo-cimento.

Sebastiany (2014) investigou a pozolanicidade de resíduos cerâmicos gerados em laboratório usando o método da condutividade elétrica. Ele constatou que todas as argilas calcinadas a diferentes temperaturas (700°C, 900°C e 1000°C) foram consideradas materiais com alta atividade pozolânica. Além disso, observou-se que a cerâmica calcinada a 700°C exibiu uma atividade pozolânica superior às outras cerâmicas em todas as análises conduzidas no estudo. O autor também destacou que as análises dos materiais provenientes dos três gradientes de temperatura (700°C, 900°C e 1000°C) indicaram uma relação direta entre a temperatura de calcinação e a formação de picos cristalinos. Consequentemente, quanto maior a temperatura de calcinação, mais cristalino torna-se o material e, por conseguinte, menos reativo.

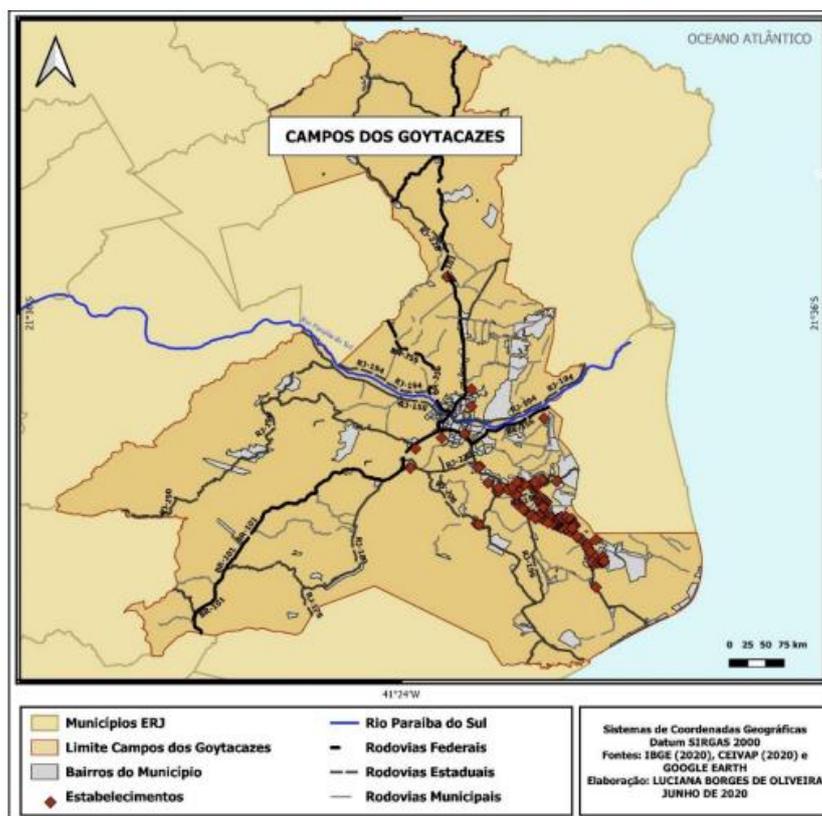
Ali, Saidur e Hossain (2011) enfatizam que a diminuição da proporção de clínquer no cimento pode ser vista como uma das estratégias mais eficazes para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub>. Isso se deve ao fato de que a indústria cimenteira é responsável por aproximadamente 7% do total de emissões de carbono na atmosfera terrestre.

### 2.3.2 POLO CERÂMICO EM CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

O município de Campos dos Goytacazes, localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, possui uma população de 483.551 pessoas, segundo dados do IBGE (2023), ilustrado na Figura 2-7. O município possui um aglomerado de indústrias produtoras de cerâmica vermelha, principalmente na região denominada Baixada Campista. Segundo dados da RAIS (2020), o setor possui 119 estabelecimentos, proporcionando 2.100 postos de trabalho diretos, vale ressaltar que há muitos postos de trabalho indiretos também.

A indústria cerâmica possui grande relevância dentro da economia municipal, além da geração de empregos diretos, impostos arrecadados, tem-se o comércio indireto que fomenta essa cadeia, comércio para atender os veículos que fazem o transporte do material fabricado, combustível e assim toda uma cadeia econômica é movimentada em virtude das indústrias cerâmicas (Oliveira, *et al.* 2021).

Figura 2-7 - Indústrias cerâmicas no município de Campos dos Goytacazes | RJ



Fonte: Oliveira *et al.* (2021)

A indústria de transformação inseriu R\$ 89,9 milhões na economia do município, desses, R\$ 30 milhões (34%) são provenientes da indústria da cerâmica vermelha, conforme dados do RAIS (2019), conforme apresentado na Tabela 2-7.

Tabela 2-7 - Massa salarial em percentual da indústria de transformação e de produtos cerâmicos (2010-2019 em R\$ milhões e %)

Atividade	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Ind. Transformação	161	157,1	190,1	180	204,8	170	125,6	120,7
Prod. Cerâmicos	33,9	38	41,9	50,3	52	44,8	39,2	39,8
%Prod. Cer/Ind. Trans	21%	24%	22%	22%	25%	26%	31%	33%

Fonte: Rais (2019)

A matéria prima prevalente é a argila plástica (caulinito-ilítica), da qual os argilominerais são seus principais componentes, como matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (Ripoli, 1997).

Em Campos dos Goytacazes, o argilomineral predominante nas argilas é a caulinita, havendo também a presença de quartzo, micas, anfibólios, zircão, gibsita, goetita e cordierita, conforme caracterização realizada por Alexandre (1997).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

A pesquisa utilizou solo e resíduo cerâmico doados pela Cerâmica Sardinha, em Campos dos Goytacazes – RJ. O solo foi transportado para o campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), onde foi triturado, seco, peneirado e ensacado. O resíduo cerâmico foi quebrado com martelo e cominuído em moinho de bolas, até atingir a granulometria desejada, conforme Figura 3-1.

Figura 3-1 - Preparo do resíduo cerâmico: a) descarte de tijolo, b) moinho de bolas e c) material ensacado



a)

b)

c)

Foi utilizado cimento CP V – ARI, da marca Holcin, cujas propriedades são recomendadas pela ABCP para composições de solo-cimento, por atender às especificações físicas e químicas propostas pela NBR 5733 (ABNT, 1991). A escolha do tipo de cimento se deve à capacidade de atingir alta resistência nos primeiros dias de aplicação. O produto foi adquirido no comércio local da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ.

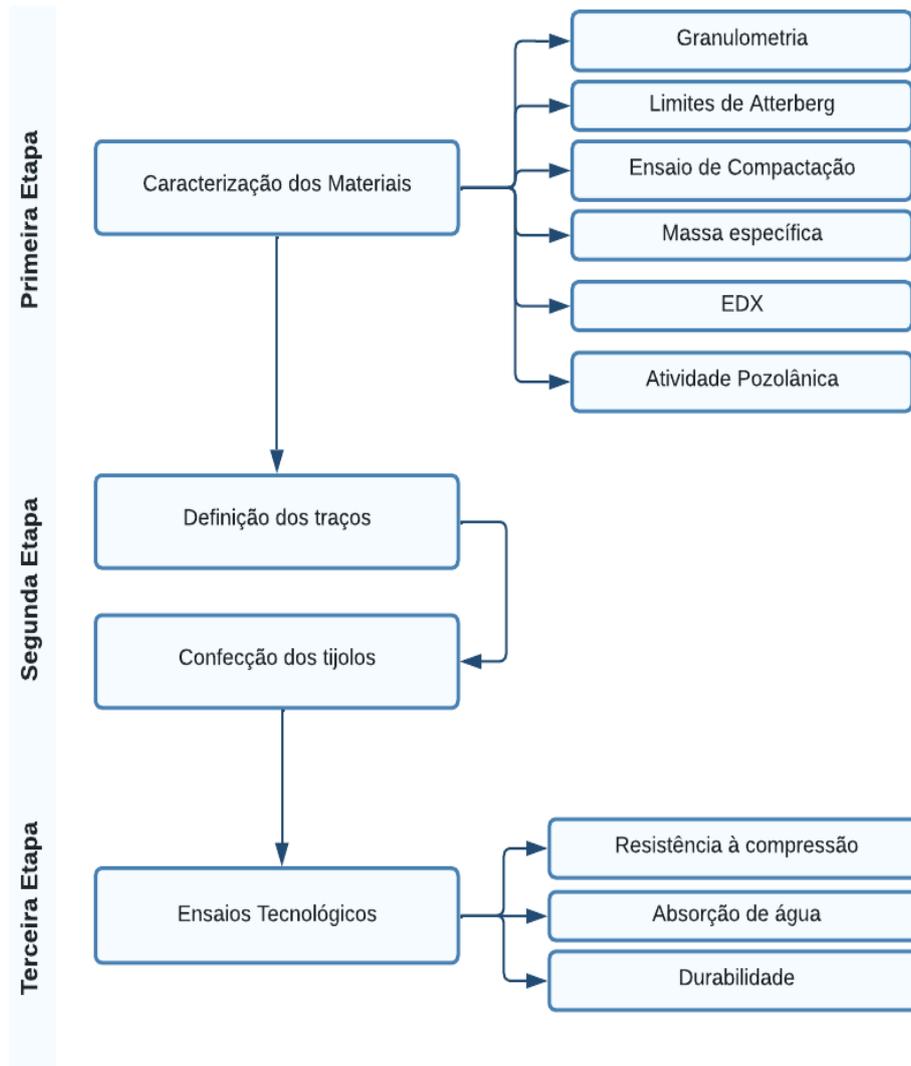
A água utilizada para confecção dos tijolos foi fornecida pela concessionária local, Águas do Paraíba

#### 3.2 MÉTODOS

A metodologia da pesquisa consistiu em três etapas. Na primeira, foi realizada a caracterização física e mineralógica dos materiais, solo e resíduo cerâmico. Em

seguida, foram determinadas as composições dos tijolos bem como os procedimentos de moldagem e cura. Por fim, os ensaios tecnológicos foram executados e analisados, conforme Figura 3-2.

Figura 3-2 - Metodologia de pesquisa



### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios realizados para a caracterização física e mineralógica foram: análise dimensional, análise granulométrica, compactação com Proctor Normal, limites de Atterberg, densidade real dos grãos e fluorescência de raios X.

### 3.2.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O ensaio de análise granulométrica é essencial para identificar a distribuição granulométrica das partículas do solo, é realizado em conformidade com a NBR 7181 (ABNT, 2016).

### 3.2.1.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO E TEOR DE UMIDADE

Conforme NBR 7182 (ABNT, 2016) e NBR 12023 (ABNT, 2012), realizou-se o ensaio de compactação para o solo bem como para os demais traços com resíduo cerâmico. O teor ideal de água utilizado nas formulações foi definido de acordo com esse ensaio.

Para Proctor (1933), a densidade do solo está relacionada à energia de compactação/compressão e ao teor de umidade no momento da compactação. O autor elucida que ao adicionar água ao solo, a densidade aparente aumenta até um dado momento, e isso se define como umidade ótima. Caso adicione água acima do teor da umidade ótima, a água absorve parte da energia de compactação e repassa para o sistema, fazendo com que as partículas sólidas se afastem. Portanto, o teor ótimo viabiliza uma lubrificação das partículas, propiciando o preenchimento de todos os vazios quando uma energia de compactação é aplicada.

### 3.2.1.3 LIMITES DE ATTERBERG (LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE)

Os ensaios foram realizados tanto para o solo quanto para as misturas com resíduo cerâmico. Para a determinação dos limites de Atterberg, foram seguidas as recomendações da NBR 6459 (ABNT, 2016) para determinação do limite de liquidez (LL) e da NBR 7180 (ABNT, 2016) para determinação do limite de plasticidade (LP). Com a diferença entre os dois limites, foi determinado o índice de plasticidade (IP), que é a medida da faixa de variação da umidade na qual o solo se comportará de maneira plástica, conforme Equação 1.

$$IP = LL - LP \quad (\text{Equação 1})$$

Tem-se: *IP* é o índice de plasticidade, *LL* é o limite de liquidez e *LP* é o limite de plasticidade.

De acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012), o limite de liquidez deve ser menor ou igual a 45% e o índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

#### 3.2.1.4 ANÁLISE MINERALÓGICA DOS MATERIAIS

O solo e o resíduo cerâmico foram submetidos ao ensaio de caracterização de espectrometria de fluorescência de raios X através do aparelho Shimadzu EDX – 700 para determinação da composição química. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil - LECIV (UENF).

#### 3.2.1.5 ATIVIDADE POZOLÂNICA

O índice de atividade pozolânica pode ser aferido por diversos métodos, indiretos e diretos. Métodos como Frattini, de Chapèlle modificado e de condutivímetro avaliam-no diretamente. Na presente pesquisa, foram realizados os métodos de Chapèlle e de condutivímetro, este último também conhecido como ensaio de Luxán. De acordo com Luxán *et al.* (1989), a atividade pozolânica pode ser determinada através da variação da condutividade elétrica de uma solução saturada, contendo 2 g de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  e 200 ml de água destilada, antes e 120 segundos após a adição de 5 g da pozolana, nesse caso o resíduo cerâmico, agitado continuamente na solução a uma temperatura de 40° C.

O material pode ser classificado conforme dados abaixo:

- Sem atividade pozolânica: < 0,4 mS/cm;
- Com atividade pozolânica moderada: entre 0,4 mS/cm e 1,2 mS/cm;
- Com boa condutividade pozolânica: > 1,2 mS/cm

O método proposto por J. Chapèlle em 1958 e modificado por Raverdy *et al.* (1980<sup>16</sup> *apud* ABNT, 2010b) é descrito na NBR 15895 - *Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapèlle modificado* (ABNT, 2010b). Nesse ensaio, a reatividade é avaliada em relação à capacidade de o material fixar cal quando mantido em solução aquosa com óxido de cálcio (CaO). A metodologia descrita pela NBR 15895 (ABNT, 2010b) baseia-se na medição da perda de  $\text{Ca(OH)}_2$  durante a reação do hidróxido de cálcio com os silicatos e aluminatos presentes nos materiais pozolânicos. O ensaio consiste em manter em agitação e

banho-maria a 90° ±5° C, durante 16 ±1 horas, uma mistura com 2 g de CaO, 1 g de material pozolânico (sílica ativa) e 250 g de água destilada isenta de CO<sub>2</sub>. O resultado é obtido através da titulação da solução com HCl 0,1 M usando fenolftaleína como indicador. Para calcular o índice de atividade, compara-se o volume gasto na solução com o resíduo cerâmico e a solução em branco.

### 3.2.2 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

Na presente pesquisa, foram estudadas 4 formulações diferentes. O primeiro traço foi utilizado como referência, enquanto os demais tiveram substituição parcial do resíduo cerâmico por solo, nas proporções de 10%, 20% e 30%, conforme demonstrado na Tabela 3-1:

Tabela 3-1 – Composição dos traços

Massa (%)				Compressão (NBR 8492)		Absorção (NBR 8492)		Durabilidade (NBR 13554)	
Id	Cimento	Solo	Resíduo cerâmico	N.º tijolos	Idades	N.º tijolos	Idades	N.º tijolos	Idades
Tr	10%	90%	-	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7
T1	10%	80%	10%	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7
T2	10%	70%	20%	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7
T3	10%	60%	30%	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7
<b>Total</b>				<b>56</b>		<b>24</b>		<b>12</b>	
				<b>92</b>					
<b>Legenda:</b> Tr é o traço de referência, T1 possui 10% de resíduo cerâmico em substituição ao solo. T2 possui 20% de resíduo cerâmico em substituição ao solo e T3 possui 30% de resíduo cerâmico em substituição ao solo.									

### 3.2.3 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Os tijolos foram moldados em concordância com a NBR 10833 (ABNT, 2012). Foram produzidos 92 tijolos no total e as misturas foram realizadas com a ajuda de um misturador. Eles foram conformados com uma prensa hidráulica, Modelo 7000 Turbo II da marca Ecomáquinas, ilustrado na Figura 3-3, que produz dois tijolos por prensagem e tem capacidade de compactação de aproximadamente 15 toneladas. Os tijolos possuem dimensões de 30 cm x 15 cm (comprimento e largura) e a altura pode variar entre 7± 1 cm. Possuem 2 furos com 5 cm de diâmetro cada e área útil de 80%.

Após a confecção, os tijolos foram transportados para a UENF e armazenados em uma câmara úmida, com auxílio de um borrifador durante 7 dias.

Figura 3-3 - Prensa Hidráulica 7000 Turbo



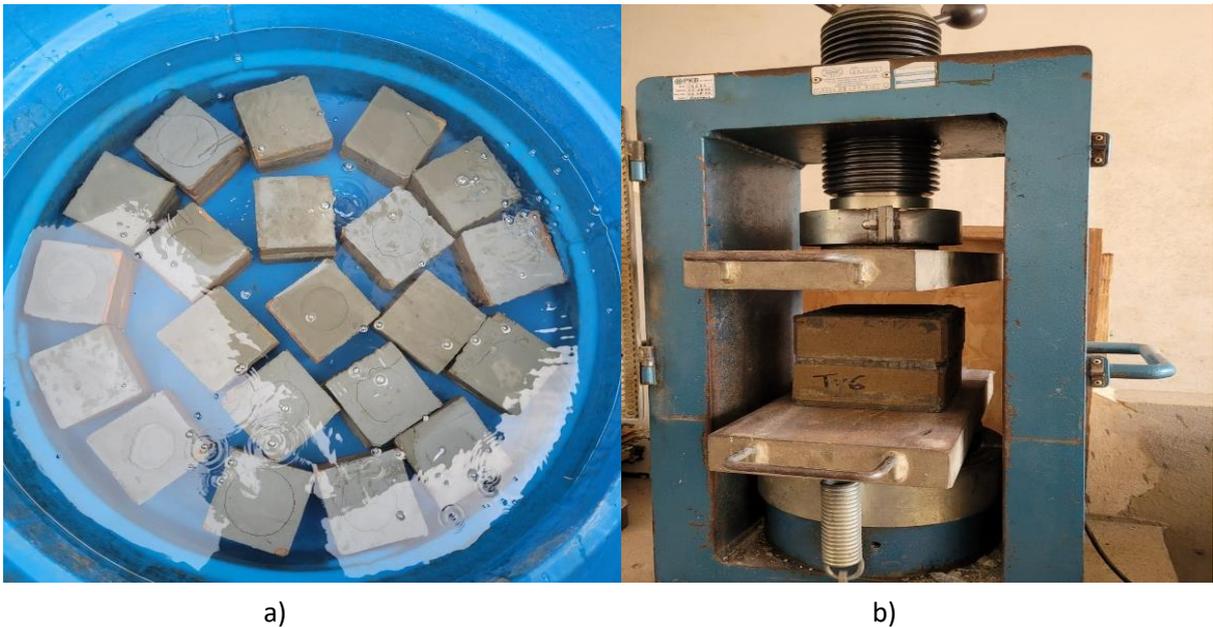
### 3.2.4 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade por imersão e secagem.

#### 3.2.4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples dos tijolos foram realizados aos 7 e 28 dias e foram utilizadas 7 amostras de cada traço, de acordo com o primeiro planejamento experimental. Os tijolos foram medidos com auxílio de um paquímetro, conforme NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012). Foram cortados ao meio no sentido transversal com auxílio de uma serra elétrica e as entranças foram retiradas, como solicita a NBR 8192 (ABNT, 2012). Após essa etapa, os corpos de prova foram capeados e colados ao meio com uma nata do mesmo cimento utilizado na confecção dos tijolos. Após o capeamento, os tijolos ficaram submersos por 6 h antes do rompimento. O rompimento das amostras foi realizado na máquina SOLOTEST com célula de carga 10.000 Kg, de acordo com NBR 8491 e NBR 8492 (ABNT, 2012), conforme Figura 3-4.

Figura 3-4 - Etapas do ensaio de resistência: Submerso em água (a) e Máquina Solotest (b)



### 3.2.4.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de absorção de água foi realizado aos 7 dias após a cura das amostras de acordo com o segundo planejamento experimental, sendo utilizados 3 tijolos para cada traço. Os tijolos foram pesados e armazenados em estufa até atingirem massa constante em temperatura aproximada de 105 °C. Em seguida, foram pesados novamente a fim de obter a massa seca, e imersos em água por um período de 24 h consecutivas e, logo após, retirados da imersão e pesados para aferir a massa úmida, as etapas estão ilustradas na Figura 3-5. Por fim, foi calculado o percentual de absorção de água dos tijolos, tudo de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012), conforme a Equação 2:

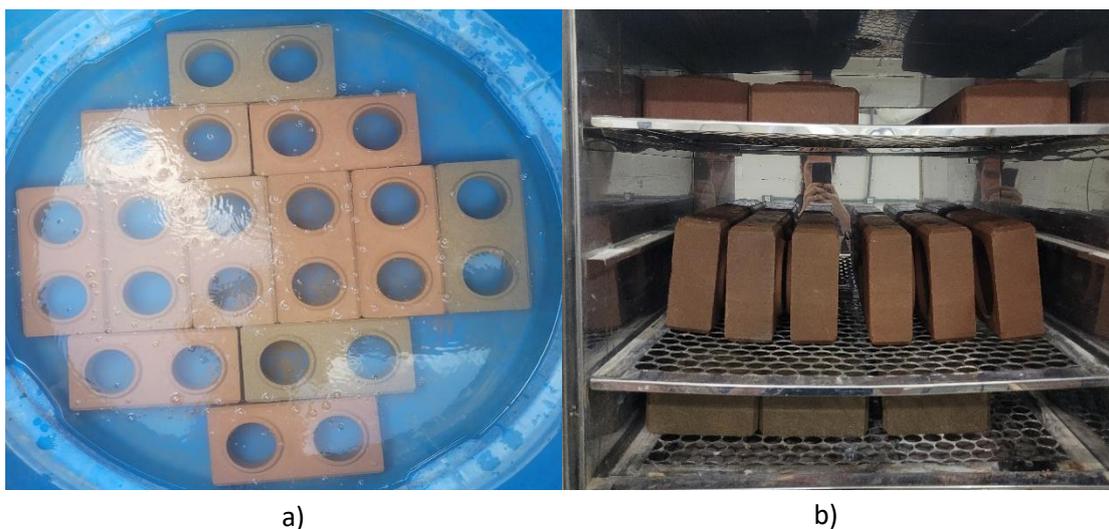
$$A (\%) = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

A: absorção de água (%);

$m_1$ : massa do corpo de prova seco em estufa (g);

$m_2$ : massa do corpo de prova saturado (g).

Figura 3-5 – Etapas do ensaio de absorção: Tijolos submersos (a) e Tijolos na estufa (b)



#### 3.2.4.3 ENSAIO DE DURABILIDADE MODIFICADO

Os ensaios de durabilidade por imersão e secagem foram iniciados aos 7 dias de cura das amostras. O ensaio foi realizado conforme recomendações da NBR 13554 (ABNT, 2012), havendo modificações em concordância com DNER-ME 203/94. A norma prescreve 6 ciclos com 5 h de molhagem e 42 h de secagem em estufa com temperatura de  $71 \pm 2$  °C com escovação entre os ciclos, utilizando escova de aço. Não foi necessária a escovação das amostras, pois, de acordo com Grande (2003), essa etapa não é imprescindível para tijolos utilizados nas obras de construção civil, haja vista que as solicitações de abrasão superficial a que são submetidos são menos rigorosas que as constatadas para fins rodoviários. O ciclo teve duração de 12 dias.

### 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizada a Análise de Variância para verificar se há diferença significativa entre os resultados obtidos. As diferenças estatísticas foram comprovadas por meio da realização do teste de comparação de médias, pelo método de Tukey ( $p < 0,05$ ). Utilizou-se o delineamento experimental DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado) para as variáveis analisadas: resistência à compressão e absorção de água (7 e 28 dias de cura), 7 tijolos por composição para o ensaio de resistência, e 3 tijolos por composição no ensaio de absorção a água. Já para a durabilidade, foram utilizadas três repetições para cada tratamento para 0, 10%, 20% e 30%.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais desenvolvidos para a realização deste trabalho.

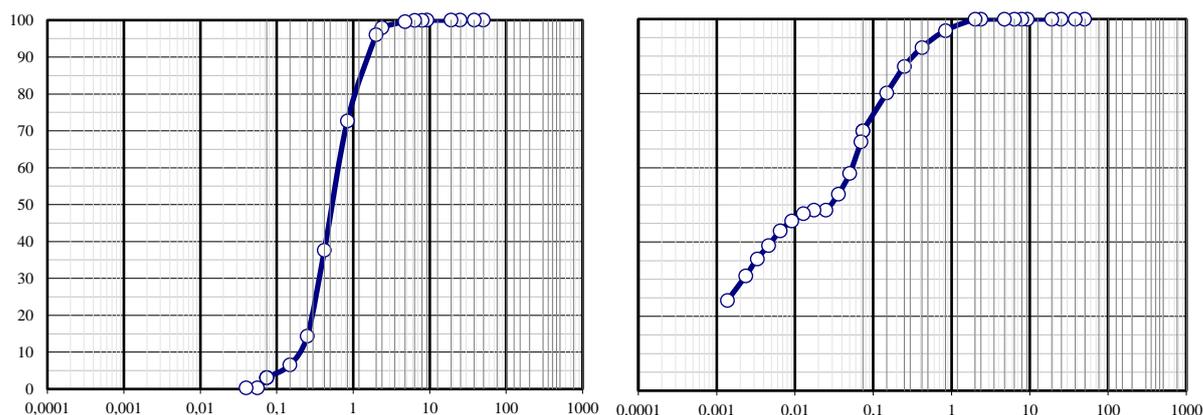
### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

##### 4.1.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica realizada no solo coletado evidenciou em sua composição as seguintes frações: 37% de areia, 34% de silte e 29% de argila, conforme apresentado na Figura 4-1

Figura 4-1 – Curva granulométrica da areia coletada e do solo coletado, respectivamente



Apesar do material atender as prescrições da NBR 10833 (ABNT, 2012), onde o solo deve ser 100% passante na peneira 4,8 mm (nº 4) e 10% a 50% passante na peneira 0,075 mm (nº 200), ele não atende as recomendações da ABCP (2000), que recomenda uma distribuição granulométrica com teor de argila entre 10 e 20%, fração silte de 10 a 20% e fração areia entre 50 e 70%.

Em estudo realizado por Silva (2022), a adição de 30% de areia, de granulometria com as seguintes proporções: 95% de areia, onde 6% é areia fina, 47% são média e 42% é grossa, além de 4% de pedregulho e 1% de silte, em substituição de um solo com 60% de finos (silte e argila) e 40% de areia, resultou em uma curva ideal para fabricação dos tijolos e com maior empacotamento de partículas. Como o solo não atendeu as recomendações da ABCP, foi necessário realizar a correção

granulométrica, seguindo os parâmetros de Silva (2022) para atingir a curva teórica ideal.

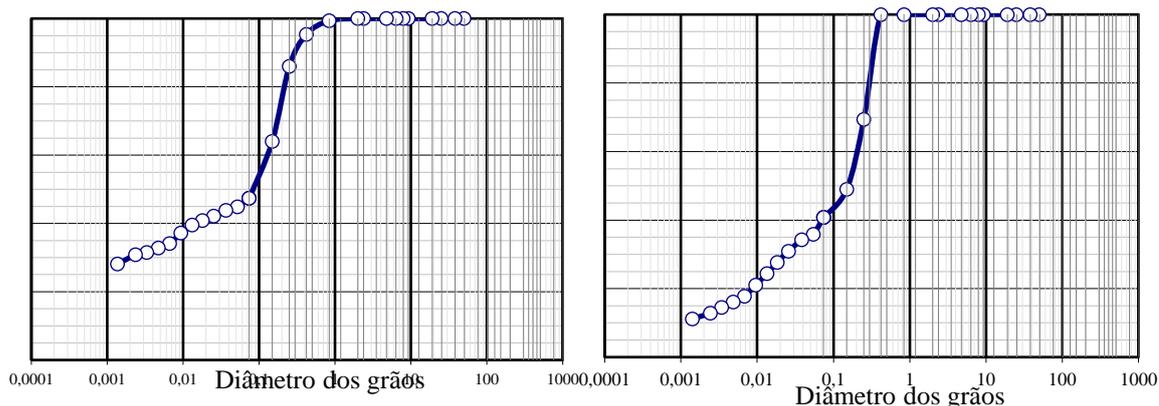
A Tabela 4-1 apresenta a curva granulométrica do solo corrigido utilizado na confecção dos tijolos de solo-cimento e do resíduo cerâmico. O solo possui percentual de 54,2% de areia, 16,0% de silte e 29,8% de argila, sendo considerado um solo areno-argiloso conforme NBR 6505 (ABNT, 1955).

Tabela 4-1 - Granulometria dos materiais

Traço	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo	54,2	16,0	29,8
Resíduo cerâmico	62,68	25,17	12,15

Um solo arenoso pode contribuir para o aumento da resistência e redução da absorção de água. Isso ocorre porque ele é inerte na reação de hidratação do cimento, agindo apenas como um enchimento, permitindo que uma maior quantidade de cimento seja liberada para aglomerar os grãos menores (Segantini, 2000). A distribuição granulométrica do solo com a adição de 30% de areia, pode ser observada na Figura 4-2.

Figura 4-2 - Granulometria do Solo padrão e resíduo cerâmico



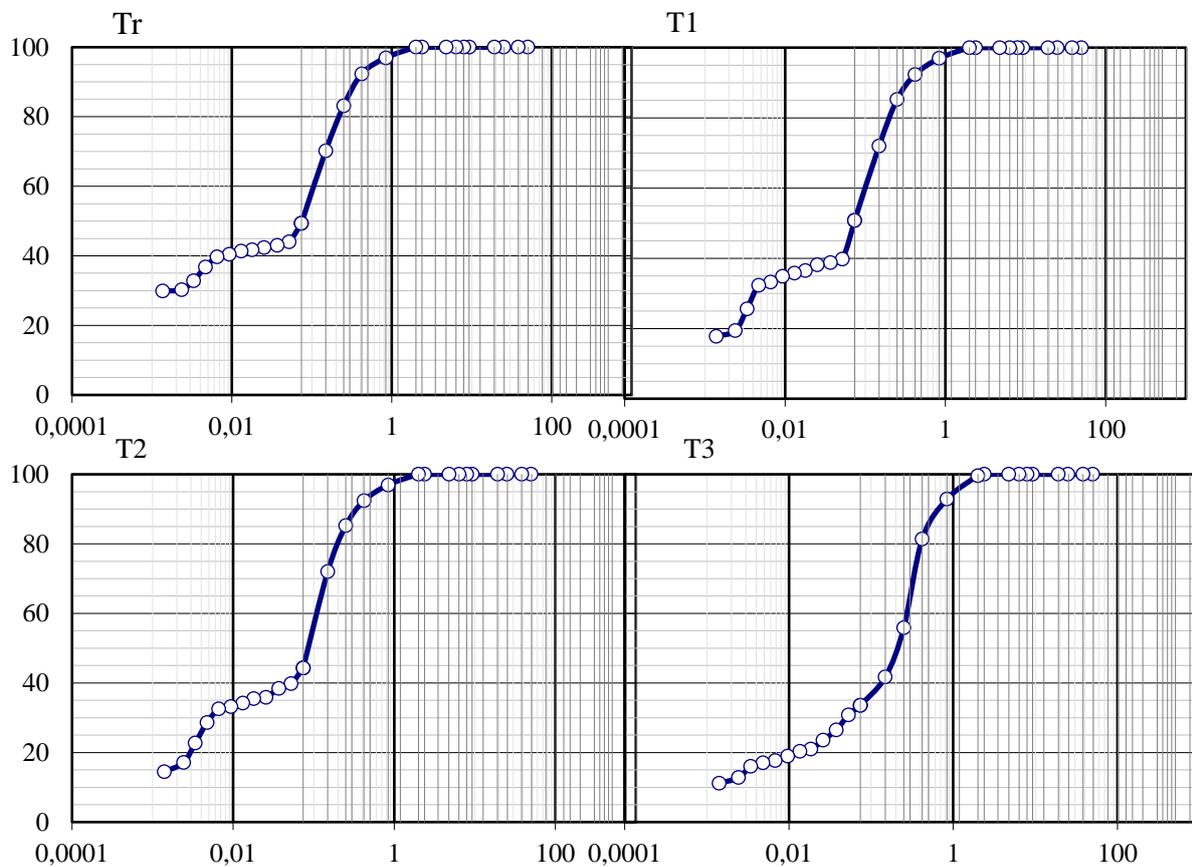
A Tabela 4-2 apresenta os valores de granulometria obtidos para as misturas de solo com resíduo cerâmico, e a Figura 4-3 apresenta a curva granulométrica.

Tabela 4-2 Granulometria dos traços definidos

Traço	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Tr	54,2	16,0	29,8
T1	56,5	24,1	19,4
T2	59,1	25,9	16
T3	68,6	19,3	12,1

As curvas granulométricas das respectivas misturas podem ser observadas nas Figura 4-3.

Figura 4-3 – Curva granulométrica dos traços



#### 4.1.1.2 TEOR DE UMIDADE

Os resultados de massa específica aparente seca e umidade ótima do solo de referência das misturas com incorporação de resíduo cerâmico (10%, 20% e 30%) são demonstrados na Tabela 4-3.

Os resultados obtidos indicaram que, à medida que a quantidade de resíduo aumentou, houve um aumento na umidade ótima de compactação e uma diminuição na massa específica aparente.

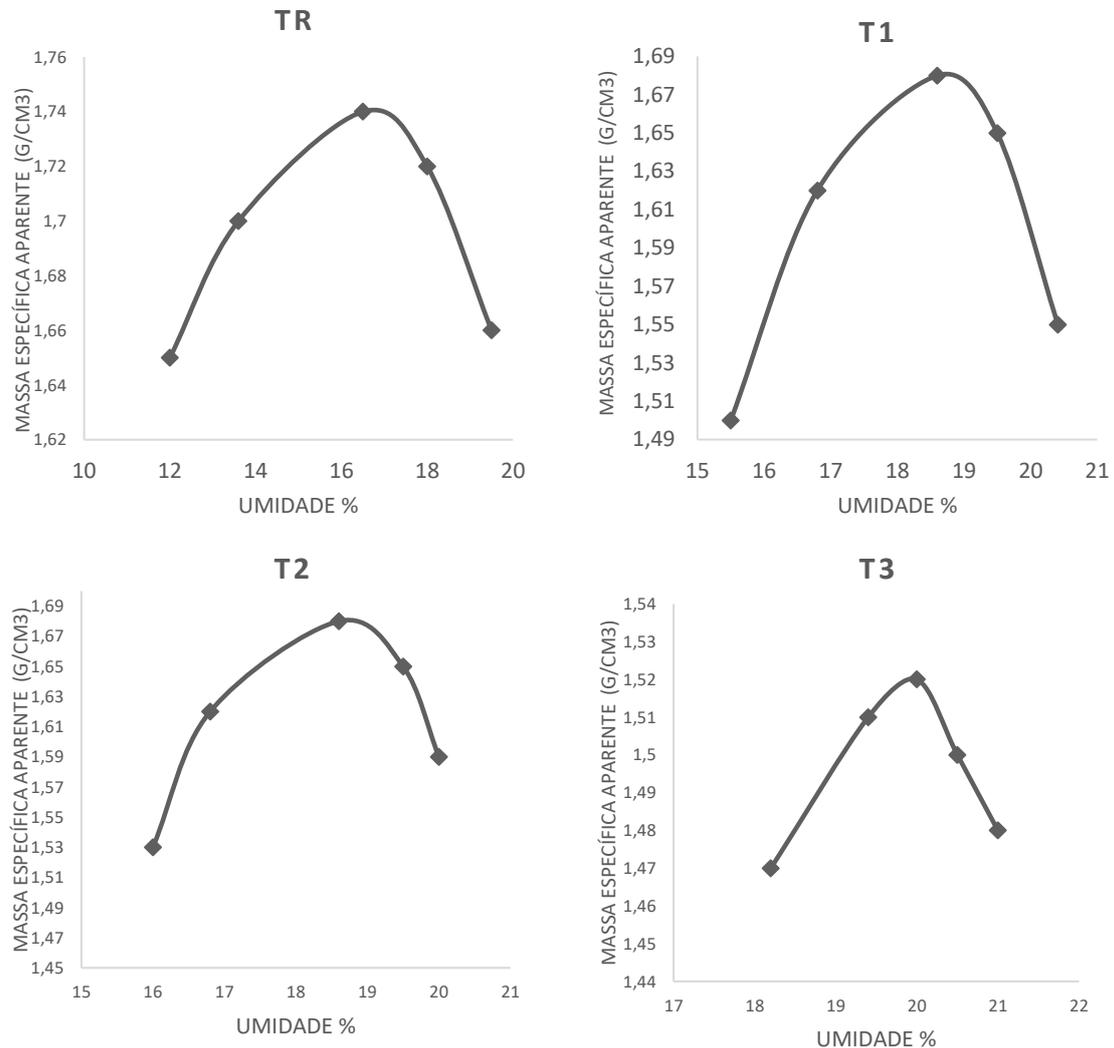
Tabela 4-3 - Teor de umidade e densidade máxima

<b>Traço</b>	<b>Massa específica aparente seca (g.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>
Tr	1,74	16,5
T1	1,68	18,6
T2	1,59	19,1
T3	1,52	20,0

O resíduo cerâmico não possui propriedades plásticas, a adição de água durante o processo de compactação o que resultou em uma diminuição da massa específica, conforme observado na Figura 4-4.

Akinyele e Ajede (2018), observaram em seus estudos que o aumento da água faz com que a trabalhabilidade diminua, o que está diretamente relacionado com a resistência de compactação.

Figura 4-4 – Ensaio de compactação Proctor Normal



#### 4.1.1.3 LIMITES DE ATTERBERG

Conforme estabelecido pela NBR 10833 (ABNT, 2012), para tijolos de solo-cimento o limite de liquidez deve ser igual ou inferior a 45% e o Índice de Plasticidade menor ou igual a 18%.

Os resultados obtidos atendem às recomendações da norma, e está compatível com estudos realizados por Murmu e Patel (2018) e Ferreira *et al.* (2018), os quais sugerem que o índice de plasticidade deve estar entre 15% e 25%.

Como apresentado na Tabela 4-4, os resultados demonstram uma redução nos valores dos limites à medida que o resíduo foi adicionado.

Tabela 4-4 – Limites de Atterberg

	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
Resíduo	N/P	N/P	N/P
TR	41,9%	20,1%	21,80%
T1	36,7%	19,3%	17,4%
T2	35,6%	18,4%	17,2%
T3	33,6%	18,1%	15,5

Isso se deve ao fato de o resíduo cerâmico ser considerado um material não plástico e conforme sua adição foi aumentando, houve também a necessidade de adicionar mais água à mistura para que ela alterasse seu estado plástico.

#### 4.1.1.4 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

A massa específica real dos grãos da amostra de solo foi determinada através da picnometria, o valor de  $2,69 \text{ g.cm}^{-3}$  foi obtido. Já a massa específica do resíduo cerâmico foi de  $2,72 \text{ g.cm}^{-3}$ . De acordo com estudos realizados por Siqueira *et al.* (2016), esse valor pode variar em média de  $2,40 \text{ g.cm}^{-3}$  a  $4,3 \text{ g.cm}^{-3}$ , dependendo da composição do solo. Portanto, o resultado obtido está dentro da faixa estabelecida por Siqueira (2016).

#### 4.1.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

A composição química dos materiais utilizados é apresentada na Tabela 4-5. Pode-se observar nos resultados obtidos que há elevado teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e baixo teor de óxidos fundentes ( $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ), o que pode caracterizá-los como material oriundo de argila caulinítica. Já o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  lhes confere a cor avermelhada (Vieira *et al.*, 2004). O autor também afirma que a presença de caulinita sugere que a temperatura de queima não foi superior a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A composição química do resíduo cerâmico é similar à composição do solo, em comparação aos óxidos de silício, ( $\text{SiO}_2$ ), de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), devido ao resíduo ser oriundo da queima de uma massa também argilosa.

Tabela 4-5 – Espectroscopia de raios-X

Composição (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	MnO
Solo	47,423	33,216	10,172	1,906	5,888	1,938	1,105	0,127
Resíduo cerâmico	51,488	33,776	8,675	1,523	2,424	1,353	0,555	

#### 4.1.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA

O ensaio de atividade pozolânica foi realizado através do Método de Luxán no Laboratório de Engenharia Civil. Para que o material seja pozolânico, o resultado dever ser maior que 1,2 mS/cm; o valor obtido foi de 0,76 (mS/cm), conforme apresentado na Tabela 4-6, sendo considerado de média pozolanicidade.

Tabela 4-6 – Ensaio de Luxán

Antes da adição do resíduo cerâmico	Após a adição do resíduo cerâmico	Índice de Atividade Pozolânica
6,805 (mS/cm)	6,045	0,76

A determinação da atividade pozolânica realizada através do Método Chapelle modificado foi realizada no Laboratório Wilson Antônio Gazotti – UENF. Conforme NBR 15895/2012, o material é considerado de baixa pozolanicidade quando o consumo é abaixo de 330mg CaO/g. O resíduo cerâmico apresentou um valor de 197,00 mg CaO/g na amostra, logo, pode-se concluir que se trata de um material sem ou baixa atividade pozolânica.

Realizou-se os ensaios de atividade pozolânica, conforme ilustra a Figura 4-5, para verificar a possibilidade de reduzir o teor de cimento na produção de tijolos. De posse dos resultados e constatando a ausência de atividade pozolânica, entende-se que o resíduo cerâmico desempenhará a função de preencher os vazios, proporcionando um melhor grau de empacotamento das partículas.

Figura 4-5 – Etapas do ensaio de Chapelle



## 4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

### 4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os tijolos de solo-cimento com incorporação do resíduo cerâmico foram submetidos ao ensaio de resistência simples à compressão, conforme NBR 8492 (ABNT, 2012). Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 4-7. É possível observar que todos os tijolos atendem à norma supracitada, que preconiza o mínimo de 1,7 MPa individual e média de 2 MPa. Já a NBR 13553 (ABNT, 2012) estabelece o mínimo de 1 MPa para materiais utilizados na construção de paredes de solo-cimento sem funcionalidade estrutural. Após análise, pode observar que as composições apresentaram valores médios acima das normas relacionadas, assim como aumentaram a resistência do sétimo para o vigésimo oitavo dia.

Tabela 4-7 – Valores médios de resistência à compressão dos corpos de prova

Traço	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
Tr	2,25 ( $\pm 0,32$ )	2,70 ( $\pm 0,24$ )
T1	1,90 ( $\pm 0,22$ )	2,15 ( $\pm 0,38$ )
T2	2,18 ( $\pm 0,36$ )	2,43 ( $\pm 0,29$ )
T3	1,87 ( $\pm 0,21$ )	1,99 ( $\pm 0,29$ )

É possível observar que aos 28 dias de cura, todos os traços aumentaram sua resistência. O T2 obteve um ganho de 11,46% aos 28 dias em relação à cura de sete dias. A composição T2 apresentou a maior média para 7 e 28 dias em comparação com os demais traços com substituição de solo por resíduo cerâmico, o que pode ser justificado pela melhor distribuição granulométrica e provocando maior empacotamento das partículas. Para Silva *et al.*, (2014), o aumento da resistência nesse traço pode ser explicado pelo efeito do empacotamento das partículas. Aos 7 dias de cura os tijolos fabricados apresentaram valores que não diferiram estatisticamente entre si, conforme Tabela 4-8.

Tabela 4-8 – Anova para resistência aos 7 dias de cura

FV	GL	SQ	QM	F Tabelado	F calculado	Teste
Tratamentos	3	0,7222	0,2407	F (3,24) = 2,916	0,0549	Insignificante
Resíduo	24	1,981	0,08256	-	-	-
Total	27	2,704	-	-	-	-

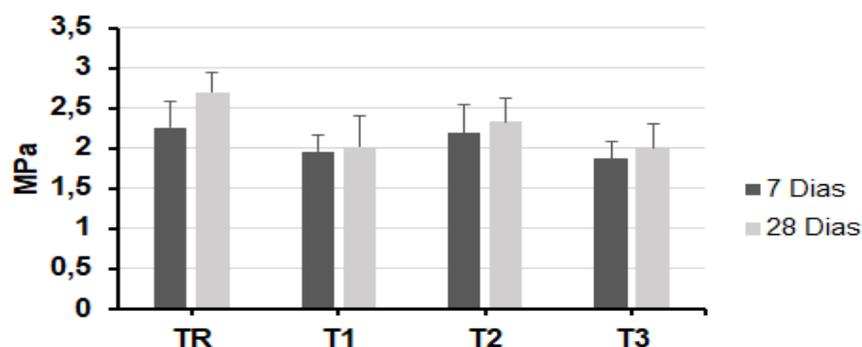
Na Tabela 4-9 é possível observar que há diferença significativa entre as os valores. A redução de resistência no T3, pode ser atribuída a desestabilização granulométrica da matriz. Para José e Kasthurba (1991) a resistência à compressão atribuída aos tijolos de solo-cimento é decorrente da união das partículas de solo e do preenchimento dos vazios no tijolo, ou seja, um empacotamento dos grãos do solo que é totalmente influenciado pela compactação aplicada.

Tabela 4-9 - Anova da resistência aos 28 dias de cura

FV	GL	SQ	QM	F Tabelado	F calculado	Teste
Tratamentos	3	2,225	0,7418	F (3,24) = 7,985	0,0007	Significante
Resíduo	24	2,230	0,09290	-	-	-
Total	27	4,455	-	-	-	-

Através da Figura 4-6 é possível comparar os valores de resistência à compressão simples. Nota-se um ganho de resistência aos 28 dias de cura, em todas as composições.

Figura 4-6 - Valores médios do ensaio de resistência à compressão



#### 4.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de absorção de água foi realizado para cada composição dos tijolos aos 7 e 28 dias. Os resultados deste ensaio não devem apresentar média dos valores maior que 20% e individuais superiores a 22%, de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012). É possível observar na Tabela 4-10 que todos os traços atendem à norma referida.

Tabela 4-10 - Absorção de água

Traços	Cura	
	7 dias	28 dias
Tr	17,73% ( $\pm 1,01$ )	17,32% ( $\pm 4,27$ )
T1	19,11% ( $\pm 0,78$ )	19,16% ( $\pm 0,78$ )
T2	19,85% ( $\pm 0,36$ )	19,69% ( $\pm 0,28$ )
T3	18,72% ( $\pm 0,21$ )	18,66% ( $\pm 0,29$ )

É possível na Tabela 4-11, que a análise da absorção de água nos tijolos aos 7 dias de cura demonstra que não houve diferença significativa entre as misturas ( $p < 0,05$ ). A mistura T3 apresentou uma redução na absorção em comparação com as demais composições, T1 e T2, o que pode ser justificado pelo maior teor de finos na mistura, preenchendo vazios, gerando um produto mais denso e com menor absorção à água.

Tabela 4-11 - Anova Absorção para 7 dias de cura

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F Tabelado</b>	<b>F calculado</b>	<b>Teste</b>
Tratamentos	3	28,64	9,546	F (3,8) = 3,804	0,0580	Insignificante
Resíduo	8	20,07	2,509	-	-	-
Total	11	48,71	-	-	-	-

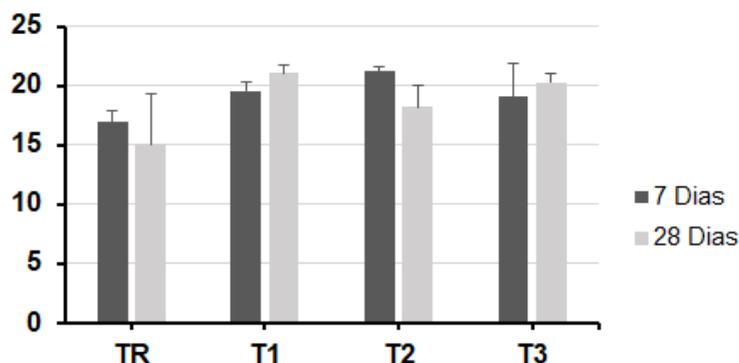
Pode-se observar na Tabela 4-12, a análise da absorção de água nos tijolos aos 7 dias de cura que não houve diferença significativa entre as misturas ( $p < 0,05$ ).

Tabela 4-12 - Anova Absorção para 28 dias de cura

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F Tabelado</b>	<b>F calculado</b>	<b>Teste</b>
Tratamentos	3	64,12	21,37	F (3,8) = 3,763	0,0595	Insignificante
Resíduo	8	45,44	5,680	-	-	-
Total	11	109,6	-	-	-	-

Para Kasinikota *et al.* (2021), a absorção de água aumenta à medida que aumenta a porcentagem de resíduos cerâmicos nos tijolos, o que pode ser verificado no presente trabalho nas composições T1 e T2. A Figura 4-7 ilustra os resultados comparativos para os 7 e 28 dias de cura.

Figura 4-7 - Valores médios de absorção de água de todos os traços aos 7 e 28 dias



Reddy e Latta (2014) observaram um aumento na absorção de água quando substituíram um solo com pó de pedra arenoso por um pó de pedra com fração maior de silte.

Para Amaral (2016), Llajaruna (2016) e Junior (2011), a resistência mecânica está intrinsicamente ligada a absorção de água, relacionando que quanto maior a resistência mecânica, menor é a absorção de água, os resultados apresentados corroboram com os autores, onde o T2 que atingiu a maior resistência à compressão simples, também obteve a menor absorção de água aos 28 dias.

#### 4.2.3 DURABILIDADE MODIFICADO

O ensaio de durabilidade modificado por ciclos de molhagem e secagem foi executado em doze ciclos após os sete dias de cura. Todos os traços apresentaram valores de perda de massa abaixo de 10%, de acordo com o prescrito na NBR 13554 (ABNT, 2012), conforme Tabela 4-13.

Tabela 4-13 - Valores do ensaio de Durabilidade

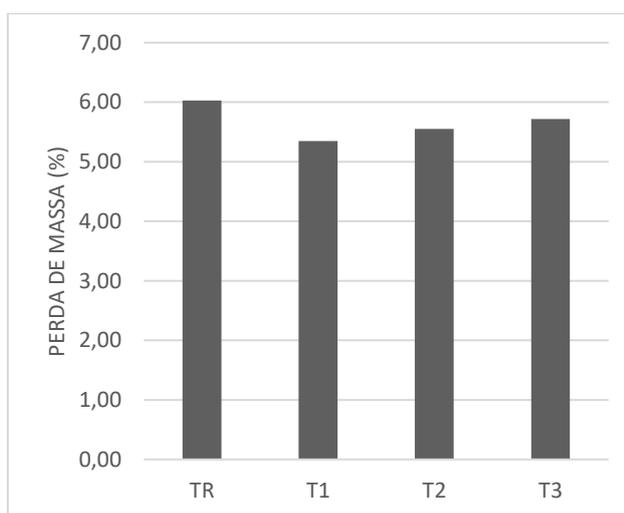
Teor	Perda de Massa
Tr	6,03 (± 0,31) A
T1	5,35 (± 0,20) A
T2	5,55 (± 0,17) A
T3	5,72 (± 0,28) A

Valores seguidos de mesma letra, maiúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste *Tukey*.

Para Silva *et al.* (2014), baixos valores de perda de massa podem estar relacionados a uma boa compactação, proporcionando melhor estabilização mecânica e estabilização química, esta última devido às reações cimentícias.

Para Kasinikota *et al.* (2021), tijolos com incorporação de resíduo cerâmico até 24% em substituição do solo, não comprometem o desempenho mecânico e durabilidade dos tijolos. Todas as composições atenderam o recomendado pela norma vigente, conforme ilustrado na Figura 4-8, sendo o T1 com menor perda de massa, o que pode estar relacionado ao melhor grau de empacotamento das partículas.

Figura 4-8 - Valores de durabilidade



Santos C. M. *et al* (2023), avaliaram a durabilidade para diferentes teores de cimento, e notaram que à medida que o teor de cimento aumentava, chegando a 12,5%, menor era a perda de massa, as amostras do presente trabalho não ultrapassaram o teor de 10% de cimento. Souza *et al* (2021), observaram que para amostras com densidades aparentes maiores e melhor compactação, possuem menor perda de massa. Os baixos valores de perda de massa podem estar relacionados ao baixo valor de absorção de água e uma compactação bem executada, reduzindo a porosidade e números de vazios da mistura.

## 5 CONCLUSÃO

Fundamentado nos resultados experimentais obtidos nessa pesquisa, pode ser concluído que:

- De acordo com a caracterização dos materiais, o solo obteve os parâmetros requeridos para a utilização em tijolos de solo-cimento. Quimicamente, o solo foi composto por sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Fisicamente, o solo foi considerado arenoso.
- A análise da composição química do resíduo cerâmico revelou uma predominância de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e uma quantidade substancial de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de potássio ( $\text{CaO}$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), com teores semelhantes aos encontrados no solo. Esses resultados evidenciam a viabilidade da substituição desse material, reduzindo a necessidade de utilização de recursos naturais.
- A incorporação de resíduo cerâmico, em substituição parcial ao solo na mistura de solo-cimento para fabricação de tijolos, demonstrou que todas as composições satisfizeram os requisitos normativos de resistência à compressão simples, absorção à água e durabilidade. Embora a composição T2 tenha apresentado uma média de resistência superior às demais, tanto aos 7 quanto aos 28 dias de cura, a composição T3, sob uma perspectiva ambiental, também atende às normativas e incorpora um volume maior de resíduo, tornando-o um produto com menor impacto ambiental em comparação com as demais composições.
- Todos os tijolos conformados apresentaram absorção de água abaixo dos 20% estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), bem como durabilidade no que preconiza as normas vigentes.
- Do ponto de vista técnico a substituição do solo por resíduo cerâmico se mostra viável para produção de tijolos de solo-cimento em substituições de até 30%. Da perspectiva ambiental, tem-se a grande vantagem de redução da utilização do solo, dando destinação final a um passivo ambiental da indústria ceramista.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Aumentar a porcentagem de resíduo cerâmico em substituição do solo concomitante variando a quantidade de cimento e avaliar as propriedades tecnológicas, atingindo, assim, a máxima substituição a ser incorporada dentro dos requisitos da NBR 10834 (2013).
2. Variar a granulometria do resíduo cerâmico, utilizando-o como agregado miúdo, variando o diâmetro dos grãos em função do tempo de moagem, com potencial de obter um produto com maior empacotamento de partículas.
3. Analisar a cromaticidade dos tijolos com resíduo cerâmico em função do tempo e verificar os benefícios na economia com pintura.
4. Aferir a energia necessária de moagem do resíduo através do Ensaio Los Angeles;
5. Investigar traços que atendam aos requisitos de conforto térmico e acústico para tijolos de solo-cimento.

## REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002) Guia básico de utilização do cimento Portland. BT-106, 7. ed., São Paulo. 28p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) Solo – Ensaio de compactação. NBR 7182. Rio de Janeiro.

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

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

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. NBR 10833. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) Solo – Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017) Solo – Determinação do limite de liquidez. NBR 6459. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018) Solo – Análise granulométrica. NBR 7181. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b), NBR 15895 - Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 12653/2014 – Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014 (Revisão 2015).

ABRAINC, Construção abre 2523,8 mil vagas de emprego formal no acumulado **do ano**, ABRAINC 28 de novembro de 2023, <https://www.abrainc.org.br/empregos/>

Akinwumi, I. I., Ojuri, O. O., Edem, D., & Ogbiye, A. S. (2016). Sawdust stabilization of lateritic clay as a landfill liner to retain heavy metals. In *Geo-chicago 2016* (pp. 478–487).

Alam, D., Singh, S. Incinerated municipal solid waste bottom ash bricks: A sustainable and cost-efficient building material Pravez <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.346>

Ali, N., Yaacob, K. Y., Khairy, M., Shahidan, S., & Abdullah, S. (2016). Investigation of compressed earth brick containing ceramic waste. 11, 5459–5462.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S., A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, , v. 15, n. 5, p. 2252-2261, 2011.

Al-Jabri, K. S., Hago, A. W., Baawain, M., & Sthapit, G. (2017). Properties of soil-cement blocks manufactured using produced water from oil fields: a preliminary investigation. *GEOMATE Journal*, 13(35), 66–72.

Amaral, M. C. (2016) Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo de lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Andrade, H. M. V. de A., Morais, L. P., & Moraes, I. A. (2021). Tecnologias sociais para políticas públicas de habitação no Brasil: potencialidades identificadas em experiências recentes. *Revista Brasileira de Economia Social e Do Trabalho*, 3, 1–18.

Azevedo, A. R. G., Marvila, T. M., Júnior Fernandes, W., Alexandre, J., Xavier, G. C., Zanelato, E. B., Cerqueira, N. A., Pedroti, L. G., & Mendes, B. C. (2019). Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks. *Journal of Building Engineering*, 23, 334–340. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.02.012>

Bueno, B. de S., & Vilar, O. M. (1999). *Mecânica dos solos*.

Campos, R. F. F., Weber, E., & Borga, T. (2017). Análise da eficiência do tijolo ecológico solo-cimento na construção civil. *IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação*.

CARNEIRO, A. P., Brum, I. A. S., & Cassa, J. C. S. (2001). Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção—Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA.

Corrêa, A. A. R., Teixeira, V. H., Lopes, S. P., & Oliveira, M. S. de. (2006). Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do adobe (tijolo de terra crua). *Ciência e Agrotecnologia*, 30(3), 503–515. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000300017>

Dallacort, R., Lima Júnior, H. C., Willrich, F. L., & Barbosa, N. P. (2002). Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6, 511–518.

Dulal, P., Maharjan, S., Timalsina, M. P., Maharjan, Y., Giri, A., & Tamang, A. (2023). Engineering properties of cement-stabilized compressed earth bricks. *Journal of Building Engineering*, 77, 107453. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107453>

Elahi, T., Shahriar A., Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122367>

Estabragh, A. R., Jahani, A., Javadi, A. A., & Babalar, M. (2022a). Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 160–170.

Ferreira, D., Luso, E., & Cruz, M. (2018). Blocos ecológicos de solo-cimento com incorporação de resíduos. REHABEND 2018-CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND HERITAGE MANAGEMENT.

Ferreira, R. de C. & Ananda H. N. Cunha, Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p543-549>

Filho, R., Souza M. J., Ecological bricks produced from scheelite residue, stone powder, and cassava wastewater for nonstructural masonry <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5237>

Fraga, Y. S. B., Barbosa, A. Q., Santos, L. H. P., Mota, W. V., & Dortas, I. S. (2016). Tecnologia dos materiais: a utilização do tijolo de solo-cimento na construção civil. *Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-Unit-Sergipe*, 3(3), 11.

França, B. R., Azevedo, A. R. G., Monteiro, S. N., Garcia Filho, F. D. C., Marvila, M. T., Alexandre, J., & Zanelato, E. B. (2018). Durability of Soil-Cement Blocks with the

Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble. *Materials Research*, 21(suppl 1), e20171118. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-1118>

G. Araya-Letelier F.C. Antico , Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>

Gandia, R. M., Campos, A. T., Corrêa, A. A. R., & Gomes, F. C. (2018). Energy costs comparison of masonry made from different materials. *Theoretical and Applied Engineering*, 2(1).

Geraldo Filho, P. R., Erbs, A., Romano, C. A., Carvalho, K. Q. de, & Nagalli, A. (2022). Índices de geração de resíduos sólidos em uma obra portuária. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 27, 1089–1096.

Gomes, A. C. F., Aplicação de rejeito de mineração de ouro na produção de tijolo de solo-cimento [recurso eletrônico].pdf. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais,

Gomes, C. (2002), “Argilas: Aplicações na Indústria”, Aveiro

Gomes, C. P., Leite, G. U., Sena, R. W. R., & Andrade, E. M. G. de. (2021). Impact and Solid Waste Management Arising from Civil Construction in Brazil: A Literature. <https://doi.org/10.14295/online.v15i55.3108>

Gomes, J. W. (1980). Tijolos de solo-cimento—solução para o problema habitacional de países em desenvolvimento. *Adendo Complementar Ao Trabalho*.

Gouveia, F. P., & Sposto, R. M. (2009). Grog incorporation in ceramic mass for the manufacture of bricks: a study of the physical-mechanical properties. *Cerâmica*, 55, 415–419.

Hidalgo, C., Carvajal, G., & Muñoz, F. (2019). Laboratory evaluation of finely milled brick debris as a soil stabilizer. *Sustainability*, 11(4), 967.

<https://doi.org/10.3390/ma14123279>

Jayasinghe, C., Fonseka, W. M. C. D. J., & Abeygunawardhene, Y. M. (2016). Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. *Construction and Building Materials*, 102, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.136>

Jordan, R. A., Costa, M. V. Da, Martins, E. A. S., Rosa, M. A., & Petruski, A. (2019). MANUFACTURE OF SOIL-CEMENT BRICKS WITH THE ADDITION OF SUGARCANE BAGASSE ASH. *Engenharia Agrícola*, 39(1), 26–31. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n1p26-31/2019>

José A, A.K. Kasthurba Laterite soil-cement blocks modified using natural rubber latex: Assessment of its properties and performance, *Construction and Building Materials*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121991>

JÚNIOR, D. S. N. (2016) Produção de blocos prensados e de encaixe com pó de pedra do beneficiamento de rochas calcárias. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Kasinikota, P., & Tripura, D. D. (2021). Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste. *Construction and Building Materials*, 280, 122520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122520>

KATS, G., BRAMAN, J., & JAMES, M. (2010). Tornando nosso ambiente construído mais sustentável: custos, benefícios e estratégias. São Paulo: IslandPress.

Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719–734.

LLAJARUNA, M. A. V. (2016) Estudo do solo-cimento autoadensável para a fabricação de tijolos de mármore e resíduo de construção. Dissertação (Engenharia civil) Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, 75p

Luhar, I.; Luhar, S.;Abdullah, M.M.A.B.; Nabiałek, M.;Sandu, A.V.; Szmidla, J.;Jurczyńska,A.; Razak, R.A.; Aziz, I.H.A; Jamil,N.H.; *et al.* Assessment of the Suitability of CeramicWaste in Geopolymer Composites: Na Appraisal. *Materials* **2021**, 14, 3279.

Mansour, M. Ben, Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. Ben. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 4, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.12.024>

Matias, G., Faria-Rodrigues, P. & Torres, I., 2008. Lime mortars with brick dust and grounded particles for ancient masonry: development and evaluation. In *Historic Mortars Conference HMC2008*. Lisbon, Portugal, 2008.

Murmu, A. L., & Patel, A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and Building Materials*, 165, 112–125.

Naceri, A., & Hamina, M. C. (2009). Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, 29(8), 2378–2384.

Oliveira, A. C. C. R., & Santos, L. B. (n.d.). EVOLUÇÃO, ESTRUTURA E DINÂMICA DA AGLOMERAÇÃO PRODUTIVA DE CERÂMICA VERMELHA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ.

Oliveira, A. M. A., Pessanha, L. S. P., Junior, W. F., Nunes, I. N., Alexandre, J., de Azevedo, A. R. G., & Monteiro, S. N. (n.d.). ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE MASSAS CERÂMICAS INCORPORADAS COM RESÍDUO CERÂMICO.

Oliveira, J. V. da C., Meira, F. F. D. de A., & Chagas, L. S. V. B. (2021). Soil-cement bricks with insertion of scheelite-tailings: Mechanical behavior and physico-chemical evaluation of kneading water. *Research, Society and Development*, 10(6), e0210615412. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15412>

Ouedraogo, K. A. J., Aubert, J. E., Tribout, C., & Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant *Construction and Building Materials*, 236, 117578. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117578>

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

Pereira Junior, S. S. (2011). Desenvolvimento de argamassas contendo resíduos arenosos de mineração e estudo de suas propriedades visando a sua utilização. Belo Horizonte: CDTN/CNEN.

Pisani, M. A. J. (2004). Taipas: a arquitetura de terra. *Revista Sinergia*, 5(1), 9–15.

Reis, F. M. D., Ribeiro, R. P., & Reis, M. J. (2020a). Physical-mechanical properties of soil-cement bricks with the addition of the fine fraction from the quartzite mining tailings (State of Minas Gerais–Brazil). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3741–3750.

- Reis, F. M. D., Ribeiro, R. P., & Reis, M. J. (2020b). Physical-mechanical properties of soil-cement bricks with the addition of the fine fraction from the quartzite mining tailings (State of Minas Gerais–Brazil). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3741–3750.
- Restelli, R. E., de Paiva, A. F., de Lima Lamezon, D. A., de Lima, E. P., & Schenatto, F. J. A. (2021). Assessment of CO<sub>2</sub> Emission in the Soil–Cement Brick Industry: A Case Study in Southwest Paraná (pp. 359–371). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78570-3\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78570-3_27)
- Sampaio, G. S., & Nunes, I. E. S. (2017). Estudo interdisciplinar da viabilidade de aplicação do tijolo de solo-cimento na construção civil: economia aliada à sustentabilidade. *Janus*, 12(22).
- Seco, A., Omer, J., Marcelino, S., Espuelas, S., & Prieto, E. (2018a). Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 167, 154–165.
- Sena, R. J., Laursen, A., & Silva, J. S. da. (2017). Avaliação mecânica de tijolo maciço solo-cimento contendo resíduo de PET. *Veredas FAVIP: Revista Eletrônica de Ciências e Cultura*.
- Silva Segantini, A. A., & Wada, P. H. (2011). Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. *Acta Scientiarum. Technology*, 33(2), 179–183.
- Silva, J., de Brito, J., & Veiga, M. R. (2007). Avaliação do comportamento à água de argamassas com incorporação de agregados cerâmicos. *Engenharia Civil*, n. o28, Escola de Engenharia Da Universidade Do Minho, Guimarães, 37–45.
- Silva, R. A., Soares, E., Oliveira, D. V, Miranda, T., Cristelo, N. M., & Leitão, D. (2015). Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 75, 349–358.
- Silva, T. R., Cecchin, D., de Azevedo, A. R. G., Alexandre, J., Valadão, I. C. R. P., Bernardino, N. A., do Carmo, D. de F., & Ferraz, P. F. P. (2021). Soil-cement blocks: a sustainable alternative for the reuse of industrial solid waste. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, 56(4), 673–686.

- Silva, V. M. da, Góis, L. C., Duarte, J. B., Silva, J. B. da, & Acchar, W. (2014). Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks. *Materials Research*, 17, 326–331.
- Siqueira, F. B., Amaral, M. C., Bou-Issa, R. A., & Holanda, J. N. F. (2016). Influence of industrial solid waste addition on properties of soil-cement bricks. *Cerâmica*, 62, 237–241.
- Souza J M, Ramos Filho R E B, Duarte J B, Silva V M, Rêgo S R, Lucena L F L, Acchar W, 2021. Mechanical and durability properties of compressed stabilized earth brick produced with cassava wastewater. *Journal of Building Engineering* 44, e103290. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103290>
- Souza, M. I. B., Segantini, A. A. S., & Pereira, J. A. (2008). Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 205–212.
- Souza, S. D. C. de, & Arica, J. (2006). Mudança tecnológica e estratificação competitiva em um arranjo produtivo do setor ceramista. *Production*, 16, 88–99.
- Theodoridou, M., Charalambous, E., Maravelaki-Kalaitzaki, P., & Ioannou, I. (2016). Amelioration of crushed brick-lime composites using nano-additives. *Cement and Concrete Composites*, 68, 77–87.
- Torkittikul, P. & Chaipanich, A., 2012. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, 32, pp.440–49.
- Venkatarama Reddy, B. V., & Latha, M. S. (2014). Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilised soil compacts. *Materials and Structures*, 47, 1633–1645.
- Vieira, C. M. F., & Monteiro, S. N. (2006). Effect of the Particle Size of the Grog on the Properties and Microstructure of Bricks. *Materials Science Forum*, 530–531, 438–443. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.530-531.438>
- Vieira, C. M. F., Holanda, J. N. F., & Pinatti, D. G. (2000). Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes-RJ. *Cerâmica*, 46, 14–17.

Vilela, A. P., Eugênio, T. M. C., de Oliveira, F. F., Mendes, J. F., Ribeiro, A. G. C., Brandão Vaz, L. E. V. de S., & Mendes, R. F. (2020). Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. *Construction and Building Materials*, 262, 120883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>

Wang, W., Gan Y, Kang, X. Synthesis and characterization of sustainable ecofriendly unburned bricks from slate tailings, <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.071>

Zhang, Z., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. *Construction and Building Materials*, 188, 1101–1118.