



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**JOEDY MAYARA SANTA ROSA DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESÍDUO DE MARMORARIA  
E DE CONSTRUÇÃO CIVIL, PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS DE  
SOLO CIMENTO.**

Recife, PE  
2022



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**JOEDY MAYARA SANTA ROSA DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESÍDUO DE MARMORARIA  
E DE CONSTRUÇÃO CIVIL, PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS DE  
SOLO CIMENTO.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kalinny Patrícia Vaz  
Lafayette

Recife, PE  
2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Universidade de Pernambuco

S729a Souza, Joedy Mayara Santa Rosa de  
Avaliação dos compósitos de resíduo de marmoraria e de  
construção civil para fabricação de tijolos de solo cimento. /  
Joedy Mayara Santa Rosa de Souza. – Recife: UPE, Escola  
Politécnica, 2022.

101 f. il.

Orientadora: Profa. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de  
Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Tijolo Ecológico. 2. ResíduosCertificação. 3.  
Sustentabilidade. 4. Solo Cimento. I. Construção Civil –  
Dissertação. II. Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz (orient.).  
III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica,  
Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 690.028

**JOEDY MAYARA SANTA ROSA DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESÍDUO DE  
MARMORARIA E DE CONSTRUÇÃO CIVIL PARA FABRICAÇÃO  
DE TIJOLOS DE SOLO CIMENTO**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientadora**

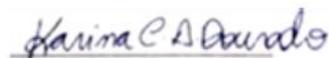


Profª. Dra. Kalinny Patricia Vaz Lafayette  
Universidade de Pernambuco

**Examinadores**



Profª. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro  
Universidade de Pernambuco



Profª. Dra. Karina Cordeiro de Arruda Dourado  
Instituto Federal de Pernambuco

Recife-PE  
2022

## **DEDICATÓRIA**

Dedico especialmente a Hillaecio (painho) e Palmira (mainha).

## AGRADECIMENTOS

À Deus;

À meus pais Palmira e Hillaecio, verdadeiros heróis sempre presentes me dando todo o apoio e amor necessário;

À minha parceira de vida, incentivadora oficial da área acadêmica Danielli, obrigada por toda leveza e companheirismo durante minha jornada.

À minha irmã Láyra e meu cunhado Luiz, grandes incentivadores, sempre me fazendo acreditar que quando se faz o que se gosta, todo o esforço vale a pena.

Aos meus irmãos Augusto e Victor e suas famílias pela parceria de sempre;

Aos meus sobrinhos Luiz Augusto, Vinícius, Valentina, Lorenzo e Liz por todo amor incondicional;

Às minhas amadas e eternas avós Maria José (*in memorian*) e Eunice (*in memorian*), que nunca deixou que a fé nos faltasse e nos momentos mais difíceis sempre me deram força para não desistir dos meus sonhos;

À minha tia Joedy e meus primos queridos por todo companheirismo e apoio sempre com muita alegria;

Aos meus tios e tias André de Souza por todo amor de sempre;

À toda a minha família, minhas tias e primos que sempre estiveram nos momentos mais importantes da minha vida;

Aos meus amigos que estiveram comigo no dia a dia, me ajudando a enfrentar todas as batalhas sempre com perseverança e muito carinho, obrigada;

Aos meus alunos Gustavo Ribeiro e Marcus Luiz que foram super parceiros e prestativos nos ensaios laboratoriais, bem como todos os laboratoristas que me auxiliaram neste processo.

Aos professores que conseguiram disseminar o conhecimento com toda excelência e competência devida, em especial minha orientadora Prof. Kalinny que sempre com muita maestria, conseguiu me orientar para que em meio ao caos de pandemia eu nunca pensasse em desistir, muito obrigada.

## RESUMO

A indústria da construção tem papel fundamental na economia de um país em desenvolvimento, representando na maioria dos países aproximadamente 3,7% a 10,53% do seu PIB (Produto Interno Bruto). No entanto é de extrema importância a busca por alternativas sustentáveis neste setor, visando à redução dos impactos ambientais gerados pela produção dos insumos, geração de resíduos, além do descarte inadequado desta atividade no ambiente. Neste sentido o presente trabalho objetivou avaliar a viabilidade técnica e econômica da incorporação de resíduos (resíduo de corte de mármore e granito - RCMG e Resíduo de construção e demolição - RCD) na produção de tijolos de solo cimento (TSC). Para desenvolvimento do presente trabalho foram realizadas caracterizações físicas, mecânicas e mineralógicas no solo, resíduos (RCD e RCMG) e compósitos (Controle, RCMG15%, RCMG25%, RCMG50%, RCMG100% e RCMG30%RCD70%). Após a fabricação dos tijolos, as caracterizações citadas foram feitas com 7, 28, 60 e 480 dias, além da avaliação das características geométricas, absorção de água, resistência dos tijolos e análise microscópica dos fragmentos pós ruptura. A análise estatística tanto dos ensaios de resistência de solo e compósitos, quanto dos tijolos produzidos com os compósitos foram realizadas. Adicionalmente, foi feita a análise de custos da utilização do TSC comparado a dois sistemas construtivos distintos (tijolo cerâmico e bloco de concreto). A partir dos resultados para caracterização física o solo foi classificado como areia argilo-siltosa (SC-SM), enquanto o RCD areia bem graduada e RCMG como argilo arenosa. As características de plasticidade do solo e dos compósitos variaram de fracamente plásticos (RCMG15% e RCMG30%RCD70% e RCMG100%) e medianamente plásticos. Nos ensaios de compactação, destacam-se que os compósitos com adição de RCMG apresentaram valores crescentes quanto a umidade ótima. As resistências à compressão simples realizadas nos corpos de provas apresentaram resultados satisfatórios para todos os compósitos, em destaque o compósito RCMG25% que obteve o resultado mais significativo com 13.777 kPa aos 28 dias de idade. As análises dimensionais para todos os tijolos apresentaram conformidade com os critérios normativos, exceto, o compósito RCMG30%RCD70%. Os tijolos utilizando os compósitos RCMG30%RCD70% e Controle apresentaram os melhores resultados para resistência à compressão quando comparados com as demais proporções. Estatisticamente os compósitos RCMG25%, RCMG30%RCD70% e controle são significativamente similares. Com relação a viabilidade econômica, o uso de tijolos ecológicos representa uma economia de 12% e 35% no valor total do orçamento do projeto estimado, quando comparado a construção com blocos de concreto e método tradicional em tijolos cerâmicos, respectivamente. Neste sentido, conclui-se que a incorporação de RCD e RCMG para produção de TSC, representa uma aplicação sustentável para construção civil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tijolo ecológico, Resíduos, Sustentabilidade, Solo cimento.

## ABSTRACT

The construction industry plays a fundamental role in the economy of a developing country, representing in most countries approximately 3.7% to 10.53% of its GDP (Gross Domestic Product). However, it is extremely important to search for ecological alternatives in this sector, aiming at reducing the environmental impacts generated by the production of inputs, generation of waste, in addition to the inappropriate disposal of this activity in the environment. In this sense, the present work aimed to evaluate the technical and economic feasibility of incorporating waste (residue from cutting marble and granite - MW and Waste from construction and demolition - CDW) in the production of ground cement bricks (SCB). For the development of this work, physical, mechanical and mineralogical characterizations were carried out in the soil, residues (CDW and MW) and compounds (Control, MW15%, MW25%, MW50%, MW100% and MW30% CDW70%). After the manufacture of the bricks, the aforementioned characterizations were carried out after 7, 28, 60 and 480 days, in addition to the evaluation of the characteristics of the bricks, water absorption, resistance of the bricks and microscopic analysis of the post-rupture fragments. Statistical analysis of both the soil and composite strength tests and the bricks produced with the composites were performed. In addition, a cost analysis of the use of SCB was carried out in comparison to two different construction systems (ceramic brick and concrete block). Based on the results for physical characterization, the soil was classified as clayey-silty sand (SC-SM), while CDW was well-graded sand and MW as sandy clay. The plasticity characteristics of the soil and composites ranged from weakly plastic (MW15% and MW30%CDW70% and CDW 100%) to moderately plastic. In the compaction tests, it is highlighted that the composites with the addition of MW showed increasing values regarding the optimum moisture content. The simple compressive strengths performed on the specimens showed satisfactory results for all composites, especially the MW25% composite, which obtained the most significant result with 13,777 kPa at 28 days of age. The dimensional analyzes for all bricks showed compliance with the normative criteria, except for the composite MW30%CDW70%. The bricks using the composites MW30%CDW70% and Control showed the best results for compressive strength when compared with the other proportions. Statistically, the MW25%, MW30%CDW70% and control composites are significantly similar. With regard to economic viability, the use of ecological bricks represents savings of 12% and 35% in the total estimated project budget, when compared to construction with concrete blocks and the traditional method using ceramic bricks, respectively. In this sense, it is concluded that the incorporation of CDW and MW for the production of SCB represents a sustainable application for civil construction.

**KEY WORDS:** Ecological brick, Waste, Sustainability, Cement soil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de resíduos segundo a NBR 10004 (2004).....	20
Figura 2 - Beneficiamento de granitos.....	24
Figura 3 - Resíduos dispostos para secagem.....	25
Figura 4 - Geração de resíduos no processo de produção de rochas ornamentais.....	26
Figura 5 - Resíduos de construção e demolição localizados na empresa de reciclagem.....	29
Figura 6 - Coleta de resíduos por região.....	30
Figura 7 - Produção tijolo solo cimento conforme NBR 12023.....	31
Figura 8 - Linha do tempo com histórico sobre solo cimento.....	32
Figura 9 - Localização do município de Jabotão dos Guararapes.....	37
Figura 10 - Distribuição geográfica das regionais por distrito.....	38
Figura 11 - Média pluviométrica (2017 a 2022) - Jabotão dos Guararapes.....	39
Figura 12 - Geomorfologia de Jabotão dos Guararapes.....	40
Figura 13- Mapa hipsométrico de Jabotão dos Guararapes.....	41
Figura 14- Pedologia da cidade de Jabotão dos Guararapes.....	42
Figura 15 - Detalhe da encosta (A) e Jazida do estudo (B).....	43
Figura 16 - Localização da jazida no município de Jabotão dos Guararapes.....	44
Figura 17 - Fluxograma com etapas da pesquisa.....	46
Figura 18 - Solo selecionado para estudo.....	47
Figura 19 - Amostra do resíduo coletada para análise.....	48
Figura 20 - Coleta do resíduo de construção civil.....	48
Figura 21 -Dispersor (A) e Ensaio de sedimentação (B).....	50
Figura 22 - Obtenção da densidade real.....	50
Figura 23 - Realização do ensaio de compactação.....	51
Figura 24 - Retirada amostra em ensaio de compactação.....	52
Figura 25 - Corpo de prova submetido ao em ensaio de compressão.....	52
Figura 26 - Controle tecnológico dos corpos de prova.....	53
Figura 27 - Realização do ensaio de difratometria de Raios-X.....	53
Figura 28 - Etapas de produção dos tijolos.....	54
Figura 29 - Tijolo produzido após prensagem.....	55
Figura 30 - Controle tecnológico dos tijolos.....	57
Figura 31 - Pesagem de material seco.....	57

Figura 32 – Corte no meio para realização de ensaio.....	58
Figura 33 – Controle de qualidade no capeamento das amostras (A) e Amostra preparada (B).....	58
Figura 34 - Corpos de prova submersos em tanque de água.....	59
Figura 35 – Prensa manual Solotest.....	59
Figura 36 – Materiais para estudo comparativo.....	60
Figura 37 - Curva granulométrica do solo, RCD e RCMG.....	62
Figura 38 - Curva granulométrica dos compósitos.....	63
Figura 39 - Curvas de compactação sem aglomerante.....	68
Figura 40 - Curvas de compactação com ligante.....	68
Figura 41 - Corpos de prova rompidos.....	69
Figura 42 – Comparativo de resistências à compressão do solo e compósitos.....	69
Figura 43 – DRX do solo.....	71
Figura 44 – DRX do RCD.....	72
Figura 45 – DRX do RCMG.....	73
Figura 46 – Resistência à compressão com 7, 28, 60 e 480 dias de idade.....	77
Figura 47 – Tijolos após ruptura.....	79
Figura 48 - Detalhamento dos tijolos com Imagem ampliada em 500x com microscópio USB dos fragmentos pós ruptura.....	80
Figura 49 – Comparação entre RCS por tratamento e tempo de cura do CP.....	81
Figura 50 – Comparação entre resistência por tratamento e idade dos tijolos.....	83
Figura 51 – Obras executadas com os materiais descritos no estudo (A) Tijolo de solo cimento (B) Tijolo cerâmico e (C) Bloco de concreto. ....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Destinação final por região do Brasil.....	22
Tabela 2 – Mapeamento de locais de despejo ilegal por município.....	30
Tabela 3 – Regionais do município de Jaboatão dos Guararapes.....	38
Tabela 4 – Proporções dos materiais para produção dos tijolos.....	55
Tabela 5 – Frações da granulometria.....	64
Tabela 6 – Densidade real das partículas do solo, resíduos e compósitos.....	65
Tabela 7 – Limites de consistência.....	66
Tabela 8 – Características e propriedades do cimento Portland CP V ARI.....	67
Tabela 9 – Resultados do ensaio de compactação.....	67
Tabela 10 – Resistência à compressão dos corpos de prova.....	70
Tabela 11 – FRX dos materiais.....	73
Tabela 12 – Análise dimensional dos tijolos solo cimentos nos diferentes tratamentos e controle.....	75
Tabela 13 – Resultados da análise de absorção de água nos tijolos solo cimento nos diferentes tratamentos e controle.....	76
Tabela 14 - Resistência à compressão em MPa com 7, 28, 60 e 480 dias de idade.....	78
Tabela 15 - Quantitativos totais de ensaios realizados.....	80
Tabela 16 - Médias e desvios padrões (dp) entre os tratamentos e o tempo de cura (TC) dos corpos de prova.....	82
Tabela 17 - Médias e desvios padrões (dp) entre os tratamentos e o tempo de cura (TC) dos tijolos.....	84
Tabela 18 - Índices de consumo e valores unitários.....	85
Tabela 19 - Custos com diferentes sistemas construtivos.....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agencia Pernambucana de Águas e Climas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BTC	Bloco de Terra Comprimida
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVID-19	Corona Vírus Disease
CP	Corpo de prova
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DRX	Difratometria de Raios-X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
FRX	Fluorescencia de Raios-X
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
TSC	Tijolo de solo cimento
PIB	Produto Interno Bruto
PGRS	Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RBRO	Resíduos de Rochas Ornamentais
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
RCMG	Resíduo de Corte de Mármore e Granitos
RS	Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SBPE	Sistema de Poupança e Empréstimo
ZCIT	Zona de convergência Intertropical Tropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	17
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	19
<b>2.1</b>	<b>Resíduos sólidos: definições e legislação</b>	19
2.1.1	Resíduos de marmoraria	24
2.1.2	Resíduos de construção civil (RCD)	27
<b>2.2</b>	<b>Tijolo solo cimento na construção civil</b>	30
2.2.1	Vantagens e Desvantagens do tijolo de solo cimento	32
2.2.2	Custos x sistemas construtivos	34
<b>2.3</b>	<b>Eficiência de compósitos no preparo do tijolo solo cimento</b>	34
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b>	37
<b>3.1</b>	<b>Aspectos climáticos</b>	39
<b>3.2</b>	<b>Relevo da região</b>	40
<b>3.3</b>	<b>Local do estudo</b>	43
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	45
<b>4.1</b>	<b>Primeira etapa</b>	45
4.1.1	Coleta de Solo	47
4.1.2	Resíduo de marmoraria (RCMG)	47
4.1.3	Resíduo de Construção Civil (RCD)	48
4.1.4	Ligante ou estabilizante	49
<b>4.2</b>	<b>Segunda etapa</b>	49
4.2.1	Caracterização Física	49
4.2.1.1	<i>Granulometria</i>	49
4.2.1.2	<i>Densidade real</i>	50
4.2.1.3	<i>Limites de Atterberg</i>	51
4.2.2	Caracterização Mecânica	51
4.2.2.1	<i>Compactação</i>	51

4.2.2.2	<i>Compressão simples</i> .....	52
4.2.3	Caracterização Mineralógica.....	53
4.2.3.1	<i>Difratometria de Raios-X</i> .....	53
4.2.3.2	<i>Fluorescência de raios-X</i> .....	54
4.2.4	Tijolo de solo cimento .....	54
4.2.4.1	<i>Controle tecnológico</i> .....	56
4.2.4.2	<i>Absorção de água</i> .....	57
4.2.4.3	<i>Resistencia à compressão do tijolo</i> .....	58
4.2.4.4	<i>Análise microscópica dos fragmentos pós ruptura</i> .....	59
4.2.5	Análises estatísticas.....	60
4.2.6	Análise comparativa de custos de sistemas construtivos.....	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>62</b>
5.1	<b>Caracterização física</b> .....	<b>62</b>
5.1.1	Granulometria.....	62
5.1.2	Densidade real dos grãos.....	65
5.1.3	Limites de Atterberg.....	66
5.1.4	Análise do cimento.....	66
5.2	<b>Caracterização mecânica</b> .....	<b>67</b>
5.2.1	Compactação.....	67
5.2.2	Compressão simples.....	69
5.3	<b>Caracterização mineralógica</b> .....	<b>70</b>
5.3.1	<i>Difratometria de Raios-X</i> .....	70
5.3.2	<i>Fluorescência de raios-X</i> .....	73
5.4	<b>Tijolo de solo cimento</b> .....	<b>75</b>
5.4.1	Características geométrica.....	75
5.4.2	Absorção de água .....	76
5.4.3	Resistência à compressão simples .....	77
5.4.4	Análise microscópica dos fragmentos pós ruptura.....	79
5.5	<b>Análises estatísticas</b> .....	<b>81</b>
5.6	<b>Análise comparativa de custos de sistemas construtivos</b> .....	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>92</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção tem papel fundamental na economia de um país em desenvolvimento, e os impactos econômicos que o setor apresenta são de alta relevância, uma vez que representa aproximadamente 3,7% a 10,53% do PIB (Produto Interno Bruto) da maioria dos países (MUSARAT, ALLALOU e LIEW, 2021).

A pressão para o crescimento do setor da construção civil é constante, sabendo que os serviços de engenharia e construções desempenham uma função de extrema importância na economia em ascensão do mundo, gerando oportunidades de emprego para milhões de trabalhadores e impactando expressivamente no PIB do país. Porém, com o advento da pandemia do novo Coronavírus COVID-19 (*SARS-CoV-2*), mudanças significativas foram impostas na execução das obras, o que aumentou a necessidade de melhoria no sistema de produção da construção (ROCHA e ESCOBAR, 2021).

As medidas restritivas para segurança da população se tornaram necessárias após o cenário pandêmico, onde boas práticas de higiene nos escritórios e canteiros de obras foram adotadas, a fim de diminuir os riscos de infecção. Entretanto, os impactos gerados pela paralisação e isolamento interferiram diretamente em outros segmentos do setor, com a redução de equipes de trabalho, de produção de insumos e de capital de investimento, entre outros (ROCHA e ESCOBAR, 2021).

No Brasil, as expectativas que o setor retome as atividades de maneira lenta, mas com grande significado diante da recessão econômica mundial, no primeiro trimestre de 2020, o PIB da construção caiu 2,4% em comparação com o último trimestre de 2019 (IBGE, 2020). Os resultados melhoraram no primeiro trimestre de 2021, representando um crescimento de 2,1% em relação ao último trimestre de 2020. Apesar do resultado otimista, o país ainda vem se recuperando da crise econômica iniciada em 2014 e agravada a partir de 2019 pela pandemia da COVID-19, (CBIC, 2021).

Segundo a CBIC (2021) no ano de 2020, mesmo prejudicado pela pandemia, o setor se destacou por gerar 105.248 novas vagas de emprego, tornando-se o setor que mais gerou empregos com carteira assinada no país.

A redução de obras paralisadas e o aumento das movimentações econômicas motivadas pelo anseio da ascensão, reflete diretamente no repasse para os investimentos no setor da construção civil, motivados sobretudo, por incentivos nas taxas de juros para financiamento habitacional.

De acordo com o Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), no ano de 2020 foram facilitadas desde a contratação das faixas 1,5 (renda familiar bruta de até R\$ 2,6 mil) e 2 (renda bruta familiar de até R\$ 4 mil) do programa Casa Verde e Amarela com recurso de 100% do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), quanto a modalidade de Sistema de Poupança e Empréstimo (SBPE), promovendo a retomada do setor (MDR, 2020).

Com a perspectiva de crescimento da construção civil, estima-se que o consumo de materiais aumente, havendo um impacto direto na necessidade de insumos para atender tal demanda. Segundo o Fundação Getúlio Vargas - FGV (2021) o Índice Nacional de Custo da Construção - M (INCC-M) variou 1,24% em julho de 2021, acumulando uma variação nos últimos 12 meses de 29,03%. Dentre esta, destaca-se a alvenaria, que representa um percentual significativo na obra de aproximadamente 4% a 12% do orçamento total (MATTOS, 2006).

A maior parte das alvenarias são feitas com tijolos cerâmicos convencionais, que apesar do baixo custo, necessitam de grandes quantidades de argamassa para assentamento, chapisco, emboço e reboco, elevando, assim, o custo do metro quadrado da alvenaria acabada (MATTOS, 2006).

A problemática ambiental relacionada a esta metodologia construtiva também reforça a preocupação, sobretudo pela utilização recorrente de fornos no processo produtivo, assim como o processo de fabricação do cimento utilizado na argamassa para

assentamento e acabamento da alvenaria, o que gera poluição ambiental (CUNHA, 2016).

Além da questão produtiva dos insumos para o produto final, há ainda a preocupação com a geração de resíduos, promovidas pela evolutiva degradação ambiental e a carência dos recursos naturais, causadas não só pela exploração indiscriminada, mas principalmente, pela disposição inadequada de resíduos das atividades humanas no ambiente. Novas buscas por alternativas visando reverter essa situação são os temas mais frequentemente discutidos atualmente (COSTA et al., 2020).

Desde o início da Revolução Industrial houve uma aceleração na geração de resíduos oriundas da produção industrial e o consumo de recursos naturais, contudo, somente nas últimas décadas a sociedade tem tomado mais consciência do impacto causado ao meio ambiente por consumo quase desenfreado (MARQUES, 2021).

A problemática da geração de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) envolve seu descarte, que frequentemente afetam os centros urbanos, sendo possível encontrar com facilidade material descartado irregularmente. Paz, Lafayette e Sobral (2020) mapearam e analisaram 857 locais de despejo ilegal na Região Metropolitana de Recife/Brasil, onde foram analisados 7 municípios e além dos locais de despejo, também foram identificados os tipos de resíduos depositados de forma inadequada.

Como alternativa para reduzir os impactos ambientais no setor da construção civil a produção de tijolos ecológicos de solo cimento se destaca com grande potencial de eficiência. Sua característica de viabilidade econômica e facilidade de produção potencializam ainda mais essa possibilidade, destacando desde a produção do tijolo até a execução de obra com este material. Na produção do tijolo os equipamentos utilizados são de pequeno porte, baixo custo, entretanto o controle de qualidade da produção ainda está longe de alcançar seu melhor desempenho, (DELUNARDI et al., 2021).

Neste sentido o presente trabalho visa avaliar o desempenho físico, mecânico e químico dos tijolos de solo cimento, produzidos com a incorporação dos resíduos de oriundos de marmoraria e de construção civil.

## **1.1 Justificativa**

A geração de resíduos sólidos ainda é um entrave para nossa sociedade, e a busca por alternativas que visem seu reaproveitamento e destinação adequada tem sido foco constante de investigações (ROCHA, CASTRO ROCHA e LUSTOSA, 2017).

Dentre os resíduos que necessitam de destinação adequada está o resíduo de marmoraria, que comumente é encontrado em lagoas de decantação ou aterros sem aplicação específica, tornando-se um material em potencial na formação de compósitos para produção de tijolos de solo cimento (COSTA, 2017).

A tecnologia da produção de tijolo solo cimento vem sendo promovida como ferramenta social para viabilizar na construção de habitações populares com a metodologia de mutirão onde os próprios beneficiados produzem seus tijolos prensados. O resíduo de marmoraria e de construção civil, podem ser utilizados neste sentido como adições sem altos custos e com a possibilidade no aumento do desempenho deste material.

Assim, o desenvolvimento de novos produtos a partir do aproveitamento de resíduos propicia práticas sustentáveis na indústria da construção civil, além do aumento do valor agregado ao produto.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade da incorporação de resíduo na produção de tijolos de solo cimento, buscando alternativas ecoeficientes para aplicabilidade e inclusão de compósitos oriundos de marmorarias e construção civil.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar a caracterização física dos materiais;
- Analisar comportamento mecânico do solo e dos compósitos;

- Realizar análise mineralógica dos materiais;
- Identificar o teor ideal dos compósitos de cimento, solo e resíduos da mistura, de forma que promovam melhorias nas propriedades físico-mecânicas dos tijolos;
- Avaliar o desempenho físico e mecânico dos tijolos;
- Realizar comparativo orçamentário entre os métodos construtivos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo serão apresentadas informações sobre os resíduos de construção e demolição (RCD) e a legislação acerca desse tema, conceitos, históricos, vantagens e desvantagens dos tijolos de solo cimento.

### 2.1 Resíduos sólidos: definições e legislação

Segundo Aguiar et al. (2021) o conjunto de fatores associados à sua falta de gestão tornam um dos problemas ambientais mais significativos ambientais. Os resíduos sólidos se tornaram o foco de debates e discussões ao redor de todo mundo, desde que se percebeu que o descontrole acerca do crescimento urbano desordenado, resultou em várias ações promovidas por entidades governamentais e não governamentais a fim de reduzir o descontrole principalmente na geração de tais resíduos, isto foi possível através da implementação de normas e legislações que regulamente as diretrizes do setor (SILVA et al., 2017).

Segundo a Lei nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define Resíduo sólido como:

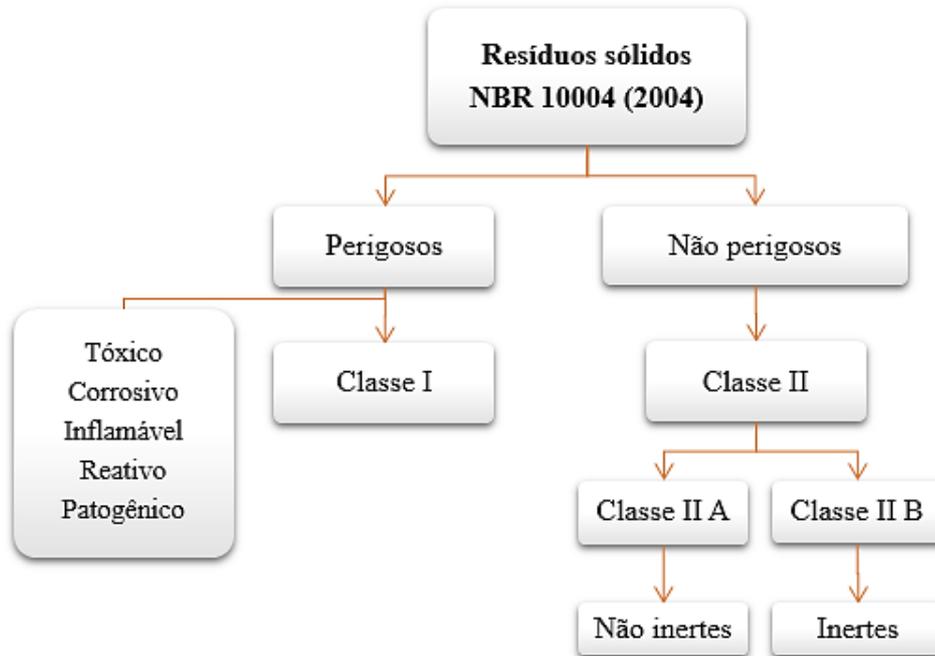
Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, identifica resíduos sólidos de origem domiciliar, de limpeza urbana, industrial, de serviços de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de transportes e de mineração.

São classificados em duas categorias de periculosidade: (1) não perigosos; e (2) perigosos, que representam risco à qualidade ambiental ou à saúde pública, devido suas propriedades inflamáveis, corrosíveis, tóxicos, de patogenicidade e carcinogenicidade.

As definições para resíduos sólidos são abordadas na NBR 10004 (ABNT, 2004) (Figura 1) descreve que:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Figura 1 - Classificação de resíduos segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004)



Fonte: NBR 10004 (ABNT, 2004).

No Brasil destaca-se a Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002, p. 1) que trata especificamente dos resíduos oriundos da construção civil com o seguinte objetivo: “Art. 1º Estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.”

A resolução supracitada ainda classifica os resíduos em quatro classes (A, B, C e D) constituindo a diretriz de aplicação dos 3Rs (redução, reutilização e a reciclagem), além de descrever as atribuições e responsabilidades sobre quem gera e quem é responsável por cada resíduo (BRASL, 2002).

A estruturação do Marco Legal do Saneamento, instituído pela Lei nº 11.445/2007 e atualizado pela Lei nº 14.026/2020, inclui também limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem como o conjunto de serviços públicos de saneamento básico, assim como infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário e manejo das águas pluviais urbanas.

Para publicação do Índice Global de Resíduos foram avaliados 38 países de acordo principalmente com a geração de resíduos x quanto se trata. Destacam-se o primeiro lugar Coreia do Sul com 400kg de resíduos gerados, 243kg/hab reciclados, 88 kg/hab incinerados e 46 kg/hab dispostos em aterros, enquanto ocupando o último lugar está o Peru com 424 kg/hab de resíduos gerados, 47 kg/hab Reciclados, 0 kg/hab incinerados, 347 kg/hab dispostos em aterros e 176 kg/hab despejados abertamente.

Com práticas que dividem seus resíduos municipais em aterros sanitários, recicláveis, compostagem e incineração, a Coreia do Sul é conhecida como um país de lixo zero, e o descarte de resíduos alimentares também é cobrado dependendo do peso de cada município. A política desencoraja mais resíduos no país. Em 2022, o governo sul-coreano planejava diminuir pela metade a quantidade de plástico descartável utilizada no país e aumentar a reciclagem em 70% (TDR, 2021).

Segundo o Índice Global de Resíduos Sensoneo (2022), a pandemia da COVID-19, em particular, criou grandes volumes de produtos descartáveis, como máscaras médicas e testes rápidos COVID, causando uma pressão nos sistemas de resíduos em todo o mundo.

Para a ABRELPE (2021) o ano de 2020 foi diferenciado, principalmente devido aos efeitos e consequências da pandemia que impactaram diretamente os mais diferentes setores da economia. Com o setor de gestão de resíduos ocorreu da mesma maneira: as restrições de distanciamento e isolamento social, o home office e o trabalho remoto, restrições a atividades de comércio e alimentação como o aumento de pedidos por delivery, dentre outros fatores, ocasionaram um novo paradigma para gestão de resíduos sólidos.

No Brasil, segundo o IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) o país é classificado como um dos países que mais gera resíduos sólidos, além de ter sua destinação final ocorrendo de maneira irregular. Cerca de 20,8 milhões de habitantes da população total não tem coleta regular direta e indireta de Resíduo doméstico, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021).

A geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil no ano de 2020 alcançou um total de 82,5 milhões de toneladas geradas, sendo distribuídas majoritariamente pela região Sudeste com 49,7%, seguidos do Nordeste com 24,7%, Sul com 10,8%, Centro-oeste com 7,5% e por fim 7,4% para região Norte (ABRELPE, 2021).

Em diagnóstico apresentado pelo Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento – SNIS referente ao ano de 2020, existem aproximadamente 5.018 unidades de processamento de RSU (resíduos sólidos urbanos) em operação, destes, apenas 0,9% representam área de reciclagem de RCC (Resíduos de Construção Civil), 1,3% são de Área de transbordo e triagem de RCC e volumosos (ATT) e 1,6% Aterro de RCC (aterros inertes), SNIS (2021).

Em 2020, cerca de 60,2% dos resíduos gerados tiveram destino final adequados (Tabela 1). Com isso, mesmo após uma década da sanção da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, vê-se que pouco se avançou quanto ao destino final de resíduos sólidos no país (ABRELPE, 2021).

Tabela 1 – Destinação final por região do Brasil.

Região	Disposição adequada	Disposição inadequada
Norte	35,6%	64,4%
Nordeste	36,3%	63,7%
Centro-Oeste	42,5%	57,5%
Sudeste	73,4%	26,6%
Sul	70,8%	29,2%
Brasil	60,2%	39,8%

Fonte: ABRELPE (2021)

Em se tratando da região nordeste, os dados acerca da destinação final de RSU são preocupantes, onde cerca de 63,7% não foram depositados em local apropriado, e conforme a ABRELPE (2021) dos 1.794 Municípios analisados cerca de 1.283 tem a disposição final inadequada e 511 adequadas.

Com o objetivo de tornar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) mais eficiente e promover os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), em 12 de janeiro de

2022 o governo brasileiro publicou um novo decreto nº 10.936, o qual Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos a PNRS, que prevê o gerenciamento integrado e a gestão de resíduos sólidos, com integralização do poder público, iniciativa privada e sociedade civil (BRASIL, 2022).

De acordo com o capítulo III do decreto nº 10.936, que regulamenta a criação do Programa Nacional de Logística Reversa integrado ao Sistema Nacional de Informações sobre Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR) e ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), e a declaração de regras mais objetivas para a implementação do sistema de logística reversa, (BRASIL, 2022).

Destaca-se como uma ferramenta de extrema importância a Logística Reversa (LR) se definida como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Para a elaboração dos Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), os empreendimentos poderão escolher três tipos de apresentação de forma coletiva e integrada: primeiro aqueles que estejam localizados no mesmo condomínio, município, microrregião, região metropolitana ou aglomeração urbana; segundo aqueles que exerçam atividades características do mesmo setor produtivo; e terceiro aqueles que possuem mecanismos formalizados de governança coletiva ou de cooperação em atividades de interesse comum. (BRASIL, 2022)

O Art. 85 do decreto esclarece como serão fomentados os instrumentos econômicos acerca do art. 42 da Lei nº 12.305, de 2010:

- I - incentivos fiscais, financeiros e creditícios;
- II - cessão de terrenos públicos;
- III - destinação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal às associações e às cooperativas dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis, nos termos do disposto nos art. 40 a art. 42;

- IV - subvenções econômicas;
- V - estabelecimento de critérios, metas e outros dispositivos complementares de sustentabilidade ambiental para as aquisições e contratações públicas;
- VI - pagamento por serviços ambientais, na forma prevista na legislação; e
- VII - apoio à elaboração de projetos no âmbito de mecanismos decorrentes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, promulgada pelo Decreto nº 2.652, de 1º de julho de 1998.

### 2.1.1. Resíduos de marmoraria

Os resíduos de marmoraria também são conhecidos como resíduos de corte de rochas ornamentais, que podem se classificar quanto a sua origem, entre natural e artificial, sendo o beneficiamento de mármore e granitos de origem natural (Figura 2) e silestone e marmoglass e outros de origem artificial (SANTOS et al., 2020).

Figura 2 - Beneficiamento de granitos



Fonte: Autora (2020)

A classificação do resíduo quanto aos parâmetros da NBR – 10004 variou de acordo com o autor, segundo Freitas, Raymundo e Jesus (2012), os resíduos da serragem de mármore e granitos, no estado do Espírito Santo, ultrapassaram os parâmetros de avaliação do pH com resultados elevados, isto justificados pela quantidade de cal utilizada durante o processo de corte, que fez com que os resíduos fossem classificados como perigosos.

Entretanto, Souza et al. (2010) e Manhães e Holanda (2008) classificaram os resíduos como “Não inerte – Classe II A”, onde dentre os ensaios utilizados os de solubilização e difração por Raios X se destacaram, encontrando componentes como ferro e manganês em altos índices superando os limites apresentados no Anexo G da NBR – 10004.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS) (2019) no mundo, cerca de dez países obtêm 72,6% do processamento de rochas ornamentais, destacando-se a China, com aproximadamente 41,5% do total, seguida da Índia, com 10,8%. No posto de terceiro maior beneficiador com 4,8% o Brasil, tendo processado cerca de 4,3 milhões de toneladas em 2017 (BEZERRA, 2018).

O crescimento do setor de rochas ornamentais está aumentando. De acordo em informe com a ABIROCHAS (2021) foram exportados US\$ 125,8 milhões (R\$ 676,8 milhões) de rochas somente no mês de junho de 2021, constituindo o maior valor mensal do 1º semestre e dos últimos 5 anos. A expectativa é que o setor alcance a marca de US\$ 1,1 bilhão ainda em 2021.

Entretanto, a atividade de mineração requer atenção para o manejo dos resíduos gerados na produção (Figura 3), que além da necessidade do manejo adequado implicando em despesas, ainda necessita de cuidados quanto um passivo ambiental, pois os volumes movimentados precisam ser dispostos de forma correta e monitorados para evitar acidentes ou contaminação.

Figura 3- Resíduos dispostos para secagem.

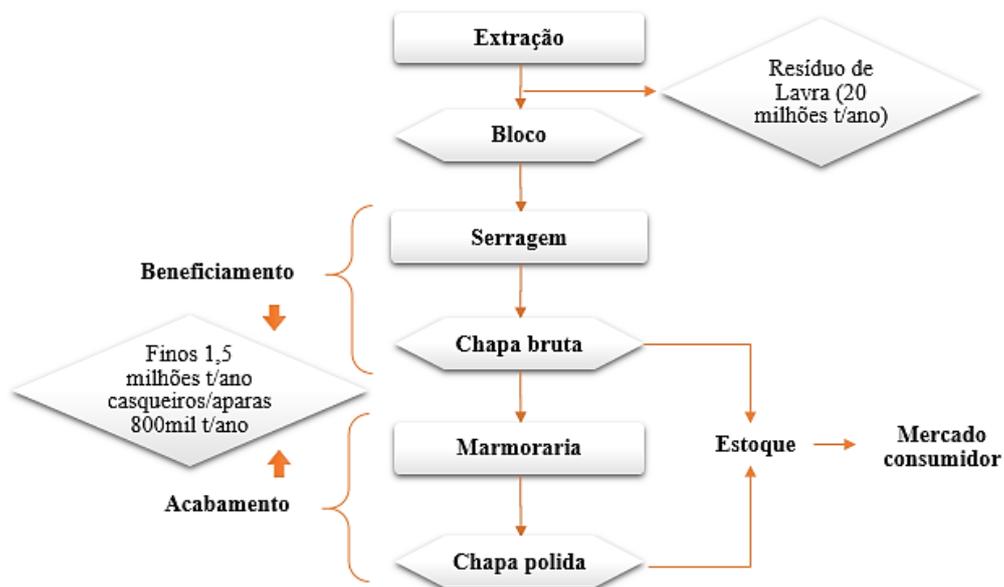


Fonte: Autora (2020)

Na Figura 4 é possível observar que nas etapas de lavra e beneficiamento são gerados os principais volumes, conhecidos como estéril e rejeito. É considerado estéril o material descartado diretamente na operação de lavra, ainda sem processamento na usina de beneficiamento, enquanto o chamado rejeito à porção associada ao minério descartada durante e/ou após o processo de beneficiamento, Agência Nacional de Mineração, (ANM, 2021).

Segundo a ANM (2021) após os desastres ambientais nas barragens de rejeito de Mariana em 2015 e em Brumadinho 2019 o reaproveitamento de rejeitos ganhou amplitude e a necessidade de dar destinação sustentável aos resíduos, gerando aproveitamento econômico e buscando uma alternativa técnica à deposição em estruturas como pilhas e barragens.

Figura 4 – Geração de resíduos no processo de produção de rochas ornamentais.



Fonte: Adaptado Campos et al. (2014).

Pesquisas estão sendo realizadas na produção de compósitos incorporando resíduos de marmoraria, visando um melhor desempenho do material (OLIVEIRA et al., 2018; ANITECO, 2020; BARRETO, 2020; BARROS et al., 2020; REIS et al., 2019; VILELA et al., 2020).

Para Pereira (2021) a utilização de resíduo de marmoraria é viável e vem sendo amplamente estudada, principalmente utilizando como adição ou substituição ao cimento portland em concretos autoadensáveis.

### 2.1.2. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

De acordo com o artigo 13 da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) publicada em 2010 a definição para os Resíduos da Construção e Demolição (RCD) ou Resíduos de Construção Civil (RCC), descreve como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras da construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, (BRASIL, 2010).

O setor da construção civil é um dos que mais geram resíduos sólidos, apresentando evidências da urgência na adoção de medidas que possam mitigar os impactos negativos provenientes da produção de materiais que são descartados no meio ambiente, (GOMES, 2021).

Os impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil são significativos quando se trata de RCD, e cada vez mais os debates acerca do tema aumentam, visto que se sabe da potência do setor quando se trata em geração de resíduos, tornando necessário o desenvolvimento de estudos que viabilizam a reutilização e ou reciclagem do RCD (ASSUNÇÃO, 2019).

A definição de economia circular recentemente mais empregada foi fornecida pela Fundação Ellen MacArthur (2017), afirmando que:

Economia circular é um sistema industrial restaurativo ou regenerativo por intenção e design. Ele substitui o conceito de 'fim de vida' por restauração, muda para o uso de energia renovável, elimina o uso de produtos químicos tóxicos que prejudicam a reutilização e visa a eliminação de resíduos através do design superior de materiais, produtos, sistemas e, dentro disso, modelos de negócios.

Como premissa para a reciclagem os resíduos devem ser classificados, e a triagem realizada. Para isso, a resolução 307/2002 do CONAMA definem as classes que cada resíduo pertence de acordo com sua origem. Os resíduos sólidos provenientes da construção civil no Brasil são classificados como:

classe A: Reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como tijolos cerâmicos, blocos de concreto, tubos, telhas, argamassa placas de revestimento e outros. Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos Classe A de preservação de material para usos futuros.

classe B: Recicláveis para outras destinações, tais como gesso, plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros. Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

classe C: Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis, tais como Neoprene, plásticos reforçados com fibras. Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

classe D: Perigosos, tais como tintas, solventes, óleos, amianto e outros. Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Brasileiro e Matos (2015) descreve que geralmente, grande parte dos resíduos gerados nos canteiros de obras e de demolição são oriundos de argamassas, tijolo, alvenaria, concreto, cerâmica, gesso, madeira, metais e etc., e tem seu descarte realizados em aterros sanitários causados pela ausência de locais para beneficiamento e reciclagem.

Além disso, tem sua aplicação diversificada apresentando propriedades satisfatórias como matéria-prima para agregados de ótima qualidade, utilizados em confecção de tijolos, blocos pré-moldados, meio-fio, calçadas, argamassa de revestimento, camadas de base e sub-base, pavimentos, entre outros.

Para Leite et al. (2018), os serviços mal feitos são as principais causas de geração de resíduos. Neste sentido, sugere-se que casos incompatibilidade de projetos com as características do local ou com a realidade do demandante, há inconsistência em procedimentos padronizados de serviços, e a destinação dos resíduos são feitos de

maneira inadequada no canteiro de obras. Em situações de reformas, principalmente sem acompanhamento profissional adequado, a falta de conhecimentos sobre reciclagem e reutilização, e do potencial dos materiais, contribui para a geração de resíduos (Figura 5).

Figura 5 – Resíduos de construção e demolição localizados na empresa de reciclagem.



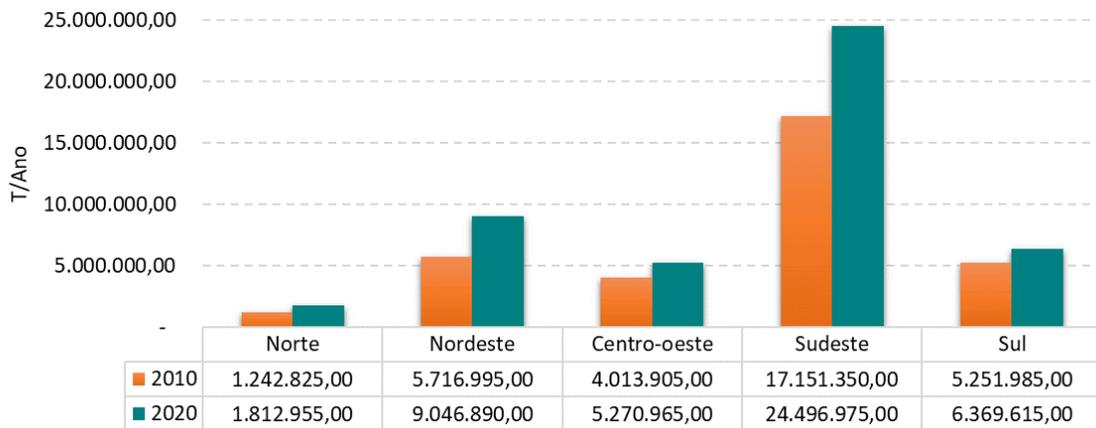
Fonte: Autora (2020)

Localizada em Camaragibe/PE, a empresa onde foi realizada a coleta é pioneira no tratamento de Resíduos da Construção e Demolição (RCD), com capacidade para processar 900 toneladas por dia.

Para os requisitos da Resolução CONAMA 307 a empresa realiza o beneficiamento através do processo de britagem e separações balísticas dos resíduos, obtendo granulometrias distintas para o resíduo.

No Brasil, houve aumentos significativos entre os anos de 2010 e 2019 dos RCD coletados pelos municípios, passando de 33 milhões de toneladas, em 2010, para 46,9 milhões, em 2020, ABRELPE (2022). Com isso, a quantidade coletada per capita cresceu de 174,3 kg para 221,19 kg por habitante por ano. A ABRELPE (2022) também apresentou os valores coletados de RCD de acordo com cada região (Figura 6).

Figura 6 – Coleta de resíduos por região



Fonte: Adaptado ABRELPE (2022)

Em Pernambuco, Paz et al. (2020) georreferenciou 857 pontos de disposição ilegal em 7 municípios (Tabela 2), utilizando a ferramenta QGIS versão 2.4, que consiste em um conjunto de ferramentas para armazenamento de dados, processamento e documentação geográfica informações em uma determinada área de interesse. Além disso, os autores mapearam ainda pontos para disposição regular e locais para tratamento dos resíduos.

Tabela 2 – Mapeamento de locais de despejo ilegal por município.

Município	População (nº habitantes)	Locais de despejo ilegal	Área urbanizada (km <sup>2</sup> )
Recife	1,637,834	418	142.7
Camaraçibe	156,736	60	50.1
Jaboatão dos Guararapes	697,636	99	85.1
Olinda	391,835	109	31.5
Paulista	329,117	46	41.2
Cabo de Santo Agostinho	205,112	85	26.7
São Lourenço da Mata	112,362	40	10.8
Total	3.530,632	857	388,1

Fonte: PAZ et al. (2020)

## 2.2 Tijolo solo cimento na construção civil

A técnica de produção tijolos de solo cimento é capaz de obter um produto com excelente desempenho, atendendo os requisitos das normas e ganhando ênfase por possibilitar uma construção rápida, ecológica e inteligente. As características desta

metodologia envolvem qualidade, solidez, economia no custo total da obra e beleza (SANTOS, A. F. R et al. 2009).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2020) a definição de solo-cimento se caracteriza de acordo com suas propriedades que devem apresentar homogeneidade na mistura, compactada e curada de solo, cimento e água nas dosagens adequadas. Tais características propiciam um material com bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica, boa resistência à compressão e durabilidade.

A norma NBR 12023 (ABNT, 2012), descreve que o solo-cimento é: “um produto enrijecido, que resulta da cura de uma mistura íntima e compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, executada conforme a NBR 12253” (Figura 7).

Figura 7 – Produção tijolo solo cimento conforme NBR 12023



Fonte: NBR 12023 adaptado pela autora (2021)

O tijolo de solo cimento, também é conhecido como tijolo ecológico, tijolo de solo comprimido (TSC) ou bloco de terra comprimido (BTC) e de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012) tem sua definição como:

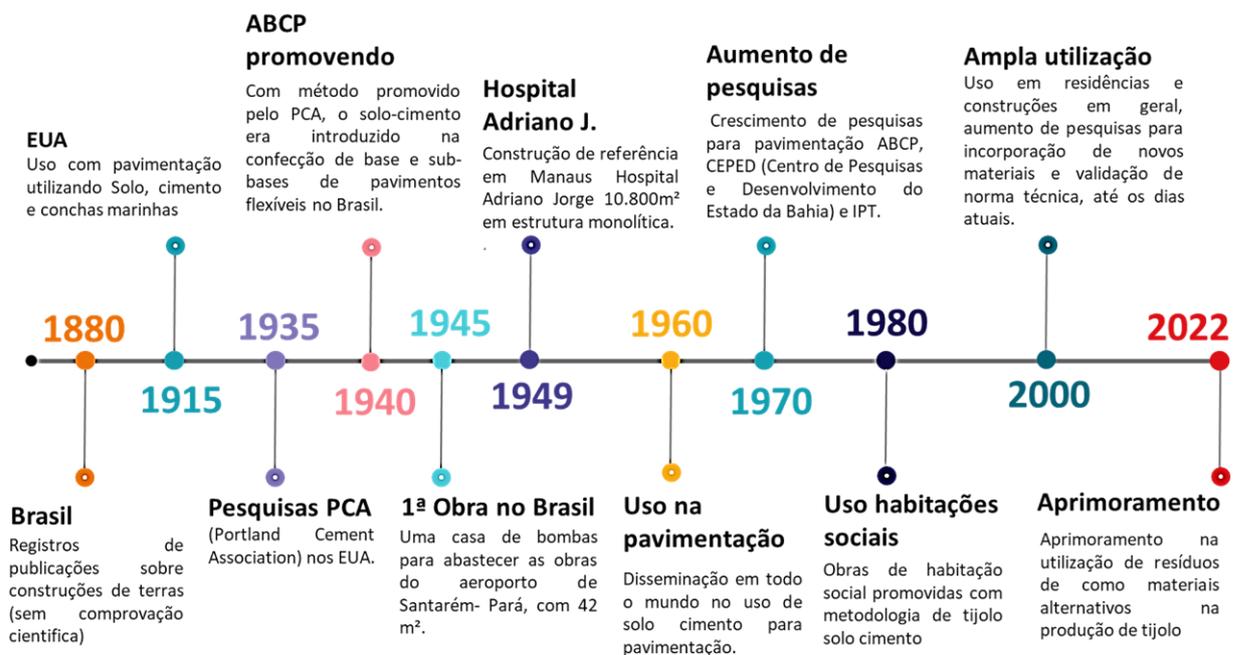
Um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland e água, em proporções estabelecidas por norma, compactado por meio de uma prensa, hidráulica ou mecânica e endurecido sem a necessidade de queima, podendo ser maciço ou vazado.

Segundo a Associação Nacional da Indústria do Tijolo Ecológico - ANITECO (2022), construções feitas utilizando terra crua e aditivos estão presentes na arquitetura

milénar, exemplos como a Muralha da China com mais de 2 mil anos executada em solo compactado, e o Castelo de Paderne em Portugal com aproximadamente 822 anos.

Exercendo a função de alvenaria o uso do solo cimento ganhou ênfase através de pesquisas desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) na década de 70, conforme Figura 8, (MERCADO, 1990).

Figura 8: Linha do tempo com histórico sobre solo cimento



Fonte: Adaptado LIMA (2018); GRANDE (2003); ANITECO (2022); SILVA (2022).

Fatores como natureza do solo, teor de umidade, compactação e dosagem do cimento podem interferir e influenciar diretamente as características do produto final. A coesão do solo cimento é encontrada pela composição do cimento relacionados a finura, quantidade de água e temperatura ambiente, (BAUER, 2019).

### 2.2.1 Vantagens e Desvantagens do tijolo de solo cimento

A importância do tijolo de solo cimento vai além das questões ambientais, pois a confecção promove oportunidades locais devido sua facilidade de obtenção,

necessitando apenas de treinamentos primários para produção, além da sua principal matéria prima ser facilmente encontrado na natureza (GOMES, 2021).

As vantagens e desvantagens do tijolo solo cimento quando comparados com materiais de construção mais populares como o tijolo cerâmico convencional, são muitas, e segundo Lima (2018) e Grande (2003) estão relacionadas ao processo de fabricação do tijolo, sendo simples, versátil, de baixo custo, com resistência mecânica maior, estrutura modular, com encaixe para orientação de montagem e preservação de juntas, evitando assim, trincas e fissuras, e é um material com características sustentáveis.

Para Sousa e Alves (2021) que avaliou o uso de tijolo de solo cimento para fins de vedação, há vantagens financeiras no seu uso, entretanto apenas como alvenaria portante, devido à redução no uso de formas, concreto e corte e dobra de ferragens, diferentemente da construção com tijolos cerâmicos de 8 furos, que necessitam do conjunto portante de vigas e pilares.

Por não passar pelo processo de queima o material é considerado ecológico, pois gera menos gás carbônico na produção. Outra vantagem é a possibilidade de incorporação de resíduos em sua mistura, visto que sua obtenção é através do processo de prensagem. Com rapidez durante a execução de obras, possibilita seu uso em casos de desastres naturais na reconstrução das cidades afetadas, (VILELA et al., 2020).

As vantagens na construção com tijolo de solo cimento englobam também a execução, visto que não necessita de reboco ou revestimento, possibilitando sua aparência natural apenas da camada de proteção realizada com pintura adequada, além disto, todas as instalações são embutidas, passantes nos furos verticais, se tornando assim uma edificação com maior conforto térmico, devido a circulação de ar dentro dos furos (ANITECO, 2022).

Entretanto, Lima (2018) e Grande (2003) citam que as desvantagens estão relacionadas a dificuldades com reformas, visto que a alvenaria é portante, durante sua produção em pequena escala e cuidados devem ser tomados, desde a padronização da produção quanto o volume reduzido que não atende a grande demanda da construção civil. Além

disso, a projeção do tijolo em grandes vãos, estruturas excessivamente esbeltas e em vigas em balanço devem ser evitadas.

Kozloski, Vagheti e Silva (2019), realizaram um comparativo entre duas edificações, uma, padrão com materiais convencionais e tijolo cerâmico, e outra considerada “casa popular eficiente” construída em tijolos de solo cimento. Os autores quantificaram a emissão de CO<sub>2</sub> de materiais empregados na construção e verificaram que quando comparadas com a construção com tijolos cerâmicos a construção com tijolos de solo cimento obteve uma redução de aproximadamente 30% de emissão de CO<sub>2</sub>, justificando seu método de produção, uma vez que os tijolos de solo cimento são prensados e não passam pelo processo de queima.

### 2.2.2 Custos x sistemas construtivos

Tradicionalmente os métodos construtivos utilizando alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto são os sistemas mais utilizados na construção civil brasileira. Atualmente são responsáveis por absorver uma considerável parcela do tempo de execução na construção, sobretudo gerando uma quantidade significativa de resíduos sólidos.

A escassez de matéria prima e o aumento contínuo dos impactos ambientais, tornam necessário o surgimento de novas técnicas construtivas, promovendo a sustentabilidade com velocidade nas construções e qualidade, (PONCIANO; SILVA, 2019).

## 2.3 Eficiência de compósitos no preparo do tijolo solo cimento

Para garantir o desempenho dos compósitos, os materiais em estudo devem ser conhecidos quanto suas características, a fim de atender essencialmente a NBR 10833 (ABNT, 2012), que determina tais propriedades relacionada a granulometria, índices de liquidez e plasticidade e teor de umidade.

Gonçalves et al. (2021) identificou em sua pesquisa que a dosagem de cimento influencia diretamente na resistência da mistura de solo cimento, tornando o cimento principal causador do aumento de peso específico aparente máximo da mistura. O papel do

cimento se aproxima de um fíler, de finura considerável, preenchendo os vários vazios entre as partículas de solo. Entretanto, tal teor de preenchimento é limitado, em casos excessivos o peso específico aparente seco do solo se torna passível a redução.

Duarte e Souza (2020) substituiu compostos por solo, cimento e escória nas proporções em porcentagem para a escória de aciaria em 0%, 15%, 30%, 45% e 60% e Reis (2019) incorporou rejeitos de minerações de quartzito. Nestas situações os autores obtiveram resultados satisfatórios.

Barreto (2020) também utilizou as adições de RCD e RCMG em substituição parcial do solo nos traços 1:8, 1:10 e 1:12 com 10% e 20% de substituição da massa por RCMG, avaliando além das propriedades mecânicas os desempenhos acústico e térmico, encontrou uma similaridade do desempenho acústico e térmico aos tijolos maciços artesanais de terra.

Pereira (2021) avaliou o desempenho mecânico e de durabilidade em concretos autoadensáveis utilizando os resíduos de marmoraria, apresentando viabilidade de utilização, e possibilitando alternativas de sustentabilidade na cadeia produtiva, gerando assim, um destino adequado a estes resíduos.

Miranda, Bacarji e Ferreira (2012) estudaram a viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo cimento, adicionando 5 %, 10 % e 15% de cimento e 0 %, 10 %, 15 % e 30 % de resíduo. Concluiu que, a adição do resíduo proveniente de beneficiamento de mármore e granito, possibilitou condições técnicas favoráveis para se produzir tijolos prensados de solo-cimento, com qualidade e redução no consumo de cimento.

Delunardi et al. (2021) realizou o estudo com a substituição de Resíduos de Rochas Ornamentais (RBRO) oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais provenientes de teares multifios, etapa anterior ao beneficiamento em marmorarias. O traço adotado foi 1:10 (cimento:solo corrigido), o solo foi substituído nos teores de 20, 30, 40 e 50% em massa de RBRO, além do traço de referência (0% em massa de RBRO). Foi observado que o traço recomendado para uma utilização maior dos resíduos foi com 50% de

substituição de areia que atendeu aos requisitos normativos, ressaltando ainda que durante a moldagem dos tijolos recomenda-se o ajuste do equipamento para garantias dimensionais mais precisas.

Sacramento (2016) também incorporou resíduos de rochas ornamentais nas seguintes proporções respectivas 1:7, 1:4:3 e 1:3:4 e verificou uma estabilidade na resistência à compressão mesmo adicionando os resíduos, também com resultados satisfatórios em suas proporções.

Souza M. *et al.* (2008) verificou que mesmo com a adição de resíduos e a redução de cimento (substituição nas proporções de 6, 8 e 10%), a resistência dos tijolos foram superiores. Já Ramos Filho (2021) realizou a combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manipueira com adição de aglomerantes na proporção de 50% de cada e destacou o melhor resultado com a incorporação de 9% de cimento na mistura, ressaltando sobre o efeito reverso de finos nos compósitos.

Silva (2022) afirma que existem muitas pesquisas sobre a incorporação e viabilidade da incorporação de diversos resíduos ou de produtos alternativos no solo cimento, com duplo objetivo, alternativa para destinação mais adequada e a possibilidade de reaproveitamento destes resíduos. Em seu estudo, verificou que diversos autores substituíram parcialmente o solo ou o aglomerante, nos casos de substituição do cimento na função aglomerante a também um benefício conjunto em diminuir o consumo do cimento e destinar de maneira mais adequada o resíduo.

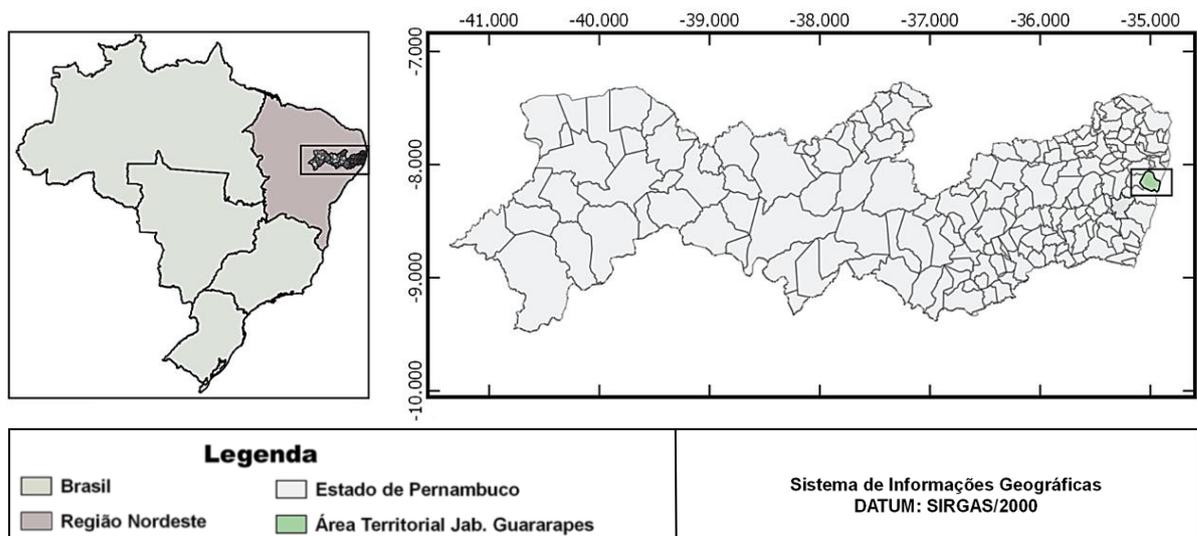
### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Jaboatão dos Guararapes pertence ao estado de Pernambuco, região nordeste brasileira. Segundo o IBGE (2020) a população está estimada em 2020 foi de 711.330 pessoas em uma área da unidade territorial de 258,724 km<sup>2</sup>, entre as coordenadas de Latitude: 8° 6' 43" Sul, Longitude: 35° 0' 55" Oeste.

Com origem indígena a palavra Yapoatan, inspirou o nome do município de Jaboatão que faz referência a uma árvore comum na região, comumente utilizadas na fabricação de mastros para embarcações, entretanto somente após a Lei Estadual nº 4, de 5 de maio de 1989, passou a ser chamada de Jaboatão dos Guararapes, em homenagem ao local das históricas batalhas nos Montes Guararapes, (IBGE, 2020).

A cidade, localizada a apenas 14 quilômetros do Recife (Figura 9), se destaca por possuir grande polo industrial e comercial, além de possuir vias de acesso que interligam a capital ao litoral sul do estado, economicamente possui o segundo maior PIB dos municípios pernambucanos, sendo o primeiro Recife.

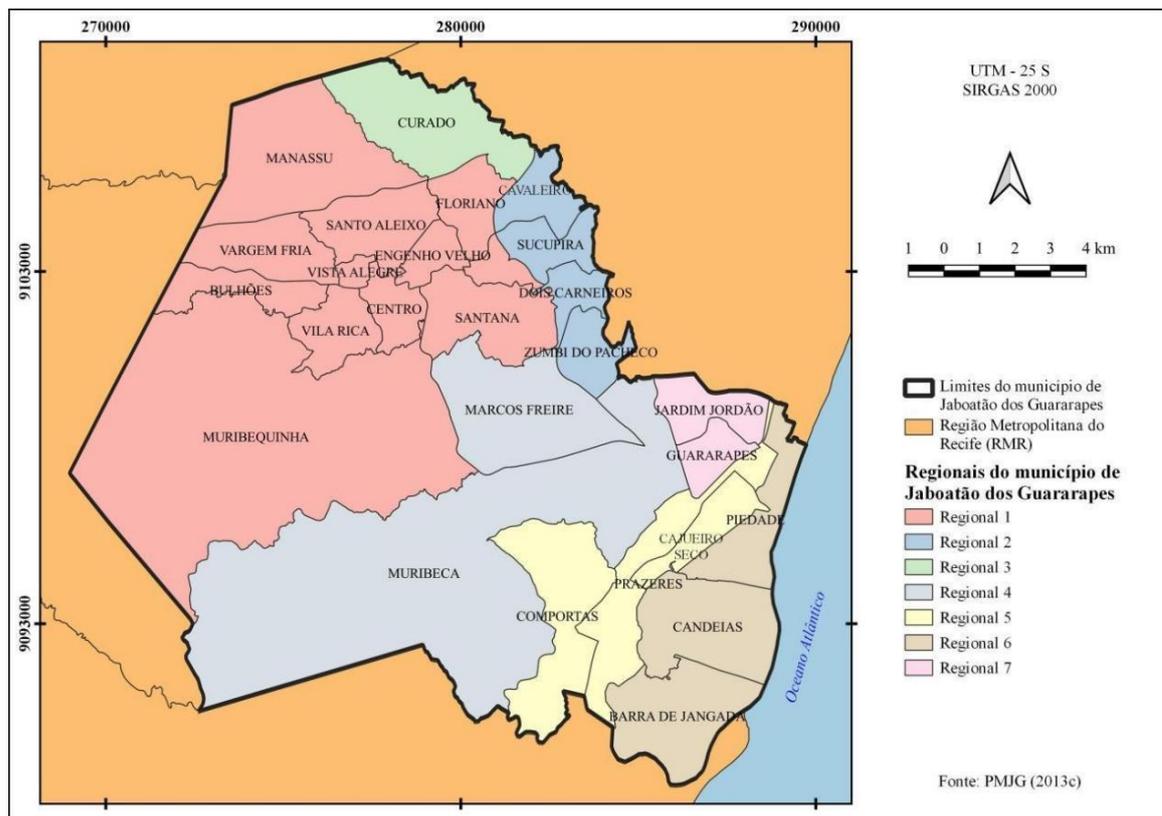
Figura 9 – Localização do município de Jaboatão dos Guararapes



Fonte: Autora (2022).

O Município está dividido de forma político-administrativamente através do Plano Plurianual do município (Lei nº 974/2013) em nove regiões (Figura 10), sendo reunidas em 31 bairros e 5 distritos.

Figura 10 – Distribuição geográfica das regionais por distrito



Fonte: Pessoa Neto (2022).

Na Tabela 3 é possível observar a relação dos bairros inseridos em cada região político-administrativa do município.

Tabela 3 – Regionais do município de Jaboatão dos Guararapes

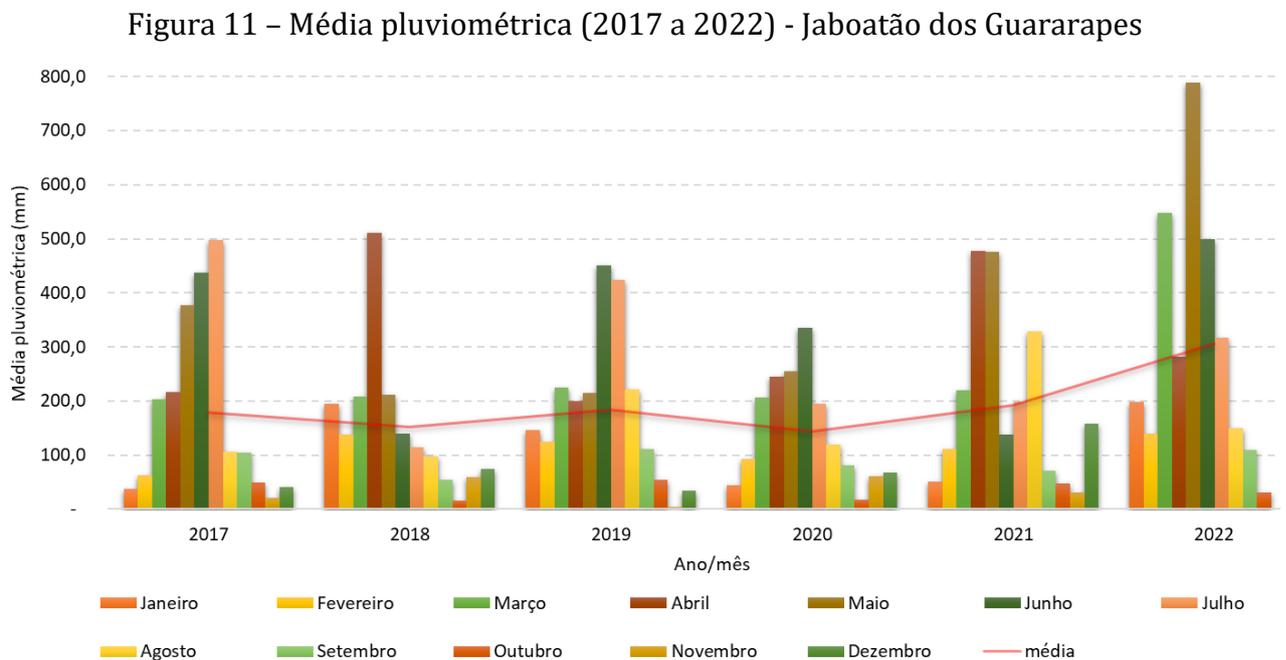
Regionais	Bairros
1- Jaboatão Centro	Bulhões, Centro, Manassu Socorro, Engenho Velho Santana, Floriano, Muribequinha, Vargem Fria, Vila Rica, Santo Aleixo e Vista Alegre.
2-Cavaleiro	Cavaleiro, Dois Carneiros, Sucupira e Zumbi do Pacheco.
3-Curado	Curado
4-Muribeca	Marcos Freire e Muribeca
5-Prazeres	Cajueiro Seco, Comportas e Prazeres
6 -Praias	Barra de Jangada, Candeias e Piedade
7- Guararapes	Guararapes e Jardim Jordão

Fonte: Jaboatão dos Guararapes(2013c).

### 3.1 Aspectos climáticos

O município está localizado na faixa litorânea do estado com características identificadas como tropical quente e úmido. Na região litorânea, as chuvas se estendem por quase todo o ano, com um curto período de seca, que geralmente ocorre durante os meses de setembro a dezembro.

Em anos com características normais a precipitação média anual (Figura 11) chega próximo a 20/50mm, a partir de fevereiro a faixa litorânea do estado passa a registrar uma maior intensidade de chuvas, com picos no mês de junho, (INPE, 2022).



Fonte: Adaptado Agencia Pernambucana de Águas e Climas - APAC (2022).

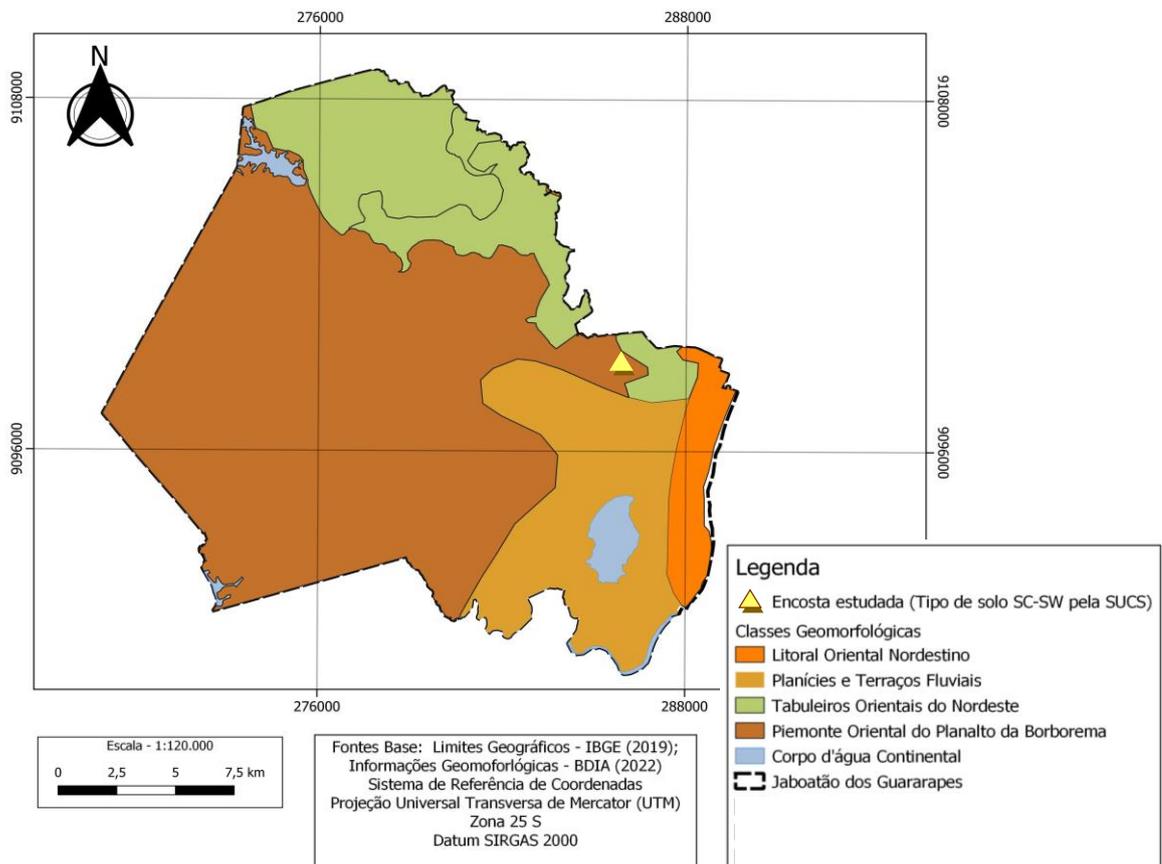
O estado de Pernambuco está localização próximo da Linha do equador, sofrendo impacto direto da Zona de convergência Intertropical Tropical (ZCIT), que aumenta a incidência de chuvas nestas regiões, entretanto segundo a APAC (2022), muitas massas de ar também atuam no estado, que acaba desviando boa parte dessas chuvas da região. As temperaturas médias ficam entre 25°C e 30°C no litoral pernambucano, expressando amplitudes térmicas anuais próximas a 5°C (INPE, 2022).

### 3.2 Relevo da região

Para caracterização do relevo da região, são divididas em três características: Planície, Tabuleiros, e Morros apresentando uma planície flúvio-marinha cercada por morros cristalinos e tabuleiros de rocha sedimentares. A Figura 12 apresenta detalhadamente por região. A região da planície apresentando características das formas marinhas com recifes de arenito e praias, formas fluviais e formas de transição com mangues e regiões de flúvio-lagunar.

Os tabuleiros da região denominados de inferior e superior em níveis distintos, mais baixo na faixa litorânea e extensa pequenas falésias com altura máxima de dois metros, com influência da erosão frequente marinha. Mais alto, localizadas entre 8m e 10m acima do nível médio do mar, apresentam em sua composição areias quartzosas esbranquiçadas, de granulação predominantemente média, e moderadamente selecionada.

Figura 12 – Geomorfologia de Jaboatão dos Guararapes

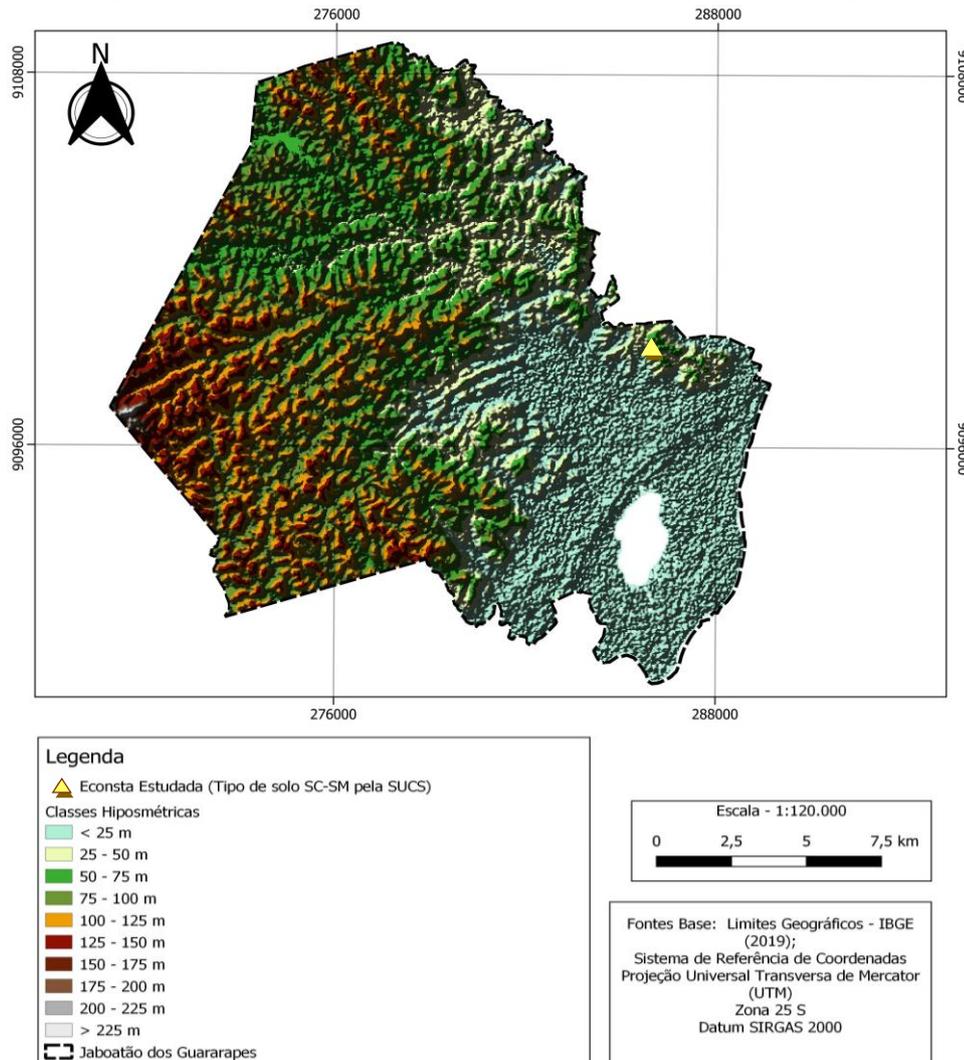


Fonte: Autora (2022).

Geomorfologicamente, a encosta estudada está localizada na região de Piemonte oriental do planalto Borborema, representado pela cor marrom no mapa, com regiões próximas de tabuleiros orientais e planícies e terraços fluviais.

Para altimetria o relevo se apresenta com divisões de planícies e morros. Na planície é possível encontrar terrenos com o mesmo nível ou até abaixo do nível do mar, enquanto nos morros as altitudes podem chegar até 200 metros, conforme mapa hipsométrico apresentado na Figura 13. A área estudada se localiza entre as classes hipsometrias de 100 a 125 metros e 50 a 75 metros de altura, isso representa uma posição intermediária entre as planícies que compõem o município de Jaboaão dos Guararapes.

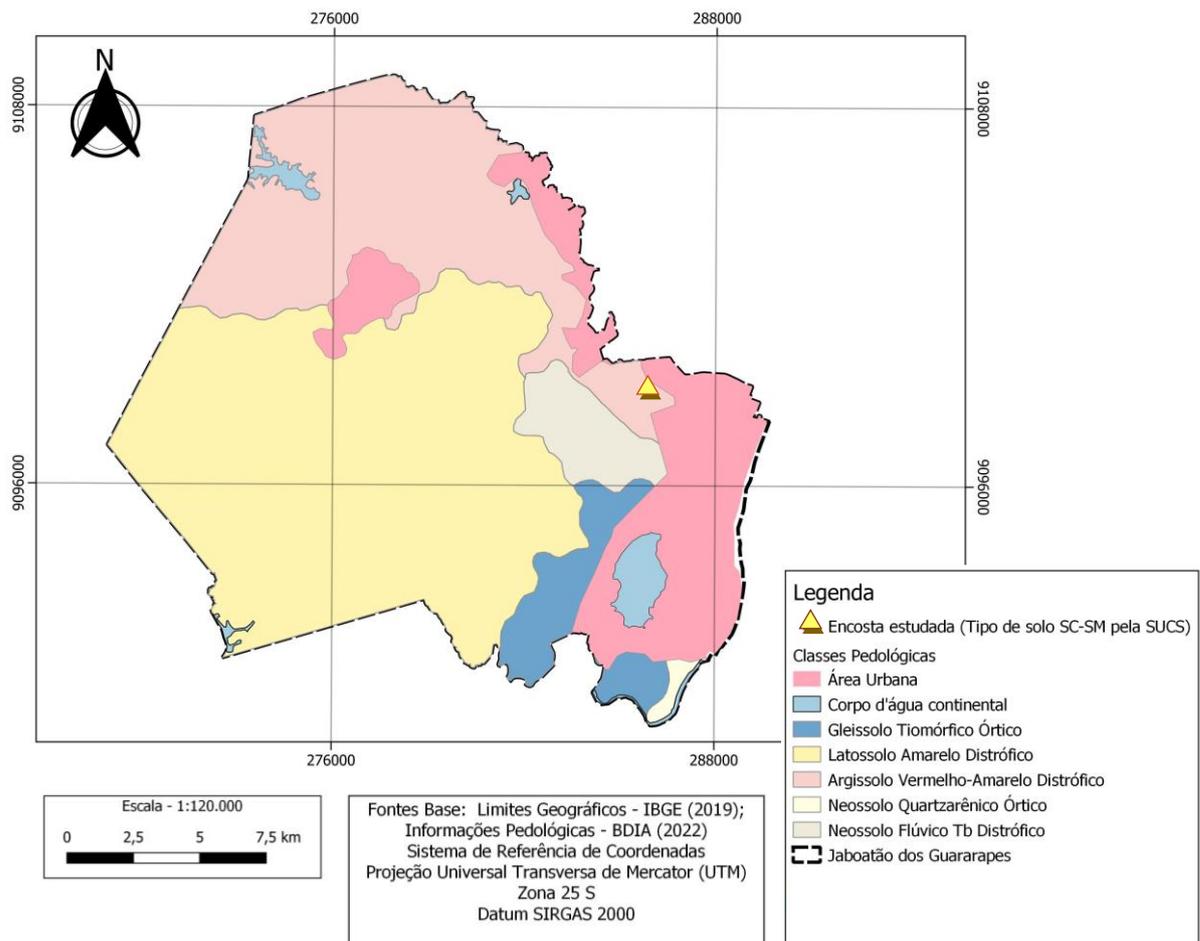
Figura 13 – Mapa hipsométrico de Jaboaão dos Guararapes



Fonte: Autora (2022).

Para classificação do solo da região, é possível observar (Figura 14) que se fazem presentes argissolos, espodosolos, gleissolos hápticos, latossolos, neossolos, solos de mangue e áreas urbanas, em sua maior parcela os Argissolos (rosa claro) e Latossolos (amarelo), a classificação representada na Figura 14 com dados do BDIA - Banco de Informações Ambientais.

Figura 14 – Pedologia da cidade de Jaboatão dos Guararapes.



Fonte: Autora (2022).

O Município de Jaboatão dos Guararapes envolve grandes conjuntos litológicos, compreendendo litótipos do Maciço Pernambuco-Alagoas, do Grupo Pernambuco, e sedimentos de cobertura terciários e quaternários, distribuídos na faixa litorânea. Estes três conjuntos foram formados em diferentes períodos, compreendendo um período de cerca de 2.500 milhões de anos atrás até a presente data (CPRM, 1997).

Com relação às características geológicas da região, estas são formadas por conjuntos diferenciados de geologia, sendo: as rochas cristalinas do Maciço Pernambuco-Alagoas; as rochas vulcano-sedimentares da bacia sedimentar Cabo (formação Cabo); os sedimentos terciários da Formação Barreiras e da Formação Algodoads; e os sedimentos quaternários das planícies aluviais e costeira (RAMOS, 2019).

### 3.3 Local do estudo

A área é uma jazida ativa de extração de saibro, material conhecido por ter características visuais de um solo de cores variadas, oriundo da decomposição de granitos e gnaisses. Sua composição é de um material granular com um misto entre grãos de areia, argila e fragmentos de minerais como feldspato (Figura 15). São possíveis de identificar a presença de foliação e veios, além das características de estruturas e textura da rocha original.

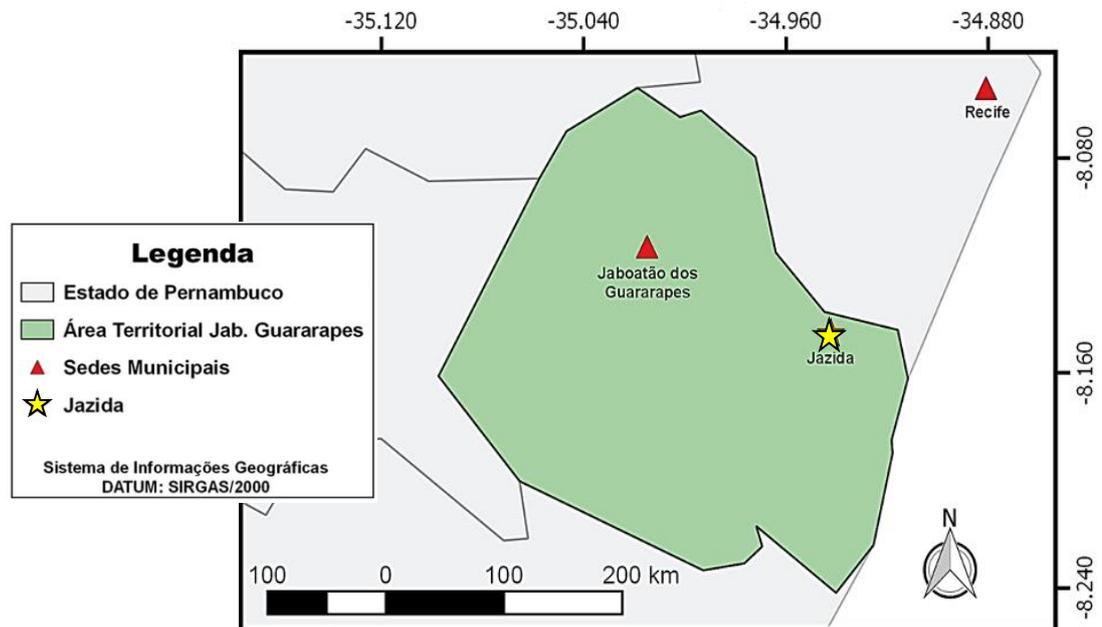
Figura 15 – Detalhe da encosta (A) e Jazida do estudo (B).



**Fonte:** Google Maps (2021).

As margens da BR-101, no bairro do Jordão (Regional 7), pertencente ao município de Jaboatão dos Guararapes, está localizada a encosta com 14,7 km<sup>2</sup>, onde foi coletado o material para o presente estudo (Figura 16), com as seguintes coordenadas geográficas: 8°08'43.7"S 34°56'32.5"W (GOOGLE MAPS, 2021).

Figura 16 – Localização da jazida no município de Jaboatão dos Guararapes



Fonte: Elaborado pela autora com auxílios do software QGis (2021).

Referente ao uso do solo em Jaboatão dos Guararapes, a mineração de materiais de construção como areia, argila, brita e pedra de talhe é obtida principalmente nas regiões norte e sul do município. A exploração de areia e argila, além da brita é concentrada na parte norte de Jaboatão, embora com menor representatividade (CPRM, 1997).

A área de estudo apresenta características geológicas, onde afloram sedimentos terciários, ocupando de 3% a 5% da área municipal. São sedimentos areno-siltico-argilosos intercalados por lentes de argila e níveis lateríticos, formando morros, morrotes e pequenos tabuleiros com encostas de fortes declividades, comumente superiores a 30% (CPRM, 1997).

## 4. METODOLOGIA

A tipologia e detalhes da pesquisa serão descritos no presente capítulo. A pesquisa foi dividida em etapas conforme apresentada na Figura 17. A primeira etapa descreve a coleta de material, a segunda trata da realização dos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e mecânica dos solos e resíduos, e posteriormente uma terceira etapa de preparo dos tijolos.

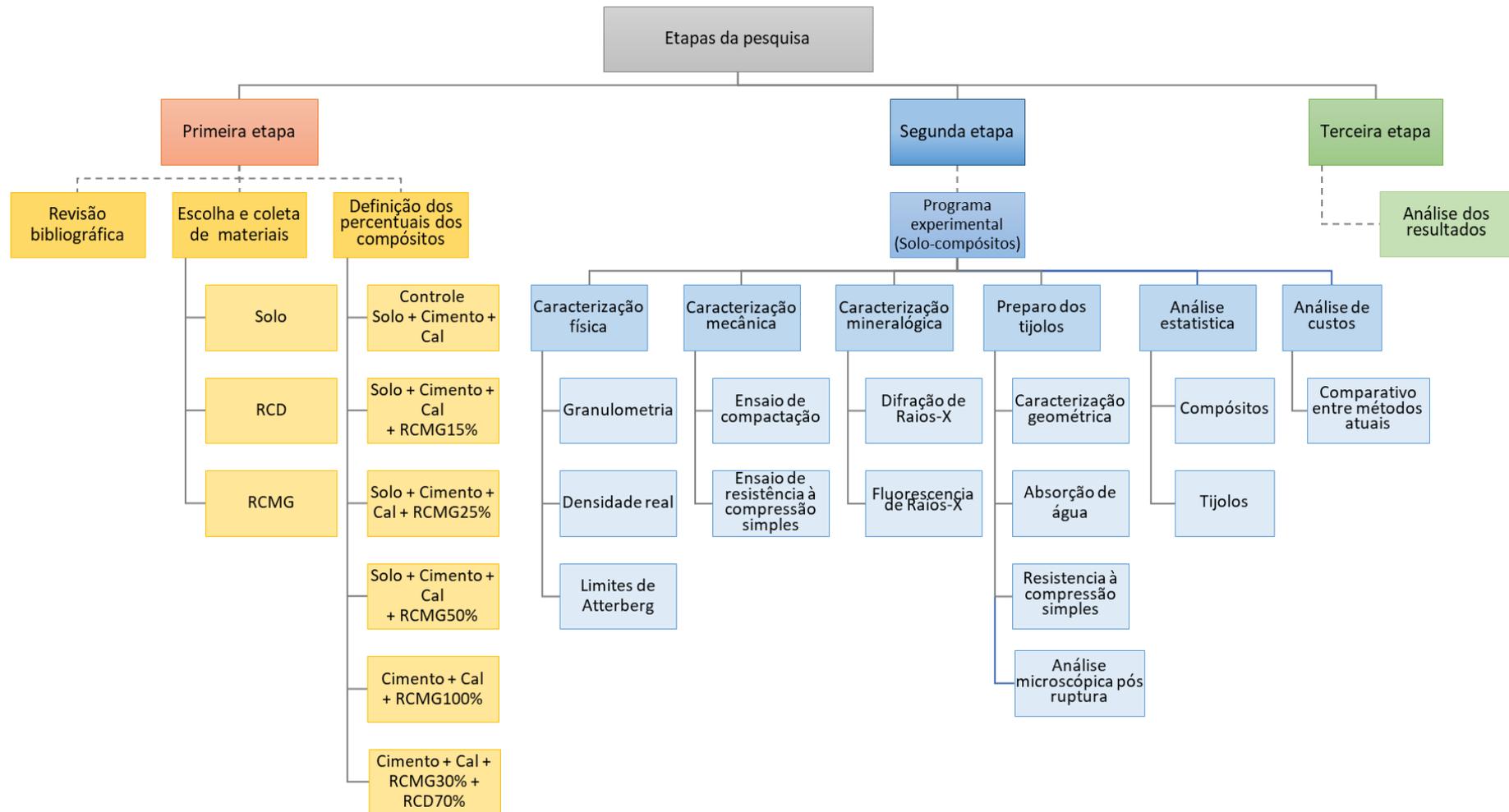
### 4.1 Primeira etapa

Para desenvolvimento deste trabalho, inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica e exploratória acerca do tema, que segundo Sousa, Oliveira & Alves (2021) este tipo de pesquisa está inserida especialmente no meio acadêmico e tem o objetivo no aperfeiçoamento e atualização do conhecimento, mediante a uma investigação científica de obras já publicadas.

Zambanini *et al.* (2021) atribuem a pesquisa exploratória como a etapa preliminar com objetivo de buscar maior familiaridade com o problema. A aplicabilidade torna ainda mais necessária, quando ainda não há tantos dados e informações disponíveis sobre um tema, mas se identifica que terá potencial de ser alvo de pesquisas futuras.

Foi realizada uma extensa investigação de laboratório em que o tem a opção de simular situações, analisá-las e compará-las, com informações publicadas sobre o tema pela comunidade científica, Zambanini *et al.* (2021).

Figura 17 – Fluxograma com etapas da pesquisa.



Fonte: autora (2020)

#### 4.1.1 Coleta de solo

A coleta do solo foi realizada na cidade de Jaboatão dos Guararapes/PE em jazidas naturais da região (Figura 18).

Figura 18 – Solo selecionado para estudo.



Fonte: Autora (2020)

Foram coletados 3760kg de solo, a 6 metros de profundidade, seguindo a NBR 6457 (ABNT, 2016) e a NBR 9604 (ABNT, 2016) preparação de amostras e coleta de amostras respectivamente.

#### 4.1.2 Coleta de Resíduo de marmoraria (RCMG)

O resíduo utilizado foi cedido pela empresa Pedra Bonita Mármore e Granitos Ltda, que está localizada na cidade de Serra Talhada em Pernambuco, especializada em beneficiamento de mármore e granitos.

Foram coletados 600kg do resíduo distribuídos em sacos de 50kg pela própria empresa e enviado ao laboratório de construção civil da Faculdade de Integração do Sertão (FIS) e Universidade de Pernambuco (UPE), para realização dos ensaios (Figura 19).

Figura 19 – Amostra do resíduo coletada para análise.



Fonte: autora (2020)

#### 4.1.3 Coleta de Resíduo de Construção e Demolição

O resíduo foi obtido na empresa de beneficiamento de resíduos de construção (Figura 20), totalizando aproximadamente 350kg de resíduo. O material foi selecionado em um lote único e enviado para os laboratórios de construção civil para as análises físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas.

Figura 20 – Coleta do resíduo de construção civil



Fonte: fornecido pela autora (2020)

#### 4.1.4 Ligante ou estabilizante

Para desenvolvimento da pesquisa foram utilizados cimento portland de alta resistência inicial (CP -V – ARI) comercializados em sacos de 40kg (estabilizante) e cal hidratada (CH-I) comercializada em sacos de 20kg.

## 4.2 Segunda etapa

As análises realizadas na segunda etapa deste trabalho são descritas em duas perspectivas: a primeira utilizando as normas para o uso em tijolos de solo cimento e a segunda em atendimento as normas de solos.

### 4.2.1 Caracterização física

As análises de caracterização física foram realizadas nos laboratórios de Engenharia civil da Faculdade de Integração do Sertão (FIS) na cidade de Serra Talhada/PE. Os critérios para obtenção do solo para produção do tijolo estão descritos na NBR 10833 (ABNT, 2013) - Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento que deve atender os seguintes requisitos:

- Solo passante na Peneira 4,75 mm total de 100%;
- Fração passante na peneira 0,075mm de 10% a 50%;
- Limite de liquidez  $\leq 45\%$ ;
- Índice de plasticidade  $\leq 18\%$ .

Com o objetivo de descrever as características dos materiais utilizados foi feita a caracterização física do solo e dos resíduos, separadamente, além dos compósitos com peneiramento, sem adição de cal e cimento e com adição dos aglomerantes.

#### 4.2.1.1 Granulometria

A composição granulométrica do solo foi determinada seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2018c). A obtenção das frações de argila, silte, areia e pedregulho realizada pela NBR

6502 (ABNT, 2022). A foi realizada sedimentação com defloculante e com dispersor (Figura 21), com defloculante e sem dispersor, e sem defloculante e sem dispersor, seguindo as recomendações da NBR 13602 (ABNT, 2020).

Figura 21 – Dispersor (A) e Ensaio de sedimentação (B)

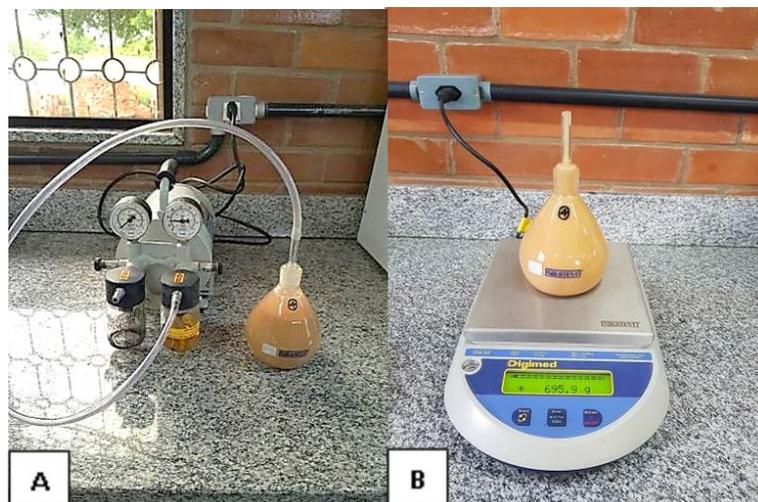


Fonte: Autora (2021)

#### 4.2.1.2 Densidade real dos grãos

A densidade real foi realizada seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016) e NBR 6458 (ABNT, 2017) (Figura 22).

Figura 22 – Realização do ensaio de densidade real.



Fonte: Autora (2021).

#### 4.2.1.3 Limites de Atterberg

Para determinação dos limites de liquidez e de plasticidade de solo, RCD, RCMG e compósitos. Foram utilizadas as normas NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

#### 4.2.2 Caracterização mecânica

##### 4.2.2.1 Compactação

Os ensaios de compactação e compressão simples no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI). Para compactação foi realizado conforme NBR 7182 (ABNT, 2020) - Solo - Ensaio de compactação (Figura 23).

Figura 23 –Realização do ensaio de compactação



Fonte: Autora (2021)

Foram moldados 60 corpos de prova com reuso do material sem a adição de aglomerantes e com a adição de aglomerantes sem o reuso dos materiais nos ensaios, (Figura 24).

Figura 24 – Retirada amostra em ensaio de compactação.



Fonte: Autora (2021)

#### 4.2.2.2 Compressão simples

A determinação da resistência à compressão simples foi realizada de acordo com a NBR 12770 (ABNT, 2022), onde foram definidas três idades de cura 7, 28 e 60 dias, e moldados 90 CP's, sendo uma série de 5 CP's para cada tempo de cura. A cura foi realizada em câmara úmida para conservação de umidade. Cada corpo-de-prova foi moldado de forma estática na prensa manual de CBR e o rompimento foi realizado em Prensa Universal de Ensaio (EMIC / Linha DL-30000) conforme as figuras 25 e 26, respectivamente.

Figura 25 – Corpo de prova submetido ao em ensaio de compressão.



Fonte: Autora (2021)

Figura 26 – Controle tecnológico dos corpos de prova



Fonte: Autora (2021).

#### 4.2.3 Caracterização mineralógica

O ensaio de Difração de Raios-X foi realizado no Laboratório de Mineralogia do Solo da UFRPE, fluorescência de Raios-X realizado no laboratório de fluorescência da Raios-X do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (DGEO-UFPE).

##### 4.2.3.1 Difractometria de Raios-X (DRX)

O equipamento utilizado foi um difratômetro de feixe divergente, de modelo um XRD 6000 Shimadzu, voltagem de 40 kV e corrente de 35 mA (Figura 27).

Figura 27 – Realização do ensaio de difratometria de Raios-X



Fonte: Autora (2022)

As condições aplicadas durante o ensaio foram: varredura de 5 a 70  $^{\circ}2\theta$  com velocidade de varredura de 1,5  $^{\circ}2\theta$  min<sup>-1</sup> com radiação K-alfa do cobre e considerado como forma de análise o pó não orientado. A realização do ensaio de difratometria consiste em determinar as fases cristalinas e amorfas do precursor. Segundo o método de difração Fraunhoffe, quanto menor for a partícula analisada, maior será o ângulo de difração de um feixe luminoso que travessará a interface entre as partículas, (CRUZ, 2022).

#### 4.2.3.2 Fluorescência de Raios X (EDX)

A realização do ensaio consiste na intensidade dos Raios-X emitidos pelos elementos químicos que compõem uma determinada amostra, considerada uma técnica multielementar instrumental não destrutiva (RAMALHO, 2021). Desta forma com o ensaio é possível determinar a concentração e caracterização dos elementos químicos da amostra de maneira quantitativa ( $Al_2O_3$ , MgO,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ T e outros).

Para realização do ensaio, as amostras foram pulverizadas em moinho de discos e foram secadas em estufa a 110  $^{\circ}C$ . Uma fração da amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. A pastilha prensada foi analisada em espectrômetro de fluorescência de Raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores.

#### 4.2.4 Tijolo de solo cimento

A etapa de produção dos tijolos ecológicos seguiu as recomendações da NBR 10833 (ABNT, 2013), conforme Figura 28.

Figura 28 - Etapas de produção dos tijolos



Fonte: Adaptado da NBR 10833 pela autora (2021).

No preparo dos tijolos ecológicos (Figura 29) foi utilizada através de uma prensa hidráulica localizada na cidade de Camaragibe/PE. As moldagens para tijolos com dimensões de 25cm (comprimento) x 12,5cm (largura) x 7cm (altura) e o equipamento utilizado tem capacidade de produção de 1500 tijolos/dia.

Figura 29 – Tijolo produzido após prensagem



Fonte: Autora (2021)

Durante o preparo do solo, utilizou-se o triturador de solo, uma peneira com malha de abertura 4,75mm, balança digital e uma estufa de secagem para realização do ensaio de absorção de água.

As proporções dos compósitos escolhidos estão descritas na Tabela 4:

Tabela 4 - Proporções dos materiais para produção dos tijolos.

ID Traço	Traço (volume)	Cimento	Solo	RCMG	Areia RCD	Cal	Quant. amostras	
1	CONTROLE	1:6	1	6,00	-	-	5%	45
2	RCMG15%	1:5,1:0,9	1	5,10	15%	-	5%	34
3	RCMG25%	1:4,5:1,5	1	4,50	25%	-	5%	38
4	RCMG50%	1:3:3	1	3,00	50%	-	5%	42
5	RCMG100%	1:6	1	-	100%	-	5%	37
6	RCMG30%RCD70%	1:1,8:4,2	1	-	30%	70%	5%	37

Fonte: Autora (2021).

Total = 297 und

Conforme NBR 8492 (ABNT, 2012), foram destinados para análise dimensional 10 tijolos, onde, 3 amostras seguiram para o ensaio de absorção de água e 7 amostras para o ensaio de resistência a compressão por idade de 7 dias, 28 dias, 60 dias e 480 dias de cura. Para obtenção da resistência à compressão e absorção de água foram utilizadas as equações 1 e 2:

$$Ft = \frac{F}{S} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Ft é a resistência à compressão simples (Mpa)

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

S é a área de aplicação da carga (mm<sup>2</sup>)

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

Onde:

A é a absorção de água (%)

m<sub>1</sub> é a massa do corpo de prova seco em estufa (g)

m<sub>2</sub> é a massa do corpo de prova saturado (g)

Os tijolos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos 7 dias, 28 dias, 60 dias e 480 dias de idade e aos 14 dias de idade foram submetidos ao ensaio de absorção de água conforme preconiza a NBR 8492 (ABNT, 2012). Para análise de resistência à compressão os valores não devem ter sua média inferior a 2,0 Mega pascal (MPa), nem individualmente obter resultados inferiores a 1,7MPa com idade mínima de 7 dias de cura.

#### 4.2.4.1 Controle tecnológico

Os ensaios do tijolo (resistência, características geométricas e absorção de água) no Laboratório de Ensaio Tecnológicos de Materiais da Construção Civil (LETMACC) localizado no SENAI/PE, onde foi realizada uma análise dimensional de cada tijolo confeccionado, conforme a (Figura 30).

Figura 30 – Controle tecnológico dos tijolos



Fonte: Autora (2021).

Segundo a NBR 10833 (ABNT, 2013) a tolerância dimensional é de  $\pm 1\text{mm}$  em suas dimensões. Os tijolos foram medidos com paquímetro de alta precisão e atenderam as condições exigidas pela norma.

#### 4.2.4.2 Absorção de água

O ensaio de absorção de água no laboratório de produção de alimento vivo - LAPAVI da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Utilizou-se estufa de secagem e balança de precisão (Figura 31), além de recipiente para garantir a saturação total do material. Segundo a NBR 8492 (ABNT, 2012) a amostra ensaiada não pode apresentar a média dos valores maior do que 20%, nem valores individuais maiores do que 22%.

Figura 31 – Pesagem de material seco.



Fonte: Autora (2021)

#### 4.2.4.3 Resistência à compressão simples do tijolo

Conforme a NBR 8492 (ABNT, 2013), a primeira etapa para realização do ensaio de resistência à compressão se dá com o corte central (Figura 32), seguidos do capeamento e união entre as faces (Figura 33), saturação (Figura 34) e em seguida a ruptura (Figura 35).

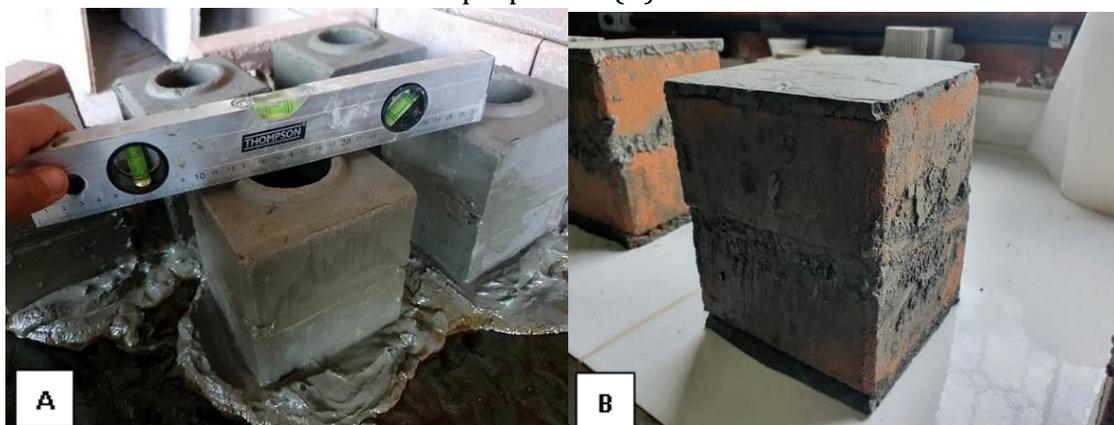
Figura 32 – Corte no meio para realização de ensaio



Fonte: Autora (2021).

A preparação dos tijolos seguiu o capeamento de ambas as faces com uma pasta de cimento nivelado. A Figura 33 representa a conferência do nivelamento da face inferior da pasta, 12,5cm x 12,5cm.

Figura 33 – Controle de qualidade no capeamento das amostras (A) e Amostra preparada (B).



Fonte: Autora (2021).

A etapa de saturação foi realizada por um período de 6 horas antes da realização da ruptura (Figura 34).

Figura 34 - Corpos de prova submersos em tanque de água.



Fonte: Autora (2021).

Para determinação da resistência à compressão simples, utilizou-se duas prensas uma automática (Figura 35) e uma manual, ambas com capacidade de 100 tf.

Figura 35 – Prensa manual Solotest



Fonte: Autora (2021)

#### 4.2.4.4 Análise microscópica dos fragmentos pós ruptura

Após a ruptura foram coletados fragmentos dos tijolos realização de estudo morfológico e composicional dos grãos, a fim de avaliar suas características visuais de índices de

vazios e empacotamento de partículas entre os compósitos. Para esta análise foi realizado observação em microscópio óptico com aumento de 500x marca Doniu.

#### 4.2.5 Análises estatísticas

A normalidade dos dados de RCS e MPa foi verificada a partir do teste de Shapiro-Wilk, e a homocedasticidade foi verificada usando Levene. Caso os pressupostos da Análise de Variância (ANOVA) sejam aceitos, a ANOVA two-ways foi realizada para testar se há diferença entre as variáveis de interesse (RCS e MPa) por tratamento (traço) e idade. No caso de rejeição de  $H_0$ , o teste *post-hoc* de significância honesta de Tukey ou Tukey HSD foi executado como comparação múltipla. Todas as análises foram executadas no Software R (R Core Team, 2021) com nível de significância igual a 5%.

#### 4.2.6 Análise comparativa de custos de sistemas construtivos

Foram realizados orçamentos visando à aplicação de três diferentes materiais de métodos construtivos empregados na construção civil (Figura 36): tijolo ecológico/solo-cimento (25 x 12,5 x 7) cm, tijolo cerâmico 8 furos (9 x 19 x 19) cm e estrutural com bloco de concreto (14 x 19 x 39) cm.

Figura 36 – Materiais para estudo comparativo

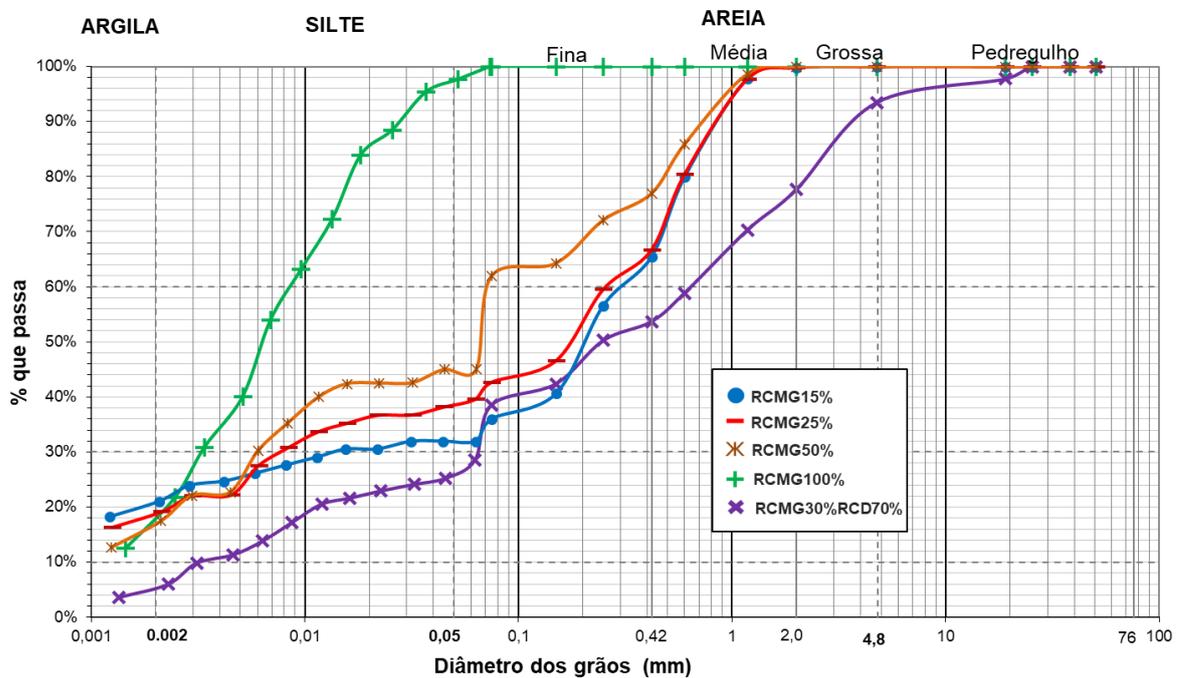


Fonte: Autora (2021).

Para a análise comparativa do orçamento, foram utilizados aspectos estruturais (bloco, concreto, ferragem, argamassa e forma) e de acabamento (rejunte, chapisco, emboço, reboco/massa, textura, pintura e impermeabilizante), além dos custos com mão de obra. Os valores foram coletados a partir da aplicação em uma área de 18m<sup>2</sup> em Camaragibe/PE.



Figura 38 - Curva granulométrica dos compósitos



Fonte: Autora (2021)

Apenas o RCD e o compósito RCMG30%RCD70% foram possíveis de identificar os coeficientes de curvatura ( $C_c$ ) e uniformidade ( $C_u$ ). Para o RCD o resultado de  $C_c$  foi 13,46 e  $C_u$  2,69, sendo tais valores classificados pela NBR 6502 (ABNT, 2022) como um solo bem graduado (Figura 38). O solo e os demais compósitos por serem materiais finos não apresentaram diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ), não sendo possível a obtenção do  $C_u$  e  $C_c$ .

Em ambas as curvas das figuras 37 e 38, foi possível observar a variação de graduação no comportamento dos materiais. À medida que o resíduo RCMG foi incorporado o percentual de finos nos compósitos aumentou. A curva em que verifica a má graduação é exatamente onde o resíduo foi inserido em sua totalidade no compósito RCMG100%, Figura 38.

Além dos requisitos solicitados nas normas de solo/cimento, foi utilizada a NBR 10833 (ABNT, 2013) que descreve os requisitos para produção do tijolo de solo cimento. A Tabela 5 apresenta os valores das frações granulométricas referentes às amostras estudadas.

Tabela 5 - Frações da granulometria

Id amostra	Argila	Silte	Areia			Pedr.	Relação Silte/Argila	Requisito NBR 10833:2013
			Fina	Média	Grossa			
Solo	17%	10%	14%	35%	22%	0%	0,60	100% passante #4,75 mm
RCD	4%	5%	24%	31%	22%	14%	1,25	
RCMG15%	26%	8%	30%	35,5%	0,5%	0%	0,31	
RCMG25%	24%	16%	23,5%	36%	0,5%	0%	0,67	Fração passante na #0,075mm de 10% a 50%;
RCMG50%	24%	20%	32%	23,5%	0,5%	0%	0,83	
RCMG100%	24%	76%	0%	0%	0%	0%	3,17	
RCMG30%RCD70%	12%	16%	26%	24%	16%	6%	1,33	

Fonte: Autora (2021)

Foi verificado que nas frações granulométricas o solo estudado tem 72% de areia, enquanto o RCD contém 66% de areia e 6% considerados pedregulho sendo caracterizados como solos arenosos. Segundo Nascimento (2019) que avaliou o mesmo RCD da empresa Ciclo ambiental as características encontradas foram de 77% de solo arenoso.

A avaliação das frações granulométricas permite analisar os critérios estipulados pela NBR 10833 (ABNT, 2013) que propõe uma caracterização do solo mais arenosa. Gonçalves (2022) descreve que solos finos com características argilosas podem dificultar sua produção no processo de desmoldagem do tijolo assim que sai da prensa, e ressalta também que durante a secagem pode apresentar alta retração plástica. Foi realizada a correção do solo com areia lavada com parcela granulométrica mais graúda aproximando o solo aos requisitos da NBR 10833 (ABNT, 2013) em 70% de solo arenoso.

Para a produção de tijolos de solo cimento seguindo as diretrizes da NBR 10833 (ABNT, 2013), ressalta-se ainda que os compósitos atenderam aos critérios da referida norma, com exceção do resíduo (RCD) que obteve apenas 9% do material passante na peneira 0,075mm.

Dantas N. (2019), realizou a correção de solo utilizando as características arenosas graúdas do RCD, uma vez que o solo estudado tinha características argilosas e

necessitava otimizar a graduação, o RCD escolhido tinha 67,83% de areia, 11,5% argila e 20,65% de silte.

Para Barreto (2020), o RCMG deve ser adicionado em quantidades menores para avaliar a possibilidade de contribuição como um filer, com objetivo de preencher os vazios da mistura no solo cimento, citando ainda o exemplo do uso de filer em cimento Portland composto CP II -F.

### 5.1.2 Densidade real dos grãos

Os ensaios para obtenção da densidade real dos grãos relacionados ao solo, resíduos e suas devidas misturas estão apresentados na Tabela 6. Dos valores obtidos, destaca-se o solo que apresentou densidade 2,64 representando 3% a mais que o compósito RCMG30%RCD70%, já o compósito RCMG100% apresentou o valor de 2,65, enquanto o RCD obteve o valor de 2,66.

Tabela 6 - Densidade real das partículas do solo, resíduos e compósitos

Id amostra	Densidade real
SOLO	2,64
RCD	2,66
RCMG	2,65
RCMG15%	2,62
RCMG25%	2,65
RCMG50%	2,64
RCMG100%	2,65
RCMG30%RCD70%	2,55

Fonte: Autora (2021)

Segundo Nascimento (2019) os valores de densidade real encontrado para o RCD foi de 2,61, valores próximos também foram obtidos por Silva (2018), Macedo (2016), Costa C. (2015), que variaram de 2,62 a 2,65.

Barreto (2020) encontrou para o RCD o valor de 2,54, enquanto para o RCMG o valor foi 2,66. Este valor pode ser justificado de acordo com os minerais presentes no material, onde foram identificadas presenças de fases cristalinas de quartzo e calcita.

### 5.1.3 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg indicam amostras de fraca e media plasticidade, conforme apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Limites de consistência

Id amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação	Requisito NBR 10833
SOLO	28	18	10	Medianamente plástico	Limite de liquidez
RCD	NL	NP	-	Não plástico	$\leq 45\%$ ;
RCMG15%	30	23	7	Fracamente plástico	Índice de plasticidade $\leq 18\%$ .
RCMG25%	32	24	8	Medianamente plástico	
RCMG50%	35	25	10	Medianamente plástico	
RCMG100%	27	26	1	Fracamente plástico	
RCMG30%RCD70%	24	19	5	Fracamente plástico	

\*NL – Não Líquido / NP – Não plástico

Fonte: Autora (2021)

Foi possível observar que os compósitos RCMG15%, RCMG100% e RCMG30%RCD70% foram classificados como fracamente plásticos. No caso do RCMG15% o valor do Índice de Plasticidade se aproximou do limite que define o estado em fracamente plástico e medianamente plástico com  $IP=7$ , enquanto o solo e os compósitos com adições intermediárias RCMG25% e RCMG50% foram classificados como medianamente plásticos.

O RCD não foi possível classificar sua consistência, pois não apresentou características suficientes para realização do ensaio, sendo considerado como não líquido e não plástico. Nascimento (2019) em seu estudo, também classificou o RCD como não líquido (NL) e não plástico (NP).

### 5.1.4 Análise do cimento

Os resultados da análise do cimento utilizado neste trabalho encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Características e propriedades do cimento Portland CP V ARI

	ENSAIOS	METHOD.	UN.	DESV. PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Químico	Resíduo Insolúvel - RI	NBR NM 15	%	0,29	1,07	≤ 3,5
	Perda ao Fogo - PF	NBR NM 18	%	0,28	1,55	≤ 6,5
	Óxido de Magnésio - MgO	NBR 14656	%	0,29	2,23	≤ 6,5
	Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	NBR 14656	%	0,12	4,3	≤ 4,5
Físico	Área Específica (Blaine)	NBR 16372	cm <sup>2</sup> /g	109	4281	não aplicável
	Massa Específica	NBR 16605	g/cm <sup>3</sup>	0	3,13	não aplicável
	Finura pela peneira 75 µm	NBR 11579	%	0,02	0,02	≤ 6,0
	Finura pela peneira 45 µm	NBR 9202/85	%	0,17	0,64	não aplicável
	Água de consistência da pasta	NBR 16606	%	0,6	33,4	não aplicável
	Início de pega	NBR 16607	min	12	163	≥ 60
	Fim de pega	NBR 16607	min	12	223	≤ 600
Mecânico	Resist. à Compressão - 7 D	NBR 7215	MPa	1	47,8	≥ 34,0

Fonte: Companhia de Cimentos Nacional (2021).

## 5.2 Caracterização mecânica

### 5.2.1 Compactação

Os resultados do ensaio de compactação estão apresentados na Tabela 9, com informações relacionadas ao ensaio sem a adição de aglomerantes e com a adição de cal e cimento.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de compactação

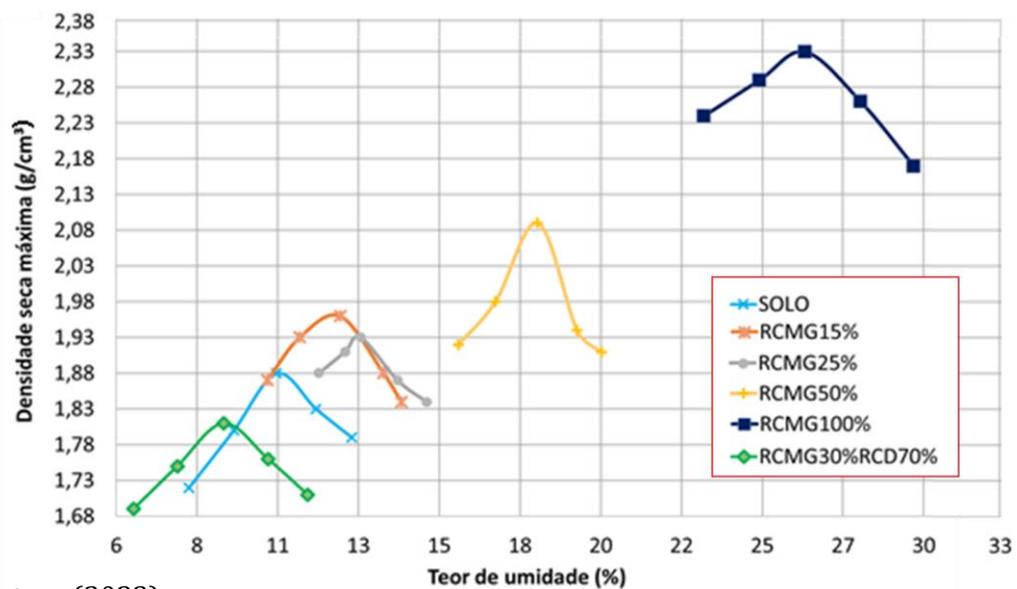
Identificação das amostras	Sem aglomerantes		Com aglomerantes	
	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)
SOLO	1,88	11%	1,953	12%
RCD	1,87	12%	-	-
RCMG15%	1,96	12%	1,926	12%
RCMG25%	1,93	13%	1,918	12%
RCMG50%	2,09	18%	1,8	16%
RCMG100%	2,33	26%	1,523	21%
RCMG30%RCD70%	1,81	9%	1,847	12%

Fonte: Autora (2021).

Os ensaios com a incorporação dos ligantes apresentaram uma leve redução tanto no peso específico, quanto no teor de umidade ótima, exceto no ensaio referente ao solo, em que com aglomerante houve um acréscimo 1,11%.

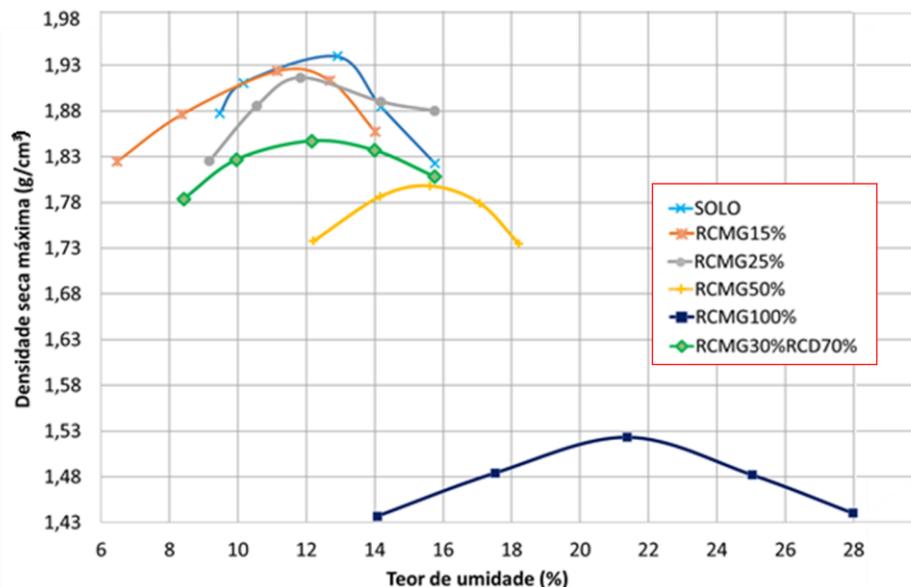
As curvas de compactação de todas as misturas e componentes foram divididas em sem aglomerante e com aglomerante, na Figura 39 e 40 é possível observar a desconformidade entre os compósitos, em destaque principalmente o RCMG100% representado na cor azul.

Figura 39 - Curvas de compactação sem aglomerante



Fonte: Autora (2022).

Figura 40 - Curvas de compactação com ligante



Fonte: Autora (2022).

Em destaque de ambas as curvas apresentadas nas figuras 39 e 40, o compósito RCMG100% se apresentou mais distante das outras curvas, com o compósito RCMG50% que se associa as demais curvas. Os materiais se comportam de maneira distinta principalmente devido a cada massa específica dos grãos do solo que são diferentes.

De acordo com Nascimento (2019) à medida que o RCD foi incorporado nas misturas a densidade seca máxima aumentou, e apresentou redução na umidade ótima. O autor justifica que esse resultado pode ser explicado pela melhoria na graduação do solo.

### 5.2.2 Resistência à compressão simples

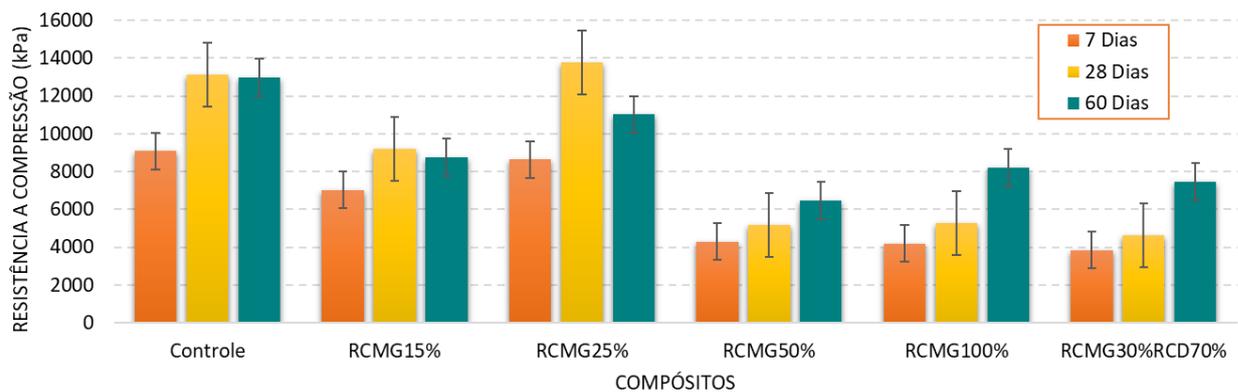
Na Figura 41 e 42 estão apresentados os corpos de prova após o rompimento e os resultados do ensaio de resistência à compressão simples dos compósitos aos 7 dias, 28 dias e 60 dias de idade.

Figura 41 – Corpos de prova rompidos



Fonte: Autora (2021)

Figura 42 - Comparativo de resistências a compressão do solo e compósitos



Fonte: Autora (2022).

Os resultados de resistência aos 28 dias nas misturas controle, RCMG15% e RCMG25% apresentaram valores superiores do que os resultados com 60 dias de idade respectivamente 31%, 24% e 37%, enquanto os compósitos RCMG50%, RCMG100% e RCMG30%RCD70% apresentaram o melhor desempenho aos 60 dias de idade (Tabela 10).

Tabela 10 - Resistência a compressão dos corpos de prova

Identificação das amostras	Média dos valores		
	7 Dias (kPa)	28 Dias (kPa)	60 Dias (kPa)
Controle	9.077	13.117	12.966
RCMG15%	7.013	9.177	8.750
RCMG25%	8.630	13.777	11.011
RCMG50%	4.283	5.177	6.457
RCMG100%	4.203	5.273	8.195
RCMG30%RCD70%	3.843	4.627	7.439

Fonte: Autora (2021).

Aos 7 dias de idade o traço controle obteve o melhor resultado com 9.077 kPa, enquanto o compósito com menor desempenho RCMG30%RCD70% obteve um valor de 3.843 kPa, representando uma redução de 42% na sua resistência.

O resultado com maior expressividade foi aos 28 dias do compósito RCMG25% com 13.777 kPa, representando 34% a mais que o resultado com menor expressividade nessa idade RCMG30%RCD70% com valor de 4.627 kPa.

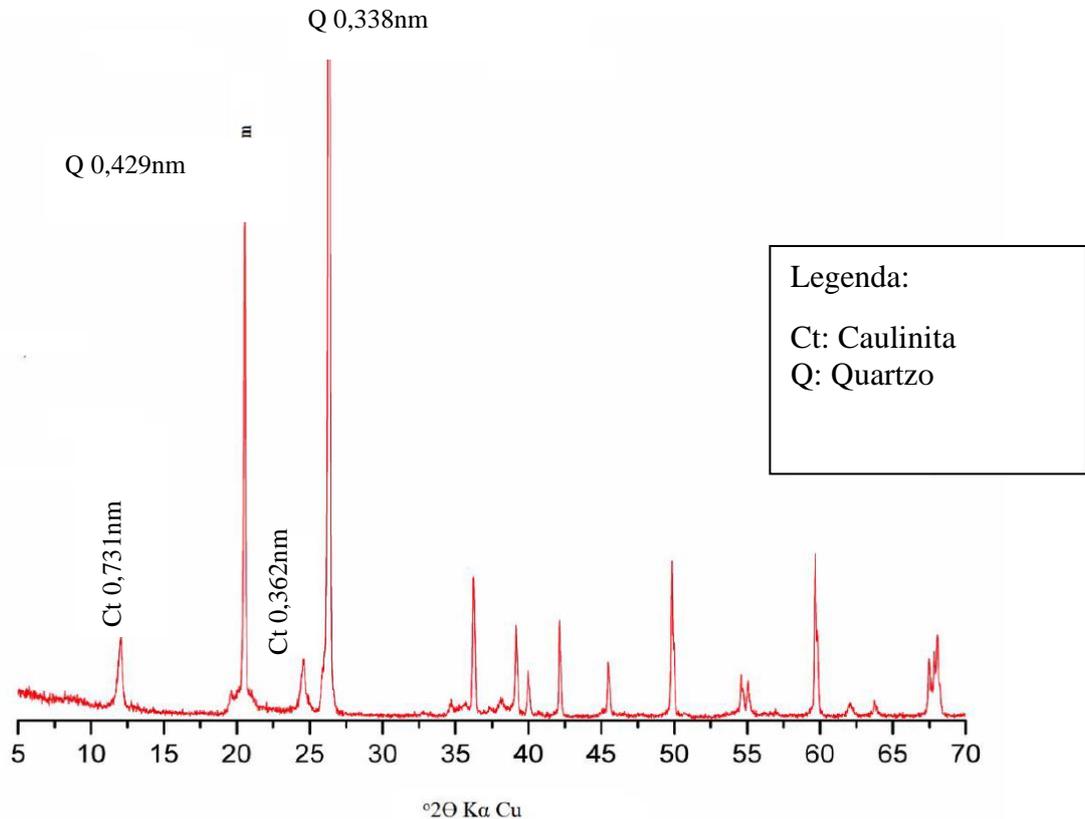
Para análise aos 60 dias de idade foi possível observar que o melhor desempenho foi do traço controle com 12.966 kPa e o compósito com maior diferença foi RCMG50% que obteve 5.880 kPa, apresentando uma diferença de aproximadamente 50% entre eles.

### 5.3 Caracterização mineralógica

#### 5.3.1 Difractometria Raios-X

Na análise mineralógica por difração de Raios-X realizada no solo (Figura 43), de uma forma geral, foram identificados em sua grande maioria o quartzo e a caulinita como o argilomineral.

Figura 43 – DRX do solo

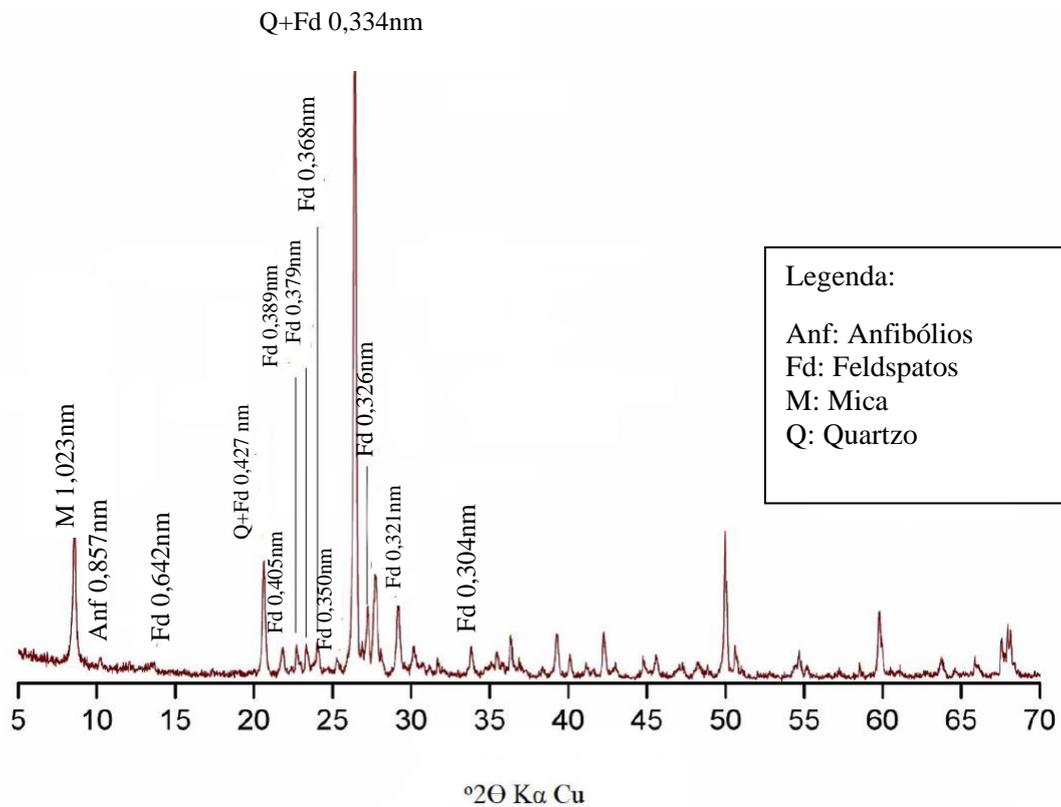


Fonte: Autora (2022).

Comumente encontrada na região da Formação Barreiras a caulinita encontrada é o principal constituinte do mineral caulim. O mesmo ocorre com relação à fração de quartzo identificado no ensaio, oriundo da areia também é encontrado na região. No ensaio também foi possível identificar a ausência de minerais como vermiculita e esmectita.

Por se tratar de um material heterogêneo na análise do RCD foi possível observar a identificação de anfibólios, feldspatos, mica e quartzo (Figura 44).

Figura 44 – DRX do RCD



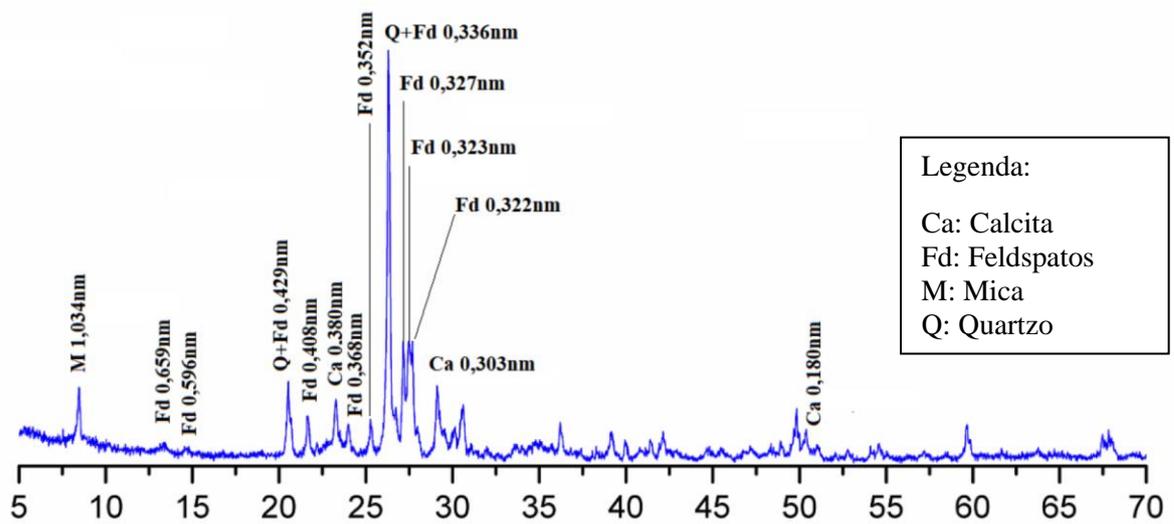
Fonte: Autora (2022).

Os resultados apresentados correspondem à origem destes, basicamente concretos, argamassas e cerâmicas, apresentando picos de quartzo (areias, argamassas e concretos) e feldspatos (cerâmicas, argilas), ainda a presença de mica que se apresenta também em materiais argilosos e Anfibólios presentes na composição de mármore.

O RCD também é fonte de cálcio, magnésio, manganês e micronutrientes essenciais aos organismos vegetais, assim como o alumínio presente na forma de óxidos nas cerâmicas e argilas, ferro no caso da presença de feldspatos oriundos do material cerâmico e carbonato de cálcio utilizado na fabricação dos insumos e materiais de construção civil (SANTOS, 2021).

Segundo Neves (2021), o RCMG é composto basicamente de pó de rocha e água. Na Figura 45 é possível observar as fases cristalinas de mármore e granitos.

Figura 45 – DRX do RCMG



Fonte: Autora (2022).

A presença de feldspato, quartzo e mica estão atribuídas ao granito, enquanto a calcita está associada ao mármore, entretanto secundariamente o quartzo também aparece na composição do mármore além de representar grande fração do silestone e nanoglass.

### 5.3.2 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Os resultados da análise de fluorescência de Raios-X do solo, RCD e RCMG está descrito na Tabela 11.

Tabela 11 – FRX dos materiais.

(continua)

Componente	Solo arenoso	RCD	RCMG
Na <sub>2</sub> O	N.D	1,15	2,57
MgO	0,06	1,65	1,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,05	11,21	11,76
SiO <sub>2</sub>	67,87	57,10	58,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,47	0,96	0,68
SO <sub>3</sub>	0,05	0,60	0,57
K <sub>2</sub> O	0,05	4,47	4,57
CaO	0,10	9,93	9,93

(continuação)

Componente	Solo arenoso	RCD	RCMG
TiO <sub>2</sub>	0,48	0,92	0,64
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N.D	0,02	N.D
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,02
MnO	N.D	0,07	0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	1,89	5,10	3,87
NiO	N.D	N.D	0,01
CuO	N.D	N.D	0,07
ZnO	N.D	0,01	0,02
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N.D	N.D	0,01
Rb <sub>2</sub> O	N.D	0,02	0,02
SrO	N.D	0,06	0,05
ZrO <sub>2</sub>	0,03	0,05	0,03
BaO	N.D	0,13	0,20
WO <sub>3</sub>	N.D	N.D	0,01
PF	11,89	6,52	4,58
Total	100,00	100,00	100,00

N.D. = Não detectado. / Os resultados estão expressos em peso%.

Fonte: Autora (2022).

Pela análise da espectrometria (FRX) dos materiais, observa-se o principal composto químico presente em todos os materiais analisados foi o SiO<sub>2</sub> (dióxido de silício ou sílica) no solo (67,87%), RCD (57,1%) e RCMG (58,8%).

O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de alumínio, também chamado de alumina) também apresentou valores significativos no solo (17,05%), RCD (11,21%) e RCMG (11,76%), com representação um pouco maior no solo arenoso do que nos demais. Além destes se destacam a presença de CaO (óxido de cálcio) que obteve valor 0,10% para o solo e mais expressivamente de 9,93% para RCD e RCMG.

Segundo Nasser (2022) que realizou FRX em RCMG valores similares foram encontrados, com 57,43% SiO<sub>2</sub> e CaO 3,36%, entretanto o autor ressalta que os valores

altos de SiO<sub>2</sub> impossibilitam do resíduo de ser classificado como pó de rocha ou remineralizador.

#### 5.4 Tijolo de solo cimento

Para realização da produção dos tijolos foi possível observar que a moldagem do compósito RCMG100% apresentou dificuldade de desmoldagem, gerando repetições e ajustes do equipamento de prensagem. Para os demais compósitos não tiveram dificuldades de homogeneização e produção.

##### 5.4.1 Características geométrica

Os dados obtidos referente a características geométricas dos tijolos solo cimento estão apresentados na Tabela 12, representando a média de todas as idades de cura, assim como o desvio padrão.

Tabela 12 - Análise dimensional dos tijolos solo cimentos nos diferentes tratamentos e controle.

Análise dimensional (mm) - Valores médios				
ID traço	Largura	Comprimento	Altura	Desvio padrão
Controle	125,0	250,0	70,93	0,93
RCMG15%	125,0	250,0	71,00	1,00
RCMG25%	125,0	250,0	70,93	0,93
RCMG50%	125,0	250,0	70,99	0,99
RCMG100%	125,0	250,0	71,16	1,16
RCMG30%RCD70%	125,0	250,0	71,93	1,93

Fonte: Autora.

Segundo critérios da ABNT NBR 8492 (ABNT, 2012) a variação média dimensional permitida para os tijolos de solo cimento é de  $\pm 1$ mm. Quanto aos valores de largura e comprimento todos os tijolos moldados apresentaram resultados satisfatórios com o requisito da referida norma. Estes valores podem estar associados às condições de prensagem, realizadas no mesmo dia para todos os traços, utilizando a fôrma com pouco tempo de uso e desgaste mínimo dimensional.

Os resultados encontrados para a análise dimensional da altura dos tijolos solo cimento variaram, apresentando a maior variação  $\pm 1,93\text{mm}$  no traço RCMG30%RCD70%, e menor média observada no traço controle com  $\pm 0,93\text{mm}$ .

Avaliando a altura do TSC e realizando a moldagem com prensa comercial com fôrmas metálicas, Barreto (2020) encontrou uma variação entre de 1 mm e 5,4 mm, nos tijolos produzidos com altura padrão de 60mm.

#### 5.4.2 Absorção de água

Os dados obtidos referente absorção de água dos tijolos solo cimento estão apresentados na Tabela 13, onde os ensaios foram realizados aos 14 dias de idade para todos os traços.

Tabela 13 - Resultados da análise de absorção de água nos tijolos solo cimento nos diferentes tratamentos e controle.

ID	Absorção de água		
	% Média	Desvio padrão	Critério NBR 8491/2012
Controle	16,00	$\pm 1$	
RCMG15%	14,00	$\pm 2$	
RCMG25%	15,00	$\pm 4$	
RCMG50%	9,00	$\pm 1$	< 20%
RCMG100%	12,00	$\pm 2$	
RCMG30% RCD70%	8,00	$\pm 3$	

Fonte: Autora.

Todos os resultados obtidos para análise de absorção de água estão de acordo com o critério estabelecido na NBR 8491 (ABNT, 2012). De acordo com a norma citada, os valores médios de absorção de água devem ser menores que 20%, o que influencia diretamente na porosidade e vida útil do TSC.

Neste sentido, os resultados mais satisfatórios foram encontrados no compósito RCMG30% RCD70% com  $8\pm 3\%$ , seguido do traço RCMG50% com  $9\pm 1\%$ . O resultado com maior porcentagem média de absorção de água foi o tratamento controle com  $16\pm 1\%$ .

Os valores encontrados nesse estudo indicam que a absorção de água foi diminuída à medida que o resíduo RCMG foi incorporado. Em contrapartida com o compósito RCMG100% houve uma maior absorção de água, uma vez que este traço possui maior porosidade influenciada pelo índice de vazios e empacotamento das partículas.

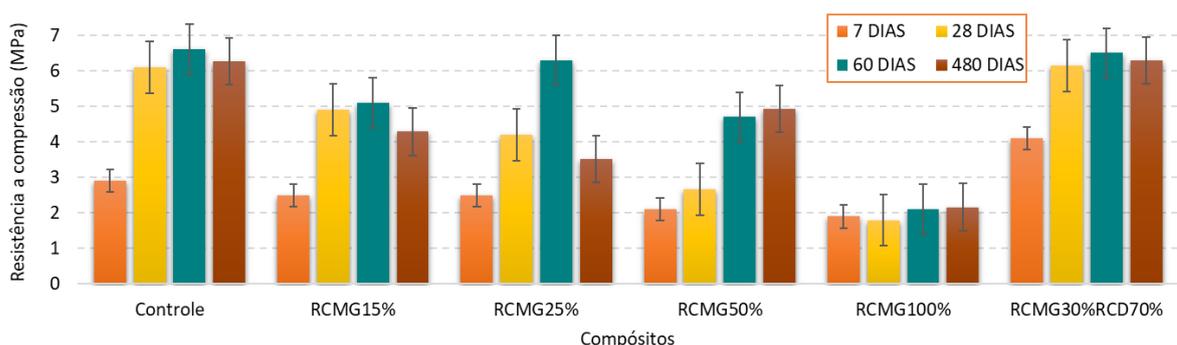
Para Thomas, Setién e Polanco (2016) a presença dos agregados de argamassa provoca uma textura mais áspera e porosa, o que influencia decisivamente na absorção de água. Geralmente a absorção do agregado reciclado é superior à dos agregados naturais devido à elevada porosidade residual da argamassa.

O coeficiente de absorção do agregado natural costuma ficar entre 0% e 4%, enquanto para a argamassa esse valor fica entre 15% e 17%.

#### 5.4.3 Resistência à compressão simples

Os resultados encontrados para resistência à compressão simples, com 7, 28 e 60 dias de cura, estão de acordo com os requisitos da NBR 8491 (ABNT, 2012) (tijolos de solo cimento), de 2,0 MPa, com exceção do compósito RCMG100% aos 28 dias (Figura 46).

Figura 46 – Resistência à compressão com 7, 28, 60 e 480 dias de cura.



Fonte: Autora (2022).

Os compósitos Controle e RCMG30%RCD70% apresentaram os resultados mais significativos de resistência à compressão simples aos 60 dias de idade, com 6,6 MPa e 6,5 MPa, respectivamente. Estes mesmos traços apresentaram o ganho de resistência diferente aos 7 dias de idade, com 2,9MPa no traço Controle e 4,1MPa no traço

RCMG30%RCD70%, o que representa uma variação de cerca de 41% entre estes tratamentos, para o tempo mais curto de cura.

Segundo Barreto (2020) uma das principais propriedades ligadas a resistência à compressão é a porosidade. No referido estudo, ao analisar traços com proporções de 1:10 com 10% (1,7MPa) e 20% (1,27MPa) de adição de RCMG, constatou-se que à medida que a porosidade aumentava a resistência diminuía, encontrando resultados que não atenderam aos requisitos da NBR 8492 (ABNT, 2012), de 2,0 MPa. Em seu estudo foi observado, através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a existência de poros e microfissura na fratura no tijolo.

O desvio padrão das médias dos resultados para resistência à compressão simples, encontrados nos tijolos de cada compósito, ensaiadas por idade, estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 15 - Resistência à compressão em MPa com 7, 28, 60 e 480 dias de idade.

ID Traço	7 Dias	Desvio Padrão	28 Dias	Desvio Padrão	60 Dias	Desvio Padrão	480 Dias	Desvio Padrão
Controle	2,9	0,8	6,1	0,5	6,6	0,8	6,3	0,6
RCMG15%	2,5	0,6	4,9	1,2	5,1	1	4,3	0,2
RCMG25%	2,5	0,5	4,2	0,6	6,3	0,3	3,5	1,5
RCMG50%	2,1	0,5	2,7	1,8	4,7	0,6	4,9	1,3
RCMG100%	1,9	0,4	1,8	2	2,1	0,8	2,2	1,9
RCMG30%RCD70%	4,1	0,8	6,2	0,3	6,5	0,6	6,3	0,7

Fonte: Autora (2022)

Todos os resultados de resistência à compressão para os compósitos analisados, a partir dos 28 dias de idade, atenderam as normas da NBR 15270-1 (ABNT, 2017) (blocos cerâmicos com função estrutural) e NBR 6136 (ABNT, 2016) (blocos de concreto com função estrutural).

Além dos requisitos da NBR 8491 (ABNT, 2012), os resultados obtidos aos 28 dias de idade dos compósitos Controle e RCMG30%RCD70% também atenderam os requisitos das normas que classificam blocos cerâmicos com função estrutural NBR 15270-1

(ABNT, 2017) e blocos de concreto com função estrutural NBR 6136 (ABNT, 2016), com valor mínimo de resistência à compressão de 4MPa.

Barreto (2020), analisando tijolo solo cimento e TSC com resíduo, observou que a resistência à compressão foi superior no TSC sem resíduo. Neste trabalho ainda que a densidade seja maior no TSC com resíduo, a resistência não foi superior. Segundo a autora, a propriedade do solo predominantemente arenosa, com alta densidade, baixa absorção e baixa porosidade, não foi suficiente para garantir a resistência à compressão, característica essa adquirida pela incorporação dos resíduos.

Foi possível observar também após o ensaio, o tipo de ruptura por cada amostra ensaiada (Figura 47), onde a grande maioria obteve o formato similar ao de uma ampulheta, com a região central mais afinada no formato cônico.

Figura 47 – Tijolos após ruptura.

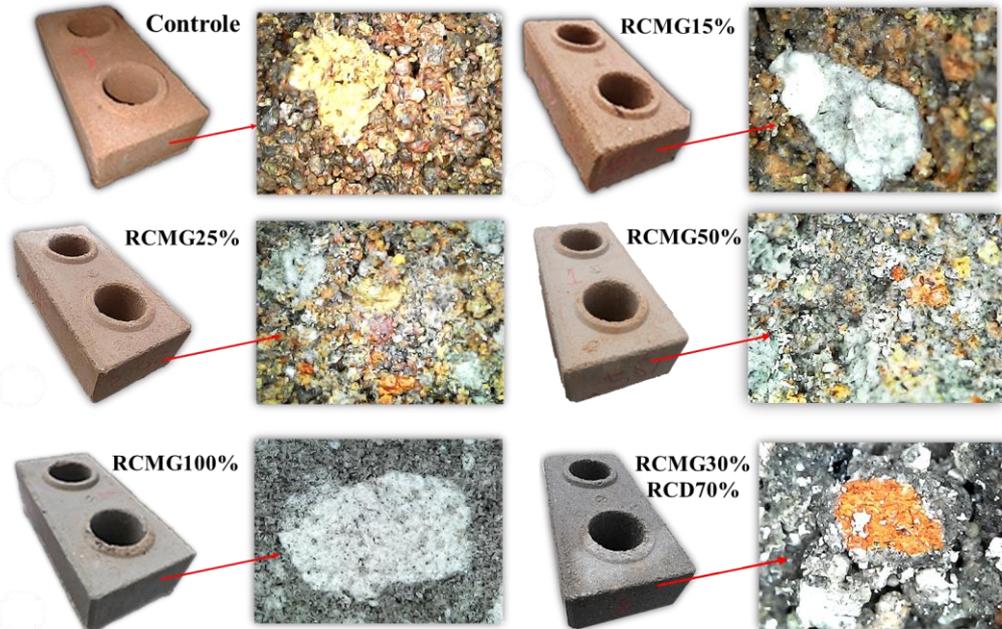


Fonte: Autora (2022)

#### 5.4.4 Análise microscópica dos fragmentos pós ruptura

Na análise pós-ruptura (Figura 48), realizado com microscópio USB com aumento de 500x, observou-se como cada compósito se apresentava internamente. Nas imagens pode-se observar que à medida que o resíduo RCMG foi sendo adicionado o tom acinzentado foi aumentando, e os vazios diminuíram uma vez que o RCMG é muito fino e preencheu os vazios que se apresentavam porosos no compósito controle.

Figura 48 - Detalhamento dos tijolos com Imagem ampliada em 500x com microscópio USB dos fragmentos pós ruptura



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Além da redução visual da porosidade, foi possível observar os fragmentos de alguns materiais como, no compósito RCMG30%RCD70% em tom laranja o material cerâmico, em destaque também o RCMG100% com fragmento de granito em sua mistura. Para concluir os ensaios laboratoriais a Tabela 15 com os quantitativos dos ensaios realizados neste trabalho.

Tabela 15 – Quantitativos totais de ensaios realizados

Características Físicas	Granulometria	24
	Densidade Real	24
	Limite De Liquidez	24
	Limite De Plasticidade	24
Características Mecânicas	Compactação Sem Ligante	35
	Compactação Com Ligante	35
	Resistência à Compressão Simples	90
Características Mineralógica	DRX	3
	FRX	3
Desempenho Tijolos	Caracterização Geométrica	240
	Absorção De Água	36
	Resistência à Compressão Simples	240
	Análise Microscópica Pós Ruptura	6
Quantidade total		784

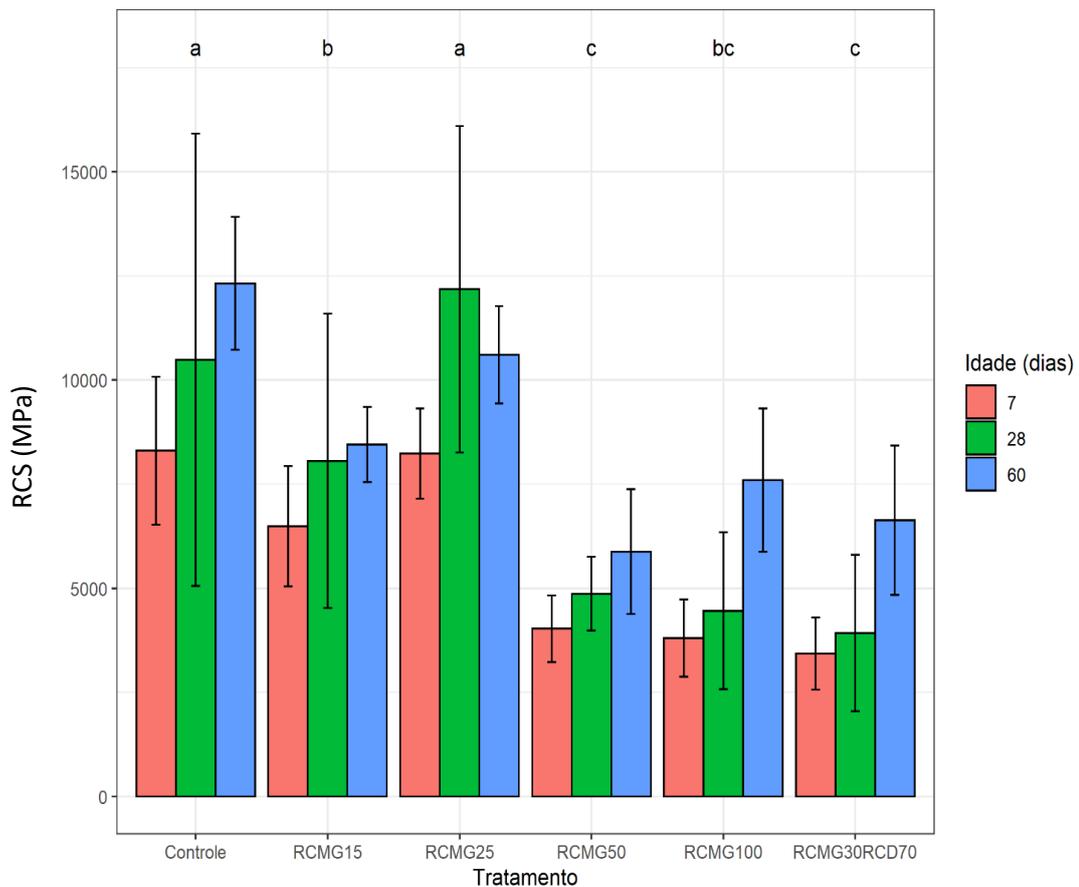
Fonte: Autora (2022).

## 5.5 Análises estatísticas

Para avaliação das informações obtidas nas análises relacionada ao ensaio de compressão do solo, foi observada uma diferença significativa entre a resistência à compressão simples (RCS) dos tratamentos (ANOVA, gl = 5;  $F = 17,5612$ ; p-valor =  $2,714e-10$ ) por tempo de cura (ANOVA, gl = 2;  $F = 10,2452$ ; p-valor =  $0,000169$ ), isoladamente, mas não houve interação entre elas.

A Figura 49 demonstra as médias e os desvios padrões de Resistência à Compressão Simples entre tratamentos por tempo de cura e a diferença entre eles, a altura da barra representa a média em MPa e em preto indica o desvio padrão.

Figura 49 - Comparação entre RCS por tratamento e tempo de cura do CP.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para análise estatística pode-se verificar que os grupos estatísticos estão representados através de letras (a, b, c e bc), distribuídos em ordem decrescente os maiores valores representados pela letra “a” e os menores pela letra “c”.

Pertencendo ao mesmo grupo estatístico os compósitos RCMG25% e controle pertencem ao grupo de contraste “a”, o mesmo ocorre para os compósitos RCMG50% e RCMG30%RCD70% com contraste “c” iguais. Em destaque o RCMG100% que pertence dois grupos distintos “bc”.

Além da distribuição por grupos de maneira mais global, também foi possível verificar os valores das médias desvios dos compósitos e contrastes para todos os tratamentos, que estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Médias e desvios padrões (dp) entre os tratamentos e o tempo de cura (TC) dos corpos de prova.

Tratamento	TC	Média	Desvio Padrão	Contrastes
Controle	7	8,3	1,77	abcde
Controle	28	1,04	5,42	abcd
Controle	60	1,23	1,59	a
RCMG15%	7	6,49	1,44	bcde
RCMG15%	28	8,05	3,53	abcde
RCMG15%	60	8,45	8,99	abcde
RCMG25%	7	8,23	1,08	abcde
RCMG25%	28	1,21	3,92	ab
RCMG25%	60	1,06	1,16	abc
RCMG50%	7	4,03	7,97	e
RCMG50%	28	4,87	8,86	de
RCMG50%	60	5,87	1,49	cde
RCMG100%	7	3,8	9,25	e
RCMG100%	28	4,46	1,88	e
RCMG100%	60	7,59	1,72	abcde
RCMG30%RCD70%	7	3,43	8,64	e
RCMG30%RCD70%	28	3,92	1,87	e
RCMG30%RCD70%	60	6,63	1,79	abcde

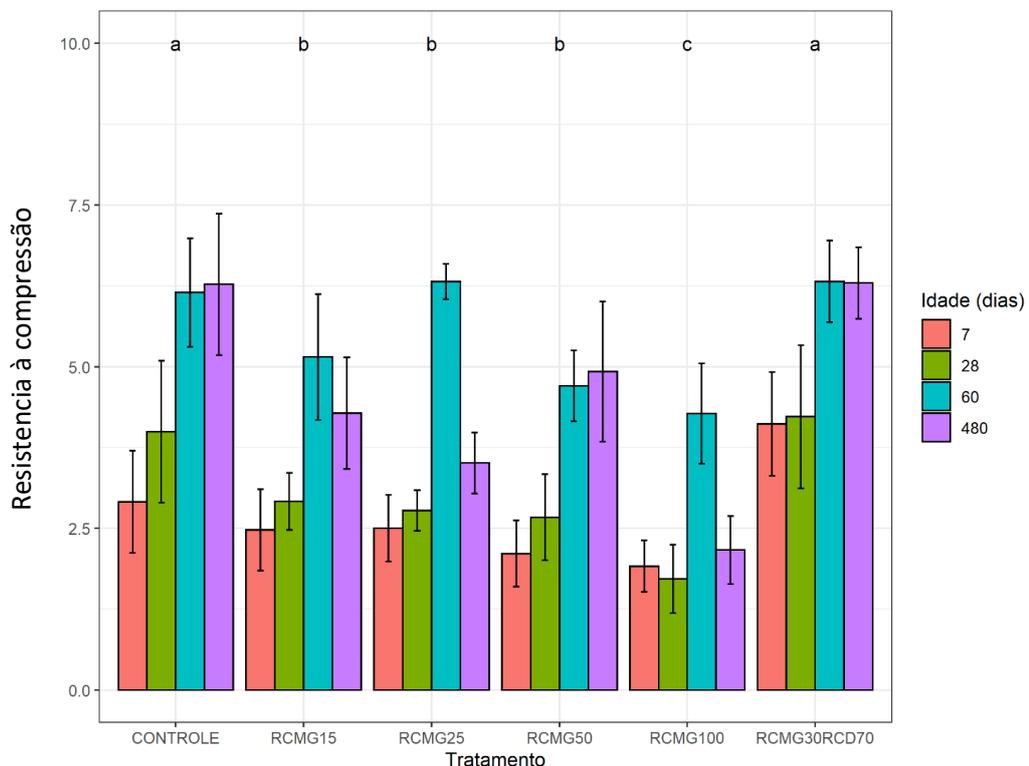
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Destacam-se os valores significativos de desvio padrão os compósitos RCMG15% aos 60 dias de cura, com desvio padrão de 8,99, o RCMG50% aos 28 dias com 8,86 e RCMG30%RCD70% com valor de 8,64. Entretanto, em sua grande maioria os valores menores entre 1 e 3 foram obtidos.

Na análise dos resultados de resistência à compressão para os tijolos produzidos, o comportamento ocorreu de maneira similar (ANOVA two-ways, gl = 15; F = 4,912; p-valor = 1,1e-07) (Tabela 16). Há diferença entre Resistencia e as composições dos traços (tratamento) isoladamente (ANOVA two-ways, gl = 5; F = 49,507; p-valor < 2,2e-16) (Figura 50).

A Figura 50 demonstra as médias e os desvios padrões de resistência à compressão (MPa) entre tratamentos por tempo de cura e a diferença entre eles.

Figura 50 – Comparação entre resistência por tratamento e idade dos tijolos.



**Fonte:** Elaborado pela autora (2022).

A análise estatística de resistência dos tijolos também classificou por seus contrastes, apresentando uma similaridade entre os grupos que fazem parte os compósitos controle

e RCMG30%RCD70% com contraste “a”, assim como os compósitos RCMG15%, RCMG25% e RCMG50% com contraste “b”, apenas o compósito RCMG100% se manteve isolado dos demais no grupo “c”.

É possível observar que na Figura 50 os indicadores de desvio padrão estão mais uniformes e com menor dimensão representando uma variação reduzida e melhorando a precisão estatística entre os tratamentos.

Além dos grupos pré definidos entre a,b e c também definiu-se os contrastes por cada tratamento, igualmente de maneira decrescente. Além disto, os valores de média e desvio padrão por tempo de cura também estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Médias e desvios padrões (dp) entre os tratamentos e o tempo de cura (TC) dos tijolos.

Tratamento	TC	Média	Desvio Padrão	Contrastes
Controle	7	2,90	0,79	efghi
Controle	28	3,99	1,09	cdefg
Controle	60	6,14	0,83	ab
Controle	480	6,27	1,09	a
RCMG15%	7	2,47	0,62	hi
RCMG15%	28	2,91	0,44	efghi
RCMG15%	60	5,14	0,97	abc
RCMG15%	480	4,28	0,86	cde
RCMG25%	7	2,50	0,51	hi
RCMG25%	28	2,77	0,31	fghi
RCMG25%	60	6,31	0,27	a
RCMG25%	480	3,50	0,46	defgh
RCMG50%	7	2,11	0,51	hi
RCMG50%	28	2,66	0,66	ghi
RCMG50%	60	4,70	0,55	bcd
RCMG50%	480	4,92	1,08	abcd
RCMG100%	7	1,91	0,39	i
RCMG100%	28	1,71	0,52	i
RCMG100%	60	4,27	0,77	cde
RCMG100%	480	2,16	0,52	hi
RCMG30%RCD70%	7	4,11	0,80	cdef
RCMG30%RCD70%	28	4,22	1,10	cde
RCMG30%RCD70%	60	6,31	0,63	a
RCMG30%RCD70%	480	6,29	0,55	a

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os valores de desvio padrão entre os tratamentos 0,27 no RCMG25% com 60 dias de cura e 1,10 no compósito RCMG30%RCD70% aos 28 dias de cura, confirmando o que foi visto na figura 48. Os contrastes por tratamento associadas ao tempo de cura, tiveram também uma variação até a letra i para os valores menores encontrados.

## 5.6 Análise comparativa de custos de sistemas construtivos

Os custos obtidos na utilização do TSC comparado aos dois sistemas construtivos (tijolo cerâmico e bloco de concreto) estão descritos de acordo com parâmetros de consumo conforme cada material por m<sup>2</sup>. Além do consumo foram inseridos os valores de cada material após coleta de preços no mercado (Tabela 18).

Tabela 18 - Índices de consumo e valores unitários

Id.	Descrição do material	Quantidade/m <sup>2</sup>	Valor unit. (R\$)
1	Aço CA-50 Ø8mm (5/16")	1	2,43
2	Aço CA-50 Ø10mm (3/8")	1	3,65
3	Aço CA-50 Ø4,2mm	1	1,41
4	Quantidade de Tijolos Ecológicos por m2	56	0,90
5	Quantidade de Tijolos Cerâmicos 8 furos por m2	27	0,55
6	Quantidade de Blocos de Concreto por m2	14	2,50
7	Argamassa de assentamento kg/m <sup>2</sup>	1	0,96
8	Massa assentamento Tijolo 8 furos 1,5cm espessura	0,014	2,24
9	Massa assentamento Tijolo Bloco Concreto 1,5cm espessura	0,001	2,24
10	Rejunte kg/m <sup>2</sup>	0,8	3,07
11	Impermeabilizante 3 Demãos L/m <sup>2</sup>	0,2	13,82
12	Concreto (cimento, areia, brita) m <sup>2</sup>		271,36
13	Chapisco 5mm m3	0,006	0,1
14	Cimento kg/m2 de parede	1,32	0,51
15	Areia Grossa m3/m2 de parede	0,004	76,80
16	Emboço 15mm	0,017	0,15
17	Cimento kg/m2 de parede	2,48	0,51
18	Areia Grossa m3/m2 de parede	0,014	89,60
19	Massa Corrida Acrílica - /m2	1	3,07
20	Textura Externa/Grafiato - /m2	1	6,14
21	Tinta - /m2 (apenas tinta contando todas demãos)	1	2,56
22	Concreto dos Grautes	0,00273	271,36
23	Concreto dos Canaletas	0,0032	271,36
24	Concreto das Colunas	0,0171	271,36
25	Tábua para formas 30cm x 3m	1	25,60
26	Cimento /kg	1	0,51
27	Areia /m3	1	76,80

Fonte: Adaptado Pipacasa (2021)

Desta maneira, foi possível realizar uma estimativa de custo para um muro de 18m<sup>2</sup> com três diferentes métodos construtivos (Tabela 19).

Tabela 19 – Custos com diferentes sistemas construtivos

Descrição	Valor	Material	M.O
Tijolo ecológico/solo-cimento (25 x 12,5 x 7cm)	2.068,02	61%	39%
Bloco concreto (19x29x19 cm)	2.337,47	81%	19%
Tijolo cerâmico 8 furos (9 cm x 19 cm x 19 cm) 1 cinta	3.197,69	44%	56%

Fonte: autora (2021)

Quando comparados com o método tradicional em tijolos cerâmicos, a utilização de tijolos de solo-cimento teve uma economia de 35%. Com relação a construção com blocos de concreto, a utilização de tijolos ecológicos teve uma redução no custo de 12%. Os resultados são justificados pela alta produtividade do bloco de concreto durante sua execução (Figura 51).

Segundo Sousa (2021), a comparação de TSC com tijolos cerâmicos ganha destaque, pois nesta metodologia se utilizam vigas e pilares para estruturação (Figura 51B), além do aço e do concreto que são necessários em maior quantidade, aumentando também o uso de formas e a dobra das barras de aço, onerando custo e tempo de execução.

Figura 51 – Execução de obras: Tijolo de solo cimento (A), Tijolo cerâmico (B) e Bloco de concreto (C).



Fonte: autora (2021)

Negreiros et al. (2018) comparou os custos de duas construções com tamanhos de 40,16 m<sup>2</sup> voltadas para Habitação de Interesse Social (HIS), utilizando o tijolo de solo cimento e construção com o mesmo projeto utilizando tijolo cerâmico. Foram contempladas etapas de alvenaria e acabamento, e os resultados apresentaram satisfatórios para a construção com tijolo de solo cimento, com uma economia representativa próxima de 41%.

Ainda de acordo com os resultados de Negreiros et al. (2018) foi possível verificar que o valor unitário do tijolo de solo cimento é superior ao tijolo cerâmico em aproximadamente 7 vezes em relação ao custo. Para o mesmo projeto também constatou a necessidade de utilizar uma maior quantidade de tijolo, visto que o tamanho é menor. Neste projeto foram utilizados para revestimento cola branca PVA, rejunte cerâmico flexível e resina acrílica impermeabilizante.

Na alvenaria convencional com tijolo cerâmico utilizou-se chapisco, reboco, argamassa para revestimento, massa acrílica e tinta e seladores, aumentando assim o valor em 12,4 vezes aproximadamente. Para análise de mão de obra os autores concluíram que a velocidade da construção em tijolos de solo cimento foi 1,9 vezes mais rápida impactando economicamente com a mesma proporção no orçamento.

Na estimativa realizada, referente ao custo de material, encontrou-se uma redução de 81% utilizando bloco de concreto para 61% de tijolos ecológicos. Apesar da porcentagem de material no método construtivo encontrada para tijolo cerâmico 8 furos ter sido inferior (44%) quando comparado ao encontrado no uso de tijolos solo cimento, há uma redução no custo com mão de obra de 17% utilizando TSC. A economia com mão de obra é significativa, tendo em vista que representa em torno de 40% do total no orçamento de uma obra.

Para Menezes *et al.* (2017) as vantagens do tijolo de solo cimento quando comparado tijolo cerâmico se associa ao fato de ter reduções substanciais no desperdício de material, sobretudo concreto e massa de assentamento, além disso o fato de utilizar apenas impermeabilizante no acabamento e ter velocidade de execução em torno de 50% mais rápida, justifica a redução no custo final da obra de aproximadamente 31%.

## 6 CONCLUSÃO

Após análises obtidas no presente trabalho foi possível concluir que a caracterização física do solo utilizado para a produção dos tijolos solo cimento foi classificada como areia argilo-siltosa (SC-SM), enquanto o RCD areia bem graduada. Já o RCMG apresentou características argilo arenosa. O solo estudado possui 72% de areia, enquanto o RCD contém 66% de areia e 6% considerados pedregulho sendo caracterizados como solos arenosos, estando estes dentro dos requisitos solicitados tanto nas normas de solo/cimento, como para produção do tijolo de solo cimento. Os resultados obtidos de densidade real referentes ao solo, resíduos e suas devidas misturas estiveram dentro dos requisitos normativos.

Para a característica de plasticidade do solo e dos compósitos variaram de fracamente plásticos e medianamente plásticos, exceto o RCD considerado não plástico não líquido, para os compósitos RCMG15%, RCMG100% e RCMG30%RCD70% foram classificados como fracamente plásticos e os demais considerados medianamente plásticos. Além da classificação por sua plasticidade os requisitos quanto a produção dos tijolos, também foram avaliados e apenas o compósito RCMG100% não atendeu tais requisitos com 1% de Índice de plasticidade.

O comportamento mecânico do solo e dos compósitos foram obtidos através de ensaios de compactação e compressão simples dos corpos de prova, as características obtidas no ensaio de compactação destacam que os compósitos apresentaram valores crescentes quanto a umidade ótima à medida que o percentual de finos do RCMG foi adicionado, o valor de umidade ótima utilizando ligantes com maior relevância foi de 21,30% para o compósito RCMG100%.

A resistência à compressão simples realizada nos compósitos, apresentaram resultados que comprovam a viabilidade da incorporação de resíduos, em destaque o compósito RCMG25% que obteve o resultado mais significativo com 13.777 kPa aos 28 dias de idade. Ademais todos os resultados foram considerados satisfatórios uma vez que o mínimo alcançado aos 7 dias de idade de 3.843 kPa do compósito RCMG30%RCD70%.

A análise mineralógica por DRX e FRX apresentou características relacionadas a origem dos materiais que foram avaliados, em suma, concretos, argamassas e cerâmicas, apresentando picos de quartzo, feldspatos, mica e anfibólios presentes na composição de solo, RCD e RCMG. A análise de FRX dos materiais, identificou-se a predominância SiO<sub>2</sub> (dióxido de silício ou sílica), o aparecimento secundário de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de alumínio) e ainda a presença de CaO (óxido de cálcio) mais expressivamente para RCD e RCMG.

As análises dimensionais para todos os tijolos apresentaram conformidade com os critérios normativos, exceto, os compósitos RCMG30%RCD70% e RCMG100% que obtiveram um valor acima da tolerância na sua altura com 0,93mm e 0,16mm respectivamente, acima do permitido pela norma vigente.

O ensaio de absorção de água dos tijolos com incorporação de resíduos de marmoraria (15%, 25% e 50%) e RCD obtiveram a menor taxa, confirmando ainda mais o conceito de compacidade, devido ao alto grau de empacotamento das partículas, com índices menores de absorção de água reduzindo os vazios da mistura.

Os compósitos utilizando resíduos reciclados em suas proporções RCMG25% e RCMG30%RCD70% e o compósito Controle, apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão quando comparado com as demais proporções, demonstrando a possibilidade de reaproveitamento desses materiais na elaboração de tijolos ecológicos. Além disto, os demais tratamentos também apresentaram resultados satisfatórios, com exceção do traço RCMG100% que obteve média inferior ao estabelecido pela NBR 8491 (ABNT, 2012).

A análise estatística apresentou uma similaridade entre os compósitos controle e RCMG25% para o ensaio de resistência à compressão do solo e para o tijolo produzido uma similaridade entre os compósitos controle e RCMG30%RCD70%, validando estatisticamente o desempenho dos compósitos utilizando os resíduos.

Com relação a análise comparativa de custo comparando dos três sistemas construtivos, foi possível observar que a utilização de tijolos ecológicos representa uma economia de 12% e 35% no valor total do projeto simulado (muro de 18 m<sup>2</sup>), quando comparado a

construção com blocos de concreto e método tradicional em tijolos cerâmicos, respectivamente.

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam a viabilidade técnica e econômica da incorporação dos resíduos reciclados de construção e demolição e resíduos de cortes de mármore e granito na incorporação para produção de tijolos ecológicos, indicando uma alternativa sustentável para construção civil.

Futuros estudos devem ser desenvolvidos com intuito de aperfeiçoar as porcentagens de adição dos resíduos na produção dos tijolos ecológicos, além da avaliação de possíveis reduções em impactos ambientais no processo produzido e na execução das obras.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Após os resultados apresentados neste trabalho, sugerem-se Diante dos resultados deste trabalho, sugerem-se para trabalhos futuros:

- Realizar a caracterização química para os compósitos
- Analisar novos percentuais de compósitos utilizando os resíduos RCD e RCMG.
- Realizar ensaios físicos e mecânicos do solo, RCD e compósitos a partir da tomografia computadorizada de raios-x com o objetivo de localizar defeitos e vazios, a densidade do material, distribuição espacial do conteúdo de água, bem como a retenção e movimento da água;
- Analisar a longo prazo através de ensaios de envelhecimento os tijolos e os compósitos.

## REFERÊNCIAS

- ABCP, Associação brasileira de cimento Portland. **Solo-cimento**. Homepage. 2009. Disponível em: <<https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento/>>. Acesso em: 24 de setembro de 2020.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/> . Acesso em: 12 de março 2022.
- AGUIAR, E. S., RIBEIRO, M. M., VIANA, J. H., & PONTES, A. N. (2021). **Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira**. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 13, e20190263. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20190263>
- AMARAL, L.F., CARVALHO, R. P. R. G., SILVA, B. M., DELAQUA, D. C. G., MONTEIRO, S. N., & VIEIRA, C. M. F. (2019). **Development of ceramic paver with ornamental rock waste**. Journal of Materials Research and Technology, 8, 599-608.
- ANPO, Associação Noroeste de Pedras Ornamentais. **Home page**. Disponível em: <[https://anpo.com.br/en/ajax.asp?link=list\\_galeria/](https://anpo.com.br/en/ajax.asp?link=list_galeria/)>. Acesso em: 24 de setembro de 2020.
- ALVES, José Cleiton Feitoza et al. **Análise do comportamento de tijolos solo-cimento com adição de resíduo de pó de mármore-granito e cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2016.
- APAC, Agência Pernambucana de Águas E Clima, **Home page**. Disponível em: <<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>> Acesso em: 10 de outubro de 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10004**: Resíduos sólidos—classificação. Rio de Janeiro, p. 9-11: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 12023**: Solo-cimento — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria, Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 13602**: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo — Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6502**: Solos e rochas - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 12770**: Solo - Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO TIJOLO ECOLÓGICO, **ANITECO**, 2020. Disponível em: < <https://www.aniteco.org.br/o-tijolo-ecologico> > . Acesso em: 15 de junho de 2021.

ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas & Gestão**, Niteroi, v. 14, n. 2, Jun. 2019.

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife**. 2010. Tese (Doutorado em engenharia civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. 340p.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. 6.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2019. 2v. (Vol. 2).

BARRETO, S. S. **Fabricação de tijolos prensados de solo-resíduos-cimento e avaliação de desempenhos térmico e acústico**. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, 2020. 112p. (Dissertação, Mestrado em Tecnologia dos Materiais).

BARROS, M. M.; OLIVEIRA, M. F. L.; RIBEIRO, R. C. C. R.; BASTOS, D. C.; OLIVEIRA, M. G. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. **Construction and Building Materials**, v. 232, jan. 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117252>.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Rochas ornamentais: novas perspectivas de desenvolvimento**. **Caderno Setorial ETENE**, BNB, a.3, n.60, dez. 2018.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. **Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Lex: **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS**: Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 de Julho de 2002. Seção 1, p. 95-96.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

CAMPOS, A. R et al. **Resíduos: tratamento e aplicações industriais**. CETEM/MCTI. ISBN: 987-85– 8261-005-3. p 433 – 492, 2014.

CAMPOS, Alessandro; DE CAMPOS, Fernando Celso. Incorporação de Resíduos Sólidos Urbanos em Tijolos Solo-Cimento: Processos e Cura. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 40, n. 1, p. 73-86, 2019.

CORREIA JUNIOR, J. L.; SILVA, D. H. **Tijolo ecológico frente à construção civil**. Anais do VII CONCCEPAR: Congresso Científico da Região Centro-Ocidental do Paraná / Centro Universitário Integrado de Campo Mourão. - Campo Mourão, PR: Centro Universitário Integrado de Campo Mourão, 2016.

COSTA, C. M. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. 2015. 163 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COSTA, Kelly C. **Reaproveitamento de resíduos sólidos de rochas ornamentais: sustentabilidade, educação e arte**. Dissertação de Mestrado em Políticas Públicas e Desenvolvimento Local. Escola Superior de Ciências da Santa Casa de Misericórdia de Vitória, 2016.

COSTA, Wesley Silva et al. Adição de resíduo de marmoraria em pastas cimentícias, avaliação de suas propriedades mecânicas e caracterização química. **INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation (ISSN 2357-7797)**, v. 8, n. 1, p. 1-18, 2020.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Atlas do meio físico do município do Jaboatão dos Guararapes, Estado de Pernambuco**. Homepage. 2020. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade/meiofisico\\_recife/jaboatao/geologia.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade/meiofisico_recife/jaboatao/geologia.pdf)>. Acesso em: 03 de agosto de 2020.

CRUZ, Mateus Arlindo da et al. Análise da viabilidade do uso de resíduos de cana-de-açúcar para produção de aglomerantes sustentáveis. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2022.

CUNHA, Iasminy. **Quantificação das emissões de CO2 na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 2016. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

CUNHA, Ubiratan de Vasconcelos Leitao; HELLMEISTER, Joao Cesar. **Terra-cimento: contribuicao para o estudo da casa de baixo-custo**. 1978. Universidade de São Paulo, Sao Carlos, 1978.

DANTAS, Nájela Kamilla Paula et al. **ESTUDO GRANULOMÉTRICO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA FABRICAÇÃO DE MISTURA DE SOLO-CIMENTO**. 2019.

DELUNARDI, Luana Delabarba et al. **Utilização de Resíduos de Rochas Ornamentais (RBRO) como substituição parcial ao solo em tijolos de solo-cimento**. A Construção Civil: em uma perspectivas econômica, ambiental e social, capítulo 4. 2021

DUARTE, MATEUS LACERDA; SOUZA, WESLEY DA SILVA. **Fabricação de tijolos solo-cimento com adição de resíduo industrial**. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial. 2017.

FACHIN, Renan Tavares et al. Valorização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais em pavimentos flexíveis. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e58711125404-e58711125404, 2022.

GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GOMES, Carla Pinheiro et al. Impacto Ambiental e Gerenciamento de Resíduos Sólidos Advindos da Construção Civil no Brasil: Uma Revisão de Literatura/Environmental Impact and Solid Waste Management Arising from Civil Construction in Brazil: A Literature Review. **ID on line REVISTA DE PSICOLOGIA**, v. 15, n. 55, p. 729-742, 2021.

GONÇALVES, Giovanna et al. **Efeitos da adição de resíduo de cinza de caldeira em misturas de solo e cimento na absorção de água e na resistência à compressão simples**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GONÇALVES, Lucas Félix da Costa. **Estudo da álcali-ativação na produção de tijolos modulares ecológicos**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São Paulo.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informe de Contas Nacionais Trimestrais - 2º Trimestre 2019**. Homepage. 2019. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2121/cnt\\_2019\\_2tri.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2121/cnt_2019_2tri.pdf)> Acesso em: 03 de agosto de 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informe de Contas Nacionais Trimestrais - 1º Trimestre 2020**. Homepage. 2020. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2121/cnt\\_2020\\_1tri.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2121/cnt_2020_1tri.pdf)>. Acesso em: 03 de agosto de 2020.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Home page**. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/previsao-tempo/pe/jaboatao-dos-guararapes>> Acesso em: 14 de março de 2022.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. 2021. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidosurbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em: 12/03/2022.

KOZLOSKI, C.; VAGHETTI, M.; DA SILVA, B. Emissões de co2 na casa popular eficiente e o emprego de materiais alternativos. **Euro elecs: III encuentro latinoamericano y europeo de Edificaciones y comunidades sostenibles**, 2019.

LADE, P.V.; LIGGIO, C.D.; YAMAMURO, J.A. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. **Geotechnical Testing Journal**, v.21, Nº.4, 1998, pp.336:347.

LIMA, DASMF. **Avaliação do tijolo modular de solo-cimento fabricado em prensa manual como material para construção de baixo custo com mão de obra**

**comunitária**. 2018. Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MACEDO, M. C. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2016.

MANHÃES, J.P.V.T.; DE HOLANDA, J.N.F. Caracterização e Classificação de Resíduo Sólido “Pó de Rocha Granítica” gerado na Indústria de Rochas Ornamentais. **Quim. Nova**, v.31, n.6, 2008. p. 1301–1304.

MARQUES, Marcos Vinícius Dias; DOS SANTOS, Rodrigo Rodrigues; CRUZ, Cláudia Patrícia Torres. O Panorama dos Resíduos de Corte de Mármore e Granito no Cenário Atual da Construção Civil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 26800-26811, 2021.

MATTOS, Aldo D. **Como preparar orçamentos de obras**. São Paulo: Editora Pini, 2006.

MENDES et al. **Impactos ambientais no setor de rochas ornamentais no espírito santo e alocação e reaproveitamento de seus resíduos**. Homepage. 2020. Disponível em: <<https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/09/impactos-ambientais-no-setor-de-rochas-ornamentais-no-espírito-santo-e-alocacao-e-reaproveitamento-de-seus-residuos.pdf>> Acesso em: 25 de agosto de 2020

MENEZES, L. C. M. de A. O.; YAMASHITA, M. Produção de tijolos ecológicos com cinzas de caldeira e bagaço de malte. 2017. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MERCADO, M. C. Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso. **São Paulo. Dissertação (Mestrado) –FAU USP**, 1990.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim do setor mineral– abril 2020**. Ministério de minas e energia.

MIRANDA, Rita Angélica Cardoso; BACARJI, Edgar; FERREIRA, R. C. Estudo da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento. **Goiânia: Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil–Universidade Federal de Goiás**, 2012.

MDR, Ministério de Desenvolvimento Regional. **Com retomada de obras, mais de 1,5 mil famílias terão novas moradias no Pará e na Bahia**. Homepage. 2020. Disponível em: <<https://www.mdr.gov.br/ultimas-noticias/13048-com-retomada-de-obras-mais-de-1-5-mil-familias-terao-novas-moradias-no-para-e-na-bahia>> Acesso em: 03 de agosto de 2020.

MUSARAT, Muhammad Ali; ALALOUL, Wesam Salah; LIEW, M. S. Impact of inflation rate on construction projects budget: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 407-414, 2021..

MÜLLER, R.; VESER, M. The current state of nonfinancial reporting in Switzerland and beyond. *Die Unternehm.* 2020, 74, 296–311.

NASCIMENTO, Álvaro Morais et al. Tijolo modular de solo-cimento como material na construção. **Revista InterScientia**, v. 6, n. 1, p. 187-202, 2018.

NASSER, Maurício Dominguez et al. Caracterização química do resíduo gerado por beneficiadora de rochas ornamentais do município de adamantina (SP). *Científica Multidisciplinary Journal*, v. 9, n. 1, p. 1-7, 2022.

NEVES, Mirna Aparecida et al. Lama de beneficiamento de rochas ornamentais processadas no Espírito Santo: Composição e aproveitamento. **Geosciences Geociências**, v. 40, n. 1, p. 123-136, 2021.

OLIVEIRA, et al.. Reaproveitamento de resíduos de mármore e granito (RMG) para a fabricação de compósitos poliméricos: resistência à tração e flexão. **58º Congresso Brasileiro de Química**, 2018

OLIVEIRA, Francisca et al. Analysis of the benefits of the addition of granite residues in the production of ecological brick. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 8, p. 3, 2021.

PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; SOBRAL, M. C. M. Management of construction and demolition waste using GIS tools. In: **Advances in Construction and Demolition Waste Recycling**. Woodhead Publishing, 2020. p. 121-156.

PEREIRA, Mara Monaliza Linhares. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos autoadensáveis com resíduo de marmoraria**. 2021. Dissertação de mestrado submetida ao departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Distrito federal.

PIMENTEL, Caroline Pereira. **Avaliação da influência da substituição parcial do solo por resíduo de rochas ornamentais nas propriedades físico-mecânicas de blocos solo-cimento**. 2021. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Sanitária e Ambiental. Instituto Federal do Espírito Santo.

PONCIANO, Ana Paula da Silva; SILVA, Giovanna Lyssa. Estudo comparativo entre sistemas de construção de alvenaria convencional e Monolite. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2019.

PORTELA, Edison Alves et al. Utilização do tijolo ecológico em construções residenciais. **Revista de trabalhos acadêmicos-Campus Niterói**, n. 1, 2017.

RAMALHO, Taynara Ewerlyn Barbosa. **Estudo dos parâmetros de síntese na obtenção da fase La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> para aplicação em células a combustível**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RAMOS, Monalyssa Caroline Lira da Silva. **Estudo geológico-geotécnico e análise da estabilidade de uma encosta localizada no bairro do Curado II no Município de Jaboatão dos Guararapes-PE**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

RAMOS FILHO, R. E. B. **Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manipueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos**. 155 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM, Natal / RN, 2020.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2021.

REIS, Fernanda Medeiros Dutra. **Estudo do comportamento físico-mecânico de tijolos de solo-cimento com adição de rejeitos de minerações de quartzito**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

REIS, F. M. D., RIBEIRO, P. R., REIS, M. J., REIS, J. C., FRANCKLIN. I. JR., **Estudo de dosagem para confecção de tijolo solo-cimento utilizando rejeitos de quartzito como agregado miúdo**, In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos. Anais... São Carlos: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2019. p. 49-56.

ROCHA, Suyene Monteiro; CASTRO ROCHA, Renata Rodrigues; LUSTOSA, Kárita Barros. Política brasileira de resíduos sólidos: reflexões sobre a geração de resíduos e sua gestão no município de Palmas-TO. **REVISTA ESMAT**, v. 9, n. 13, p. 29-44, 2017.

SACRAMENTO, Jaire. **Confecção de tijolos ecológicos utilizando resíduo de marmoraria**. 2019. Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, Bahia.

SANTOS, A. F. R. et al. **Utilização de resíduos da construção civil em tijolos ecológicos**. Trabalho Interdisciplinar, Administração da Produção II. Associação do Vale do Itajaí Mirim, 2009.

SANTOS, Lucas Souza. **Processo produtivo e geração de resíduos de corte de mármore e granitos em marmorarias de Rio Verde/GO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde. Rio Verde, GO, 2020, 65p.

SANTOS, Rogério Pires. **Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como componente na recuperação de áreas degradadas por mineração de argila**. Tese (Doutorado) Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2021.

SENSONEO. **Global Waste Index 2022: These are the biggest waste producers in the world**. Homepage. 2022. Disponível em:  
< <https://sensoneo.com/global-waste-index/> > Acesso em: 12 de março de 2022.

SILVA, et al. Resíduos Sólidos de Construção Civil: caracterização, alternativas de reuso e retorno econômico. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 286-301, 2017.

SILVA, A. C. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2018. 146f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, Bruno Sanches et al. Tijolo de solo-cimento: incorporação de resíduos e viabilidade na construção civil no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e19011225605-e19011225605, 2022.

SILVA, Thalia Klein. **Análise de provas de carga em placa na determinação da potencial colapsividade de solos típicos do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2020.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Homepage. 2021. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnosticos> > Acesso em: 12 de março de 2022.

SOUSA, Angélica Silva; OLIVEIRA, Guilherme Saramago; ALVES, Laís Hilário. A PESQUISA BIBLIOGRÁFICA: PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS. **Cadernos da FUCAMP**, v. 20, n. 43, 2021.

SOUSA, Kennedy Wanderson Rosa; ALVES, Vinicius Domingos. **Análise comparativa de produtividade e custos das alvenarias: em solo-cimento, blocos cerâmicos e estrutural em habitação popular**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). FACEG – Faculdade Evangélica De Goianésia, Goiás.

SOUZA, A.J.; PINHEIRO, B.C.A.; HOLANDA, J.N.F. **Recycling of Gneiss Rock Waste in the Manufacture of Vitrified Floor Tiles**. *Journal of Environmental Management*. v. 91, 2010. p. 685–689

SOUZA, Luiz Guilherme Meira et al. Composto utilizando resíduos de mármore e granito para a construção de casas populares. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 192-197, 2017.

SOUZA, Márcia IB, et al. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 205-212, 2008.

TDR. **What A Waste: A Global Review Of Solid Waste Management**. Homepage. 2021. Disponível em: < <https://theedinburghreporter.co.uk/2021/11/what-a-waste-a-global-review-of-solid-waste-management/> > Acesso em: 12 de março de 2021.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 536-546, 2016.

VICTORIA, Anderson Magalhães. **Recursos para construção civil**. Homepage. 2021. Disponível em: < <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/recursos-construcao-civil/>> Acesso em: 19 de agosto de 2021.

VILELA, A. P., EUGÊNIO, T. M. C., OLIVEIRA, F.F., MENDES, J. F., RIBEIRO, A. G. C., VASCONSELLOS, L. E., MENDES, R. F., Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste, **Construction and Building Materials**, v. 262, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

ZAMBANINI, Marcos Eduardo et al. **Manual para elaboração e normalização de trabalhos acadêmicos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Universidade Federal De Sergipe, Sergipe.