

INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PIAUI



**PPGEM**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DOS MATERIAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**FABRICAÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM PLÁSTICO RECICLÁVEL**

**FREDERICO PINTO MARQUES**

**Orientador: Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares**

**TERESINA**

**2022**

**FREDERICO PINTO MARQUES**

**FABRICAÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM PLÁSTICO RECICLÁVEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processamento e caracterização de materiais.

**Orientador: Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares**

**TERESINA**

**2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**

---

Marques, Frederico Pinto

M357f      Fabricação de tijolos ecológicos com plástico reciclável / Frederico Pinto  
Marques. - 2023.  
74 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2023.

Orientador : Prof Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho

1. Tijolo solo-cimento. 2. Polímero . 3. PET reciclável. I.Título.

CDD - 620.1

---

**Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ - IFPI  
CAMPUS TERESINA CENTRAL / DIRETORIA DE PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS / PPG-EM  
Praça da Liberdade, 1597 - Centro - Teresina - PI CEP. 64.000-040  
Fone: (86) 3131 – 9468, endereço eletrônico: <http://ppgem.ifpi.edu.br/home>

**FREDERICO PINTO MARQUES**

## **FABRICAÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM PLÁSTICO RECICLÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do  
Instituto Federal do Piauí, como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
de Materiais.

**Aprovada em 22/12/2022**

### **BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí-IFPI  
Orientador

---

**Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí-IFPI  
Avaliador Interno

---

**Profª. Drª. Yáskara Lopes Oliveira**  
Universidade Estadual do Piauí-UESPI  
Avaliador Externo

### **Dedicatória**

A minha mãe, irmã e minha filha Bianca.

### **Agradecimentos**

A minha família, pois sem seu apoio não teria conseguido.

Ao professor Reis, pela sua orientação.

Ao professor Arruda, pela sua orientação.

Aos amigos, Roseane, Symei, Aline, Fábio, Francisca que no decorrer do curso incentivaram-me nessa caminhada.

Ao programa de pós graduação em engenharia de materiais, pela oportunidade recebida.

Por fim, a todos que, diretamente ou não, contribuíram para tornar a realização desta pesquisa em algo possível.

## RESUMO

As embalagens de quase tudo que consumimos e a maioria dos materiais que utilizamos estão envolvidos por plástico. De uma simples garrafa d'água a um computador, tudo é feito de algum tipo de plástico, gerando assim, após sua utilização, uma enorme quantidade de lixo. A utilização excessiva do plástico (polímero) certamente devido ao baixo custo de produção, tem contribuído para proliferação de um sério problema ambiental devido ao seu descarte. O resíduo desse polímero que já foi utilizado pode ser reciclado, retornando ao consumidor. O tijolo ecológico, que por sua natureza vem mostrando que é uma alternativa viável para nossas construções - sem utilização de queima de árvores e emissão de gás carbônico na atmosfera - é um excelente receptor de resíduos. Esse trabalho busca avaliar a incorporação do PET - Poli (Tereftalato de Etileno), uma das variações do polietileno, para atender aos critérios de aceitação por norma, para uma boa resistência mecânica, absorção de água, durabilidade e conforto térmico dos tijolos ecológicos. Os teores de adição da fibra aplicados nesta pesquisa foram de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em uma massa utilizada na produção de tijolo ecológico. O traço adotado de 7/1 para proporção de solo em relação ao cimento. Os corpos de prova foram confeccionados em tamanho padrão em uma prensa manual simples. Foram realizados ensaios tecnológicos de absorção de água e resistência à flexão 3 pontos nos corpos de prova, seguindo as normas da ABNT 8491:2012, para um período de cura nas idades de 7, 14 e 28 dias para a molhagem do tijolo solo-cimento. Também foram realizados ensaios de caracterização das matérias-primas como: granulometria, limites de consistência, difração de raios X e fluorescência de raios X. Os resultados mostraram que adição do resíduo plástico PET no tijolo solo-cimento influencia positivamente na resistência mecânica, obtendo-se assim um material apropriado para o sistema construtivo de alvenaria sem função estrutural.

**Palavras-Chave:** Tijolo solo-cimento; Polímero; PET reciclável

## **ABSTRACT**

The packaging of almost all we consume and most of the materials we use are wrapped by plastics, from a simple water bottle to a computer, everything is made of some type of plastic, thus, generating a huge amount of waste after its use. The excessive use of plastic (polymer), certainly owing to the low production cost, has contributed to the proliferation of a serious environmental problem due to its disposal. The residue of this polymer which has already been used can be recycled, returning to the consumer. The ecological brick has been proving to be a viable alternative for our buildings, without burning trees and emitting carbon dioxide into the atmosphere, and it is an excellent waste receiver. This work seeks to evaluate the incorporation of PET - Poly (Ethylene Terephthalate), one of the polyethylene variations to meet the acceptance criteria by standard for a good mechanical resistance, water absorption, durability and thermal comfort of ecological bricks. The fiber addition contents applied in this research were 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% in a mass used in the ecological brick production. The adopted trait of 7/1 for proportion of soil in relation to cement. The specimens were made in standard size in a simple manual press. Technological tests of water absorption and 3-point flexural strength were carried out on the test specimens, following the ABNT standards 8491: 2012, for a curing period at ages of 7, 14 and 28 days for wetting the soil-cement brick. Characterization tests of the raw materials were also carried out, such as: granulometry, consistency limits, X-ray diffraction and X-ray fluorescence. The results showed that the addition of PET plastic residue to the soil-cement brick positively influences the mechanical resistance, thus obtaining an appropriate material for the masonry constructive system without structural function.

**Keywords:** Brick soil cement; Polymer; Recyclable PET.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil .....                                                                        | 18 |
| Figura 2 – Destinação Adequada e Inadequada dos RSU no Brasil e Sul (T/dia).....                                                     | 19 |
| Figura 3 – Fluxograma das diretrizes da PNRS .....                                                                                   | 20 |
| Figura 4 - Estrutura química do PET .....                                                                                            | 21 |
| Figura 5 – Métodos de preparação do PET .....                                                                                        | 22 |
| Figura 6- Processo de injeção e sopro de garrafas.....                                                                               | 23 |
| Figura 7 – Reciclagem de PET no Brasil.....                                                                                          | 24 |
| Figura 8 – Processo produtivo do plástico .....                                                                                      | 25 |
| Figura 9 - (a) Construção com tijolos de solo-cimento (b) Construção de paredes monolíticas de solo-cimento .....                    | 33 |
| Figura 10 – Fluxograma da pesquisa .....                                                                                             | 35 |
| Figura 11 – a) Jazida de argila e b) Argila coletada .....                                                                           | 35 |
| Figura 12 - Areia coletada .....                                                                                                     | 36 |
| Figura 13 – a) Ponto de recolhimento de descartáveis; b) Embalagens de PET; c) PET pulverizado; d) Lixa usada para ralar o PET ..... | 37 |
| Figura 14 -Cimento ensacado .....                                                                                                    | 38 |
| Figura 15 - Jogo de peneiras e agitador.....                                                                                         | 40 |
| Figura 16 - Matriz de conformação metálica .....                                                                                     | 42 |
| Figura 17 - Prensa hidráulica .....                                                                                                  | 43 |
| Figura 18 - Corpos de prova.....                                                                                                     | 43 |
| Figura 19 - Equipamento utilizado na análise química .....                                                                           | 44 |
| Figura 20 – Limite de liquidez e plasticidade.....                                                                                   | 45 |
| Figura 21 – Aparelho de Casagrande .....                                                                                             | 46 |
| Figura 22 – Gráfico de Plasticidade .....                                                                                            | 46 |
| Figura 23 - Equipamento utilizado na microscopia optica .....                                                                        | 48 |
| Figura 24 - Esquema da flexão a três pontos.....                                                                                     | 48 |
| Figura 25 - Ensaio de flexão (3 pontos) .....                                                                                        | 50 |
| Figura 26 - Medidas da caixa de madeira .....                                                                                        | 51 |
| Figura 27 - Caixa de madeira com régua pra medição .....                                                                             | 51 |
| Figura 28 - Frasco com solo.....                                                                                                     | 52 |
| Figura 29 - Hand Test .....                                                                                                          | 52 |
| Figura 30 – Determinação da umidade ótima do solo .....                                                                              | 53 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 31 - Ensaio do cordão .....                                                  | 53 |
| Figura 32 - Ensaio da fita .....                                                    | 54 |
| Figura 33 - Ensaio do bolo .....                                                    | 55 |
| Figura 34 - Ensaio da resistência seca .....                                        | 55 |
| Figura 35 - Equipamentos para Ensaio de Consistência.....                           | 56 |
| Figura 36 - Ensaio da caixa- apresentação de trincas .....                          | 56 |
| Figura 37 – Ensaio do vidro – presença maior de argila .....                        | 57 |
| Figura 38 - Hand test – apertando a argila entre os dedos .....                     | 57 |
| Figura 39 - Teste da bola ao solo.....                                              | 58 |
| Figura 40 - Ensaio do cordão- bola esmagada.....                                    | 59 |
| Figura 41 - Ensaio da fita- cilindro amassado acima de 3 mm .....                   | 60 |
| Figura 42 - Ensaio do bolo- bolo antes de ser golpeado .....                        | 60 |
| Figura 43 - Ensaio do bolo- bolo com a pressão dos dedos .....                      | 61 |
| Figura 44 - a) Pastilha após secagem e b) Resistência seca- pastilha esfarelada.... | 61 |
| Figura 45 – Distribuição granulométrica das matérias-primas .....                   | 62 |
| Figura 46 – Gráfico DRX da Argila .....                                             | 65 |
| Figura 47 – Difractogramas dos agregados miúdos (areias) .....                      | 66 |
| Figura 48 – Absorção de água .....                                                  | 66 |
| Figura 49 – Resistência à compressão .....                                          | 67 |
| Figura 50 – Correlação entre RC e AA.....                                           | 68 |
| Figura 51 - Tijolo ecológico com fragmentos de plástico.....                        | 69 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Propriedades do polietileno tereftalato .....                                                          | 21 |
| Tabela 2 – Faixas granulométricas consideradas ideais para o solo-cimento .....                                   | 29 |
| Tabela 3 – Faixas granulométricas consideradas ideais para o solo-cimento .....                                   | 29 |
| Tabela 4 - Limites especificados para controle de qualidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento..... | 31 |
| Tabela 5 - Tipos de tijolos de solo-cimento .....                                                                 | 34 |
| Tabela 6 – Normas utilizadas.....                                                                                 | 39 |
| Tabela 7 – Classificação do agregado miúdo através do módulo de finura .....                                      | 40 |
| Tabela 8 – Proporções em peso dos corpos de prova.....                                                            | 41 |
| Tabela 9 - Parâmetro de referência para absorção de água.....                                                     | 47 |
| Tabela 10 - Resistência Mínima à Compressão.....                                                                  | 47 |
| Tabela 11 - Interpretação dos ensaios expedidos do solo .....                                                     | 59 |
| Tabela 12- Interpretação dos resultados dos ensaios qualitativos .....                                            | 61 |
| Tabela 13 – Dados de limite de liquidez e plasticidade da matéria-prima argilosa ...                              | 63 |
| Tabela 14 – Análise química das matérias-primas.....                                                              | 64 |

## Sumário

|           |                                               |     |
|-----------|-----------------------------------------------|-----|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                             | 14  |
| <b>2</b>  | <b>OBJETIVOS</b>                              | 17  |
| 2.2       | OBJETIVO GERAL                                | 17  |
| 2.3       | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                         | 17  |
| <b>3</b>  | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                    | 18  |
| 3.1       | RESÍDUOS SOLIDOS                              | 18  |
| 3.2       | RESÍDUOS PLASTICOS                            | 20  |
| 3.3       | PROBLEMÁTICA AMBIENTAL                        | 25  |
| 3.4       | IMPACTOS AMBIENTAIS                           | 27  |
| 3.5       | SOLO                                          | 28  |
| 3.6       | CIMENTO                                       | 30  |
| 3.7       | COMPOSIÇÃO DO SOLO-CIMENTO                    | 31  |
| 3.8       | FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO                    | 311 |
| 3.9       | USO E APLICAÇÃO DO SOLO-CIMENTO               | 32  |
| 3.10      | TIJOLO ECOLÓGICO                              | 33  |
| <b>4</b>  | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                    | 34  |
| 4.1       | MATERIAIS                                     | 35  |
| 4.1.1     | Argila                                        | 35  |
| 4.1.2     | Areia                                         | 36  |
| 4.1.3     | Plástico                                      | 36  |
| 4.1.4     | Cimento                                       | 37  |
| 4.1.5     | Água                                          | 38  |
| 4.2       | METODOLOGIA                                   | 38  |
| 4.2.1     | Caracterização das Matérias-primas            | 38  |
| 4.2.2     | Preparação das matérias-primas                | 39  |
| 4.2.3     | Granulometria                                 | 39  |
| 4.2.4     | Formulações e produção dos corpos de prova    | 40  |
| 4.2.5     | Análise química                               | 43  |
| 4.2.7     | Análise de plasticidade                       | 44  |
| 4.2.9     | Absorção de água                              | 46  |
| 4.2.10    | Microscopia ótica                             | 47  |
| 4.2.11    | Ensaio de resistência à flexão em três pontos | 48  |
| 4.2.12    | Ensaaios qualitativos                         | 49  |
| <b>5</b>  | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                 | 54  |
| 5.1       | ENSAIOS QUALITATIVOS                          | 54  |
| 5.2       | GRANULOMETRIA                                 | 58  |
| 5.3       | PLASTICIDADE                                  | 59  |
| 5.3       | ANÁLISE QUÍMICA                               | 60  |
| 5.4       | ANÁLISE MINERALÓGICA                          | 61  |
| 5.5       | ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA                    | 62  |
| 5.6       | ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO            | 63  |
| 5.7       | ANÁLISE MICROESTRUTURAL                       | 65  |
| <b>6</b>  | <b>CONCLUSÃO</b>                              | 65  |
| <b>7</b>  | <b>SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS</b>        | 66  |
| <b>8</b>  | <b>REFERÊNCIAS</b>                            | 67  |

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Bellen (2002), a sustentabilidade é vista como um padrão fundamental que implica a cada geração, certo nível de manutenção do desenvolvimento humano. Dessa forma, é possível modificar de tempos em tempos a maneira adotada pelos seres humanos para desenvolver os padrões evolutivos requisitados na era em questão.

Com o avanço da construção civil, para atender as demandas de mercado, tem-se observado como reflexo dessa expansão que, cada vez mais, e consequentemente em maior quantidade, está crescendo a extração de recursos naturais para esse fim. Esses recursos são finitos e estão sendo regidos por um sistema linear de extração, que nos leva a refletir sobre a breve escassez de materiais e energia. Assim, faz-se relevante a compatibilização do crescimento urbano apoiado nos métodos atuais de concepção da construção civil e sustentabilidade, o que, segundo Pisani (2010), não eliminará completamente os impactos, mas diminuirá positivamente e consideravelmente as intervenções ao meio.

Em vista disso, o desenvolvimento de técnicas capazes de aprimorar o campo da construção civil, visando, mormente, o cuidado com o meio, devem ser constantes e regularmente atualizadas. Já existem, no âmbito da construção civil, estruturas de alvenaria conhecidas como blocos ecológicos ou, ainda, blocos de solo-cimento, feitos de argila, areia e cimento, que por sua vez assumem um papel sustentável, visto que são mais pertinentes ao ambiente que os demais, pois não passam por processo de queima. Dessa forma se apresentam como uma alternativa eficaz, já que os tijolos (de vedação e estruturais) são uma parte fundamental na engenharia. Existem também no ramo da construção civil muitos materiais produzidos a partir de resíduos de PET.

Aragon e Ghiraldelo (2014) apontam alguns destes, como: carpetes, forros, telhas, revestimentos, tubos, entre outros. Apesar de poderem ser utilizados de diversas formas, o preconceito quanto a materiais recicláveis ainda é muito intenso e gera na população a ideia de que este possui menor qualidade, sendo uma ideia equivocada, já que os resíduos de PET podem agregar vantagens aos materiais, como no caso deste estudo. Associar a construção civil – que possui um ritmo extremamente crescente em sua indústria – ao aproveitamento destes resíduos não degradáveis, gera um salto considerável na relação da construção civil e sustentabilidade.

Segundo Aragon e Ghiraldello (2014), os polímeros de polietileno possuem características nas suas propriedades bastante positivas, como processamentos com menor custo de energia e grande durabilidade; podendo ser rígidos ou flexíveis, leves, indeformáveis e de fácil trabalhabilidade, características essas que inseridas na construção civil, podem proporcionar bons resultados.

Alinhado com esses propósitos, este trabalho busca agregar a blocos de solo-cimento, partículas de poli (tereftalato de etileno) – PET –, almejando uma viável diminuição destes resíduos, bem como avaliar o possível aumento de resistência das peças para, então, incorporá-las ao ramo construtivo. Sendo a construção civil um dos ramos que mais utiliza os recursos naturais, surge a necessidade de incorporar novos materiais e técnicas construtivas que minimizem os impactos ambientais. Nesse cenário, surge o tijolo de solo-cimento constituído por solo, cimento e água em sua composição. Este apresenta boa resistência à compressão. Sua matéria prima é abundante, sendo também chamado de tijolo ecológico, pois não exige o processo de queima de madeira e combustível, reduzindo assim o corte de árvores e consequentemente a emissão de monóxido de carbono (MOTTA,2014).

Os tijolos de solo-cimento podem ser confeccionados para serem revestidos ou utilizados a vista, podem também ter função de vedação ou uso estrutural, o fator que determina são as dosagens e o maior cuidado na execução. No caso do estudo realizado, foi feita uma análise se as partículas de garrafa PET influenciariam de alguma forma na resistência a compressão do tijolo, constatando se este poderá ter um uso estrutural ou de vedação (MOTTA,2014).

De acordo com a Abrelpe (Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública), o volume de resíduos sólidos urbanos (RSU), gerados em 2010, foi cerca de 7% superior ao volume medido em 2009, ou seja, mais de 61 milhões de toneladas. Este valor equivale a 380 kg de resíduos por habitante (Abrelpe, 2017). São as embalagens pós-consumo do PET, os resíduos que estão atingindo percentuais cada vez maiores na composição do lixo urbano, com presença crescente no meio ambiente (Abrelpe, 2017).

O PET é classificado quimicamente como um polímero poliéster termoplástico, e é o melhor e mais resistente plástico para a fabricação de garrafas e embalagens para refrigerantes, entre outras aplicações. O polietileno é dividido em quatro tipos. São eles: polietileno de baixa densidade (PEBD), de baixa densidade linear (PEBDL), média densidade (PEMD) e alta densidade (PEAD). O PET entra na classificação de

baixa densidade (PEBD) e suas características são: (i) alta resistência ao impacto; (ii) excelente barreira a gases e odores; (iii) flexibilidade; (iv) transparência; (v) possui maior viscosidade e maior brilho; (vi) boa resistência à tração e ao rasgo (COUTINHO et al,2003).

Por consequência dessas características, o mercado apresenta uma ampla utilização para o PET. As garrafas de PET são utilizadas basicamente para o armazenamento de bebidas carbonatadas, porém, após o consumo das bebidas, seu descarte se torna um problema. Por ser um material de longo processo de decomposição, que ocupa um grande volume, seu descarte em aterro torna-se inviável. Pensando nisso e nos impactos que esse material pode causar no meio ambiente, sua reciclagem tem sido impulsionada.

Segundo Galli (2013), essa reciclagem pode ser por três diferentes modos: química, energética e mecânica, sendo na reciclagem mecânica as tentativas de utilização na construção civil, já que o PET possui boa resistência à tração, além de criar alternativas de construção com custo mais baixo. Com o passar dos anos, e o crescente aumento da necessidade de compatibilizar a sustentabilidade com vários âmbitos do cotidiano humano, surgiram diferentes maneiras de definir os termos e aplicações de métodos sustentáveis na sociedade.

Assim, segundo Mikhailova (2004), a forma mais ampla de delinear sustentabilidade é a maneira de sustentar-se, manter-se. Para ela, uma atividade sustentável é aquela que é feita conscientemente, de modo que, mesmo explorando recursos naturais, a matriz destes não se esgotará nunca. Desta forma, uma sociedade sustentável não coloca em risco os elementos naturais. Existem no mercado vários métodos sendo implementados, os que demonstram a inserção de medidas sustentáveis no desenvolvimento urbano, entre eles estão: projetos de reutilização de água da chuva, telhado verde, energia renovável, gestão de resíduos, tijolos ecológicos, entre outros. O PET foi introduzido no Brasil em 1988, trazendo muitos benefícios para os consumidores, mas também trouxe alguns problemas ambientais.

De acordo com a ABIPET (Associação Brasileira da Indústria do PET, 2016), no ano de 2007, apenas 53,5% deste polímero foi devidamente reciclado. Em outras palavras, aproximadamente 175.000 toneladas não receberam nenhum tipo de tratamento de reciclagem. Percebendo toda essa massa PET como garrafas de bebida de 2 L de capacidade (com 50 g de massa cada), pode ser estimado quase

3,5 milhões de garrafas que foram destinadas (em parte considerável) a áreas de disposição irregulares.

De acordo com Frigione (2010), a reciclagem do PET proporciona vantagens nas dimensões ambiental, social e econômica. Estas vantagens se traduzem através da diminuição da extração de matéria prima virgem não renovável, na disposição em aterros, no consumo de energia, pois no processo de reciclagem é utilizada em média 30% da energia necessária para produzir a resina virgem sem comprometer a qualidade do produto final, na criação de uma cadeia de logística para coletar, segregar, transportar e destinar este rejeito e na redução do preço dos produtos na utilização do material reciclado (algo em torno de 30% em comparação ao produto virgem). Dessa forma, entende-se que a substituição de parte do solo por resíduos de PET, para a construção de tijolos de solo-cimento, possa apresentar uma alternativa sustentável para a reciclagem de resíduos PET.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.2 OBJETIVO GERAL**

Analisar a viabilidade técnica da utilização de agregado reciclado e partículas de garrafa PET na fabricação de blocos de tijolos ecológicos.

## 2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

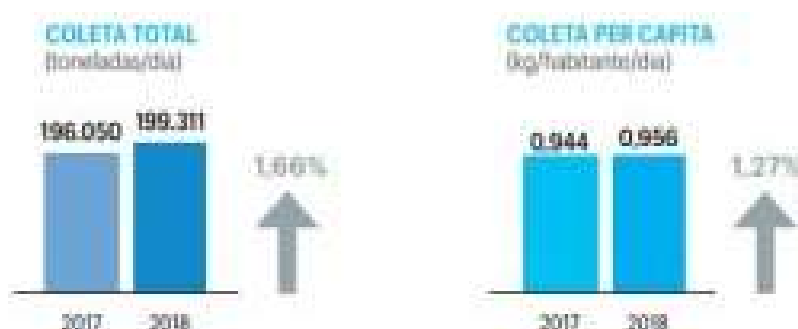
- Formular um traço padrão para o tijolo ecológico;
- Inserir o plástico em diversas proporções no traço padrão;
- Confeccionar os corpos de prova;
- Ensaiair em laboratório os limites das propriedades exigidas nas normas para fabricação do tijolo ecológico;
- Comparar os resultados do compósito e do tijolo ecológico tradicional;
- Analisar as melhorias que o compósito demonstrou perante o tijolo ecológico tradicional;
- Ajustar o traço para fabricação dos tijolos ecológicos com resíduos;

## 3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Lei Federal 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos-PNRS (BRASIL, 2010), e define resíduos sólidos como: “Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”. Analisando a Figura 1, observa-se que a quantidade de RSU, coletada no país, apresentou um acréscimo no seu índice, tanto no total, quanto no per capita e na comparação com o ano.

Figura 1 – Coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2022)

A disposição final dos resíduos teve um avanço quanto à disposição ambientalmente correta, pois houve um ligeiro aumento de 2,7% do uso de lixões no ano de 2019 (Figura 2) (ABRELPE, 2022).

Figura 2 – Destinação Adequada e Inadequada dos RSU no Brasil e Sul (T/dia)



Fonte: Abrelpe (2022)

A PNRS define ainda a reciclagem como: “Processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente) e, se couber, do SNVS (Sistema Nacional de Vigilância Sanitária) e do SUASA (Sistema Unificado de Atenção a Sanidade Agropecuária) (BRASIL, 2010). A Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 307 (2002), define reciclagem como sendo o processo de reaproveitamento do material, depois de ter sofrido algum tipo de transformação. A PNRS (Política Nacional dos Resíduos Sólidos) institui ainda a responsabilidade aos grandes geradores de seguirem as diretrizes desta lei na gestão de resíduos, seguindo a seguinte ordem de prioridade (Figura 3).

Figura 3 – Fluxograma das diretrizes da PNRS

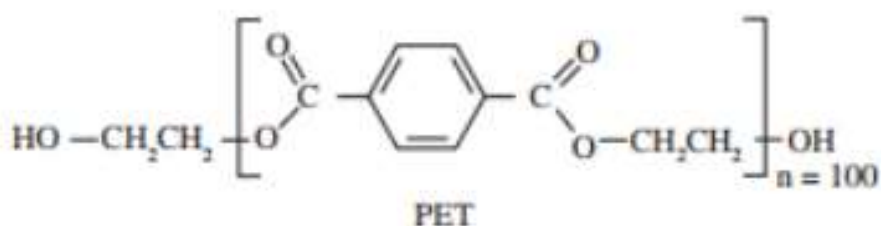


Fonte: TIBURCIO (2018)

### 3.2 RESÍDUOS PLÁSTICOS

Os resíduos plásticos causam no ambiente muitos impactos, dentre eles: o esgotamento de matéria prima não renovável e o aglomerado de resíduos de difícil degradabilidade. Por esta razão, a reciclagem apresenta um significado ainda maior, por envolver uma série de procedimentos, visando a redução dos impactos ambientais relacionados aos plásticos (ZANIN e ZANIN, 2015). De acordo com o site do Ministério do Meio Ambiente (2018), os plásticos podem ser divididos em três grupos: 1) os que deveriam ser gradualmente banidos (embalagens de PVC para alimentos); 2) os que no médio e longo prazo devem ser reduzidos por apresentarem características tóxicas - PET e poliestireno (copos descartáveis); 3) e os que apresentam características pouco tóxicas como o polietileno e o polipropileno. O PET, é o polímero termoplástico comercialmente mais importante da família dos poliésteres. Possui estrutura semicristalina, parcialmente alifática e aromática, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Estrutura química do PET



Fonte: Adaptado de ROMÃO *et. al.*, (2009)

Entre suas propriedades destacam-se baixa densidade, transparência, excelente estabilidade térmica, facilidade de processamento, alta resistência química, alta estabilidade hidrolítica (devido à presença de anéis aromáticos), propriedades mecânicas atrativas às altas temperaturas, propriedades de barreira aos gases, leveza, aparência nobre (brilho e transparência) e baixo custo de produção. Algumas de suas propriedades estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do polietileno tereftalato

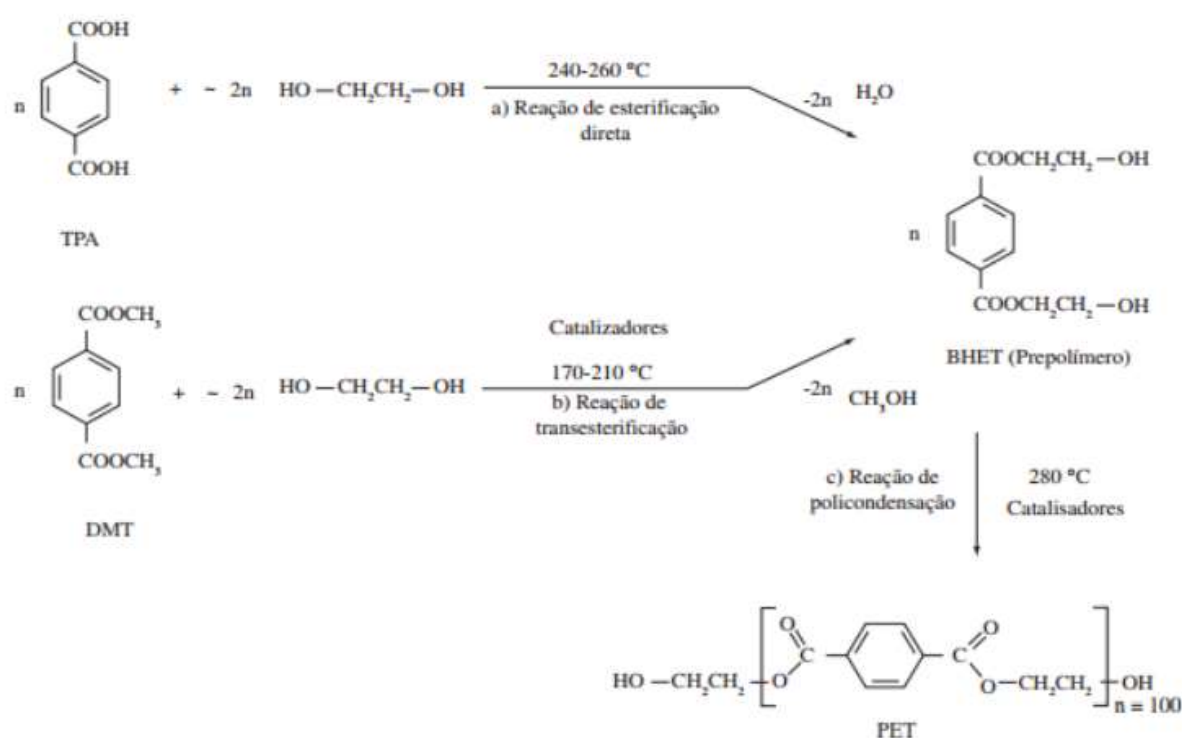
| Propriedade                     | Valor       |
|---------------------------------|-------------|
| Massa molecular                 | 15000-42000 |
| Densidade                       | 1,33-1,45   |
| Índice de refração              | 1,65-1,66   |
| Temperatura de fusão            | 250-270 °C  |
| Temperatura de transição vítrea | 70-74 °C    |

Fonte: Adaptado de Montenegro et al, (2000).

A produção industrial do PET pode ser realizada em duas ou três etapas: pré-polimerização, policondensação e polimerização no estado sólido. Segundo Romão *et. al.* (2009), a etapa de pré-polimerização consiste na fabricação do oligômero

tereftalato de bis (2-hidroxietileno), BHET. O poliéster pode ser fabricado por duas rotas distintas: a) esterificação direta; e b) transesterificação. A esterificação direta é obtida pela reação do ácido tereftálico (TPA) com etileno glicol (EG). Uma das principais diferenças da transesterificação é a substituição do monômero ácido tereftálico pelo éster tereftalato de dimetileno (DMT). Na policondensação, o BHET é gradualmente aquecido a 280 °C após a sua síntese na pré-polimerização. Durante esse aquecimento a pressão dentro do recipiente de reação é reduzida o que eleva o grau de polimerização para 100. Já na polimerização no estado sólido, a reação ocorre entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão do material, obtendo-se um PET de alta massa molar. A Figura 5 ilustra todas as etapas de obtenção do polietileno tereftalato (ROMÃO, et. al.,2009).

Figura 5 – Métodos de preparação do PET

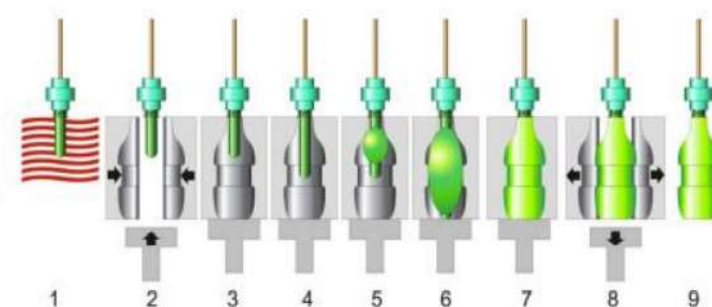


Fonte: Adaptado de ROMÃO *et. al.* (2009.)

O PET é um polímero constituído por uma estrutura linear. Sendo assim, contém diversas propriedades de acordo com o grau de cristalinidade: brilho, leveza, facilidade de moldagem, etc. É inodoro, não possui propriedades tóxicas, insípido e inerte; também apresenta uma resistência mecânica, térmica química à gorduras, à

tração e à abrasão alta, além de possuir uma boa estrutura de barreira. Apresenta-se em alguns estados: transparente (amorfo), translúcido (semicristalino e orientado) e opaco (altamente cristalino) (FIGUEIREDO et al., 2015). Esse polímero pode ser utilizado como embalagens rígidas e flexíveis, sacaria industrial, tampas de utensílios domésticos, filmes, entre outras aplicações (SILVA e MIRANDA, 2017). Seu processo de fabricação é denominado processo de Injeção e Sopro. Esse processo pode ser resumido em 9 etapas representadas na Figura 6.

Figura 6- Processo de injeção e sopro de garrafas



Fonte: Adaptado de Miranda (2011).

Essas etapas foram descritas por Miranda (2011) seguindo a sequência da Figura 6. Uma máquina sopradora recebe as pré-formas injetadas, as posiciona em pinos sobre um trilho móvel e as aquece ou reaquece por radiação até temperaturas da ordem de 90 a 100°C, de modo a apenas amolecer material e moldá-lo posteriormente; 2. Depois de aquecidas, as pré-formas são posicionadas entre as placas do molde; 3. Fechamento do molde; 4. As pré-formas são esticadas longitudinalmente por uma haste para obter o estiramento axial; 5. A partir deste momento inicia-se o sopro, que ocorre de cima para baixo; 6. O sopro dá origem ao estiramento radial; 7. Uma pressão é aplicada no interior da pré-forma, forçando a junção das paredes ao molde, resultando a forma final do frasco; 8. O molde é aberto e a garrafa é sacada do seu interior; 9. A garrafa é transportada para as demais etapas da fabricação (envase e rotulagem).

O processo de sopro permite a obtenção de peças ocas de paredes finas, usualmente empregado na fabricação de frascos e garrafas, difundindo desta forma a utilização do PET. Quando estes resíduos são depositados em locais inapropriados como lixões, o principal problema é a queima indevida e sem controle. Quando

depositados em aterros, prejudicam a compactação do lixo e prejudicam a decomposição dos materiais que são biologicamente degradáveis, pois forma camadas impermeáveis que interferem nas trocas de líquidos e gases produzidos no processo de biodegradação da matéria orgânica (PINTO, 1995). O PET pode levar aproximadamente 400 anos para degradar-se, reduzindo a capacidade física aterros o que provoca os impactos citados à cima (MODRO *et al.*, 2009). Segundo levantamentos feitos em grandes cidades brasileiras, os principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos são o polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), PET, PVC e o PP. Outros tipos de polímeros encontrados correspondem a apenas 11% do total (FIGUEIREDO *et al.*, 2015). De acordo com ABI PET (Associação Brasileira da Indústria do PET), o consumo aparente dos plásticos em 2015 foi de 6,99 milhões de toneladas. Os dados mais recentes sobre a reciclagem de plásticos no Brasil são da indústria de reciclagem mecânica dos plásticos, que transformam os materiais descartados pós-consumo em grânulos para serem utilizados na produção de novos produtos plásticos. De acordo com os dados disponíveis, a reciclagem de PET aumentou em 2019, mas o índice foi superior a 50% (Figura 7).

Figura 7– Reciclagem de PET no Brasil

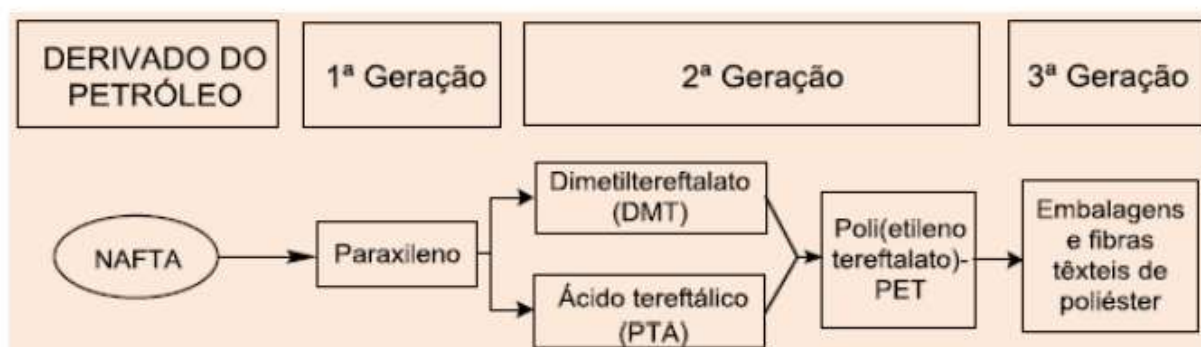


Fonte: Adaptado de ABI PET, 2022

Do consumo total de PET no Brasil, 90% são destinados para fabricação de embalagens de bebidas e alimentos, tais como água, refrigerantes, entre outros

(ABIPET, 2023). A Figura 8 mostra a cadeia produtiva para produção dos plásticos, em que o processo se inicia com a obtenção da matéria prima, passando para as centrais petroquímicas (1ª Geração), que geram produtos petroquímicos básicos (2ª Geração), a fim de transformarem estes petroquímicos em resinas de artefatos de diversas cores, formatos e finalidades (3ª Geração).

Figura 8 – Processo produtivo do plástico



Fonte: Adaptado de FIGUEIREDO *et. al.*(2015)

Para Figueiredo *et al.* (2015), a reciclagem dos materiais plásticos é uma das melhores opções, por demandar baixo consumo de energia e menor extração de recursos naturais, preservando desta forma os combustíveis fósseis e diminuindo a emissão de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio) e SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre).

### 3.3 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

Um dos principais componentes da poluição ambiental é o processo de industrialização, do qual são gerados subprodutos em forma de resíduos, que quando descartados sem quaisquer cuidados, representam um risco potencial à saúde pública e aos ecossistemas. Sob condições adequadas, esses materiais podem ser reaproveitados, promovendo assim um crescimento harmônico e sustentável da sociedade. O princípio do desenvolvimento sustentável está amparado no tripé crescimento econômico, equidade na distribuição de renda e preservação da natureza.

John (2000) define ainda como o desenvolvimento capaz de atender as necessidades básicas de toda a população e garantir a todos a oportunidade de satisfazer suas aspirações por uma vida melhor, sem comprometer a possibilidade das próximas gerações e que atenda suas próprias demandas.

Para Capra (2005), a construção da sustentabilidade não pode desprezar o fato de que a própria natureza possui os mecanismos necessários para a sustentação da vida. Na natureza, o que é rejeito de uma espécie torna-se alimento para outra, da mesma forma, nas comunidades humanas, os resíduos de uma indústria devem tornar-se matéria-prima para outra.

Diante do grande volume de resíduos gerados pela indústria, a chamada política dos três R's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar) coloca-se como uma alternativa não apenas viável, mas também necessária para a consolidação de uma comunidade sustentável. Como a redução da geração de resíduos implica quase sempre em adequações de processos produtivos, é muitas vezes inviável, tecnicamente e economicamente, para a maioria das pequenas e médias indústrias.

A reciclagem, por outro lado, apresenta diversas vantagens, dentre as quais John (2000) destaca:

- Preservação dos recursos ambientais;
- Redução do volume de resíduos a ser depositado em aterros ou incinerado;
- Redução do consumo de energia para a fabricação do mesmo produto;
- Geração de empregos.

O aproveitamento dos resíduos mediante a reciclagem depende de sua prévia classificação. A NBR 10004/2004 classifica os resíduos de acordo com suas propriedades físicas, químicas e risco de contaminação nos seguintes grupos:

Resíduo Classe I – Perigoso: Apresenta risco à saúde pública e ao meio ambiente, quando manuseado incorretamente. Incluem os materiais inflamáveis, corrosivos, radioativos, tóxicos e patogênicos;

Resíduo Classe II – Não-inerte: São aqueles que não se enquadram como classe I ou classe III. Podem ser combustíveis, biodegradáveis e/ou solúveis em água;

Resíduos Classe III – Inertes: Aqueles que quando em contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização descrito na norma NBR 10006/2004, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos de potabilidade da água.

Para justificar a reciclagem de um resíduo, deve-se considerar além de suas características e risco ambiental, sua disponibilidade e transporte como fatores economicamente determinantes.

### 3.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

O aumento populacional junto ao avanço tecnológico e a alta taxa de consumo nos países industrializados, resultou no aumento da demanda por bens materiais, principalmente em países emergentes. Esse consumo teve um aumento significativo entre 1900 e 2000, subindo de 6 bilhões para 49 bilhões. Essa demanda por recursos faz com que a vida útil das jazidas seja afetada. É notório que após longos períodos de exploração, determinado recurso se torna escasso, como é o caso da areia, tornando o solo infértil e ocasionando erosões e desmatamento (CALCADO, 2015).

Por afetar tanto o meio ambiente, existem alguns limites técnicos e geográficos para implementar áreas por causa da exploração dos recursos e, sendo assim, a produção é encarecida, devido ao transporte de determinados materiais (TIBURCIO, 2018). As áreas degradadas iniciam-se na fase de extração dos recursos, podendo resultar na extinção/escassez de jazidas e fontes de matéria prima, que alteram a flora e a fauna local, aceleram processos erosivos, modificam cursos d'água e aumentam emissões de gases e partículas em suspensão. Observa-se também, a existência de 33 ruídos provocados pelo maquinário, cruzamento do lençol freático e vibrações no solo (SANTOS, 2015).

Para Figueiredo *et. al.* (2015), a destinação mais comum entre as grandes geradoras é o aterramento, por trazer benefício econômico. Lima (2005) complementa que a prática de aterramento pode acarretar contaminação do solo por lixiviação ou por solubilização de determinadas substâncias tóxicas presentes na composição dos resíduos, decorrentes de materiais de pintura ou substâncias de tratamento de superfícies.

Outro impacto gerado pela produção dos RCC é a saturação dos locais disponíveis para descarte deles. Por isso, a reutilização destes resíduos é uma solução viável, tanto ambientalmente como economicamente, pois introduz no mercado um material com alto potencial de uso para diversas áreas (MORAND, 2016). Resíduo de plástico constitui um problema social crescente, por causa da perda de recursos naturais, da poluição ambiental e do esgotamento do espaço de aterro sanitário. A situação é agravada em algumas das cidades brasileiras onde o lixo é

depositado em terrenos baldios ou nos inadequados lixões (FIGUEIREDO, *et. al.* 2015). O resíduo plástico é cinético e na maioria das vezes não biodegradável. O tempo de degradação é alto, podendo chegar a séculos. Estes resíduos quando queimados emitem toxinas, do tipo dioxina, extremamente agressiva para o organismo humano. Esta toxina é classificada como mortal, por ser arma biológica, superando a periculosidade do plutônio e do urânio; sendo, assim, a melhor alternativa ecológica para os plásticos é a reciclagem (GUAMÁ *et. al.*, 2008).

O peso médio de uma embalagem de garrafa PET de 2 litros é de 50 gramas, na pesquisa a seguir serão incorporados até 50 % de plástico reciclado em peso no tijolo ecológico, cerca de 1,575 quilos, sabendo que um tijolo ecológico pesa em média 3,150 quilos. Em apenas um tijolo serão incorporadas o plástico reciclável de 31,5 garrafas PET. Em um metro quadrado de parede utilizamos aproximadamente 53 tijolos ecológicos, portanto poderão ser retirados da natureza o lixo de 1706 garrafas plásticas. Numa casa popular com: 2 quartos, 1 sala, 1 cozinha, 1 banheiro social de dimensões 6x6 metros e de aproximadamente 90 metros quadrados de paredes, poderão ser aproveitados até 153.600 garrafas PET, um alívio para o meio ambiente. Atualmente um tijolo convencional custa em média R\$ 0,70 cada unidade, enquanto o tijolo ecológico custa R\$1,00. Mas se levarmos em consideração que para a parede ficar pronta com o tijolo convencional, temos que adicionar a argamassa entre os tijolos, o chapisco, o reboco, o emassamento e a pintura, por fim fica mais caro trabalhar com o tijolo convencional. Já que no tijolo ecológico utilizamos apenas ele, uma cola entre os tijolos e uma resina de pintura.

### 3.5 SOLO

Segundo Castro (2008), o solo é um conjunto de minerais, orgânicos, água e ar, não-consolidados, normalmente localizados à superfície da terra, com atividade biológica e capacidade para suportar a vida das plantas. Da decomposição de rochas que inicialmente constituíam a crosta terrestre, originam-se os solos. Na composição do solo-cimento, o solo é o material que entra em maior proporção, mas não pode ser qualquer solo. O solo para a mistura de solo cimento deve estar limpo, sem galhos, folhas, raízes ou outro material orgânico. Para Silva *et al.* (2009) o solo ideal deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, já que exigem baixo consumo de cimento. A areia pura não contém argila, logo é inadequada para o solo-cimento, pois acabaria produzindo blocos de concreto

ao invés de tijolos de solo-cimento. O solo argiloso, que contém mais argila do que areia, também é inadequado, já que requer uma quantidade maior de cimento, dificultando a mistura e compactação. Este tipo de solo pode ser corrigido com a adição de areia, as correções, porém devem respeitar os limites econômicos e técnicos (GRANDE, 2003). Segantini (2000) apresenta as faixas de granulometria do solo, consideradas ideais para a composição do solo-cimento, como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2 – Faixas granulométricas consideradas ideais para o solo-cimento**

| Autores      | Areia (%) | Silte (%)    | Argila (%)   | Silte + Argila (%) | Limite de liquidez |
|--------------|-----------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|
| CINVA (1963) | 45-80     | -            | -            | 20-25              | -                  |
| ICPA (1973)  | 60-80     | 10-20        | 5-10         | -                  | -                  |
| MAC (1975)   | 40-70     | Menor que 30 | 20-30        | -                  | -                  |
| CEPED (1984) | 45-90     | -            | Menor que 20 | 10-55              | 45-50              |
| PCA (1969)   | 65        | -            | -            | 10-35              | -                  |

Fonte: Adaptado de SENGANTINI (2000)

Os solos mais adequados para fabricação do solo cimento são os que possuem as características geotécnicas apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3 – Faixas granulométricas consideradas ideais para o solo-cimento**

| Características                                | Tijolos de solo-cimento NBR 8492/12 | Paredes monolíticas de solo-cimento NBR 13553/13 |
|------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------|
| % passando na peneira ABNT com abertura 4,2 mm | 100%                                | 100%                                             |
| % passando na peneira ABNT com abertura 4,8 mm | -                                   | 100%                                             |
| % passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200)   | 10 a 50%                            | 15 a 50%                                         |
| Limite de liquidez                             | Menor ou igual a 45%                | Menor ou igual a 45%                             |
| Índice de plasticidade                         | Menor ou igual a 18%                | Menor ou igual a 18%                             |

Fonte: Adaptado de SENGANTINI, 2000

Os limites de liquidez e de plasticidade (limites de Atterberg) são valores que representam a trabalhabilidade dos materiais cerâmicos, ou seja, representam a transição entre os estados líquido – plástico – semissólido – sólido (CARVALHO, 2014). O limite de liquidez (LL) caracteriza a quantidade de água que adicionada ao solo é capaz de causar perda de coesão de suas partículas; e o limite de plasticidade (LP) é caracterizado pelo momento em que, se retirado progressivamente a umidade do solo, esta passa do estado plástico para o estado semi-sólido; a razão entre o LL e o LP denomina-se índice de plasticidade (IP). Os limites de Atterberg descrevem o estado físico do solo e estão diretamente ligadas às variações de volume por absorção de água.

### 3.6 CIMENTO

O material ligante do solo-cimento é o cimento Portland. A palavra cimento deriva do termo latino *caementun*, que os romanos utilizavam para denominar a mistura de cal com pozzolana, oriunda das cinzas vulcânica das ilhas gregas da região de Pozzuoli. De acordo com Grande (2003) cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso (para regular o tempo de início de hidratação ou o tempo de pega) e outras substâncias que determinam o tipo de cimento. No solo-cimento, assim como em concretos e argamassas, a natureza do cimento deve ser considerada em vista de melhorar o desempenho desses materiais. É sabido que diferentes composições do cimento conduzem a comportamentos distintos da mistura de solo-cimento, principalmente no que se refere à fissuração por retração.

Diversas pesquisas demonstram a evolução acerca da composição de cimentos e suas implicações na estabilização de solos. Miller & Azad (2000) por exemplo, comprovaram a eficiência e o potencial de alternativas tecnológicas na composição de cimentos ao observarem a influência do cimento Portland de alto forno como estabilizadores de solos e notaram incrementos de resistência à compressão e redução do índice de plasticidade em solos argilosos. De acordo com norma da ABNT NBR 8491/12 (Tijolo Solo Cimento-Requisitos) o cimento utilizado em solo cimento deve estar em conformidade com as normas da ABNT NBR 16697/2018 (Cimento Portland). Incorporado o cimento ao solo, suas partículas envolvem fisicamente os grânulos do solo, formando agregados que aumentam de tamanho à medida que se processam à hidratação e cristalização do cimento, permitindo obter um material em que a absorção e perda de umidade não causam grandes variações de volume, e não se deteriora quando submerso em água, há o aumento da resistência a compressão e com a diminuição da permeabilidade aumenta a durabilidade (LOPES, 2002).

Segundo Milani & Freire (2006), na estabilização do solo com o cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado.

### 3.7 COMPOSIÇÃO DO SOLO-CIMENTO

Os principais componentes do solo-cimento são solo, cimento e água. Podendo ser adicionado ainda cal como potencializador de suas propriedades ou para corrigir a acidez do solo. Estudos recentes também têm verificado a incorporação de materiais alternativos como, vidro, borracha, papel, resíduo da construção e demolição, dentre outro, agregando ainda mais valor ambiental ao material. A quantidade de materiais (solo, cimento e água) a serem misturadas é chamada traço e pode ser expresso em unidade de massa. A relação entre as quantidades deve produzir tijolos com qualidade satisfatória, após os primeiros sete dias de cura.

Segundo a ABCP (1986), a dosagem do solo-cimento deve ser feita por meio de ensaios de laboratório, seguido pela análise e interpretação dos resultados, baseando-se em critérios pré-estabelecidos. O resultado final consiste na fixação de três parâmetros de quantidade de cimento, quantidade de água e massa específica aparente seca máxima.

### 3.8 FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO

O primeiro passo antes da preparação do solo-cimento é a escolha do traço, ou seja, a dosagem dos componentes, a qual deve ser estudada com cuidado, tendo por base as propriedades necessárias para cada aplicação. Em geral, traços 1:7 e 1:10 são satisfatórios. A escolha do traço adequado deve ser o que apresentar menor consumo de cimento e atender aos critérios de resistência à compressão e absorção apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 -Limites especificados para controle de qualidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento.

| CARACTERISTICA                             | Tijolos de solo-cimento NBR 8491/12 | Parede monolítica de solo-cimento NBR 13553/96 |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| Resistencia a compressão simples (28 dias) | Maior ou igual a 2,0 MPa            | -                                              |
| Resistencia a compressão simples (7 dias)  | -                                   | Maior ou igual a 1,0 Mpa                       |
| Absorção de água                           | Menor ou igual a 20%                | Menor ou igual a 20 %                          |

Fonte: adaptado de SEGANTINI (2000)

Os demais passos para a confecção do solo-cimento são: preparação do solo, mistura e homogeneização dos materiais, compactação e cura. Antes de ser misturado ao cimento, o solo deve ser seco ao ar, destorroado e passado em peneira ABNT nº4. No misturador deve ser colocado, inicialmente, os componentes secos que

são misturados até serem completamente homogeneizados, ou seja, apresentar coloração uniforme. A água deve ser adicionada em forma de chuva (com um regador, por exemplo) garantindo boa distribuição sobre a massa até que atinja umidade ideal, essa verificação pode ser feita manualmente no local da obra com relativa precisão através do teste da mão, que consiste em formar com as mãos um “bolo” que mantém sua forma inalterada ao abrir a mão.

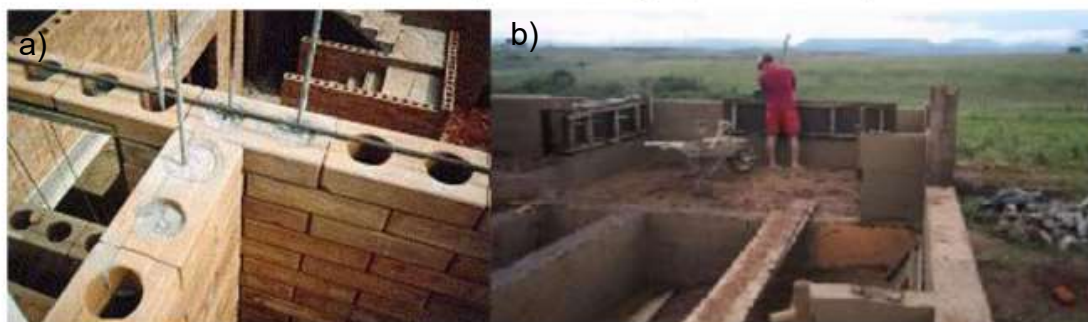
Do misturador, a massa vai para compactação, seja em prensa manual ou hidráulica, para tijolos, ou em formas, que é o caso das paredes monolíticas, quando recebe a forma desejada. Juntamente com as fases de seleção, preparo e estabilização de solo, a prensagem das misturas de solo-cimento merece cuidados especiais, uma vez que essas fases do processo de produção podem significar a fronteira entre o sucesso ou o fracasso de todos os esforços empenhados na fabricação deste material. A fase de compactação do solo-cimento visa o melhoramento de suas características, não só quanto à resistência, mas, também, em relação à permeabilidade, compressibilidade, absorção d'água e, principalmente, estabilidade. Castro (2008) destaca que cada solo possui uma curva própria de peso específico, aparente seco, versus teor de umidade para uma determinada energia de compactação. Para cada solo há uma umidade ótima, na qual existem valores de densidade e resistência máxima. Após a prensagem, a última fase é a cura, que dura em média 28 dias.

### 3.9 USO E APLICAÇÃO DO SOLO-CIMENTO

O uso do solo-cimento representa diversas vantagens, destacando-se do ponto de vista econômico, abundância do solo, principal componente, o baixo custo de produção, redução do uso de argamassas, diminuição do desperdício nos canteiros de obras e isenção de mão-de-obra especializada. Há também os benefícios ecológicos, como: redução dos resíduos de construção e dispensa da queima em fornos, como acontece com os tijolos convencionais, entre outros. Na construção civil, o solo-cimento possui hoje diversas aplicações como em edificações, paisagismo, pavimentação, contenção de encostas, contenção de córregos e pequenas barragens (CAMPOS, 2007). No Brasil, as principais formas de utilização do solo-cimento são: - Parede monolítica, em que o solo-cimento é compactado no próprio local, em camadas sucessivas, no sentido vertical, com auxílio de formas e guias, formando painéis inteiriços, sem juntas horizontais (Fig. 9.b). - Tijolos ecológicos que são

produzidos em prensas, dispensando a queima em fornos. Podem ser maciços ou vazados. Além de grande resistência, outra vantagem desse tijolo é o seu excelente aspecto (Fig. 9.a). - Pavimentos, os quais são compactados no local, com auxílio de fôrmas, mas em uma única camada. Eles constituem placas maciças totalmente apoiadas no chão.

Figura 9 - (a) Construção com tijolos de solo-cimento (b) Construção de paredes monolíticas de solo-cimento



Fonte: Campos (2007).

### 3.10 TIJOLO ECOLÓGICO

Os tijolos prensados de solo-cimento, também chamados tijolos ecológicos, apresentam diversas vantagens em relação aos tijolos convencionais, tais como, maior conforto térmico e acústico, melhores condições de trabalho, pois o canteiro de obra fica mais bem organizado, proporcionando redução de desperdícios e geração de menor quantidade de entulho. Em relação ao fator econômico, verifica-se um menor custo de produção, uma vez que os equipamentos utilizados em sua produção são simples de baixo custo, e não carecem de mão-de-obra especializada para operar, além disso, pode ser feita no próprio canteiro de obras, reduzindo os custos com transporte. Outra vantagem é a redução do uso de argamassas de assentamento e revestimento, já que a qualidade e o aspecto final das peças são notadamente superiores, com maior regularidade dimensional e planicidade de suas faces, podendo até ser utilizado em alvenaria aparente, necessitando apenas de uma cobertura impermeabilizante como acabamento (SOUSA, 2006).

Do ponto de vista sustentável, uma das principais vantagens dos tijolos ecológicos é não necessitar passar pelo processo de cozimento, no qual são consumidas grandes quantidades de madeira ou de outros combustíveis, como é o caso dos tijolos comuns produzidos em olarias. Além disso, ao contrário dos tijolos de argila queimada, que quando quebram, não podem ser reaproveitados; os tijolos de

solo-cimento podem ser moídos e prensados novamente, evitando o desperdício (SOUSA, 2006). O processo de fabricação dos tijolos de solo-cimento é bastante simples, após o preparo da mistura de solo, cimento e água nas proporções adequadas, a massa é compactada em prensa que pode ser manual ou hidráulica. No Brasil, são produzidos diversos tipos de tijolos prensados de variados tamanhos e modelos, que são escolhidos de acordo com as necessidades do projeto, como mostra a Tabela 5.

**Tabela 5 - Tipos de tijolos de solo-cimento**

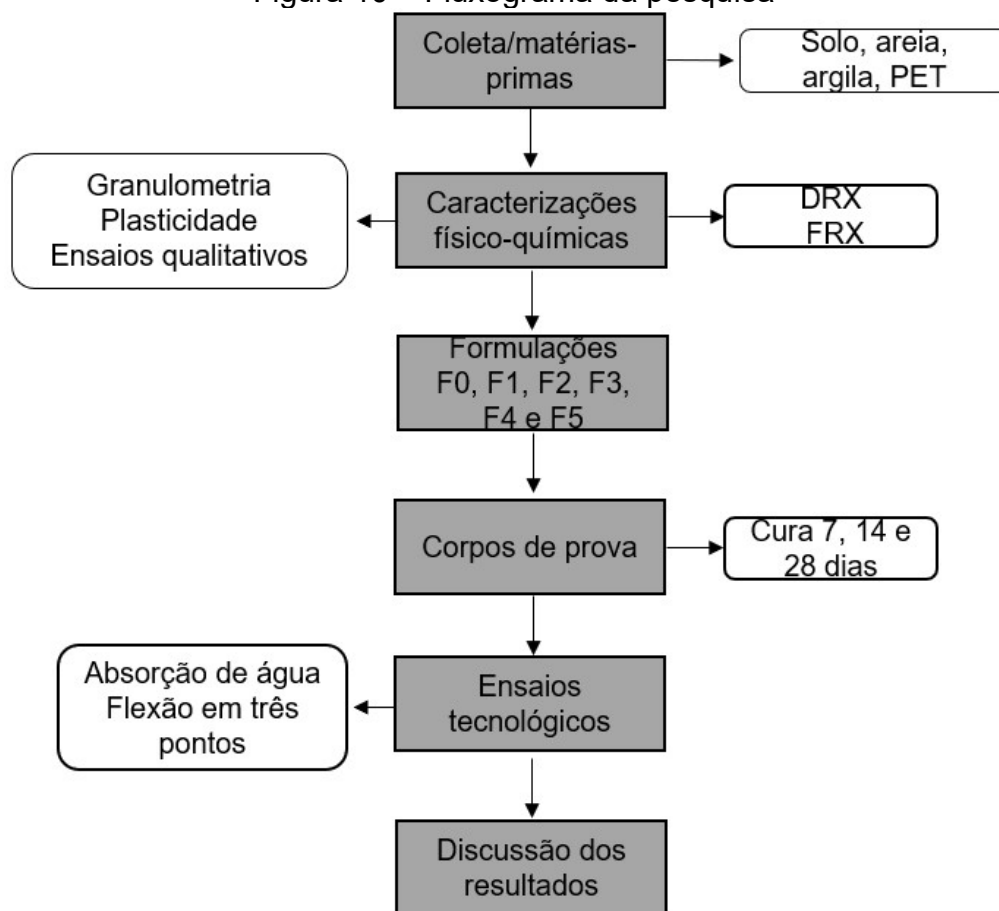
| Tipo                         | Dimensões                                                      | Uso                                                         | Exemplo                                                                               |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Tijolo maciço comum          | (5 x 10 x 20) cm                                               | Assentamento de alvenaria semelhante ao tijolo convencional |    |
| Tijolo maciço de encaixe     | (5 x 10 x 21) cm                                               |                                                             |    |
| ½ tijolo com encaixe         | (5 x 10 x 10,5) cm                                             |                                                             |   |
| Tijolo com 2 furos e encaixe | (5 x 10 x 20) cm<br>(7 x 12,5 x 25) cm<br>(7,5 x 15 x 30) cm   |                                                             |  |
| ½ tijolo com furo e encaixe  | (5 x 10 x 10) cm<br>(7 x 12,5 x 12,5) cm<br>(7,5 x 15 x 15) cm |                                                             |  |
| canaletas                    | (5 x 10 x 20) cm<br>(7 x 12,5 x 25) cm<br>(7,5 x 15 x 30) cm   |                                                             |  |

Fonte: Adaptado de SENGANTINI (2000)

## 4 MATERIAIS E METODOS

A metodologia do trabalho seguiu as seguintes etapas, conforme Figura 10:

Figura 10 – Fluxograma da pesquisa



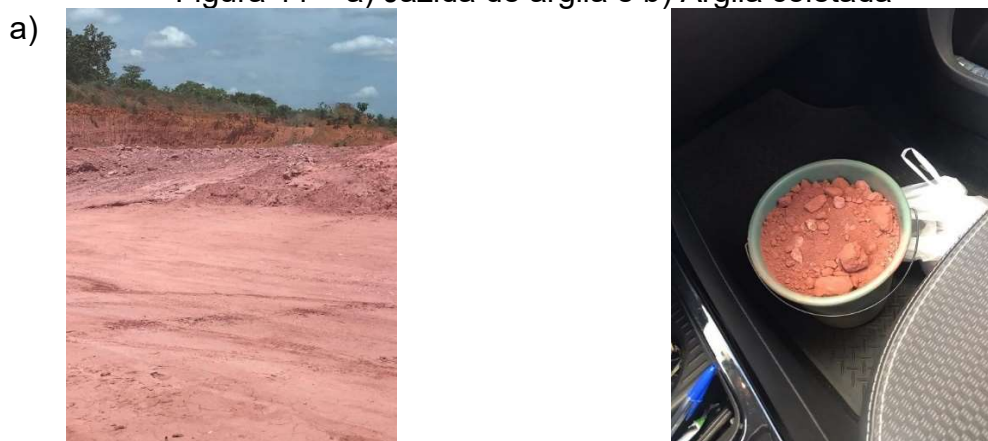
Fonte: Autor.

## 4.1 MATERIAIS

### 4.1.1 Argila

As matérias-primas argilosas (Figura 11) foram coletadas na jazida localizada no bairro vale do gavião em Teresina/PI.

Figura 11 – a) Jazida de argila e b) Argila coletada



Fonte: Autor.

#### 4.1.2 Areia

A areia utilizada na pesquisa é proveniente de casas de materiais de construção. (Figura 12).

Figura 12 - Areia coletada



Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Plástico

O plástico utilizado é proveniente de pontos de coleta de recicláveis (Figura 13). Foram pulverizados através de lixamento.

Figura 13—a) Ponto de recolhimento de descartáveis b) Embalagens de PET; c) PET pulverizado; d) Lixa usada para ralar o PET



Fonte: Autor

#### 4.1.4 Cimento

O cimento é um aglomerante hidráulico que, em contato com a água, produz reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando assim resistência mecânica. A partir deste, produz-se argamassas quando usado com agregados miúdos, ou concreto, quando misturado com agregados miúdos e graúdos. O cimento utilizado é o CP IV-32, e é proveniente das lojas de materiais de construção locais (Figura 14).

Figura 14 -Cimento ensacado



Fonte: Autor.

#### **4.1.5 Água**

A água serve como iniciador da reação química do cimento com os demais agregados. A água utilizada veio diretamente da concessionária.

### **4.2 METODOLOGIA**

#### **4.2.1 Caracterização das Matérias-primas**

Para caracterização da matéria-prima, o material coletado (argila) na jazida da região do Bairro Vale do Gavião e areias de construção (areia fina, areia média e areia grossa) advindas de casas de materiais de construção, ambas localizados em Teresina-PI, a avaliação qualitativa da argila realizou-se nos Laboratório da AESPI-Ensino Superior do Piauí e Laboratório de Cerâmica – PPGEM-IFPI (Programa de Pós Graduação em Engenharia dos Materiais), de acordo com os ensaios sugeridos pelo Manual de construção com solo-cimento, CEPED (1999). Inicialmente, a argila foi submetida aos seguintes ensaios: Ensaio da caixa – retração do solo, Ensaio da determinação da umidade ótima em campo (Hand test), Ensaio da determinação da umidade ótima (teste da bola no solo), Ensaio do vidro, Ensaio do cordão, Ensaio da fita, Ensaio do bolo e Ensaio da resistência seca. A determinação dos limites de Atteberg para conhecer o limite de liquidez e o limite de plasticidade dos solos, também foram realizadas apenas na argila, obedecendo os preceitos das normas NBR 6459/16 (Limite de Liquidez) e NBR 7180/16 (Determinação do Limite de Plasticidade).

Logo após os materiais (argila e areia) passarem pelo ensaio de granulometria, de acordo com a norma ABNT NBR 7181:2016 (Solo-Análise Granulométrica), afim de caracterizá-los quanto a distribuição e tamanhos das partículas sólidas. Para completar a caracterização, as amostras (argila e areia) foram submetidas à análise química, através da técnica de Fluorescência de Raio X (FRX) e à análise mineralógica, através da técnica de Difractometria de Raio X (DRX). Todas as técnicas foram realizadas nos laboratórios do PPGEM e laboratório da AESPI. Todos os ensaios de caracterização foram realizados no Instituto Federal do Piauí e Faculdade Aespi. As normas utilizadas foram estabelecidas de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Normas utilizadas

|                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| Agregados - Especificações | ABNT NBR 7211:2011          |
| Granulometria (Peneiras)   | ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010 |
| Granulometria (Peneiras)   | ABNT NBR NM-ISO 3310-2:2010 |
| Granulometria              | ABNT NBR NM 248:2003        |
| Massa unitária             | ABNT NBR NM 45:2006         |
| Massa específica           | ABNT NBR NM 52:2002         |

Fonte: Adaptado de Silva (2020).

#### 4.2.2 Preparação das matérias-primas

Primeiramente, todos os agregados, com exceção do PET, foram secos em estufa no período de 24h, a uma temperatura de 110°C. Os resíduos de PET ficaram em temperatura ambiente por 96h, e em estufa à 60°C por 4h. Foram utilizados tachos e assadeiras no acondicionamento. Em seguida, foram iniciadas as análises para a caracterização dos resíduos da porção miúda e graúda.

#### 4.2.3 Granulometria

Para o ensaio de granulometria foi utilizado um jogo de nove peneiras com tela metálica com as seguintes aberturas: 9,50 mm (3/8"); 6,30mm (1/4"); 4,75mm (4); 2,36mm (8); 1,18mm (16); 600µm (30); 300µm (50), 150µm (100), 75 µm (200) e fundo. A análise granulométrica das matérias-primas ocorreu por meio do método de peneiramento de acordo com a norma ABNT NBR 7181 (Solo-Análise Granulométrica), que trata sobre esse tipo de análise. A Figura 15 ilustra o agitador

de peneiras da marca Lucadema, utilizado para realizar o peneiramento das matérias-primas.

Figura 15 - Jogo de peneiras e agitador



Fonte: Adaptado de Silva (2020).

Tabela 7 – Classificação do agregado miúdo através do módulo de finura

| Limites    | Módulo de finura   |
|------------|--------------------|
| Muito fina | $1,35 < MF < 2,25$ |
| Fina       | $1,71 < MF < 2,85$ |
| Média      | $2,11 < MF < 3,38$ |
| Grossa     | $2,71 < MF < 4,02$ |

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7211/19.

#### 4.2.4 Formulações e produção dos corpos de prova

De acordo com Pecoriello e Barros (2004), para preparação dos blocos, a dosagem dos elementos da mistura pode confirmar uma variação na proporção em volume de 1:7 a 1:10 (cimento: solo), ao que se deve escolher o melhor traço, dentro dessa faixa. Em geral, o traço referência para a fabricação de tijolos de solo cimento é o 1:10, sendo uma de cimento e dez partes de solo. Temos também o traço 1:7, este rico em cimento e o 1:10 pobre em cimento e o traço 1:7 utilizado por Mendes et al., (2014) em estudos sobre a produção do tijolo ecológico. Usualmente os fabricantes de tijolo ecológico utilizam o traço 1:7 (cimento: solo), medido em peso, portanto esse será o adotado nesse trabalho.

Para esta pesquisa foi produzido um único traço 1:7, com diferentes formulações para a parte maior que é o solo, onde será introduzido o resíduo de plástico pulverizado. A maior parte do traço, ou seja, as 7 partes de solo são compostas de argila + silte, areias fina, media e grossa. O plástico pulverizado irá substituir, nas devidas proporções impostas pelo pesquisador (10%;20%;30%;40%;50%), as areias da maior para a menor granulometria.

Segundo Pinto (1980), as composições ideais para o solo são, 15% silte; 20% argila; 30% areia fina e 35% areia média+areia grossa.

Composições:

- Traço F0- cimento + solo (15% silte; 20% argila; 30% areia fina; 35% areia média+areia grossa);
- Traço F1- cimento+solo (15% silte; 20% argila; 30% areia fina; 25% areia média+grossa; 10% plástico pulverizado);
- Traço F2- cimento+solo (15% silte; 20% argila; 30% areia fina; 15% areia média+grossa; 20% plástico pulverizado);
- Traço F3- cimento+solo (15% silte; 20% argila; 30% areia fina; 5% areia média+grossa; 30% plástico pulverizado);
- Traço F4- cimento+solo (15% silte; 20% argila; 25% areia fina; 40% plástico pulverizado)
- Traço F5- cimento+solo (15% silte; 20% argila; 15% areia fina; 50% plástico pulverizado).

Tabela 8–Proporções em peso dos corpos de prova

| Formulações / Matérias primas | PET(g) | Silte e argila (g) | Areia fina (g) | Areia média e grossa (g) | Cimento (g) | Água (g) |
|-------------------------------|--------|--------------------|----------------|--------------------------|-------------|----------|
| F0                            | 0      | 61,25              | 52,5           | 61,25                    | 25          | 15,6     |
| F1                            | 17,5   | 61,25              | 52,5           | 43,75                    | 25          | 15,6     |
| F2                            | 35     | 61,25              | 52,5           | 26,25                    | 25          | 15,6     |
| F3                            | 52,5   | 61,25              | 52,5           | 8,75                     | 25          | 15,6     |
| F4                            | 70     | 61,25              | 43,75          | 0                        | 25          | 15,6     |
| F5                            | 87,5   | 61,25              | 26,25          | 0                        | 25          | 15,6     |

Fonte: Autor.

Foram confeccionados um total de 60 corpos de prova para ensaios, 10 para cada composição acima. A preparação se inicia com a mistura do solo beneficiado e o cimento, até formarem uma argamassa homogênea.

Na etapa de produção dos corpos-de-prova, as matérias-primas de cada formulação foram colocadas em uma matriz de conformação metálica que apresenta dimensões aproximadamente iguais a 80 mm x 10 mm x 10 mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente). A Figura 16 ilustra a matriz de conformação metálica utilizada na preparação dos corpos de prova.

Figura 16 - Matriz de conformação metálica



Fonte: Acervo do autor.

Em seguida, foi realizada a moldagem dos corpos de prova de todas as formulações por meio de prensagem uniaxial com intensidade de 62,0 Mpa, por meio de uma prensa hidráulica, modelo RP0002, da marca Ribeiro, do laboratório de cerâmica do IFPI. A Figura 17 apresenta a prensa hidráulica utilizada na conformação dos corpos de prova.

Figura 17 - Prensa hidráulica



Fonte: Acervo do autor.

Para cada formulação foram confeccionados 10 corpos de prova. Com isso, houve a confecção de um total de 60 corpos de prova. A Figura 18 apresenta parte dos corpos de prova que foram confeccionados por meio de prensagem uniaxial.

Figura 18 - Corpos de prova



Fonte: Acervo do autor.

Quanto ao processo de cura do Tijolo Ecológico, este é um procedimento que visa melhorar o seu processo de endurecimento deixando-o mais resistente e firme. O objetivo é retardar a evaporação da água usada no preparo da mistura, garantindo a completa hidratação do cimento e as reações químicas necessárias entre todos os

componentes. Ela deve ser feita pelo menos ao longo de 7 dias após o tijolo ecológico ter sido compactado. Esse procedimento é previsto inclusive pelas normas técnicas que orientam sobre a fabricação do tijolo ecológico, especificamente a ABNT NBR 10833/12 (Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento). A cura hidratada consiste em encharcar as misturas com água, os tijolos deverão ser mantidos em local coberto e livre da ação do vento. Após passarem do período de cura hidratada, os corpos de prova ficarão por aproximadamente 20 dias em cura a seco. Após o processo de cura concluído, o processo de fabricação é encerrado. Para este trabalho, será observado o tempo de cura, verificando sua influência no resultado da resistência do tijolo ecológico.

#### **4.2.5 Análise química**

A análise dos componentes químicos presentes nas matérias-primas e argila foi realizada por meio de uma análise quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) em equipamento modelo Epson 3 XL da Panalytical. As matérias-primas foram moídas e peneiradas até granulometria inferior à peneira de nº 200 (0,075 mm) e colocadas no porta-amostra sobre um filme de prolene. A Figura 19 mostra o equipamento utilizado na análise química.

Figura 19 - Equipamento utilizado na análise química



Fonte: Adaptado de Silva (2020).

#### **4.2.6 Análise Mineralógica**

A análise dos minerais presentes nas matérias-primas, assim como na massa cerâmica sinterizada, foi realizada por difração de raios X (DRX). Além disso, o equipamento utilizado nessa análise foi o XRD-6000 da Shimadzu com tubo de Co ( $\lambda$

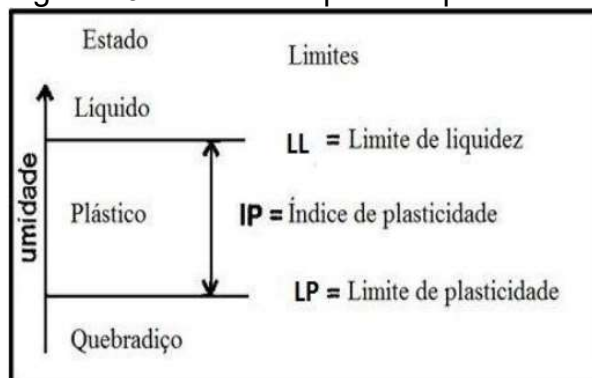
= 1, 78901 Å). A tensão utilizada foi de 40 kV e a corrente foi de 45 mA, com varredura de 6° a 90° para 2θ, com velocidade de 2°/min e passo de 0,02°/passo. Foram utilizadas amostras em pó, com as matérias-primas moídas e peneiradas até granulometria inferior à peneira de nº 200 (0,075 mm) para identificação das fases cristalinas presentes.

A difração de Raios-X (DRX) é o método mais abrangente para determinar a mineralogia das matérias-primas cerâmicas, devido não só à possibilidade da identificação das espécies minerais presentes, mas também por permitir estudar as características cristalográficas desses minerais (GONDIM, 2009). A avaliação das fases de cada matéria-prima e produto final analisados foi dada por comparação entre os picos gerados no difratograma com cartas padrões do programa de computador JCPDF, cadastradas no ICDD (Internacional Center for Diffraction Data).

#### 4.2.7 Análise de plasticidade

Para a análise da plasticidade das formulações das massas cerâmicas, foram determinados o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). O limite de liquidez corresponde à máxima quantidade de água que a massa argilosa ou a massa cerâmica podem conter para ainda serem moldáveis (Figura 20).

Figura 20–Limite de liquidez e plasticidade



Fonte: Petrucci (1988)

Por sua vez, o limite de plasticidade indica a menor quantidade de água que a massa argilosa ou a massa cerâmica devem conter para serem conformadas em uma extrusora ou uma prensa. Com esses dois limites, foi encontrado o índice de plasticidade (IP) conforme a Equação (1) (ABNT NBR 6459, 2016; ABNT NBR 7180, 2016). ( $IP = LL - LP$ )

Onde: IP: índice de plasticidade; LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade.

Análise de Plasticidade - IP A análise foi realizada para a massa básica de argilas e para cada composição buscando-se prever a quantidade mínima de água que se deveria adicionar à massa, a fim de obter-se a plasticidade (em média 20% de umidade) suficiente para que sejam conformados corpos de prova por extrusão. A determinação do limite de liquidez foi obtida segundo o método de Casagrande (Figura 21), calculado conforme a ABNT NBR 6459/16 (Limite de Liquidez).

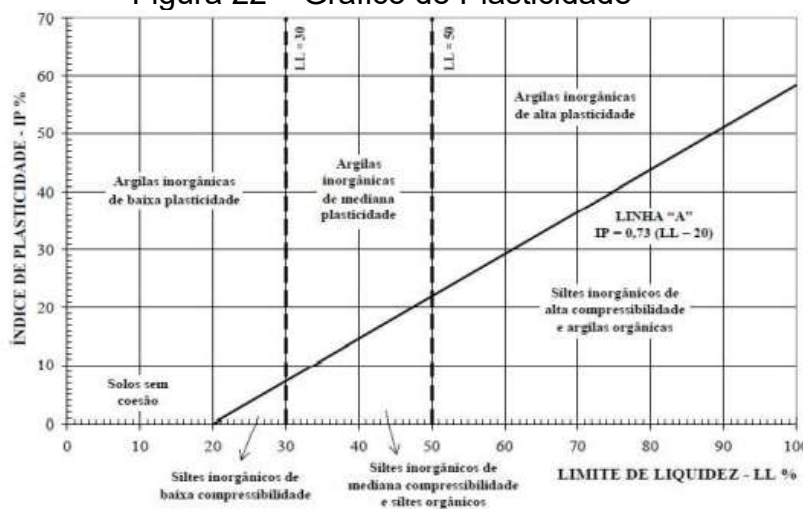
Figura 21–Aparelho de Casagrande



Fonte: Adaptado de Silva (2020).

Para determinação da classificação do solo segundo as suas propriedades, foi utilizado o Gráfico de Plasticidade do pesquisador Arthur Casagrande (Figura 22), que utiliza dados do índice de plasticidade e limite de liquidez do solo para classifica.

Figura 22 – Gráfico de Plasticidade



Fonte: Petrucci (1988).

#### 4.2.9 Absorção de água

Após o resfriamento, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de 110 °C, durante 24h. Em seguida, foram pesados em uma balança e,

logo após, foram colocados dentro de um recipiente com água destilada, durante 24h. A seguir, os corpos de prova foram removidos e foi retirado o excesso de água com o auxílio de um pano umedecido, para que eles novamente pudessem ser pesados, de forma a calcular a quantidade de água absorvida por cada corpo de prova. Os ensaios de absorção de água (AA) foram realizados de acordo com a norma ASTM C373 (2018) e foi utilizada a Equação abaixo para o cálculo da absorção de água dos corpos de prova.

$$AA (\%) = (P_u - P_s) \times 100 / P_s$$

Sendo:

AA: absorção de água

P<sub>u</sub>: peso do corpo de prova úmido (g)

P<sub>s</sub>: peso do corpo de prova seco (g)

Tabela 9 -Parâmetro de referência  
para absorção de água

| MÉDIA | INDIVIDUAL |
|-------|------------|
| 20%   | 22%        |

Fonte: ABNT NBR 8491 (2012).

Tabela 10 -Resistencia Mínima à Compressão

| MÉDIA   | INDIVIDUAL |
|---------|------------|
| 2,0 MPA | 1,7 MPA    |

Fonte: ABNT NBR 8491 (2012).

#### 4.2.10 Microscopia óptica

A microestrutura das amostras foi analisada por microscopia óptica (MO), com o auxílio do microscópio óptico modelo CX31, da marca Olympus e por meio do software “Motic Imagens Plus 2.0 ML”, no laboratório do IFPI.

No qual foram observados os poros e os possíveis defeitos presentes nas amostras, após o processo de cura. A Figura 23 mostra o equipamento utilizado na análise de microscopia óptica dos corpos de prova.

Figura 23 - Equipamento utilizado na microscopia optica

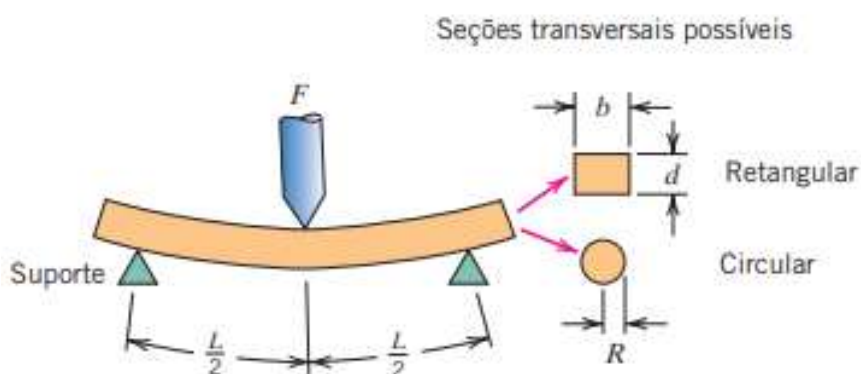


Fonte: Acervo do Autor.

#### 4.2.11 Ensaio de resistência à flexão em três pontos

Os resultados de ensaio à compressão foram obtidos a partir da correlação com o ensaio à flexão em três pontos, Figura 24. Conforme Callister (2016), os dados de flexão são aproximadamente um décimo (1/10) da resistência à compressão.

Figura 24 - Esquema da flexão a três pontos



Fonte: Callister (2016)

em que:

$b$  = largura da seção transversal

$d$  = altura da seção transversal

$R$  = raio da seção transversal

F = carga aplicada

Para realização do ensaio de flexão, foram utilizados 10 corpos de prova para cada formulação, conforme recomendação da norma NBR 8491:2012 (Norma do Tijolo Solo Cimento-Requisitos), rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias. Para o procedimento do ensaio, deve-se posicionar o corpo de prova horizontalmente sobre os dois apoios verticais metálicos, em seguida, uma haste metálica vai descer no meio do corpo de prova, então se aplica uma carga e os resultados são anotados com unidade em (MPa), assim, a carga é elevada até atingir a ruptura do corpo de prova. Calcula-se os dados de tensão de ruptura em três pontos pela seguinte equação:

$$TRF (MPa) = \frac{N \cdot P}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

Onde:

TRF - Tensão de Ruptura à Flexão

P - Carga (em N) atingida no momento da ruptura

N - Número de pesos

b - Largura (em mm) do corpo de prova

h - Altura (em mm) do corpo de prova

Os corpos de prova foram medidos nas três dimensões e ensaiados por um deflectômetro do IFPI de Teresina-PI, Figura 25. Os resultados trabalhados para tensão de Ruptura e Flexão foram obtidos pela média aritmética dos valores encontrados em dez corpos de prova distintos.

Figura 25 - Ensaio de flexão (3 pontos)



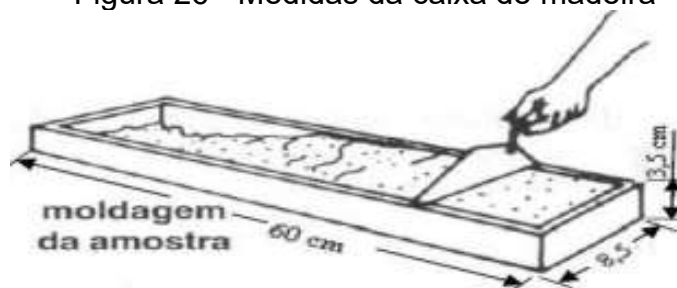
Fonte: Autor.

#### 4.2.12 Ensaaios qualitativos

Na utilização do solo como material de construção civil, podem surgir alguns problemas, uma vez que o solo apresenta propriedades muito complexas e heterogêneas. Os métodos de caracterização de solos permitem avaliar qualidade do material. As matérias-primas utilizadas para este trabalho foram coletadas na jazida localizada no Vale do Gavião e as areias adquiridas no comércio local, inicialmente a argila que passou por ensaios preliminares propostos por Taveira (1987) e pelo CEPED (1999) são apenas de caráter qualitativo.

O primeiro ensaio qualitativo é o Ensaio da caixa (Figura 26): é realizado ao se tomar uma porção de solo destorroado e peneirado, umedecê-lo com água até a mistura aderir a superfície metálica, por exemplo, a lâmina da colher de pedreiro. Colocar a mistura em uma caixa de madeira lubrificada com óleo diesel ou similar com dimensões internas de 60cm x 8,5cm x 3,5cm conforme figura abaixo.

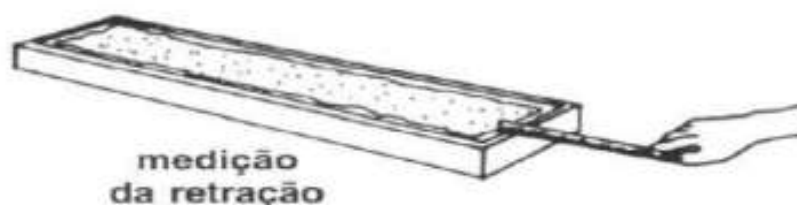
Figura 26 - Medidas da caixa de madeira



Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999)

É necessário deixar a caixa moldada com a mistura à sombra, em ambiente fechado, protegido de sol e chuva, e depois de sete dias, medir a retração no sentido do comprimento (Figura 27). Se o total da retração não ultrapassar 2 cm e não aparecerem trincas na amostra, o solo estará qualificado para construção com solo-cimento. Caso contrário deverá ser adicionada areia até a obtenção de um solo com as características desejadas, conforme figura abaixo (TAVEIRA, 1987; CEPED, 1999).

Figura 27 - Caixa de madeira com régua pra medição

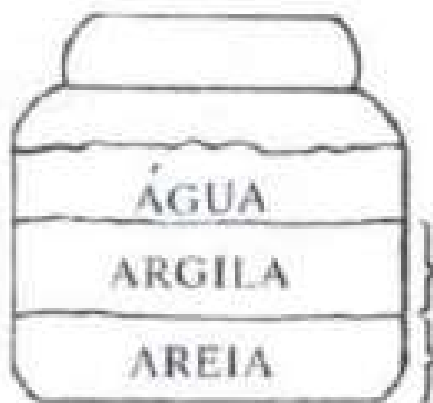


Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

Outra metodologia é o Ensaio do vidro: trata-se de tomar um frasco transparente de boca larga. Colocar a amostra de solo até a metade do vidro. Adicionar duas colheres, de chá de sal e completar o vidro com água. Tampar o vidro, agitando-o vigorosamente. Deixá-lo em repouso por aproximadamente meia hora. Após meia hora, ocorrerá a decantação do solo, e observando-se as frações nitidamente diferenciadas no vidro, pode-se avaliar o solo. O solo é considerado bom quando a quantidade de argila é igual à quantidade de areia. Caso a quantidade de areia seja maior que a de argila, o solo é melhor ainda, conforme figura abaixo. Se

ocorre de o solo possuir mais argila que areia, deve-se proceder uma correção no solo TAVEIRA (1987).

Figura 28 - Frasco com solo



Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

O terceiro ensaio é Hand Test (Figura 29): toma-se uma porção de solo umedecido nas mãos, apertando-o entre os dedos de forma que ao abrir a mão, a massa tenha adquirido a sua forma (fique a marca dos dedos). Se a marca dos dedos ficar bem definida, a umidade é adequada. Caso a marca não ocorra ou se houver esfarelamento, significa que o solo pode estar muito seco e a umidade é insuficiente. Se a marca aparecer muito compacta e molhada- mais do que úmida- então a umidade é excessiva TAVEIRA (1987).

Figura 29- Hand Test



Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

Ensaio para determinação da umidade ótima (teste da bola de solo), Figura 30: toma-se uma porção de solo umedecido nas mãos prensando-o até fazer uma bola com ele. Em seguida, deixe a bola de massa cair de uma altura de aproximadamente

1,0 m em um chão firme. Ao chocar-se com qualquer superfície dura, o bolo deverá esfarelar indicando assim um teor de umidade adequado. Caso contrário, se a bola não esfarelar, é sinal de que a umidade é excessiva. Neste caso, há necessidade de secar a amostra ou então acrescentar solo e cimento em suas devidas proporções, repetindo assim o ensaio. A umidade é considerada insuficiente caso não se consiga formar o bolo na mão TAVEIRA (1987).

Figura 30– Determinação da umidade ótima do solo



Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

Ensaio do cordão, Figura 31: toma-se uma porção de solo seco e junta água rolando cordões até que eles comecem a se quebrar com um diâmetro de 3 mm. Com os cordões quebrados, formar uma bola mantendo essa umidade. Esmagar a bola entre o polegar e o indicador verificando a força necessária para esmagá-la TAVEIRA (1987).

Figura 31- Ensaio do cordão



Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

Parâmetros comparativos para o teste do cordão, conforme Taveira (1987):

- Cordão duro: só se pode quebrar a bola com muito esforço;
- Cordão mole: a bola se fissa ou esmigalha com pouco esforço;
- Cordão frágil: não é possível reconstituir a bola sem que ela se fissure ou esmigalhe.

Ensaio da fita, Figura 32: toma-se uma porção de solo, com a mesma umidade do ensaio do cordão, e fazer um cilindro do tamanho de um cigarro. Amassar este cilindro até formar uma fita, com 3 a 6 mm de espessura e com o maior comprimento possível.

- Fita longa: 25 a 30 cm sem dificuldade
- Fita curta: 5 a 10 cm com dificuldade.

Figura 32- Ensaio da fita

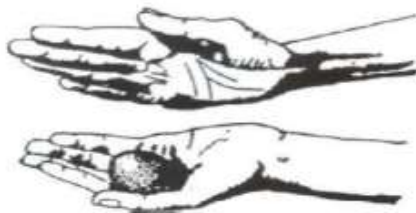


Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

Ensaio do bolo, Figura 33: toma-se uma porção de solo bastante úmida e a coloca na palma da mão. Golpear esta bola com a outra mão de modo que uma película de água aflore na superfície da amostra, dando-lhe um aspecto liso e brilhante. Pressionar então o bolo com os dedos.

- Reação rápida: Bastam 5 a 10 golpes para que a água aflore à superfície da amostra, sendo que a pressão dos dedos faz a água desaparecer imediatamente e uma pressão mais forte esmigalha o bolo.
- Reação lenta: São necessários 20 a 30 golpes para que a água aflore; a pressão dos dedos faz com que o bolo se deforme como uma bola de borracha.

Figura 33- ensaio do bolo



Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

Ensaio de resistência seca, Figura 34: faz-se duas ou três pastilhas de solo bem úmido, com cerca de 1 cm de espessura e 2 a 3 cm de diâmetro. Secar estas pastilhas ao sol por dois ou três dias. Após a secagem, tentar esmagar a pastilha entre o indicador e o polegar:

-Grande resistência seca: é muito difícil esmagar a pastilha e quando se consegue esta, quebra-se como um 'biscoito'.

Média resistência seca: não é difícil partir a pastilha e com algum esforço consegue-se reduzir os pedaços a pó.

Fraca resistência seca: é muito fácil partir a pastilha e ao partir-se reduz-se a pó

Figura 34- Ensaio da resistência seca

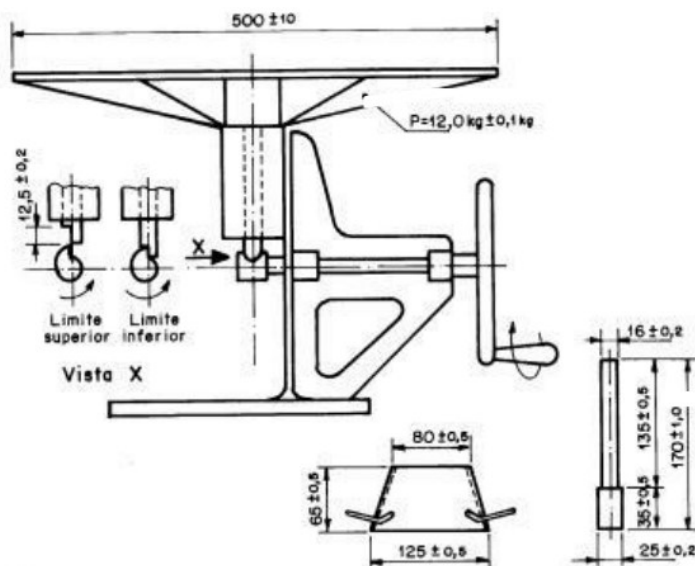


Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

Ensaio de Consistência: este ensaio seguiu a norma ABNT NBR 13276:2016 para determinação do índice de consistência. O objetivo deste ensaio consiste em obter o teor de água necessário para cada argamassa, com vistas na trabalhabilidade (Figura 35). Sendo assim, foram utilizados 400g de cimento em cada traço. Utilizou-se um recipiente e espátula na mistura manual, acrescentando uma quantidade conhecida de água até uma consistência visualmente adequada. Vale lembrar que é

preciso umedecer a mesa de consistência, o molde tronco-cônico e o soquete metálico.

Figura 35 - Equipamentos para Ensaio de Consistência



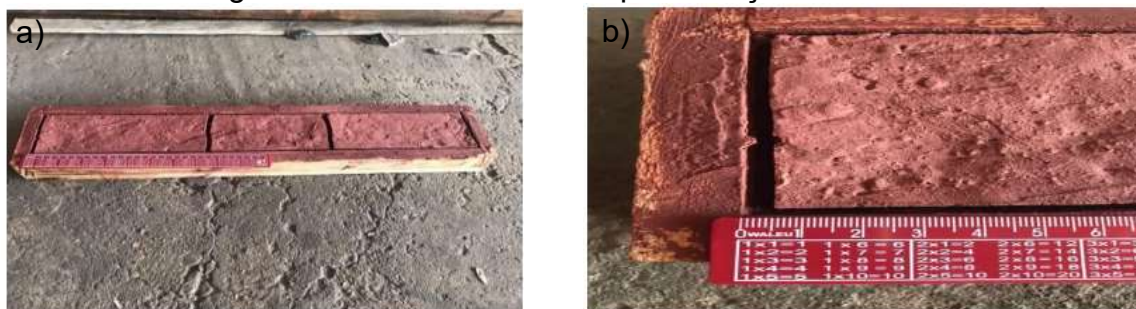
Fonte: TAVEIRA (1987) e CEPED (1999).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ENSAIOS QUALITATIVOS

A princípio, a matéria-prima argilosa foi submetida a ensaios preliminares assim como proposto por Taveira (1987) e pelo CEPED (1999), os quais são apenas de caráter qualitativo. As Figuras 36 (a,b) ilustram o Ensaio da Caixa, e percebe-se que a retração não ultrapassou os 2 centímetros de limite.

Figura 36- Ensaio da caixa- apresentação de trincas



Fonte: Acervo do autor

Já na Figura 37, abaixo, está ilustrado o ensaio do vidro. Percebe-se que a região de argila é maior que a região da areia, portanto, é necessário ser corrigido com adição de areia.

Figura 37 – Ensaio do vidro – presença maior de argila



Fonte: Autor.

O ensaio da determinação da umidade ótima em campo ou *Hand Test* está ilustrado na Figura 38. Verificou-se que a marca dos dedos ficou bem definida, o que significa que a umidade está adequada.

Figura 38- Hand test – apertando a argila entre os dedos



Fonte: Acervo do autor

O ensaio da bola ao solo permite a determinação da umidade ótima, Figura 39. Uma bola solta a partir de 1 m de altura, o material ao chocar-se com o chão, esfarelou-se, indicando que o teor de umidade do solo em estudo é adequado.

Figura 39- Teste da bola ao solo



Fonte: Autor.

Outros ensaios qualitativos e seus resultados estão descritos nas Tabelas 11 e 12, abaixo. Ademais, as Figuras 40 a 44 ilustram os procedimentos decorrentes desses experimentos.

Tabela 11- Interpretação dos ensaios expedidos do solo

| Ensaio do cordão                  | Ensaio da fita                             | Ensaio do bolo                                | Resistencia seca              | Tipo do solo                                                                  | Possibilidade de utilização                                                                                                                    |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cordão frágil ou resistência nula | Fita curta ou não se consegue fazer a fita | Reação rápida a lenta, mas jamais muito lenta | Fraca a nula, geralmente nula | Areias finas, areias finas siltosas, areias finas argilosas, siltes argilosos | Solo prensado para tijolos, adobes com cimento, terra compactado com ou sem cimento; quando muito arenosos juntar solos finos, silte e argilas |
| Cordão frágil a semi duro         | Fita curta                                 | Reação lenta a muito lenta                    | Fraca a média                 | Siltes                                                                        | Utilização mais difícil que os solos anteriores, mas possível com o uso de cimento                                                             |
| Cordão semiduro                   | Fitas curtas a longas                      | Reação muito lenta ou não tem reação          | Média a grande                | Argilas com pedregulhos, argilas com areia e argilas siltosas                 | Possível de usar apenas para terra compactada ou tijolo prensado com cimento                                                                   |
| Cordão duro                       | Fitas longas                               | Não tem reação                                | Grande                        | Argilosos                                                                     | Não deve ser usado                                                                                                                             |

Fonte: Autor.

Figura 40 - Ensaio do cordão- bola esmagada



Fonte: Autor.

Figura 41- Ensaio da fita- cilindro amassado acima de 3 mm



Fonte: Autor.

Figura 42- Ensaio do bolo- bolo antes de ser golpeado



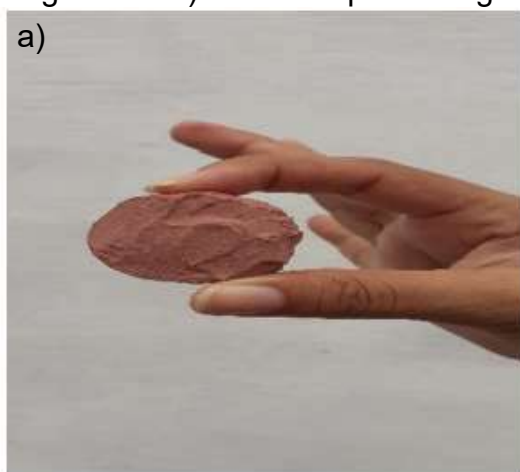
Fonte: Autor.

Figura 43- Ensaio do bolo- bolo com a pressão dos dedos



Fonte: Autor.

Figura 44- a) Pastilha após secagem e b) Resistência seca- pastilha esfarelada



Fonte: Autor.

Tabela 12- Interpretação dos resultados dos ensaios qualitativos

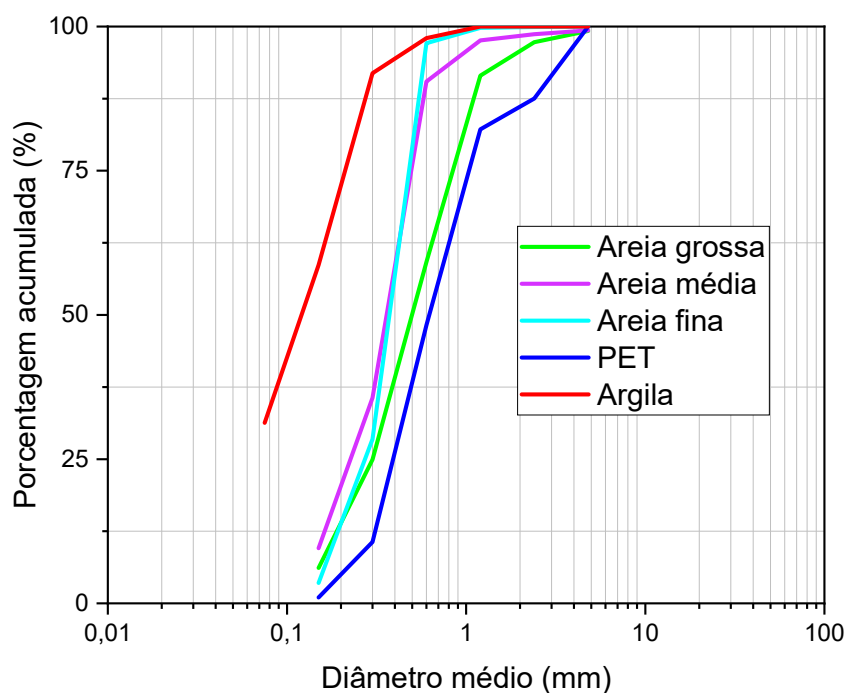
| Ensaio do cordão | Ensaio da fita        | Ensaio do bolo                       | Resistencia seca | Tipo do solo                         | Possibilidade de utilização                                                  |
|------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Cordão semi duro | Fitas curtas e longas | Reação muito lenta ou não tem reação | Média a grande   | Argilas com areia e argilas siltosas | Possível de usar apenas para terra compactada ou tijolo prensado com cimento |

Fonte: Adaptado de CEPED (1999).

## 5.2 GRANULOMETRIA

A partir da análise da Figura 45 percebe-se que a distribuição granulométrica da argila contém mais partículas finas que as areias e do PET. Além disso, mais de 30% aproximadamente das partículas de argila são menores que 0,075 mm, portanto, passantes na peneira nº 200, assim, entre os limites de 10% e 50%. Percebe-se uma descontinuidade no gráfico das areias e do PET, o que demonstra que as amostras não têm graduação uniforme.

Figura 45 – Distribuição granulométrica das matérias-primas



Fonte: Autor

Conforme a Abrams (1992) a curva granulométrica do agregado miúdo (areias) deve estar dentro dos parâmetros abaixo:

- Areia grossa: Módulo de finura superior a 3,9;
- Areia média: Módulo de finura maior que 2,4 e menor que 3,9;
- Areia fina: Módulo de finura menor do que 2,4.

A partir dos cálculos, o módulo de finura para areia grossa, média e fina foram, respectivamente, 4, 2, 8 e 1,71. Deste modo, os parâmetros de granulometria para essas matérias-primas estão dentro dos limites pré-estabelecidos.

### 5.3 PLASTICIDADE

A plasticidade é uma característica da mistura argila com água. Trata-se da medida da deformação do material pela aplicação de uma força (tensão), sem se romper, e sem uma adequada plasticidade, não seria possível a conformação de produtos cerâmicos (NETTO, 2019). A tabela 13 abaixo ilustra os dados oriundos do ensaio de plasticidade regidos pelas NBR's 6459/16 (Limite de Liquidez) e 7180/16 (Determinação do Limite de Plasticidade).

Tabela 13– Dados de limite de liquidez e plasticidade da matéria-prima argilosa

| LIMITE DE LIQUIDEZ     |     |      |      |      |      |      |             |            |
|------------------------|-----|------|------|------|------|------|-------------|------------|
| Cápsula                | N.º | 07   | 08   | 10   | 13   | 14   | Operador:   |            |
| Golpes                 | g   | 12   | 21   | 30   | 39   | 50   |             |            |
| Peso Bruto Úmido       | g   | 8,28 | 8,66 | 8,71 | 8,83 | 8,96 | Data:       | 09/01/2020 |
| Peso Bruto Seco        | g   | 7,71 | 7,99 | 7,92 | 7,92 | 8,08 |             |            |
| Peso da Cápsula        |     | 6,00 | 6,12 | 5,75 | 5,54 | 5,84 | Calculista: |            |
| Peso da Água           | g   | 0,57 | 0,67 | 0,79 | 0,91 | 0,88 |             |            |
| Peso do Solo Seco      | g   | 1,71 | 1,87 | 2,17 | 2,38 | 2,24 |             |            |
| Umidade                | %   | 33,3 | 35,8 | 36,4 | 38,2 | 39,3 |             |            |
| LIMITE DE PLASTICIDADE |     |      |      |      |      |      |             |            |
| Cápsula                | N.º | 01   | 06   | 08   | 09   | 10   | LL          | 36,6%      |
| Peso Bruto Úmido       | g   | 8,33 | 8,16 | 8,74 | 8,72 | 8,89 | LP          | 21,2%      |
| Peso Bruto Seco        | g   | 8,17 | 8,02 | 8,55 | 8,55 | 8,72 |             |            |
| Peso da Cápsula        | g   | 7,43 | 7,33 | 7,67 | 7,74 | 7,93 | OBS: IP :   | 15,4%      |
| Peso da Água           | g   | 0,16 | 0,14 | 0,19 | 0,17 | 0,17 |             |            |
| Peso do Solo Seco      | g   | 0,74 | 0,69 | 0,88 | 0,81 | 0,79 |             |            |
| Umidade                | %   | 21,6 | 20,3 | 21,6 | 21,0 | 21,5 |             |            |

Fonte: Autor.

Caputo (2015) classifica os solos em fracamente plásticos ( $IP \leq 7$ ), medianamente plásticos ( $7 < IP < 15$ ) e altamente plásticos ( $IP \geq 15$ ). Segundo essa classificação, o material analisado seria definido como altamente plástico. Desse modo, conforme a aplicação, é possível a inserção de materiais não-plásticos como areias ou partículas de PET sem comprometer tanto a plasticidade do sistema.

### 5.3 ANÁLISE QUÍMICA

A Fluorescência de raios-X permite a identificação dos elementos químicos que compõem um determinado material. A partir da análise da Tabela 14, verifica-se a qualidade das areias, uma vez que possuem grande quantidade de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ . Esse resultado corrobora com a presença de quartzo ( $SiO_2$ ) da análise de Difração de raios-X (DRX). A argila possui quantidade significativas de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ . A presença do quartzo na argila tem papel importante na resistência, uma vez que as reações pozolânicas do solo resultante da hidratação são favorecidas na presença dos silicatos do material argiloso na reação com o cimento (CARVALHO, 2019). O plástico PET possui na maioria da sua composição  $Al_2O_3$ , e  $SiO_2$ , mas também  $CaO$  em quantidades significativas.

Tabela 14 – Análise química das matérias-primas

| %            | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | MnO  | TiO <sub>2</sub> | ZrO <sub>2</sub> | Ag <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|
| Areia Fina   | 75,76            | 8,97                           | -                              | 2,28  | 0,47 | -    | 2,11             | 1,02             | 0,17              | 0,97                          | 2,68             |
| Areia média  | 50,81            | 7,45                           | 4,97                           | 29,81 | 0,76 | 0,17 | 1,60             | 0,61             | 0,21              | 0,28                          | 1,64             |
| Areia grossa | 82,77            | 9,89                           | -                              | 0,61  | -    | -    | 2,50             | 0,53             | 0,11              | -                             | 0,82             |
| Argila       | 83,77            | 11,44                          | 3,2                            | -     | -    | -    | 0,71             | 0,14             | 0,14              | 0,21                          | 0,25             |
| PET          | 28,20            | 45,57                          | 1,76                           | 10,36 | -    | 0,27 | 3,61             | 2,15             | 1,06              | -                             | 3,46             |

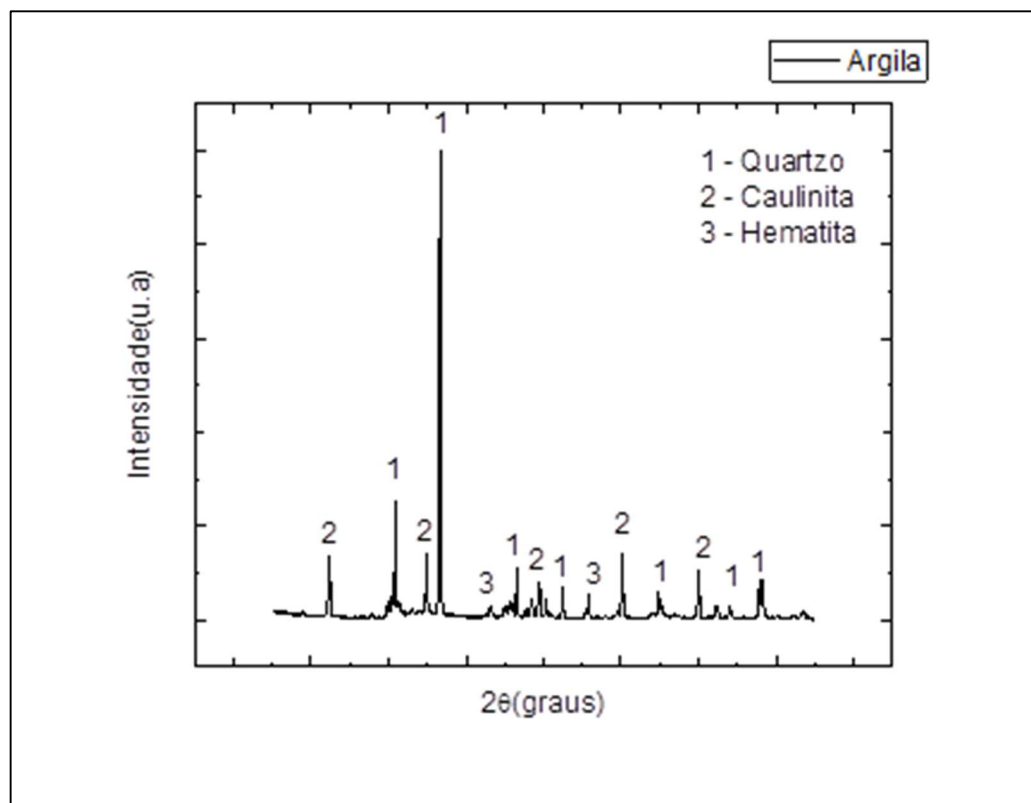
Fonte: Autor.

#### 5.4 ANÁLISE MINERALÓGICA

Na análise mineralógica da argila, Figura 46, foram identificados argilominerais como a caulinita [Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>], além de minerais como o Quartzo (SiO<sub>2</sub>) e a Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A caulinita é um componente importante porque confere resistência inicial, ajuda na etapa de conformação melhorando a trabalhabilidade das massas (SILVA *et al.*, 2018). Já o quartzo é uma matéria-prima não plástica, e confere estabilidade dimensional às peças cerâmicas (NETTO, 2019). No cimento encontramos a Portlandita, calcita, etringita, monocarboaluminato de cálcio hidratado e silicato de cálcio hidratado.

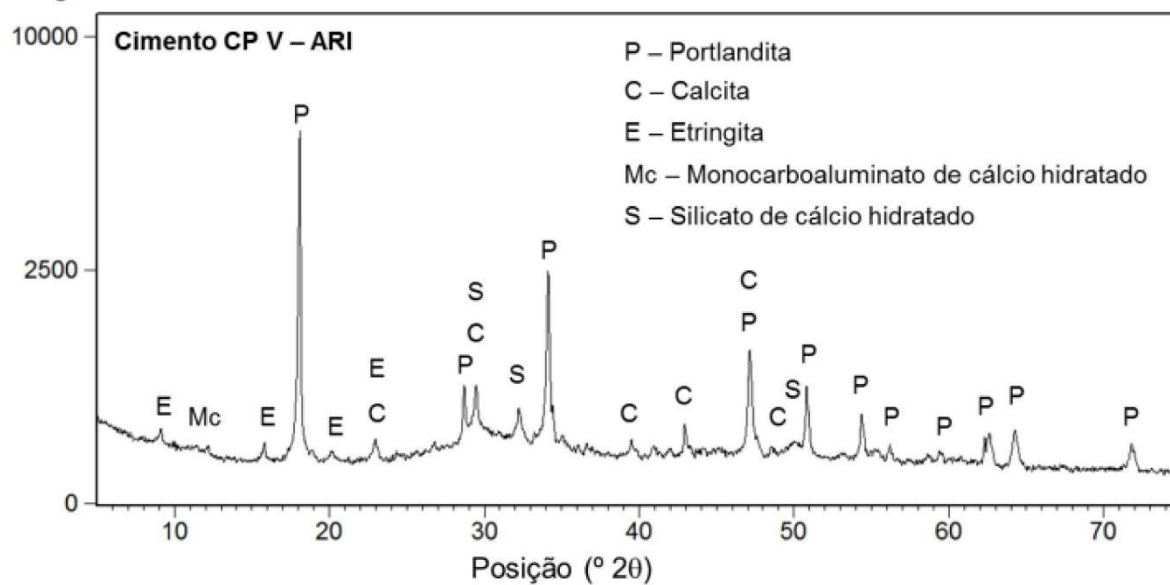
Figura 46– Gráfico DRX da a)Argila e b)Cimento

a)



b)

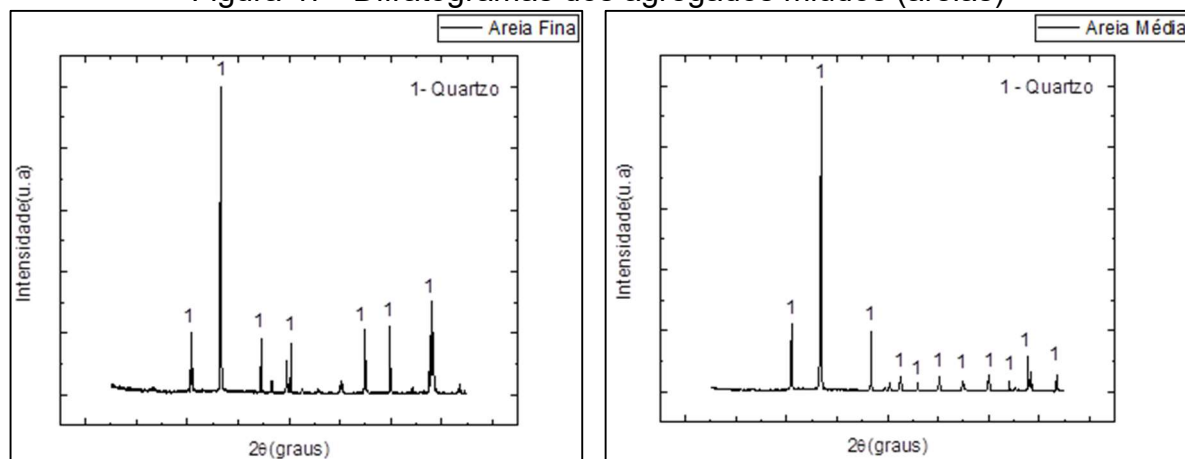
Contagem



Fonte: Autor.

Já no difratograma das areias, Figura 47, os picos apresentam apenas o aparecimento de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), corroborando a análise química, uma vez que essa matéria-prima é composta basicamente por óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ).

Figura 47– Difratogramas dos agregados miúdos (areias)

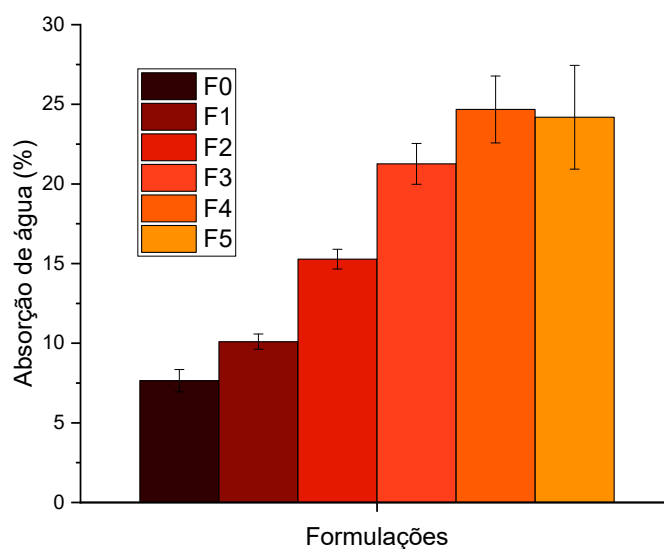


Fonte: Autor.

## 5.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Segundo a NBR 8491/2012 (Norma Tijolo Solo Cimento Requisito), o índice de absorção de água médio deve ser menor ou igual a 20% e individualmente deve ser menor que 22%. As formulações com até 20% de PET (F2) obtiveram resultados médios de 15,27% e individualmente 15,46%, portanto, inferiores ao parâmetro normativo, Figura 48.

Figura 48 – Absorção de água



Fonte: Autor.

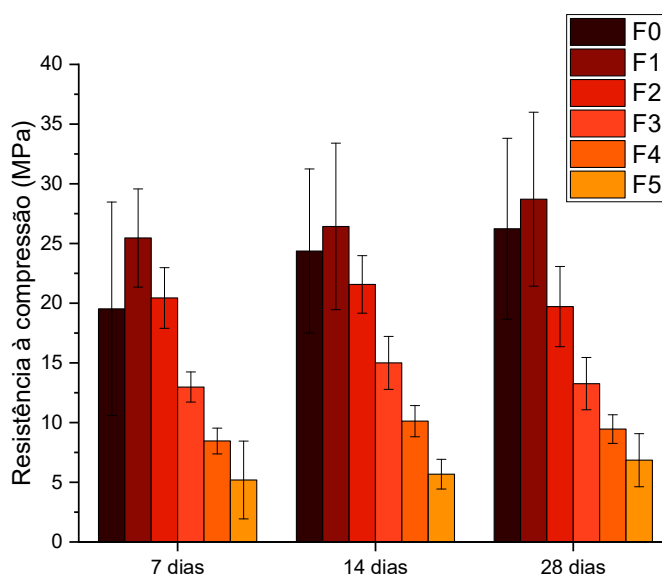
Percebe-se que o incremento de PET nas formulações F3 (30%), F4 (40%) e F5 (50%) possuíram maior absorção de água. Tal fato pode ser explicado a partir dos resultados dos ensaios de granulometria. As partículas de PET são mal graduadas, ou seja, não possuem tamanho de partículas bem variados. Desta forma, uma distribuição granulométrica da massa que seja ampla, isto é, que seja composta de grãos finos, médios e grossos é necessário para alcançar um melhor fator de empacotamento dos grãos (NETTO, 2019).

## 5.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Todos os resultados, em todas as idades, obtiveram o mínimo estabelecido na NBR 8491/12, maior ou igual a 2,0 MPa em média, Figura 49. Foi observado que a maior resistência à compressão, encontrada, foi aos 28 dias na formulação F1, ou seja, com 10 % de PET, obteve-se 14 vezes mais do que o mínimo exigido.

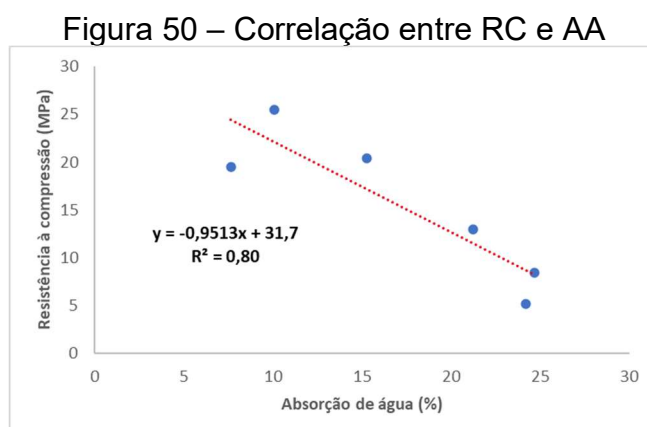
À medida que se incorpora partículas de PET, a resistência à compressão foi prejudicada. Isto ocorre devido ao aumento da absorção de água decorrente da má graduação das partículas de PET, e consequente, menor grau de empacotamento dos grãos.

Figura 49 – Resistência à compressão



Fonte: Autor.

Ao cruzar os dados de resistência à compressão (RC) com a absorção de água (AA), percebe-se uma forte correlação ilustrada pelo coeficiente de determinação  $R^2=0,8$ , este parâmetro é a medida do ajuste de um modelo estatístico (SCHOBER; SCHWARTE, 2018). Nesse sentido, a partir da Figura 50, afirma-se que ambas as propriedades estão intimamente ligadas, e que 80% dos valores de resistência à compressão podem ser explicados pelos valores de absorção de água.

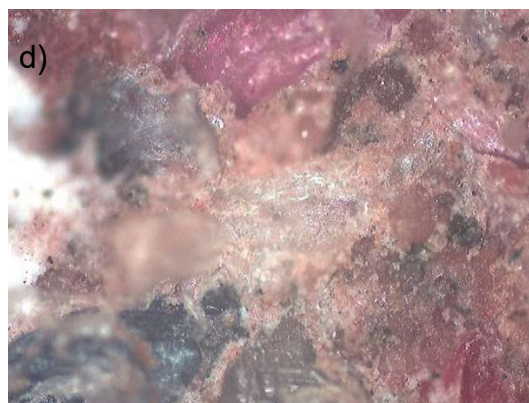
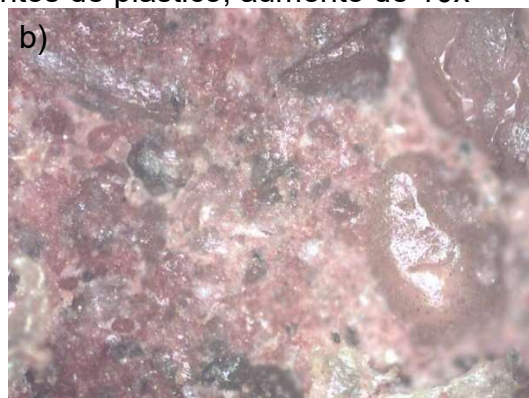
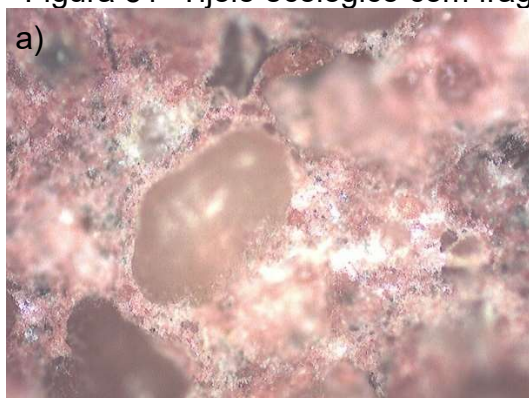


Fonte: Autor.

## 5.7 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As imagens 51 (a, b, c, d) ilustram a superfície de um corpo de prova da formulação F2 (20%), obtidas por meio do microscópio ótico. Trata-se de uma formulação com os melhores resultados nos ensaios tecnológicos. É possível observar o resíduo plástico bastante coeso e impregnado na massa do tijolo ecológico. Verifica-se na Figura 51c uma estrutura bastante compactada e homogênea. A adesão da interface entre o resíduo do PET e a massa cerâmica é fundamental para o maior grau de compactação do espécime.

Figura 51- Tijolo ecológico com fragmentos de plástico, aumento de 10x



Fonte: Autor

## 6 CONCLUSÃO

Esse trabalho propôs a inserção de partículas de PET em formulações de tijolo ecológico. Matérias-primas como argila, areia, PET e cimento, para as quais foram 6 utilizadas em formulações que variaram de 0% a 50% de inserção de PET. Os resultados demonstraram que é possível incorporar até 20% desse material, respeitando os parâmetros normativos de absorção de água ( $15,27\% < 20\%$ ) e resistência à compressão ( $19,72 \text{ MPa} > 2 \text{ MPa}$ ).

Além disso, a análise química das amostras de areia revelou que estas possuem altos teores de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), a argila é composta tanto por óxido de silício, como de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). A análise mineralógica demonstrou que as fases cristalinas preponderantes nas areias é o quartzo, como esperado, já para a argila, constatou-se que se trata de uma caulinita.

Nesse sentido, constatou-se a viabilidade da incorporação de partículas de PET, sendo a formulação F2, com até 20% de adição, a melhor composição. Portanto, a fabricação de tijolos ecológicos não só é uma alternativa tecnicamente possível, como uma alternativa viável para destinação correta e reutilização de resíduos de PET.

## 7 SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS

Diante da pesquisa exposta acima, outros parâmetros podem ainda ser estudados em pesquisas posteriores, tais como:

- 1- Aperfeiçoar o processo de beneficiamento do PET de modo a se obter amostras mais bem graduadas;
- 2- Coincidir a força utilizada nas prensas comerciais com a prensa do laboratório;
- 3- Utilizar o PET pulverizado no próprio tijolo ecológico;
- 4- Realizar a análise do conforto térmico-acústico do tijolo solo cimento com adição de PET;
- 5- Realizar um estudo da viabilidade econômica do uso de tijolo solo cimento.

## 8 REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. ABCP, São Paulo, SP, ET-35, 51p, 1986.

ABIPET, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Censo da reciclagem do PET no Brasil. 10 ed. 2016. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3> > Acesso em: 05 mai. 2021.

ABRELPE, EMPRESAS ASSOCIADAS; ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: Grappa, 2017.

ANICER. Artigo “Segredos da Secagem e Queima”. Revista da ANICER, Ano 11, edição 53, agosto, 2008.

ALROMA. Máquinas para tijolos ecológicos. Disponível em: <<http://www.alroma.com.br/tijolo-vantagens> > Acesso em 09 de abril de 2021.

ABC – Associação Brasileira de Cerâmica. Informações Técnicas: Definição e Classificação. 2016a. Disponível em: Acesso em: 20 de nov. de 2020.

AMBROZEWICZ, P.H.L. Materiais de construção. São Paulo: PINI, 2012.  
ANICER. Artigo “Segredos da Secagem e Queima”. Revista da ANICER, Ano 11, edição 53, agosto, 2008.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1:2010. Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro: 2010. 20 p.

ABNT - NBR NM 45:2006. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: 2006.

ABNT- Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248/2003, Rio de Janeiro, 2003, 6 p.

ABNT- Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52/2002, Rio de Janeiro, 2002, 6 p.

ABNT- NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT- NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT- NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT- NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT- NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT- NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT- NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT- NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT- NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT- NBR 10545-4: Placas cerâmicas Parte 4: Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT- NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT- NBR 13553: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT- NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ARAGON, Aline Tomaz; GHIRALDELLO, Luciane. Produtos à base de polietileno (PET) na construção civil: um estudo diagnóstico no município de Poços de Caldas. Gestão, Conhecimento e edição, 2014.

ASTMC-373. Test Methods for Determination of Water Absorption and Associated Properties by Vacuum Method for Pressed Ceramic Tiles and Glass Tiles and Boil Method for Extruded Ceramic Tiles and Non-Tile Fired Ceramic Whiteware Products. ASTM International, 2018. <https://doi.org/10.1520/C0373-18>. Acessado em 12 de julho de 2022.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção, 5ª edição revisada v.2 - Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2015.

BELLEN, H.M.V. Indicadores de sustentabilidade: Uma análise comparativa. 2002. 220f. Tese(Doutorado em Engenharia de Produção)- Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis. 2002.

BEZERRA, M. J. Putnoki, J. C. Novo Bezerra Matemática, Editora Scipione, São Paulo, 1994.

BRASIL (2010). Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Congresso Nacional, Brasília, DF, 2010.

CALCADO, G. C. da S. Influência da adição de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland. 2015. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CALLISTER, William. Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 9ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMPOS, I. M. Solo-cimento, solução para economia e sustentabilidade. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=23>, 2007 > acesso em abril de 2022.

CAPRA, Fritjof. Speaking nature's language: Principles for sustainability. Ecological literacy: Educating our children for a sustainable world, p. 18-29, 2005.

CARVALHO, M. A Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de babaçu de cana de açúcar em tijolo solo cimento. UENF: Rio de Janeiro, 2014.

CARVALHO, R. S. de S. Estudo da viabilidade da utilização da fibra de coco babaçu em formulações de tijolo solo-cimento. (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, 2019.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações - Fundamentos - Vol. 1. 7ªed. LTC, 2015.

CASTRO, S. F. Incorporação de resíduos de caulim em solo-cimento para construções civis. (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2008.

CEPED - CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. Manual de construção com solo-cimento. Camaçari-BA, 1999. 147p. CEPED/ABCP.

CONAMA, Resolução Nº. 303 de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente, 2002.

CONTADOR, J. C. Modelo para aumentar a competitividade da indústria brasileira de manufatura. Revista de Administração da Usp, São Paulo, v. 29, n. 4, p.3-12, out. 1994.

CORTESE, T. T. P.; KNISS, C. T. MACCARI, E. A., (orgs.). Cidades Inteligentes e Sustentáveis. 1 ed. São Paulo: Manole, 2017.

COUTINHO, Fernanda; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. Polímeros: ciência e tecnologia, v. 13, n. 1, 2003.

COUTO, V. M. P. Desenvolvimento e Caracterização de Materiais Cerâmicos Derivados do Processamento dos Resíduos de Estação de Tratamento de Água. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciências), UFRJ: Rio de Janeiro, 2011.

CONTADOR, J. C. Modelo para aumentar a competitividade da indústria brasileira de manufatura. Revista de Administração da Usp, São Paulo, v. 29, n. 4, p.3-12, out.

1994.

DETHIER, J. Arquiteturas de terra, ou o futuro de uma tradição milenar. Europa Terceiro Mundo – Estados Unidos. 10ed. Lisboa: Litografia Tejo, 1993.

DUALIBI, J. F. Mercado de cerâmica vermelha estrutural. ABC Informativo, 1999. n.26.

EMILIANI, G.P. & CORBARA, F. Tecnologia cerâmica. Faenza: Editoriale Faenza Editrice, v.1; 1999.

FIGUEIREDO, A. L.; ALVES, A. P. M.; FERNANDES JUNIOR, V. J. e ARAUJO, A. S. Reciclagem Terciária do Poli(etileno tereftalato) Visando a Obtenção de Produtos Químicos e Combustível: Uma Revisão. Revista Virtual de Química. v. 7, p. 1145 – 1162, 2015.

FRIGIONE, Mariaenrica. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. Waste management, v. 30, n. 6, p. 1101-1106, 2010.

GALLI, Bárbara et al. Uso de garrafas de poli-tereftalato de etileno–PET como insumo alternativo na construção de edificações residenciais. Revista de Arquitetura IMED, v. 1, n. 2, p. 174-181, 2013.

GOMES, M. I.; BRITO, J.; LOPES, M. Construção de uma edificação em terra crua reforçada com pórticos em betão armado. Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil, 2008. Disponível em: Acesso em: 06 jan. 2014.

GONÇALVES, C. P.; CARDOSO, A. F. A utilização da cerâmica nas técnicas construtivas em busca da inovação e sustentabilidade. In: 201 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 60. 2016. Águas de Lindóia, São Paulo, 2016. p. 577 – 587.

GONDIM. Regulação emocional no trabalho: um estudo de caso após desastre aéreo, Brasília, 2009.

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.

GUAMÁ, F. F. M. C. de; COSTA, R. V. de A. C.; ROCHA, H. L.; ISENSEE, F. V. e FUTURO, L. L. Lixo plástico – de sua produção até a madeira plástica. In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2008, Rio de Janeiro.

HENRIQUES, P. M. Avaliação do tijolo modular de solo-cimento como material na construção civil. Escola Politécnica: Rio de Janeiro, 2009.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. 3 ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014. KLEIN, C. & HURLBUT, C.S., 1993. Manual of Mineralogy. After J.D. Dana, 21st Edition. John Wiley & Sons. 681 p.

LIMA, F. S. N. S. Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas. Dissertação de M. Sc. 2005, Centro de Tecnologia/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

LOPES, W. G. R. Solo cimento reforçado com bambu : características físico mecânicas. 2002. 158 f. Dissertação (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas (SP), 2002.

NETTO, R. de C. B. Ensaios Cerâmicos. São Paulo: SENAI/SP, 2019.

MARQUES, José Carlos. Sistema de Gestão de Qualidade, 2013.

MEIRA, R. C. As ferramentas para a melhoria da qualidade. Porto Alegre: SEBRAE, 2003.

MENDES, R.; ZANOTTI, R A. R.; MENEZES, J.C. S. S. Produção de Solo-Cimento (Tijolo Ecológico) Utilizando Resíduo do Polimento de Grés de Porcelanato como Fonte de Sílica. Revista de Engenharia Civil IMED, 1(1): 50-55- ISSN 2358-6508, 2014.

MIKHAILOVA, Irina. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. Economia e Desenvolvimento, n. 16, 2004.

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

MILLER, Gerald A.; AZAD, Shahriar. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. Construction and building materials, v. 14, n. 2, p. 89-97, 2000.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resíduos de plástico, papel, papelão, papel metalizado, vidro e metal. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/9411>> Acesso em 15 Fev. 2022.

MIRANDA, C. A. S. de. Simulação do processo de sopro de garrafas de poli (tereftalato de etileno) a partir de pré-formas disponíveis através do método de elementos finitos. 2011. 138 p. Tese (Doutorado) – REDEMAT, Ouro Preto, 2011.

MODRO, N.L.R.; MODRO, N.R. e OLIVEIRA, A.P.N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. Revista Matéria. v. 14, n. 1, p. 725 – 736, 2009.

MONTENEGRO, R.S.; PAN, S.S.; RIBEIRO, M.C. Resina PET para recipientes. Páginas 1-15, 2000. Disponível em

[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta\\_Expressa/Setor/Complexo\\_Quimico/199609\\_8.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Complexo_Quimico/199609_8.html). Acesso em 09 jun 2022.

MORAND, F. G. Estudo das principais aplicações de resíduos de obra como materiais de construção. 2016. 91 p. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MOTTA, J. C. S. S., et al. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. *e-xacta* 7.1 (2014): 13-26.

MORAIS, Marcelo Brito de; CHAVES, Armando Macêdo; JONES, Kimberly Marie. Análise de viabilidade de aplicação do tijolo ecológico na construção civil contemporânea. *Revista Pensar Engenharia*, v. 2, n. 2, jul. 2014.

OLIVEIRA, F. E. M. Acompanhamento da produção industrial em cerâmica da microregião do Vale do Assu: estudo de caso. Angicos, RN: UFESA, 2011.

PETRUCCI, E.G.R. Materiais de construção. 8.ed. Rio de Janeiro:Globo, 1988. 435 p.

PECORIELLO E BARROS. Comportamento estrutural de tijolos de solo-cimento utilizando diferentes fontes de água e métodos de cura, 2004.

PINTO, A. G. Plástico. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.In: IPT/CEMPRE.1995.

PINTO, T. P. Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo cimento. São Paulo: ABCP, 1980. 22p.

PISANI, M. A. J.Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento. AE ensaios. 2010.

Plano Nacional de Resíduos Sólidos: diagnóstico dos resíduos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores. Comunicados do Ipea, n. 145, IPEA, abr/2012. Disponível em <http://www.ipea.gov.br>. Acesso em 23 jul 2021.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S. e PAOLI, M. A. de. Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 2, p. 121 – 132, 2009.

ROTHER, M., SHOOK, J. Aprendendo a Enxergar, São Paulo, Lean Institute Brasil, 2000.

SANTANA, J.E.S.; CARVALHO, A.C.X.; FARIAS, R.A.P.G. Tijolo ecológico versus tijolo comum: Benefícios ambientais e economia da energia durante o processo de queima. In: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2013.

SANTOS, I. da R. Medidas para redução dos impactos ambientais gerados pela construção civil. 2015. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

- SAMPAIO, G. S.; NUNES, I. E. S. Estudo interdisciplinar da viabilidade de aplicação do tijolo de solo-cimento na construção civil: economia aliada à sustentabilidade. Faculdade Integradas Teresa D'Ávila – FATEA, 2017.
- SCHOBER, P.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, v. 126, n. 5, p. 1763–1768, 2018.
- SEGANTINI, A. A. da S. Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, Departamento de Construções Rurais, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-São Paulo, 176p, 2000.
- SILVA, J.P.S. Influência da adição de chamote nas propriedades tecnológicas e microestruturais do adoquim. Dissertação de mestrado. Instituto Federação do Piauí - IFPI, Teresina, 2020.
- SILVA, A. L. et al. Avaliação de novos depósitos de argilas provenientes da região sul do Amapá visando aplicação na indústria cerâmica. *Cerâmica*, v. 64, n. 369, p. 69–78, 2018.
- SILVA, M. R. Incorporação de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs) em tijolos de solo-cimento como forma de minimização de impactos ambientais. 2009. 98 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental)-Faculdade de Aracruz, Aracruz, ES, 2009.
- SILVA, T. de C. S.; MIRANDA, L. F. de. Estudo comparativo das propriedades do POLI (Tereftalato de Etileno) virgem e reciclado. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo. 2017. Disponível em: <[http://www.mackenzie.br/fileadmin/Graduacao/EE/Revista\\_on\\_line/Estudo\\_Comparativo\\_Poli.pdf](http://www.mackenzie.br/fileadmin/Graduacao/EE/Revista_on_line/Estudo_Comparativo_Poli.pdf)> Acesso em: 14 mai. 2022.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISSON, A.; JOHNSTON, A. (2009). *Administração da Produção*. 3a Ed. São Paulo: Atlas.
- SOARES, R. A. L. Caracterização de uma argila contaminada com calcário: estudo da potencialidade de aplicação em massa de cerâmica de revestimento. Instituto Federação do Piauí - IFPI, Teresina, 2010.
- SOUSA, M. I. B. Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo cimento. Ilha Solteira: UNESP, 2006.
- SOUZA, M. I., Segantini, A. A., & Pereira, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. 2008. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 205-212.
- TAVEIRA, Eduardo Salmar Nogueira. O solo-cimento no campo e na cidade. Construir, morar, habitar. Coleção Brasil Agrícola, Ícone editora. 2ª edição. São Paulo, SP, 1987.

TIBURCIO, Juliana. Utilização de areia reciclada de resíduo da construção civil e resíduos de garrafa PET para fabricação de blocos de concreto e argamassa. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TONDOLO, R. da R. P. et al. (2016). Gestão dos custos operacionais na empresa de pequeno-porte: um estudo de caso no sul do Brasil. Revista Espacios, v. 34, 2013.

ZANIN, M. e ZANIN, S. D. Livro: Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia. 2 ed. 138 p. EdUFSCar, 2015.