



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

**EYSHILA PALOMA COSTA DE BRITO**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR  
LODO TÊXTIL GERADO PELA LAVANDERIA INDUSTRIAL DE JEANS DO  
ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE CONFECÇÕES DO AGRESTE  
PERNAMBUCANO**

**RECIFE**

**2024**

**EYSHILA PALOMA COSTA DE BRITO**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR  
LODO TÊXTIL GERADO PELA LAVANDERIA INDUSTRIAL DE *JEANS* DO  
ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE CONFECÇÕES DO AGRESTE  
PERNAMBUCANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE),  
como requisito para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda

**RECIFE**

**2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

B862e Brito, Eyshila Paloma Costa de.  
Estudo do comportamento mecânico de argamassas de revestimento com substituição parcial do agregado miúdo por lodo têxtil gerado pela lavanderia industrial de jeans do Arranjo Produtivo Local de confecções do agreste pernambucano / Eyshila Paloma Costa de Brito. – Recife, 2024.  
63 f.; il.

Orientador(a): Romildo Morant de Holanda.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).

1. Argamassa. 2. Resíduos industriais. 3. Lavanderias e tinturarias - Pernambuco. 4. Indústria têxtil - Pernambuco I. Holanda, Romildo Morant de, orient. II. Título

CDD 628

**EYSHILA PALOMA COSTA DE BRITO**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR  
LODO TÊXTIL GERADO PELA LAVANDERIA INDUSTRIAL DE *JEANS* DO  
ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE CONFECÇÕES DO AGRESTE  
PERNAMBUCANO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovado em 30 de setembro de 2024.

---

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda  
Presidente da Banca e Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Manoel Vieira de França  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## RESUMO

O arranjo produtivo local (APL), localizado no Agreste pernambucano, é o segundo maior polo têxtil do Brasil, produzindo, confeccionando e comercializando peças. As atividades realizadas na região englobam desde o processo de fabricação até etapas de beneficiamento de *jeans*, sendo o mesmo realizado em lavanderias industriais. Assim como em todo procedimento industrial, as lavanderias são grandes geradoras de resíduos, sendo o lodo têxtil um dos principais, gerado em grande volume. Um potencial poluidor capaz de comprometer a qualidade do solo, recursos hídricos e ar, afetando diretamente a saúde e bem-estar da população. Por outro lado, a construção civil segue como um dos maiores consumidores de recursos naturais, principalmente com o uso de areia para a confecção de concretos e argamassas. Esta pesquisa realizou o estudo de incorporação do resíduo de lodo de lavanderia de *jeans*, em teores de 10%, 20% e 25%, no traço de argamassas para revestimento, com o objetivo de possibilitar uma destinação mais sustentável ao lodo, além da opção de servir como matéria-prima alternativa. A pesquisa visou estudar o comportamento mecânico das argamassas modificadas, com intuito de avaliar as propriedades físicas e mecânicas das mesmas após a incorporação parcial do resíduo em relação ao agregado miúdo (areia). Foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa unitária e massa específica do resíduo, bem como a caracterização do lodo têxtil. Como o resíduo substituiu parcialmente o agregado miúdo, esses mesmos ensaios foram realizados com a areia. Embora a areia e o lodo tenham apresentado curvas granulométricas diferentes, ambas se encontram dentro da zona utilizável para agregado miúdo. O lodo teve massa unitária 45% inferior em relação à da areia. A massa específica do lodo também apresentou resultado inferior ao da areia, totalizando em 1,62 g/cm<sup>3</sup> e 2,63 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Ao se avaliar a resistência mecânica dos corpos de prova, notou-se baixa variação entre os diferentes traços, porém, a argamassa com 10% de incorporação de lodo apresentou o maior valor de resistência à compressão e à tração na flexão, quando comparada às demais. Nos resultados de absorção de água e do coeficiente de capilaridade o resíduo foi capaz de preencher de maneira eficaz os pequenos poros da mistura. Por fim, foi possível classificar as argamassas estudadas, que atingiram valores mínimos para características de resistência à compressão, à tração na flexão e do coeficiente de capilaridade, recebendo designação P3, R1, C1 nos quatro tipos.

**Palavras-chave:** Argamassas, resíduos, comportamento mecânico, lodo têxtil.

## **ABSTRACT**

The local productive arrangement (APL), located in the Agreste region of Pernambuco, is the second largest textile hub in Brazil, producing, making and selling garments. The activities carried out in the region range from the manufacturing process to the processing of jeans, which is carried out in industrial laundries. As with any industrial procedure, laundries are major generators of waste, with textile sludge being one of the main ones, generated in large volumes. It is a potential pollutant capable of compromising soil, water and air quality, directly affecting the health and well-being of the population. On the other hand, the construction industry continues to be one of the biggest consumers of natural resources, mainly through the use of sand to make concrete and mortar. This research studied the incorporation of jeans laundry sludge, at levels of 10%, 20% and 25%, into mortar mixes for coatings, with the aim of providing a more sustainable destination for the sludge, as well as serving as an alternative raw material. The research aimed to study the mechanical behavior of modified mortars in order to evaluate their physical and mechanical properties after partially incorporating the waste in relation to the fine aggregate (sand). Tests were carried out on the particle size composition, unit mass and specific mass of the waste, as well as the characterization of the textile sludge. As the waste partially replaced the fine aggregate, the same tests were carried out on the sand. Although the sand and sludge had different particle size curves, both were within the usable zone for fine aggregate. Sludge had a unit mass 45% lower than that of sand. The specific mass of silt was also lower than that of sand, totaling 1.62 g/cm<sup>3</sup> and 2.63 g/cm<sup>3</sup>, respectively. When evaluating the mechanical strength of the specimens, there was little variation between the different mixes, but the mortar with 10% sludge incorporation had the highest compressive strength and flexural tensile strength when compared to the others. In the water absorption and capillarity coefficient results, the residue was able to effectively fill the small pores in the mixture. Finally, it was possible to classify the mortars studied, which achieved minimum values for the characteristics of compressive strength, flexural tensile strength and capillarity coefficient, receiving the designation P3, R1, C1 in the four types.

**Keywords:** Mortars, waste, mechanical behavior, textile sludge.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Etapas do tratamento do efluente.....                                                                                                                                        | 17 |
| Figura 2: Tanque de equalização da lavanderia parceira.....                                                                                                                            | 18 |
| Figura 3: Estação elevatória de efluente bruto da lavanderia parceira.....                                                                                                             | 18 |
| Figura 4: Casa de química da lavanderia parceira da pesquisa.....                                                                                                                      | 19 |
| Figura 5: Tanque flocculador da lavanderia parceira.....                                                                                                                               | 20 |
| Figura 6: Tanque decantador da lavanderia parceira.....                                                                                                                                | 21 |
| Figura 7: Filtro de areia da lavanderia parceira.....                                                                                                                                  | 21 |
| Figura 8: Estrutura de um adensador de lodo convencional de ETE.....                                                                                                                   | 22 |
| Figura 9: Leito de secagem da lavanderia parceira.....                                                                                                                                 | 23 |
| Figura 10: Área de estocagem da lavanderia parceira.....                                                                                                                               | 23 |
| Figura 11: Processo de coleta do resíduo na lavanderia.....                                                                                                                            | 26 |
| Figura 12: Armazenamento do mesmo no laboratório.....                                                                                                                                  | 26 |
| Figura 13: Sequência de tratamento do lodo.....                                                                                                                                        | 27 |
| Figura 14: Organograma descritivo dos métodos realizados na pesquisa.....                                                                                                              | 28 |
| Figura 15: Quarteamento.....                                                                                                                                                           | 29 |
| Figura 16: (a) Pesagem do recipiente vazio, (b) pesagem do recipiente preenchido com água e (c) medição da temperatura, necessária para interpolar e calcular a densidade da água..... | 30 |
| Figura 17: (a) Rasamento do recipiente e (b) pesagem do recipiente com lodo.....                                                                                                       | 31 |
| Figura 18: (a) Materiais utilizados e (b) lodo e querosene em descanso na proveta.....                                                                                                 | 32 |
| Figura 19: Pesagem da (a) água e (b) cimento.....                                                                                                                                      | 33 |
| Figura 20: (a) Frasco em banho e (b) última leitura no Le Chatelier.....                                                                                                               | 34 |
| Figura 21: (a) pesagem da água para determinar o volume do recipiente, (b) enchimento do recipiente.....                                                                               | 35 |
| Figura 22: (a) Saturação da areia, (b) revolvimento e (c) amostra em condição de saturação superfície seca.....                                                                        | 36 |
| Figura 23: (a) Massa do conjunto frasco-areia, (b) frasco em banho e (c) massa do conjunto frasco-areia-água.....                                                                      | 36 |

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24: (a) Pesagem da massa de areia, (b) preenchimento do frasco com água, (c) agitação do conjunto água-areia, (d) repouso do frasco para efetuar a leitura do nível. .... | 38 |
| Figura 25: (a) Mistura de materiais secos, (b) uso do misturador e (c) fim da mistura. ....                                                                                      | 40 |
| Figura 26: (a) Aplicação dos golpes por camadas, (b) rasamento, (c) retirada do molde e (d) argamassa após o espalhamento.....                                                   | 41 |
| Figura 27: (a) Molde prismático e (b) cura ao ar dos corpos de prova.....                                                                                                        | 42 |
| Figura 28: (a) Aplicação de golpes, (b) cura ao ar 24 horas após moldagem e (c) cura úmida.....                                                                                  | 42 |
| Figura 29: (a) Posicionamento do corpo de prova e (b) rompimentos.....                                                                                                           | 43 |
| Figura 30: Diferentes rompimentos de corpos de prova cilíndricos.....                                                                                                            | 44 |
| Figura 31: (a) Recipiente, (b) lixamento, (c) início do ensaio e (d) fim do ensaio.....                                                                                          | 45 |
| Figura 32: (a) Aparência do resíduo após o tratamento e (b) armazenamento.....                                                                                                   | 46 |
| Figura 33: Fibras do lodo têxtil após secagem e tratamento.....                                                                                                                  | 46 |
| Figura 34: (a) Amostras contaminadas por infiltração de ar e (b) contaminação por problemas com a estufa.....                                                                    | 47 |
| Figura 35: Amostras de massas retidas nas respectivas aberturas e fundo.....                                                                                                     | 48 |
| Figura 36: Curva granulométrica – Lodo têxtil.....                                                                                                                               | 48 |
| Figura 37: Amostra de massas retidas de areia nas respectivas malhas e fundo.....                                                                                                | 50 |
| Figura 38: Curva granulométrica – Agregado miúdo.....                                                                                                                            | 50 |
| Figura 39: (a) Equipamento adaptado para o ensaio de consistência e (b) ensaio.....                                                                                              | 52 |
| Figura 40: Resistência à tração na flexão.....                                                                                                                                   | 53 |
| Figura 41: Resistência à compressão.....                                                                                                                                         | 54 |
| Figura 42: Absorção de água por capilaridade.....                                                                                                                                | 55 |
| Figura 43: Coeficiente de capilaridade.....                                                                                                                                      | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Traço da argamassa corrigido para os diferentes teores.....         | 39 |
| Tabela 2: Definição da quantidade de corpos de provas moldados.....           | 39 |
| Tabela 3: Resultados de índice de consistência de acordo com a NBR 13276..... | 53 |
| Tabela 4: Relação de água/aglomerantes de cada tipo de argamassa.....         | 53 |
| Tabela 5: Classificação das argamassas. ....                                  | 56 |

## **SIGLAS**

|         |                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas              |
| A-LOTEX | Argamassa de lodo têxtil                              |
| APL     | Arranjo Produtivo Local                               |
| CNAE    | Classificação Nacional de Atividades Econômicas       |
| CPRH    | Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos |
| CP's    | Corpos de Prova                                       |
| CTR     | Centro de Tratamento de Resíduos                      |
| ETE     | Estação de Tratamento de Efluentes                    |
| IBGE    | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística       |
| JUCEPE  | Junta Comercial de Pernambuco                         |
| NBR     | Norma Brasileira                                      |
| NM      | Norma Mercosul                                        |
| UFRPE   | Universidade Federal Rural de Pernambuco              |

## SUMÁRIO

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                       | 13 |
| 2. OBJETIVOS.....                                                                         | 14 |
| 2.1 Objetivo Geral.....                                                                   | 14 |
| 2.2 Objetivos Específicos.....                                                            | 14 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO .....                                                              | 14 |
| 3.1 Lavanderias do Agreste de Pernambuco .....                                            | 14 |
| 3.1.1 Mapeamento das lavanderias de jeans do Agreste de Pernambuco.....                   | 12 |
| 3.1.2 Caracterização das lavanderias de jeans do Agreste de Pernambuco .....              | 16 |
| 3.1.3 Resíduos produzidos pelas lavanderias de <i>jeans</i> do Agreste de Pernambuco..... | 15 |
| 3.1.4 Produção de lodo nas lavanderias de <i>jeans</i> do Agreste de Pernambuco.....      | 16 |
| 3.1.4.1 Tanque de Equalização.....                                                        | 17 |
| 3.1.4.2 Estação Elevatória de Efluente Bruto.....                                         | 18 |
| 3.1.4.3 Casa de química.....                                                              | 19 |
| 3.1.4.4 Tanque Floculador Hidráulico.....                                                 | 19 |
| 3.1.4.5 Tanque de Decantação.....                                                         | 20 |
| 3.1.4.6 Filtro de areia e carvão ativado.....                                             | 21 |
| 3.1.4.7 Adensador de lodo.....                                                            | 22 |
| 3.1.4.8 Leito de secagem.....                                                             | 22 |
| 3.1.4.9 Área de estocagem do lodo.....                                                    | 23 |
| 3.2 Incorporação de resíduos em concretos e argamassas.....                               | 23 |
| 4. METODOLOGIA .....                                                                      | 25 |
| 4.1 Materiais.....                                                                        | 26 |
| 4.1.1 Resíduo.....                                                                        | 26 |
| 4.1.2 Aglomerante.....                                                                    | 27 |
| 4.1.3 Agregado miúdo.....                                                                 | 27 |
| 4.2 Métodos.....                                                                          | 28 |
| 4.2.1 Resíduo.....                                                                        | 28 |
| 4.2.1.1 Composição granulométrica.....                                                    | 28 |
| 4.2.1.2 Massa unitária.....                                                               | 29 |
| 4.2.1.3 Massa específica.....                                                             | 31 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2 Aglomerante.....                                       | 33 |
| 4.2.2.1 Massa unitária.....                                  | 33 |
| 4.2.2.2 Massa específica.....                                | 33 |
| 4.2.3 Agregado Miúdo.....                                    | 34 |
| 4.2.3.1 Composição granulométrica e módulo de finura.....    | 34 |
| 4.2.3.2 Massa Unitária.....                                  | 35 |
| 4.2.3.3 Determinação da densidade e da absorção de água..... | 35 |
| 4.2.3.4 Teor de Umidade.....                                 | 38 |
| 4.2.4 Argamassas.....                                        | 38 |
| 4.2.4.1 Dosagem da mistura.....                              | 39 |
| 4.2.4.1.1 Teores de lodo incorporado.....                    | 39 |
| 4.2.4.1.2 Conjunto amostral.....                             | 39 |
| 4.2.4.2 Caracterização das argamassas.....                   | 39 |
| 4.2.4.2.1 Estado fresco.....                                 | 40 |
| a) Preparação da mistura.....                                | 40 |
| b) Índice de consistência.....                               | 41 |
| c) Moldagem dos corpos de prova.....                         | 41 |
| 4.2.4.2.2 Estado endurecido.....                             | 43 |
| a) Resistência mecânica.....                                 | 43 |
| a.a) Resistência à tração na flexão.....                     | 43 |
| a.b) Resistência à compressão.....                           | 44 |
| b) Absorção de água por capilaridade.....                    | 44 |
| 4.2.4.2.3 Classificação das argamassas.....                  | 45 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                             | 46 |
| 5.1 Resíduo .....                                            | 46 |
| 5.1.1 Tratamento.....                                        | 46 |
| 5.1.2 Composição granulométrica.....                         | 47 |
| 5.1.3 Massa unitária.....                                    | 49 |
| 5.1.4 Massa específica.....                                  | 49 |
| 5.2 Aglomerante .....                                        | 49 |
| 5.3 Agregado miúdo.....                                      | 49 |
| 5.3.1 Caracterização dos Materiais .....                     | 51 |
| 5.3.2 Massa unitária.....                                    | 51 |
| 5.3.3 Determinação da densidade e da absorção de água.....   | 51 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 5.3.4 Teor de umidade.....                                        | 52 |
| 5.4 Argamassas.....                                               | 52 |
| 5.4.1 Índice de consistência.....                                 | 52 |
| 5.4.2 Estado endurecido.....                                      | 53 |
| a) Resistência à tração na flexão e resistência à compressão..... | 53 |
| b) Absorção de água por capilaridade.....                         | 54 |
| 5.4.3 Classificação das argamassas.....                           | 55 |
| 6. CONCLUSÕES.....                                                | 56 |
| 7. REFERÊNCIAS.....                                               | 60 |

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil é o setor responsável pelo consumo de maior volume de recursos naturais, podendo chegar a até 50% dos recursos extraídos (John, 2000). Além disso, segundo o pesquisador, seus produtos são grandes consumidores de energia e, por estas razões, é de fundamental importância o desenvolvimento de materiais alternativos para atender a essa atividade.

De acordo com Leloup (2013), na região Agreste de Pernambuco, é abrigado o segundo maior polo têxtil do Brasil, o APL (Arranjo Produtivo Local) de Confeções do Agreste, produzindo cerca de 900 milhões de peças por ano e gerando o emprego de 100 mil pessoas. Seus principais membros são os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama que, junto aos demais, representam o segundo maior volume de produção nacional, ficando atrás apenas para o estado de São Paulo (Leloup, 2013). A produção local destaca-se na manufatura do *jeans*. Seu processo de fabricação é composto por algumas etapas que, além das fábricas de confecção, também envolve muitas indústrias de beneficiamento, denominadas lavanderias industriais (Moura *et al.*, 2021).

Como afirma Cometti *et al.* (2016), as lavanderias industriais são responsáveis pelos processos de lavagem, amaciagem, tingimento, descoloração e demais processos de modificação nas peças. No decorrer desses processos, as indústrias têxteis geram um alto volume de efluentes líquidos, os quais são tratados em estações de tratamento físico-químico, de onde resulta o lodo, um produto semissólido.

De acordo com Souto (2017), uma lavanderia industrial têxtil de médio porte, que processa 100 mil peças de vestuários por ano, pode gerar, aproximadamente, 6 toneladas de lodo têxtil seco nesse período. Devido à falta de uma estrutura adequada para a deposição final, esse lodo geralmente é depositado em aterros sanitários ou locais clandestinos, o que leva a causar o aumento dos custos de produção, além de problemas ambientais como a contaminação do lençol freático. Dias Júnior (2013) mostra que, entre outros fatores, o descarte não consciente desse resíduo tornou-se um problema ambiental para as lavanderias têxteis.

Assim, o reaproveitamento do lodo vindo das indústrias têxteis como matéria-prima tem sido estudado como uma perspectiva sustentável, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, propondo a incorporação desse resíduo em matrizes de materiais da construção civil, tratando-se no presente trabalho na incorporação do lodo em argamassas de revestimento.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar o comportamento mecânico de argamassas de revestimento utilizando a substituição da areia por lodo têxtil de lavanderia de *jeans*.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar os materiais utilizados na pesquisa;
- Desenvolver o traço para utilização do lodo têxtil em argamassa de revestimento substituindo parcialmente a areia com diferentes teores de lodo;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dessas argamassas conforme os critérios estabelecidos pela ABNT.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

Na presente seção serão abordados os temas necessários para o desenvolvimento do trabalho, partindo de um embasamento teórico, advindo de consultas às literaturas técnica e científica.

### **3.1 Lavanderias do Agreste de Pernambuco**

Em uma perspectiva inicial, Lima (2014) afirma que segundo a CPRH (Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos) as lavanderias têxteis são classificadas como um dos ramos industriais mais poluentes em Pernambuco, e conforme a Instrução Normativa nº 004/2012, “podem gerar impactos ambientais decorrentes do não tratamento de resíduos sólidos, líquidos e atmosféricos, e por este motivo devem limitar o potencial degradador aos níveis indicados nessa norma”.

Como afirma Costa (2014), durante o processo produtivo, as lavanderias realizam alto consumo de recursos hídricos, além da utilização de produtos e geração de resíduos tóxicos, como também emitem poluentes. Dessa forma, em casos onde não são instituídas medidas necessárias para diminuição desses fatores, há, consequentemente, uma mudança na qualidade de vida da comunidade, assim como evidentes impactos ambientais, prejudiciais para recursos hídricos, do solo e do ar. Mas ainda assim, a autora considera pontos positivos, tratando-se desse ramo de produção como um todo, tendo por exemplo, a geração de empregos e o desenvolvimento da região, bem como a interação com demais setores, como o de confecção.

### 3.1.1 Mapeamento das lavanderias de jeans do Agreste de Pernambuco

Grande parte das empresas do Polo de Confecções do Agreste de Pernambuco se localiza nos municípios de Caruaru, Cupira, Toritama, Riacho das Almas, Vertentes, Surubim, Frei Miguelinho e Santa Cruz do Capibaribe. Entretanto, o município de Caruaru abriga a maior quantidade de lavanderias industriais de beneficiamento de *jeans*, concentrando 33% do arranjo total, seguida de Toritama com 30%, Riacho das Almas com 18%, Vertentes com 15% e Surubim com 4% (Guimarães *et al.*, 2018).

De acordo com Alves (2020), que levantou dados da Junta Comercial de Pernambuco (JUCEPE), no estado de Pernambuco existem 2.316 empreendimentos industriais, onde 235 deles são lavanderias distribuídas pelo estado. De 235 lavanderias, 134 pertencem ao Arranjo Produtivo Local, classificadas em diferentes tipos de atividades, abrangendo as lavanderias industriais de beneficiamento de *jeans* e lavanderias de atividades distintas. A mesma autora também mostra que do número de lavanderias industriais encontradas no APL, 51 delas possuem Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE 1340-5/02, efetuando atividades de alvejamento, tingimento e torção em fios, tecidos, artefatos têxteis e peças de vestuário, enquanto uma delas possui CNAE 9601-7/02, realizando atividades de tinturaria como atividade principal.

Com os dados cadastrais das empresas, é possível consultar o status de funcionamento das mesmas através da Receita Federal. Conforme o levantamento de Alves (2020), 94 lavanderias apresentaram atividade ativa. A partir de visitas realizadas *in situ*, parte das 134 lavanderias do APL finalizaram suas atividades, às quais, 20 foram classificadas inaptas, 8 tinham status baixado/extinto e 12 não apresentavam status de funcionamento. Os dados coletados da Receita Federal correspondem até o ano de 2019.

Em dados mais recentes de Alves (2020), mostra o aumento na concentração de lavanderias no município de Toritama, chegando a 45,52% das indústrias do Arranjo Produtivo Local, com 61 lavanderias. Em seguida, encontra-se Caruaru com 30 lavanderias e Santa Cruz do Capibaribe, com 16 lavanderias. Os 3 municípios concentram 79,85% de lavanderias têxteis do APL e representam o triângulo do polo de confecções devido ao alto fluxo de produção em relação aos demais municípios (Amorim *et al.*, 2016). Seguindo em ordem decrescente, encontra-se Riacho das Almas, Surubim, Vertentes e Taquaritinga do Norte com 8, 7, 5 e 3 lavanderias, respectivamente, e por fim, Cupira e Brejo da Madre de Deus, ambas com 2 lavanderias cada.

Vale salientar que Alves (2020) mostra que, de acordo com a CPRH, 34 lavanderias possuem licenças ambientais, enquanto que não foi possível encontrar registro de licença de 100 delas na Companhia. Além de tudo, as 134 lavanderias citadas anteriormente se tratam de empresas registradas na Junta Comercial do Estado de Pernambuco e encontradas na Receita Federal. Grande parte das lavanderias existentes na região do Arranjo Produtivo Local, localizadas na zona rural ou até mesmo urbana, não são registradas devido ao funcionamento primitivo e irregular, o que leva a possíveis riscos à saúde dos funcionários e do meio ambiente, tratando-se da qualidade da água e do ar. Somente em Toritama foi possível registrar por volta de 2000 lavanderias, porém, apresentando características irregulares como mencionadas anteriormente (Alves, 2020).

### 3.1.2 Caracterização das lavanderias de jeans do Agreste de Pernambuco

As lavanderias têxteis são empresas que possuem maquinários e operários capazes de realizar o beneficiamento de peças cruas de *jeans* em peças com diferentes acabamentos, com objetivo de se adequar e acompanhar as tendências da moda (Brito, 2013). Nessas indústrias, as peças de *jeans* passam por processos físicos e químicos, como recepção das peças, desengomagem, lavagem, tingimento, amaciamento, secagem, acabamento e customização, no intuito de atender os produtos solicitados pelo mercado (Ferraz Júnior, 2010; Cometti *et al.*, 2016). Incluso no processo de lavagem, estão outros cinco processos: desengomagem, alvejamento, tingimento, amaciamento e centrifugação. Entretanto, esse processo não é fixo para todas as lavagens de peças que ocorrerão, visto que os *jeans* passam por diferentes tratamentos a depender do resultado da peça esperado (Viana, 2019).

Lorena *et al.* (2018) descreve que o processo de beneficiamento se inicia a partir da recepção das peças cruas, seguindo para a fase da lavagem combinada ao processo de desengomagem, para então direcioná-la ao alvejamento, visando o clareamento do material com uso de produtos químicos, como permanganato de potássio, cloro ou redutor, a depender do tecido e do resultado que se deseja.

De acordo com Viana (2019), as peças são encaminhadas para produção com base em uma peça exemplar aprovada pelo cliente previamente. A reprodução da peça exemplar pode ser elaborada pela parte da área técnica da lavanderia, por uma ficha de serviço, seguindo padrão. Nessa ficha de serviço é descrito todo o processo de recomendação da lavagem, indicando temperatura correta, tempo de operação, a forma de como será feita a lavagem, assim como os produtos químicos que devem ser utilizados no decorrer do processo.

Segundo Fernandes (2010), as lavagens das peças de *jeans* são divididas em lavagem por esgotamento e a seco. A lavagem por esgotamento é realizada com uso de água e produtos químicos, dentro do processo se incluem enxágue, desengomagem, estonagem, alvejamento, desbotamento, neutralização, tingimento e amaciamento. Já no processo a seco, são postos nas peças todos os efeitos visuais e físicos que o jeans pode receber, como *fix-pin*, *destroyed*, *used*, *bigode*, *puídos*, *lixados*, *laser*, entre outros. Viana (2019) afirma que corantes são usados para colorir ou alterar a cor do *jeans*, de modo a apresentar efeitos visuais nas peças como “*Dirty*”, “*Destroyed*” e “*Used*” durante o processo de tingimento. Durante essa etapa, os corantes são aplicados como uma solução diretamente nas máquinas de lavar industriais, de grande porte, com capacidade de processamento de 120 peças, a fim de que a fase de tingimento seja otimizada. Dado o fim do processo, o efluente da lavagem pode ser coletado através de valetas situadas no chão, abaixo das máquinas de lavar e centrífuga, e direcionado para a Estação de Tratamento.

Após a finalização da etapa de lavagem é feita a secagem das peças em máquina centrífuga no intuito de retirar a umidade residual, por isso, também há geração de efluentes nessa fase, que assim como na etapa anterior são coletados por meio de valetas no chão do setor seguindo para a estação de tratamento de efluentes (Viana, 2019).

Ainda conforme a autora citada anteriormente, na fase de acabamento, as peças recebem efeitos manuais e mecânicos, além de apresentar características como impermeabilidade e ajustes nas dimensões do tamanho final. Nessa etapa há geração de resíduos sólidos, como os retalhos. Em seguida, as peças são transferidas para etapa de passagem, onde usa-se vapor d’água – advinda das caldeiras – nos ferros com objetivo de engomar as peças de *jeans*. No término, as peças seguem para separação e expedição.

### 3.1.3 Resíduos produzidos pelas lavanderias de jeans do Agreste de Pernambuco

De acordo com Leloup (2013), de forma mais geral, os resíduos sólidos produzidos pelas lavanderias têxteis se resumem em: (I) argila expandida desgastada, utilizada na lavagem das peças para retirada de fragmentos dos tecidos pelo processo de abrasão; (II) fibras do material têxtil, resultantes dos cortes e das abrasões; (III) cinzas provenientes da queima da madeira nas caldeiras geradoras do vapor utilizado em processos como a passagem das peças; e (IV) o lodo têxtil oriundo do tratamento físico-químico dos efluentes. Enquanto isso, Viana (2019) traz além do lodo, a geração de resíduos para além do processo interior da lavagem,

como embalagens de sacos plásticos, papelão, sacos de ráfia de embalagem do sal comum e de agregados leves, bombonas e embalagens plásticas diversas dos produtos químicos.

Para um melhor entendimento, Bastian (2009) detalha a geração de resíduos advinda de cada etapa produtiva da indústria têxtil, incluindo as unidades de apoio:

- Fiação: Cascas, fibras, fios, cones, borras de fibra.
- Beneficiamento: Fibras queimadas, fibras retiradas durante as operações de impregnação de álcali, purga, lavagem e felpagem, pastas de estampar, telas, embalagens diversas, óleo térmico, banho de acabamento.
- Tecelagem e/ou malharia: Cones, restos do banho de goma, embalagens diversas, fibras, fios, tecidos, óleo usado.
- Enobrecimento: Fibras queimadas, fibras retiradas durante as operações de impregnação de álcali, alvejamento, purga, lavagem, felpagem, navalhagem e esmerilhagem, pastas de estampar, telas, embalagens diversas, óleo térmico e banho de acabamento.
- Confecção: Retalhos, embalagens diversas.
- Caldeira, aquecedor de fluido térmico, compressores de ar, sistema de aclimatização: Cinzas, embalagens de produtos químicos, borra de óleo, pano com óleo, fibras retiradas na limpeza dos equipamentos.
- Sistema de tratamento de efluentes: Lodo biológico, embalagens de produtos químicos.
- Atividades administrativas: Embalagem de papel e papelão, de plástico e de vidro, cartucho de impressoras.

#### *3.1.4 Produção de lodo nas lavanderias de jeans do Agreste de Pernambuco*

As lavanderias têxteis geralmente possuem uma estação de tratamento de efluentes (ETE) muito próximas ao local de processamento. Viana (2019) detalha as operações executadas durante o tratamento do efluente de uma lavanderia que possuía uma ETE em suas dependências, desde a fase de recepção até o final do produto gerado após o tratamento.

A autora relata que o processo é iniciado a partir da chegada e passagem do efluente bruto, por meio do gradeamento, de 10 mm de espaçamento entre as grades, e aproximadamente 323 m<sup>3</sup> de vazão média por dia. Os valores de vazão de entrada podem modificar, a depender da demanda do dia. Viana (2019) mostra as funções dos elementos iniciais que recebem o efluente. De acordo com a mesma, a função da unidade de gradeamento é reter os componentes sólidos de proporção superior ao espaçamento das barras, como por exemplo os fiapos, madeira, plástico, trapos, retalhos, entre outros materiais. O gradeamento é a primeira filtragem, que

auxilia a condução do efluente através das tubulações. Ao remover os sólidos de maior dimensão, é possível evitar obstruções e danificações aos equipamentos da estação.

Com base na literatura da autora citada anteriormente, pode-se apresentar as etapas (Figura 1) para descrever o processo de produção do lodo têxtil.

Figura 1: Etapas do tratamento do efluente.



Fonte: Adaptado de Viana (2019)

#### 3.1.4.1 Tanque de Equalização

Essa etapa tem como finalidade fazer a homogeneização do efluente líquido, de modo que possibilite um intenso contato das diversas características do efluente proveniente do processo de beneficiamento do jeans, deixando-o uniforme em relação à temperatura e ao pH (Viana, 2019).

Conforme Favaretto (2015) existem cinco objetivos básicos em um tanque de equalização, sendo eles:

- Neutralizar despejos ácidos e alcalinos através da mistura deles;
- Minimizar variações de vazão;
- Minimizar variações de concentração;
- Diluir compostos tóxicos;
- Fornecer alimentação contínua aos processos de tratamento posteriores.

Ainda de acordo com Viana (2019), essa etapa tem também a função de proteger as bombas, impedindo que elas não operem a seco. A autora ainda indica que determinadas Estações de Tratamento de Efluentes possuem no tanque de equalização (figura 2) um aerador

em seu interior, no intuito de ajudar na oxidação dos compostos orgânicos e inorgânicos, visando o aumento de eficiência do tratamento.

Figura 2: Tanque de equalização da lavanderia parceira.



Fonte: Autora (2022)

#### 3.1.4.2 Estação Elevatória de Efluente Bruto

A ABNT NBR 12208 (1992) define Estação Elevatória de esgoto sanitário como a instalação que se destina o transporte de esgoto do nível do poço de sucção das bombas ao nível de descarga na saída do recalque (figura 3), acompanhando aproximadamente as variações de vazão afluente. Ela serve para prover energia hidráulica suficiente para produzir a vazão adequada e constante durante o processo de tratamento.

Figura 3: Estação elevatória de efluente bruto da lavanderia parceira.



Fonte: Autora (2022)

#### 3.1.4.3 Casa de química

Consoante Viana (2019), a casa de química trata-se das instalações onde ocorrem mistura e dosagem, sendo o local onde é feita a aplicação dos produtos em solução (figura 4), dessa forma, a função principal dessa etapa é preparar e dosar os produtos químicos que são utilizados na estação de tratamento por meio da agitação e homogeneização dessas soluções. Bavaresco (2018) traz em observação que no interior da casa de química há tanques dosadores instalados, assim como medidores de vazão de tratamento da estação de tratamento. Nessa fase é feita a desinfecção do efluente, podendo ser utilizados diferentes produtos, como Cloro, sulfato de alumínio, coagulante orgânico, sulfato de alumínio, cal e polímeros aniônicos (Bavaresco, 2018).

Figura 4: Casa de química da lavanderia parceira da pesquisa.



Fonte: Autora (2022)

#### 3.1.4.4 Tanque Floculador Hidráulico

Sabogal Paz (2007) resume que o processo da floculação consiste no desenvolvimento e agrupamento de partículas desestabilizadas eletricamente, onde as mesmas formam aglomerados de maior proporção – os flocos –, por meio de processos que produzem agitação

na água, podendo ser realizado com misturadores hidráulicos ou mecanizados. Assim, em razão do seu tamanho e densidade, esses flocos são sedimentados ou decantados com mais facilidade (Viana, 2019).

Figura 5: Tanque floclador da lavanderia parceira.



Fonte: Autora (2022)

#### 3.1.4.5 Tanque de Decantação

De acordo com Souza (2007), os decantadores recebem o efluente floclado, onde sua velocidade é diminuída visando a decantação dos flocos. Na decantação ocorre a separação das partículas sólidas suspensas na água, que tendem a cair e se depositar no fundo do tanque com determinada velocidade, em função do seu peso, tendo como finalidade a remoção de areia, partículas sedimentares sem coagulação e retenção de flocos após a coagulação. O objetivo dos tanques (figura 6) é de decantar as partículas coloidais e aglomeradas em flocos advindas do tanque floclador hidráulico (Viana, 2019).

A mesma autora relata, após visitas *in loco*, que os tanques de decantação de determinada lavanderia trabalham em um regime contínuo e com velocidade baixa de fluxo, o que acaba favorecendo a formação de lodo, encaminhado por meio de um dreno posicionado no fundo do tanque, gerando um efluente mais limpo com baixa turbidez, que segue para o tanque de efluente tratado. O mesmo volume de lodo acumulado no fundo do tanque é transportado para o adensador de lodo através de descargas periódicas, que ocorrem por bateladas várias vezes por semana, a depender da demanda. O dreno é aberto gradualmente para evitar agitação ao lodo assentado, enquanto o efluente decantado e clarificado segue para o filtro de areia para a remoção de partículas suspensas não sedimentáveis que ainda permanecem no efluente.

Figura 6: Tanque decantador da lavanderia parceira.



Fonte: Autora (2022)

#### *3.1.4.6 Filtro de areia e carvão ativado*

Os filtros de areia, segundo a NBR 13969 (1997), são definidos como tanques preenchidos de areia e outros meios filtrantes, com fundo drenante e com esgoto em fluxo descendente, onde ocorre a remoção de poluentes, tanto por ação biológica quanto física.

Viana (2019) resume que o filtro de areia (figura 7) funciona na aplicação intervalar de afluente sobre a superfície de um leito de areia através de uma tubulação de distribuição.

Figura 7: Filtro de areia da lavanderia parceira.

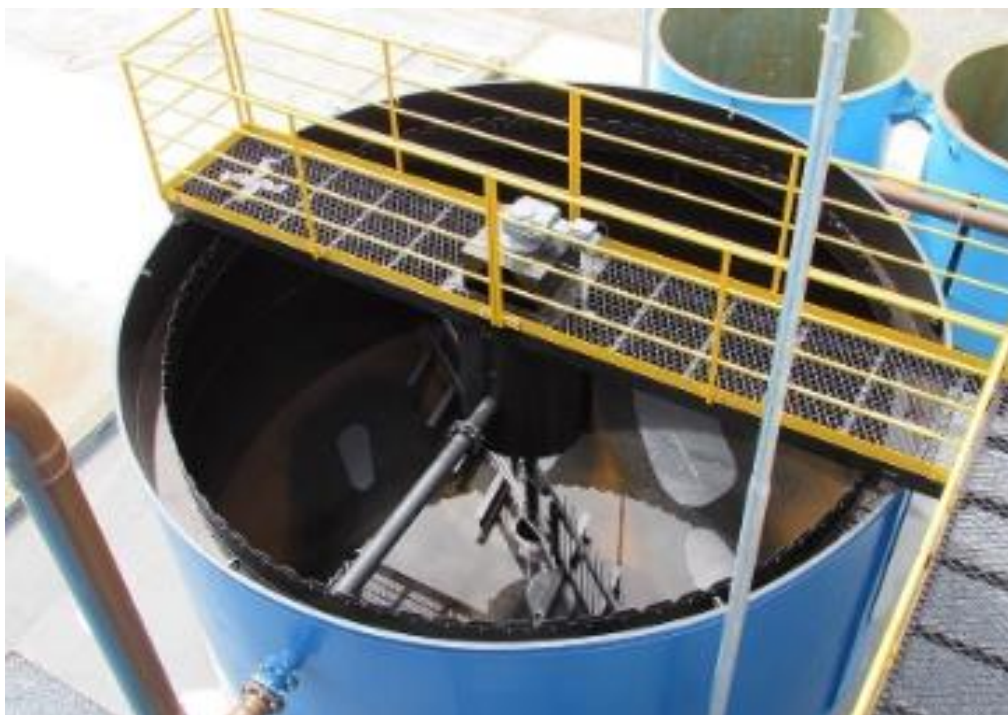


Fonte: Autora (2022)

#### 3.1.4.7 Adensador de lodo

De acordo com Viana (2019), a principal finalidade do adensador (figura 8) é reter e adensar em seu meio todo o lodo advindo do tanque de decantação que, sequencialmente, será enviado para os leitos de secagem. Alves (2019) afirma que o adensamento de lodo proveniente de estações de tratamento procura reduzir o máximo de água do lodo, isto é, aumentando a concentração do resíduo visando a diminuição dos custos e operações no leito de secagem.

Figura 8: Estrutura de um adensador de lodo convencional de ETE.



Fonte: Autora (2022)

#### 3.1.4.8 Leito de secagem

Segundo Caetano (2018), os leitos de secagem (figura 9) são compostos por tanques rasos e o processo de desaguamento é formado pela sedimentação, drenagem e evaporação. Essa fase tem como finalidade reter o lodo advindo do adensador no intuito de desidratá-lo com ajuda da incidência solar direta. Ainda segundo a autora, a parte líquida é canalizada para corpo hídrico receptor e a parte sólida é removida e colocada na área de estocagem.

Figura 9: Leito de secagem da lavanderia parceira.



Fonte: Autora (2022)

#### 3.1.4.9 Área de estocagem do lodo

Viana (2019) aborda que a área de estocagem de lodo tem como finalidade armazenar o material proveniente do leito de secagem, assim como completar o processo de desidratação desse material, tornando-o ainda mais seco. O armazenamento (figura 10) é feito em sacos de ráfia, onde ficam estocados por um período de 5 dias. Após este período, uma empresa especializada, contratada pela lavanderia, remove o lodo e faz a destinação para o local mais adequado.

Figura 10: Área de estocagem da lavanderia parceira.



Fonte: Autora (2022)

### 3.2 Incorporação de resíduos em concretos e argamassas

De acordo com Sampaio *et al.* (2014), nas últimas décadas vem ocorrendo o aumento do descarte de diferentes resíduos no meio ambiente, da mesma forma que, paralelamente, aumenta a escassez de recursos naturais utilizados pela indústria da construção civil. Esse cenário vem conduzindo o desenvolvimento de pesquisas na busca de alternativas para o reaproveitamento de resíduos industriais, no intuito de diminuir o impacto ambiental que os mesmos podem causar.

Fomentando essas alternativas, Petry *et al.* (2017) abordam que a composição do resíduo de marmoraria é dada pelas sobras do processo de corte e polimento de rochas ornamentais, e é formado por resíduos de quartzitos, mármore e granitos. Silva e Falcão (2017) realizaram ensaios com incorporação de 10%, 15% e 20% de pó de mármore e granito a fim de se estudar a resistência e a durabilidade das argamassas com a agregação desses resíduos. Os autores citados anteriormente apontam relevância no estudo, com base nos resultados em que os corpos de prova com 10% e 15% de resíduo de mármore e granito incorporados, aos 28 dias, apresentam ganho de resistência em relação ao traço padrão.

Um resíduo industrial bastante observado em pesquisas são as cinzas. Nas lavanderias têxteis são as cinzas de madeira, provenientes da utilização da madeira como fonte de energia para gerar aquecimento das caldeiras. De acordo com Lima (2019), a cinza de algaroba – madeira utilizada no estudo em questão – é constituída em sua maior parte por carbonato de cálcio, podendo ser utilizada em substituição ao fíler tradicional, visando destinação usual do resíduo em concretos auto adensáveis, além de diversificar os materiais utilizados na construção civil. O mesmo autor afirma que há um crescimento da resistência mecânica à compressão comparando o tempo de cura de 1, 7 e 28 dias, à medida que o teor de incorporação de cinza da algaroba é aumentado. Essas observações sinalizam que a presença da cinza de algaroba tem propriedades que podem acelerar as reações iniciais de hidratação dos compostos cimentícios. Para Lima (2019), esse comportamento se dá devido a atuação da cinza como fíler alternativo aumentando o preenchimento, antecipando o processo de hidratação do aglomerante, desse modo, viabilizando ganho de resistência nas primeiras idades.

Paula *et al.* (2008) avaliaram a influência da adição das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas, substituindo o aglomerante em teores de 10%, 20% e 30%, estudando os índices de pozolanicidade das cinzas, visto que as mesmas apresentam grandes quantidades de sílica (SiO<sub>2</sub>) em sua composição. Os autores apresentam que os corpos de prova com os 3 teores iniciais apresentam valores próximos e maiores de resistência à compressão. Os resultados do estudo indicam a possibilidade da substituição de cimento Portland por até 20%

de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, sem que haja interferência da resistência à compressão. Os ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios resultam em uma função crescente, graficamente, concluindo que as argamassas que apresentam maiores teores de cinza resultam em argamassas mais porosas, justificando valores de absorção mais altos (Paula *et al.*, 2008).

Em mais um estudo de incorporação de resíduos em argamassas, Reis (2019) buscou avaliar o potencial dos resíduos de carvão vegetal em substituição parcial do agregado miúdo de baixa granulometria. Foram incorporados 10%, 20% e 30% de resíduos de carvão vegetal em relação à areia fina, com relação água/cimento de 0,55. Os corpos de prova apresentaram valores de resistência mecânica acima de 20 MPa em todos os teores incorporados (Reis, 2019). Ainda conforme a autora, aos 28 dias de idade, todos os traços elevaram os valores de resistência à compressão, no entanto, o corpo de prova com 20% de resíduo de carvão vegetal retratou aumento de 2,21% em relação ao valor de referência, enquanto os corpos com 10% e 30% de resíduo reduziram 1,86%. A mesma conclui que, conforme os valores de resistência mecânica acima de 20 MPa, o resíduo pode ser incorporado em placas de concreto, blocos de pavimentação, lajes e componentes que não exijam elevadas resistências.

Já Leloup (2013), fazendo uso do mesmo objeto desta pesquisa, realizou a incorporação de 1%, 2% e 3% de lodo têxtil em substituição à areia para produção de argamassas, utilizando também a introdução de cinza de algaroba, simultaneamente, a fim de analisar o comportamento da mesma dentro do sistema. A autora confirma que a substituição de 4% de areia – sendo 3% de lodo têxtil e 1% de cinzas – aos 28 dias de idade, há uma diminuição da resistência à tração e à compressão de 22% e 35%, respectivamente, quando comparada à argamassa padrão. Ela afirma que essa diminuição acontece em razão de uma alteração de classe, de acordo com os requisitos da ABNT NBR 13281, tanto em relação à resistência à compressão, das classes P6 para P5 (designação dos valores de compressão), quanto à tração na flexão, nas classes R5 para R4 (designação dos valores de tração na flexão).

Os valores encontrados estão de acordo com os requisitos para argamassas para assentamento preconizados na NBR 13281 (ABNT, 2005a). Dessa forma, a autora conclui que a substituição do agregado miúdo por 3% de lodo têxtil e 1% de cinza de algaroba garantem uma possibilidade segura de destinação para esses resíduos, e proporciona a aplicação da nova argamassa para fins de assentamento de blocos e/ou revestimento.

#### **4. METODOLOGIA**

Neste tópico é apresentada uma metodologia descritiva que atende aos objetivos propostos nesta pesquisa, ao método utilizado e aos procedimentos de como a referida pesquisa foi realizada.

## 4.1 Materiais

### 4.1.1 Resíduo

A coleta do lodo *in natura* foi realizada em uma lavanderia industrial, localizada no município de Caruaru – PE. O lodo têxtil foi recolhido em sacos de rafia após o tratamento e repouso nos leitos de secagem e armazenado em baldes com tampas para manter preservadas as características do material (Figura 11). O resíduo foi encaminhado ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – SEDE, ficando armazenado em baldes plásticos fechados (Figura 12) até o momento de caracterização e aplicação experimental.

Figura 11: Processo de coleta do resíduo na lavanderia; Figura 12: Armazenamento do mesmo no laboratório.

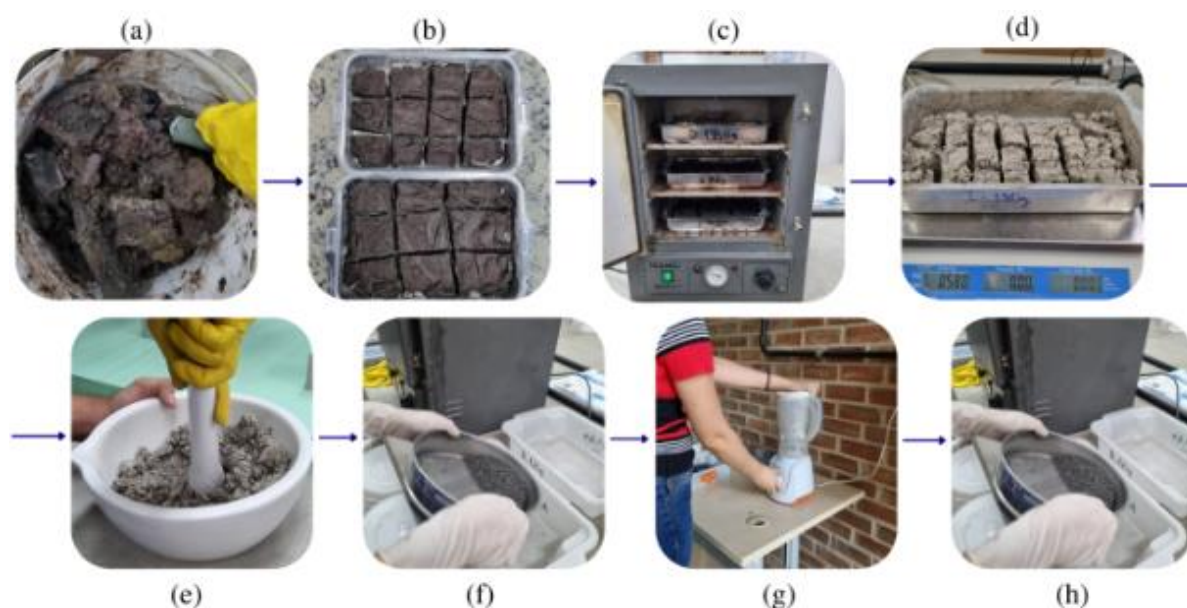


Fonte: Autora (2022)

Para o tratamento (figura 13), sequencialmente, o resíduo foi retirado dos baldes com auxílio de pá e espátula, colocado em formas metálicas, pesados em balança e encaminhados à estufa para realizar a secagem à 100 °C, de acordo com a metodologia de Goyal *et al.* (2019) e Kasaw *et al.* (2021), até que fosse observado que a amostra apresentava massa constante, além de se observar visualmente que se apresentavam com aspecto seco. Após o processo de secagem, o lodo foi destorroado com auxílio de almofariz e pistilo para desagregar as partículas, sendo possível nessa fase caracterizá-lo e identificar a presença de outros resíduos no conjunto, como etiquetas, pedras, folhas e retalhos plásticos. Então, o resíduo foi passado na peneira de malha 4,75 mm para separar os materiais mais finos, enquanto os retidos foram batidos em um

liquidificador, com objetivo de triturá-lo, e novamente passado na peneira de 4,75 mm, visto que o mesmo foi usado em substituição parcial do agregado miúdo, devendo então apresentar grãos em granulometria semelhante.

Figura 13: (a) coleta das amostras dos baldes de armazenamento, (b) separação em formas, (c) secagem em estufa, (d) checagem da constância de massa e aspecto físico do material, (e) destorroamento, (f) peneiramento, (g) trituração no liquidificador e (h) segunda passagem nas peneiras com o material triturado pelo liquidificador.



Fonte: Autora (2022)

Vale salientar que, devido à grande quantidade de lodo recolhido na lavanderia, houve uma demanda de tempo desde o processo de secagem em estufa até a fase de trituração no liquidificador. Dessa forma, após a trituração de cada batelada, o resíduo tratado ficava armazenado em vasilhas plásticas até o momento do experimento. Dadas as circunstâncias, algumas amostras foram danificadas em razão de possíveis fissuras nas vasilhas e infiltração de ar úmido durante o dia e calor durante a noite, na ausência de pessoas no laboratório, levando ao aparecimento de fungos na superfície de algumas amostras. Por esse motivo, elas foram separadas manualmente e descartadas do experimento.

#### 4.1.2 Aglomerante

Os aglomerantes utilizados no presente trabalho foram o cimento Portland do tipo CPII-Z, de classe 32, e a Cal Hidratada, os quais foram armazenados em local limpo e seco no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – SEDE.

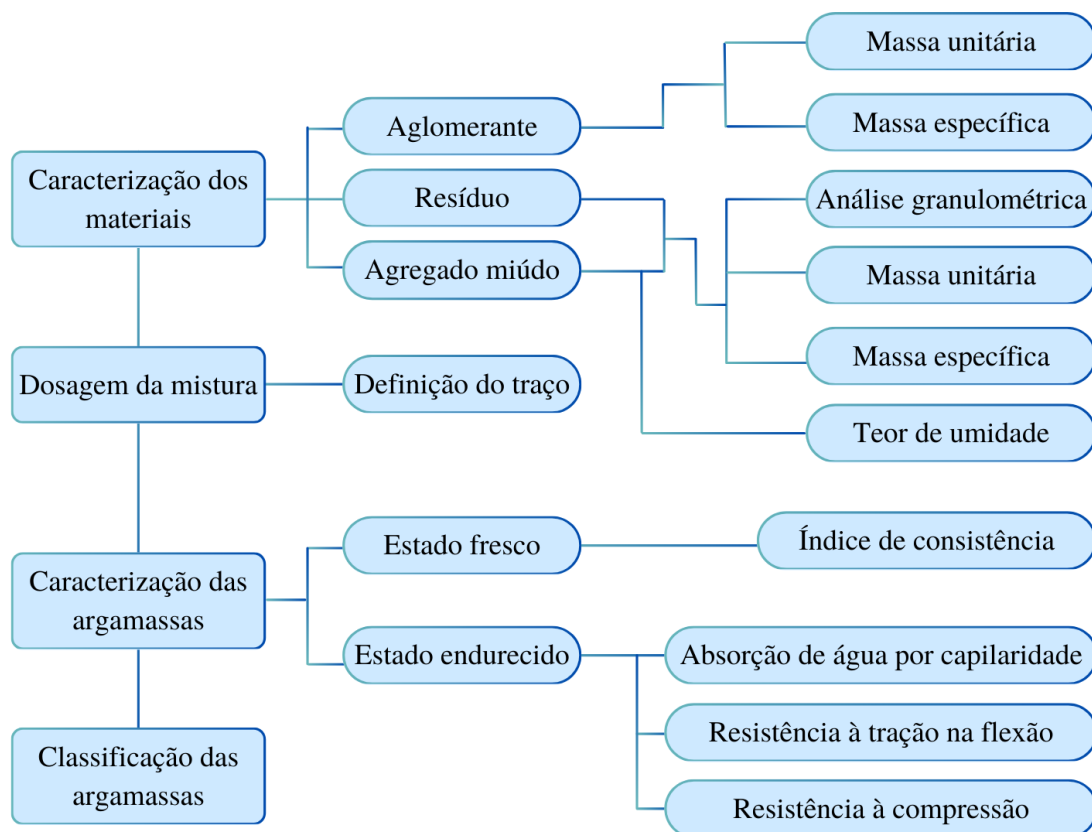
#### 4.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média lavada comercializada em sacos. Após a recepção do material, o mesmo foi despejado em um recipiente maior, revolvido e quarteado para promover melhor uniformidade. Depois de processo inicial, separou-se a areia em formas metálicas para secá-las em estufa à 105 °C durante 24 horas e depois do esfriamento, o agregado foi armazenado em baldes plásticos fechados até o momento do uso para realização dos ensaios.

## 4.2 Métodos

O programa experimental se dividiu em etapas graduais de desenvolvimento, separadas por fases de caracterização dos materiais que compõem a mistura para argamassa; discussão da proporção dos materiais, em relação à quantidade de cimento, para definição de um traço unitário; caracterização da argamassa nos estados fresco e endurecido e; classificação das argamassas conforme as exigências normativas (figura 14).

Figura 14: Organograma descritivo dos métodos realizados na pesquisa.



Fonte: Autora (2022)

### 4.2.1 Resíduo

#### 4.2.1.1 Composição granulométrica

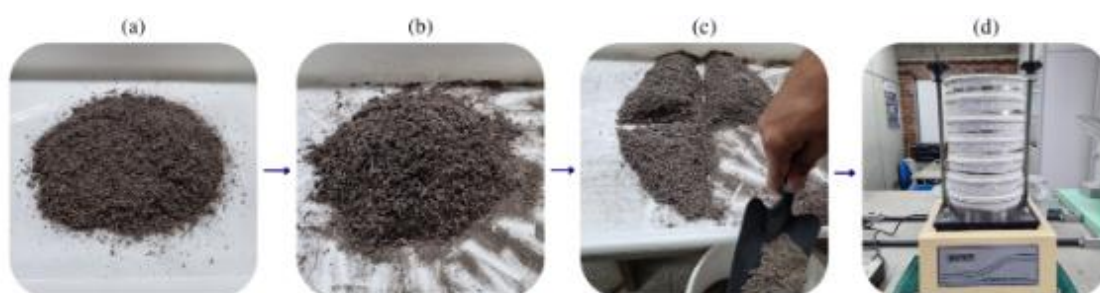
O lodo têxtil tratado foi passado na série de peneiras para determinar sua granulometria. Essa definição foi efetuada a partir das diretrizes estabelecidas na NBR NM 248: Agregados

– Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003), que prescreve o método para determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos, como também aborda a série normal e série intermediária de peneiras com tampa e fundo, de forma sucessiva, que atendem à ABNT NBR NM ISO 3310-1 ou 2, com as aberturas de malha no intervalo de 75 mm a 150  $\mu$ m. Como a pesquisa trata da incorporação do resíduo em argamassas substituindo parcialmente o agregado miúdo, as peneiras utilizadas para esse ensaio se iniciam na série 4,75 mm e terminam em 150  $\mu$ m, satisfazendo o intervalo adequado para agregados miúdos.

A preparação da amostra foi efetuada seguindo os parâmetros da NBR 16915: Agregados: Amostragem (ABNT, 2021a) seguindo o método de quartejamento, retratado na figura 15, para a seleção da amostra analisada, onde uma amostra de no mínimo 600 gramas foi pesada, disposta em um recipiente de superfície plana, revolvida com auxílio de uma pá e quarteadada. Logo após, foram retirados dois quartos da amostra inicial – de lados opostos – e pesados, objetivando ter metade da massa inicial. Essa amostra foi colocada na peneira 4,75 mm, que já estava sobreposta às demais peneiras de malha inferior e fundo, e colocada no agitador mecânico em uma frequência de 10 Hz durante 10 minutos.

A série de peneiras (d) foi vedada com fitas para evitar o escapamento de material fino do lodo durante a agitação, com objetivo de diminuir as perdas, que durante os ensaios anteriores foram significativas.

Figura 15: (a) amostra inicial disposta em superfície plana, (b) amostra revolvida, (c) separação de dois quartos da amostra inicial e (d) série de peneiras no agitador para iniciar execução da granulometria.



Fonte: Autora (2022)

#### 4.2.1.2 Massa Unitária

A determinação da massa unitária foi realizada conforme o método estabelecido na NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios (ABNT, 2021b) para agregados miúdo ou graúdo, ou da mistura dos dois, em estado compactado ou solto. A amostragem do resíduo foi realizada de acordo com a NBR 16915: Agregados: Amostragem

(ABNT, 2021a), uma vez que o mesmo foi incorporado à mistura em substituição parcial do agregado miúdo.

Neste ensaio, um recipiente cilíndrico foi pesado para ter conhecimento da sua massa, depois preenchido com água e em seguida coberto com uma placa de rasamento para evitar a presença de bolhas de ar e água. Em seguida, determinou-se a massa de água no recipiente para que fosse possível calcular o volume de água do mesmo. O volume do recipiente foi calculado dividindo a massa de água necessária para preenchê-lo pela sua densidade; de acordo com NBR 16972 (2021b), considerando a densidade de 997,5 kg/m<sup>3</sup> a 23 °C. A determinação foi feita conforme a expressão:

$$V_{rec} = \frac{m_{rec+água} - m_{rec}}{\rho_{água}} \quad (1)$$

Sendo,

$V_{rec}$  = Volume do recipiente (m<sup>3</sup>);

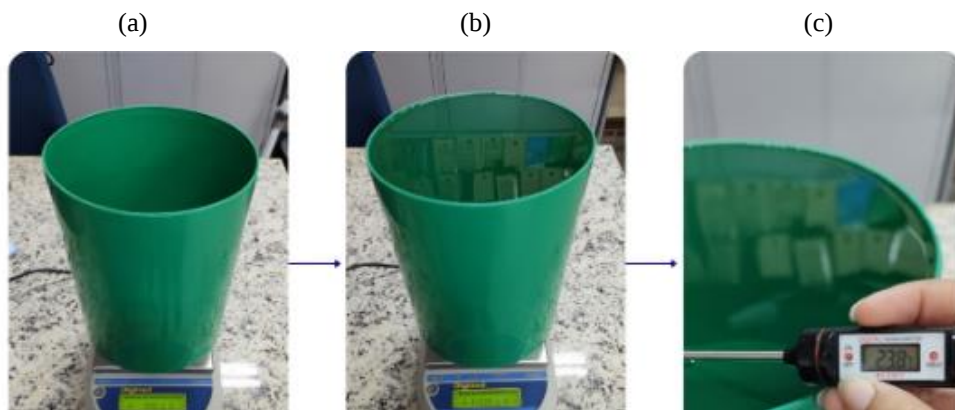
$m_{rec+água}$  = massa do recipiente em conjunto à água (kg);

$m_{rec}$  = massa do recipiente (kg);

$\rho_{água}$  = densidade da água (de acordo com a temperatura) (kg/m<sup>3</sup>).

Nota-se a disposição da primeira parte do ensaio na figura 16.

Figura 16: (a) Pesagem do recipiente vazio, (b) pesagem do recipiente preenchido com água e (c) medição da temperatura, necessária para interpolar e calcular a densidade da água.



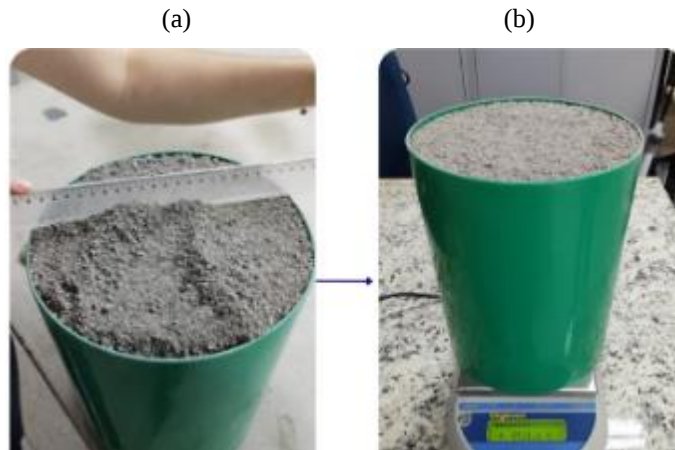
Fonte: Autora (2022)

A temperatura da água registrada no momento do ensaio foi 23,8 °C, sendo assim, ao interpolar os valores fixos de densidade para cada temperatura, encontrou-se um valor de densidade igual a 997,4 kg/m<sup>3</sup>.

O procedimento selecionado a empregar nesse ensaio foi pelo Método C, em que os agregados se apresentam em estado solto. Inicialmente, é necessário secar o recipiente e, em

seguida, começar a enchê-lo com a massa do resíduo, previamente seco a 105 °C por 24 horas, até que ele transbordasse, utilizando uma pá e despejando o lodo de uma altura que não ultrapassasse 50 mm acima da borda superior do recipiente. A camada superficial de resíduo foi nivelada e rasada, como na figura 17, com a ajuda de uma espátula para que, em seguida, fosse determinada a massa do conjunto.

Figura 17: (a) Rasamento do recipiente e (b) pesagem do recipiente com lodo.



Fonte: Autora (2022)

Possuindo o valor da densidade e da massa da água, foi obtido o volume do recipiente, podendo assim, calcular a massa unitária através da seguinte equação:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V_{rec}} \quad (2)$$

Sendo,

$\rho_{ap}$  = massa unitária do resíduo (kg/m<sup>3</sup>);

$m_{ar}$  = massa do recipiente com o resíduo (kg);

$m_r$  = massa do recipiente vazio (kg) e

$V_{rec}$  = volume do recipiente (m<sup>3</sup>).

#### 4.2.1.3 Massa Específica

Para a determinação da massa específica do lodo realizou-se uma adaptação do ensaio de massa específica do cimento. Não foi possível realizar a massa específica do resíduo de forma semelhante ao agregado, pois para esse último, parte da amostra teve que permanecer saturado em água por determinado período e depois retomar em parte do procedimento em uma nova saturação em água. Observou-se que após a secagem e tratamento do lodo, o material tem dificuldade em interagir com água, tornando pouco viável a realização de ensaios do mesmo com esse líquido.

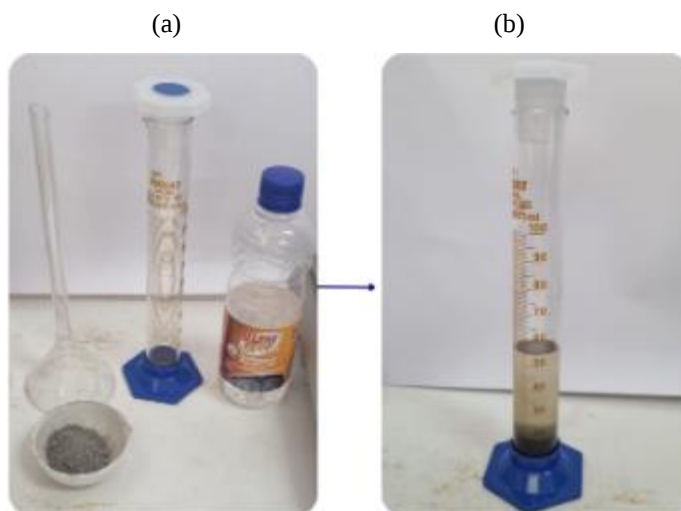
A determinação da massa específica do cimento foi feita de acordo com a NBR 16605:

cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017), fazendo uso do frasco de Le Chatelier e um líquido reagente livre de água. Entretanto, devido ao formato do frasco utilizado no ensaio – de entrada estreita – e ao fato do resíduo não ser um material fino – como o cimento –, tornou-se inviável efetuar o procedimento, pois o lodo apresentava partículas que variavam de 150  $\mu\text{m}$  a 2,36 mm, que por vezes causou entupimento na entrada do frasco, podendo durante esse tempo ter ocorrido a evaporação do querosene, o que influenciaria diretamente nos resultados.

Sendo assim, fez-se uma adaptação do ensaio citado na NBR 16605 (ABNT, 2017) trocando o uso do frasco de Le Chatelier por uma proveta graduada (figura 18). Dessa forma, possibilitou introduzir o material sem causar entupimento e observar a variação de volume ao depositar a massa de resíduo na proveta.

Inicialmente, colocou-se aproximadamente 50 ml de querosene na proveta, com auxílio de um funil de haste longa, em seguida, limpou-se as paredes da proveta. Logo após, depositou-se 10 gramas de lodo com auxílio de um funil de haste curta, deixando a proveta tampada por 30 minutos. Por fim, fez-se uma leitura após o tempo determinado, para assim, determinar a massa específica do resíduo.

Figura 18: (a) Materiais utilizados e (b) lodo e querosene em descanso na proveta.



Fonte: Autora (2022)

Determinou-se a massa específica do lodo por meio de:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (3)$$

Sendo,

$\rho$  = massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$  = massa introduzida (g);

$V_2$  = segunda leitura de volume ( $\text{cm}^3$ ) e

$V_1$  = primeira leitura de volume ( $\text{cm}^3$ ).

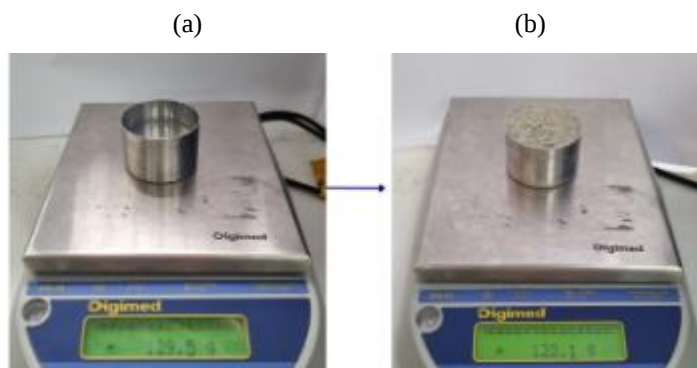
#### 4.2.2 Aglomerante

##### 4.2.2.1 Massa Unitária

Devido a não haver uma norma específica para determinação de massa unitária do cimento Portland, usou-se a norma para agregados, NBR 16972: Determinação da massa unitária e do índice de vazios (ABNT, 2021b) para agregados miúdo ou graúdo, ou da mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Separou-se a amostra de acordo com a NBR 16915: Agregados: Amostragem (ABNT, 2021a) e, em seguida, foi feita uma adaptação do recipiente, usando uma cápsula metálica, visto que o cimento é um aglomerante muito fino, evitando a retirada de grandes quantidades da embalagem.

O procedimento ocorreu da mesma forma que foi descrita no tópico 7.2.1.2., havendo mudança apenas quanto às dimensões do recipiente. Pesou-se a cápsula vazia e depois com água, para determinar o volume do recipiente e, em seguida, foi pesado o conjunto cápsula-aglomerante (figura 19).

Figura 19: Pesagem da (a) água e (b) cimento.



Fonte: Autora (2022)

##### 4.2.2.2 Massa Específica

A realização do ensaio de massa específica seguiu os requisitos da NBR 16605: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017), usada para determinar a massa da unidade de volume do material por meio do frasco de Le Chatelier. A norma aponta que deve ser utilizado um líquido que não reaja quimicamente com o material, podendo ser xilol, querosene ou nafta.

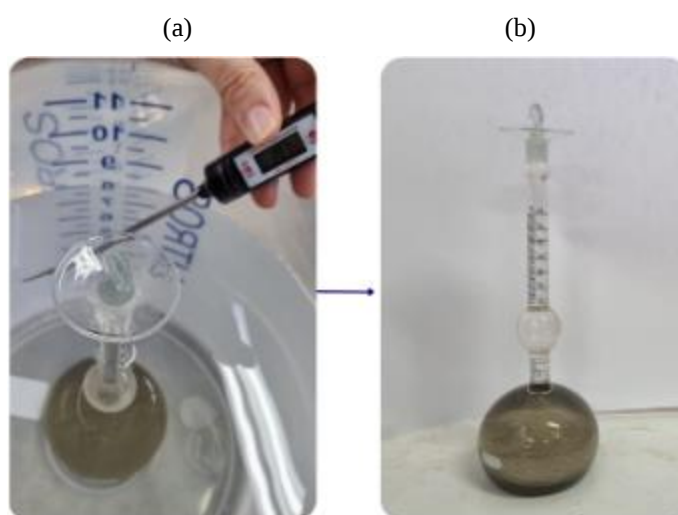
A amostra deve ser ensaiada da forma que foi recebida, a menos que constate presença de corpos estranhos ao material, devendo ser peneirada em peneira de malha 150  $\mu\text{m}$ . Como

o cimento utilizado foi recebido em saco fechado, não foi necessário o peneiramento.

Primeiro, encheu-se o frasco de Le Chatelier, com auxílio de um funil de haste longa, com querosene até o nível compreendido entre 0 e 1 cm<sup>3</sup>, em seguida, secou-se o interior do frasco acima do nível citado anteriormente. Depois disso, o frasco foi colocado em banho de água, ficando submerso por 30 minutos, para igualar a temperatura do querosene no interior do Le Chatelier com a temperatura da água. Com isso, registrou-se a primeira leitura de volume.

Após essa primeira etapa, pesou-se 60 gramas do cimento Portland e depois foi-se introduzindo o material em pequenas porções no frasco com auxílio de um funil de haste curta. Assim, tampou-se o frasco para girá-lo em posição inclinada em círculos horizontais, até que não subissem mais bolhas de ar para a superfície do líquido. Tendo feito isso, o frasco foi colocado novamente em banho (figura 20), submerso por 30 minutos, repetindo o processo citado no parágrafo anterior. Depois dos 30 minutos, registrou-se a segunda leitura.

Figura 20: (a) Frasco em banho e (b) última leitura no Le Chatelier.



Fonte: Autora (2022)

#### 4.2.3 Agregado Miúdo

##### 4.2.3.1 Composição granulométrica e módulo de finura

Foi feita a determinação da composição granulométrica e o módulo de finura seguindo as diretrizes da NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométricas (ABNT, 2003), cuja prescreve o método para determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos, como também aborda a série normal e série intermediária de peneiras com tampa e fundo, de forma sucessiva, que atendem à ABNT NBR NM ISO 3310-1 ou 2, com as aberturas de malha no intervalo de 75 mm a 150 µm.

A preparação da amostra foi realizada seguindo os parâmetros da NBR 16915:

Agregados: Amostragem (ABNT, 2021a) seguindo o método de quartearamento para a seleção da amostra analisada. O procedimento se seguiu igualmente item 7.2.1.1, visto que o resíduo foi substituído como um agregado miúdo.

#### 4.2.3.2 Massa Unitária

Para a caracterização em relação à massa unitária da areia foi utilizada a NBR 16972: Determinação da massa unitária e do índice de vazios (ABNT, 2021b), seguindo igualmente o procedimento feito no item 7.2.1.2 de determinação de massa unitária do resíduo.

Seguiu-se o mesmo procedimento, havendo apenas a mudança de um recipiente diferente, como mostrado na figura 21.

Figura 21: Pesagem da água para determinar o volume do recipiente e enchimento do recipiente.



Fonte: Autora (2022)

Sendo assim, foi necessário apenas calcular o volume do novo recipiente e aplicá-lo para determinar a massa unitária do agregado miúdo.

#### 4.2.3.3 Determinação da densidade e da absorção de água

Para a determinação de massa específica, densidade úmida e seca foi seguido os parâmetros da NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água (ABNT, 2021c), onde foi feita a secagem de uma amostra de 2,5 kg de areia a 105 °C durante 24 horas, a qual foi depositada em um recipiente com água para saturação por mais 24 horas. Após o tempo indicado, retirou-se completamente a amostra de dentro da água, estendendo-a sobre a superfície plana, onde foi revolvida com auxílio de pá e espátula, visando assegurar uma secagem uniforme e contínua, até que os grãos diminuíssem sua força de aderência entre si.

Em seguida, a amostra foi colocada no molde tronco cônico, sem compressão da mesma, e aplicou-se 25 golpes com a haste de compactação em sua superfície. Se ao retirar do molde, o agregado mantiver a forma do aparelho, significa que ainda há umidade superficial, e dessa forma deve-se dar continuidade à secagem revolvendo a amostra constantemente, repetindo o ensaio em intervalos frequentes de tempo até que o cone de agregado miúdo desmorone assim que o molde seja retirado. Quando isso ocorreu, de acordo com a NBR 16916 (2021c), o agregado atingiu a condição de saturação superfície seca (figura 22).

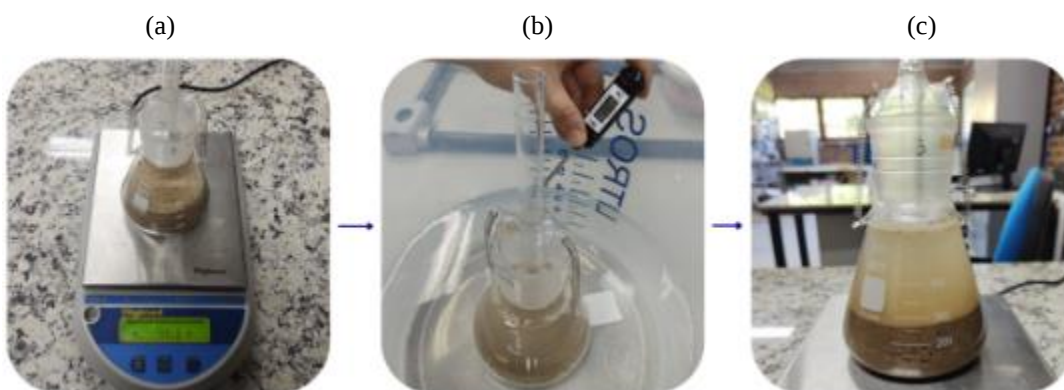
Figura 22: (a) Saturação da areia, (b) revolvimento e (c) amostra em condição de saturação superfície seca.



Fonte: Autora (2022)

Após a preparação da amostra, aproximadamente 500 gramas da mesma foi separada e acondicionada ao frasco de vidro com tampa, descrito na norma, e assim determinou-se a massa do conjunto. Depois disso, encheu-se esse frasco com água potável até aproximadamente abaixo de 500 ml e moveu-se o mesmo de modo a eliminar as bolhas de ar. Em seguida, o frasco foi colocado em banho e mantido à temperatura constante de  $23 \pm 2$  °C. Após aproximadamente 1 hora, o frasco foi completado com água até a marca de 500 ml para poder determinar a massa total (figura 23), correspondente à massa da amostra na condição saturada superfície seca, massa do frasco e massa da água.

Figura 23: (a) Massa do conjunto frasco-areia, (b) frasco em banho e (c) massa do conjunto frasco-areia-água.



Fonte: Autora (2022)

Ao mesmo tempo em que foram retirados os 500 gramas anteriormente para colocar no frasco, também se retirou mais 500 gramas para serem colocados em uma bandeja e levados à estufa à 105 °C por 24 horas. Após o esfriamento da massa, determinou-se a massa da amostra seca.

O volume do frasco utilizado foi de 500 cm<sup>3</sup>, e a massa específica da água, para temperatura de 23 °C utilizada no ensaio, foi de 0,9975 g/cm<sup>3</sup>. Para obter o volume de água adicionado ao frasco, faz-se:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{\text{água}}} \quad (4)$$

Sendo,

$V_a$  = volume de água adicionado ao frasco (cm<sup>3</sup>);

$m_2$  = massa total do conjunto frasco, agregado e água (g);

$m_1$  = massa do conjunto frasco e agregado (g);

$\rho_{\text{água}}$  = massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

A determinação da massa específica foi feita de acordo com o seguinte cálculo:

$$d_1 = \frac{m}{v - v_a - \left( \frac{m_s - m}{\rho_{\text{água}}} \right)} \quad (5)$$

Sendo,

$d_1$  = massa específica do agregado (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  = massa da amostra seca em estufa (g);

$v$  = volume do frasco (cm<sup>3</sup>);

$v_a$  = volume de água adicionado ao frasco (cm<sup>3</sup>);

$m_s$  = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$\rho_{\text{água}}$  = massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

Para determinação da densidade úmida, efetuou-se o cálculo por meio de:

$$d_2 = \frac{m_s}{v - v_a} \quad (6)$$

Para definição da densidade seca, descobre-se através de:

$$d_3 = \frac{m}{v - v_a} \quad (6)$$

#### 4.2.3.4 Teor de Umidade

A NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio (ABNT, 2011) foi utilizada para realização do teor de umidade, onde inicialmente fez-se a preparação da amostra de areia, conforme a NBR NM 248 (2003), e reservou-se 500 gramas da mesma. Em seguida, preencheu-se até a divisão de 200 ml do frasco de Chapman com água e depois, foi-se adicionando gradualmente a massa de areia com auxílio de um funil. Logo após a adição, agitou-se o frasco de Chapman, inclinándolo em 45° e rotacionado o fundo com as mãos para facilitar a saída das bolhas de ar, como apresentado na figura 24. Por fim, o frasco foi colocado em repouso e após 45 segundos foi feita a leitura do nível, em milímetros, atingido pela água no gargalo, indicando o volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo.

Figura 24: (a) Pesagem da massa de areia, (b) preenchimento do frasco com água, (c) agitação do conjunto água-areia, (d) repouso do frasco para efetuar a leitura do nível.



Fonte: Autora (2022)

Determinou-se o teor de umidade superficial por meio de:

$$h = \frac{[500 - (v - 200) \times \gamma]}{(v - 700) \times \gamma} \quad (7)$$

Sendo,

h = teor de umidade superficial (%);

v = leitura final do frasco de Chapman (ml) e

γ = densidade na condição saturada de superfície seca do agregado miúdo (g/ml).

#### 4.2.4 Argamassas

Dentre os diversos tipos de argamassas, suas aplicações e funcionalidades, escolheu-se para a pesquisa o desenvolvimento de uma mistura que servisse como argamassa de revestimento. Com isso, foram feitas pesquisas relacionadas à proporção ideal de cada material dentro do

traço, com a contribuição da adição de lodo têxtil em alguns deles.

#### 4.2.4.1 Dosagem da mistura

A composição de uma argamassa também pode ser definida por dosagem. Nela, é analisada a relação de proporção do cimento com os outros materiais que compõem a mistura. É mais conhecido como traço, e pode ser medido em massa, volume ou peso.

##### 4.2.4.1.1 Teores de lodo incorporado

Definiu-se para a pesquisa o uso de um traço padrão em massa, de 1:2:9, proporção utilizada por Bif e Pelisser (2013), com a incorporação dos teores de 10%, 20% e 25% de lodo têxtil, como apresentado na tabela 1, com as seguintes correções do traço nos tipos em que há substituição ao agregado miúdo (areia).

Tabela 1: Traço da argamassa corrigido para os diferentes teores.

| Tipo da argamassa | Teor (%) | Cimento | Cal | Areia | Lodo |
|-------------------|----------|---------|-----|-------|------|
| A-LOTEx0          | 0        | 1       | 2   | 9,00  | 0,00 |
| A-LOTEx10         | 10       | 1       | 2   | 8,10  | 0,90 |
| A-LOTEx20         | 20       | 1       | 2   | 7,20  | 1,80 |
| A-LOTEx25         | 25       | 1       | 2   | 6,75  | 2,25 |

Fonte: Autora (2022)

##### 4.2.4.1.2 Conjunto amostral

Separou-se a quantidade de corpos de provas para realização dos ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, apresentada na tabela 2. Utilizou-se 6 corpos de prova prismáticos para os ensaios de resistência na flexão e 3 para absorção de água e 6 corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 2: Definição da quantidade de corpos de provas moldados.

| Tipo da argamassa | Teor (%)  | CP-Prismáticos | CP-Cilíndricos |
|-------------------|-----------|----------------|----------------|
| A-LOTEx0          | A-LOTEx0  | 9              | 6              |
| A-LOTEx10         | A-LOTEx10 | 9              | 6              |
| A-LOTEx20         | A-LOTEx20 | 9              | 6              |
| A-LOTEx25         | A-LOTEx25 | 9              | 6              |
| Total             |           | 36             | 24             |

Fonte: Autora (2022)

#### 4.2.4.2 Caracterização das argamassas

#### 4.2.4.2.1 Estado fresco

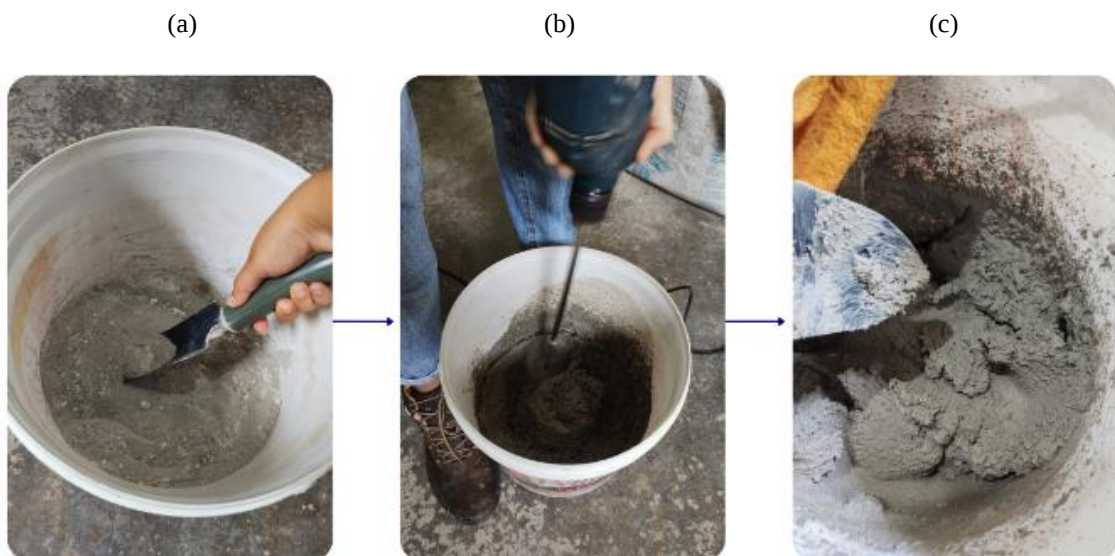
O estado fresco das argamassas consiste no estado ainda plástico das mesmas sem indício de início de tempo de pega ou rigidez das argamassas. Neste item serão analisadas propriedades como preparação da mistura, índice de consistência e moldagem dos corpos de prova.

##### a) Preparação da mistura

Seguiu-se as exigências da NBR 16541 (ABNT, 2016a) para a preparação da mistura, que se iniciou com a pesagem da massa de materiais secos da argamassa, ou seja, a soma de todos os materiais que compunham o traço – cimento, cal e agregado(s). Logo após, foi feita a pesagem da massa de água, que variou de acordo com o traço à medida que o resíduo foi incorporado. Essa mudança foi necessária para que cada traço apresentasse os valores adequados dentro do intervalo do índice de consistência.

Em uma segunda fase, todo o material seco da argamassa foi colocado em um recipiente e misturado em velocidade baixa para uniformizar a mistura com 75% da massa de água nos 10 segundos iniciais, mantendo essa mistura até completar o tempo de 30 segundos desde o primeiro momento em que a mesma foi iniciada (figura 25). Ao fim dos 30 segundos, aumentou-se a velocidade de mistura, mantendo-a por mais 60 segundos. Após esse momento, deu-se uma pausa no misturador para raspar as paredes do recipiente e manter a argamassa em descanso dentro de um tempo de 90 segundos. Em seguida, o misturador foi novamente acionado em velocidade baixa ao passo que se adicionou os 25% restantes da massa de água, por 10 segundos. Deu-se continuidade na mistura em velocidade alta até completar 90 segundos.

Figura 25: (a) Mistura de materiais secos, (b) uso do misturador e (c) fim da mistura.

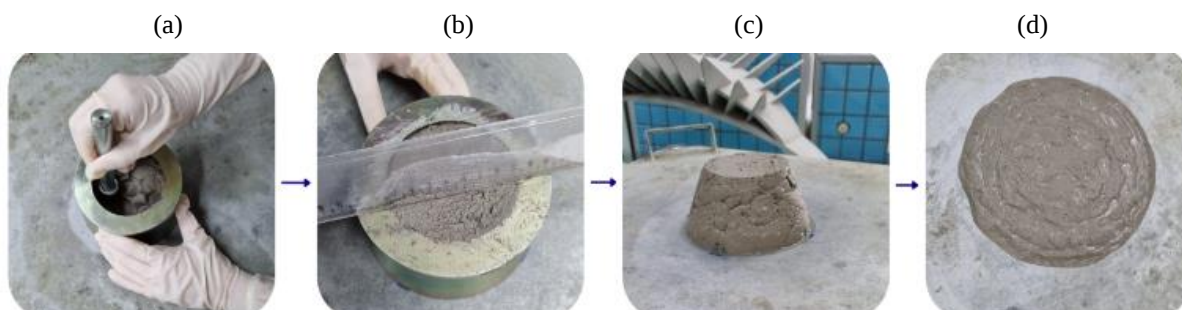


#### b) Índice de consistência

Foi realizado ensaio para caracterizar o índice de consistência das argamassas conforme a NBR 13276, de forma a definir a quantidade de água utilizada na mistura (ABNT, 2016b). Com a preparação da argamassa finalizada, pôde-se iniciar o ensaio de consistência. Antes de começar, foi feita a limpeza e secagem da placa metálica – usada em adaptação à mesa para índice de consistência, fazendo uso da placa sobre um equipamento agitador vibratório – e da parede interior do molde tronco cônico com um pano limpo. Posicionou-se o molde no centro da placa, segurando-o firmemente para que o mesmo fosse preenchido em três camadas sucessivas de argamassa, com alturas aproximadamente iguais, aplicando em cada uma delas 15, 10 e 5 golpes com um soquete, respectivamente.

Após o preenchimento (figura 26), rasou-se a argamassa rente à borda superior do molde com uma régua e fez-se uma limpeza da placa ao redor da base do molde. Feito isso, retirou-se o molde verticalmente e acionou-se o equipamento vibratório por 30 segundos. Após a finalização do tempo, mediu-se 3 diâmetros do espalhamento da argamassa.

Figura 26: (a) Aplicação dos golpes por camadas, (b) rasamento, (c) retirada do molde e (d) argamassa após o espalhamento.



Fonte: Autora (2022)

O índice de consistência foi calculado pela média dos 3 diâmetros coletados:

$$IC = \frac{D1 + D2 + D3}{3} \quad (8)$$

Sendo,

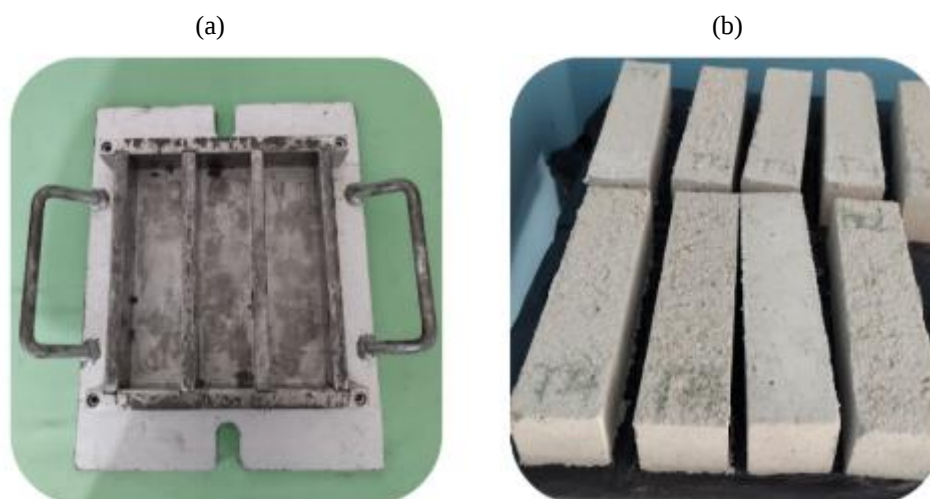
IC = índice de consistência (mm) e

D = diâmetros 1, 2 e 3 coletados (mm).

#### c) Moldagem dos corpos de prova

Após a preparação da argamassa e aprovação do índice de consistência, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova, seguindo-se os preceitos na NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (ABNT, 2005c) para a moldagem dos corpos prismáticos. Imediatamente após o preparo da mistura, colocou-se em cada compartimento do molde prismático, previamente untado com desmoldante, uma porção de argamassa e fez-se um nivelamento da camada. Depois, o molde foi levado ao equipamento agitador, permanecendo em vibração por 30 segundos. O procedimento se repetiu, colocando uma segunda camada de argamassa, nivelando e retornando à vibração, visando promover adensamento do material dentro do molde. Ao término, o molde foi rasado para uniformizar sua camada superior. Após 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes para cura ao ar (figura 27), mantidos em temperatura variando de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar de  $60 \pm 5\%$ .

Figura 27: (a) Molde prismático e (b) cura ao ar dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2022)

Para a moldagem dos corpos cilíndricos seguiu-se os parâmetros da NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2019). Antes do preparo da argamassa as formas cilíndricas foram pinceladas com desmoldante para o momento de receber a mistura. Logo após a preparação da argamassa, preencheu-se os moldes com 4 camadas (figura 28), cada uma recebendo 30 golpes e ao fim foi feito o rasamento. Nas primeiras 24 horas, os corpos permaneceram em cura ao ar e após a desmoldagem foram transferidos para um recipiente de cura com água, permanecendo totalmente imersos pelo período de 28 dias.

Figura 28: (a) Aplicação de golpes, (b) cura ao ar 24 horas após moldagem e (c) cura úmida.

(a)

(b)

(c)



Fonte: Autora (2022)

#### 4.2.4.2.2 Estado endurecido

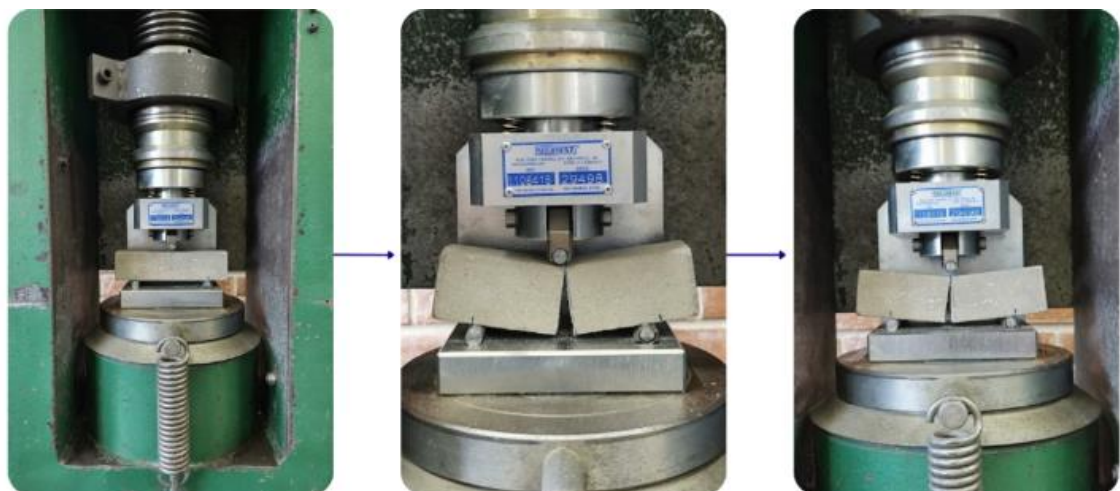
O estado endurecido das argamassas consiste no momento em que as mesmas se encontram rígidas. Sendo assim, outras propriedades diferentes do estado plástico devem ser consideradas, como resistência mecânica e absorção de água.

##### a) Resistência mecânica

##### a.a) Resistência à tração na flexão

O rompimento dos corpos de prova foi realizado aos 28 dias de idade, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005c). Para o ensaio da resistência à tração na flexão, posicionou-se o corpo de prova no dispositivo de apoio do equipamento, deixando a face rasada sem contato com os dispositivos de apoio e carga (figura 29). Em seguida, acionou-se a alavanca da prensa até que ocorresse a ruptura dos corpos de prova.

Figura 29: Posicionamento do corpo de prova e rompimentos.



Fonte: Autora (2022)

Para determinar a resistência à tração na flexão, fez-se o cálculo por meio de:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3} \quad (9)$$

Sendo,

$R_f$  = resistência à tração na flexão (MPa);

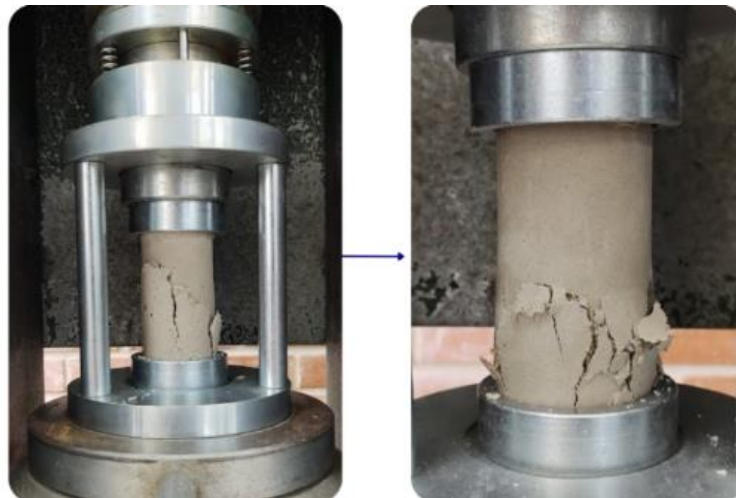
$F_f$  = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N) e

$L$  = distância entre os suportes (mm).

#### a.b) Resistência à compressão

O rompimento dos corpos de prova foi realizado aos 28 dias de idade, após cura úmida, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). Para o ensaio da resistência à compressão, encaixou-se o corpo de prova nos cabeçotes com neoprene para nivelamento da superfície, e o posicionou abaixo do dispositivo de carga (figura 30). Em seguida, acionou-se a alavanca da prensa repetidas vezes até que ocorresse a ruptura dos corpos de prova.

Figura 30: Diferentes rompimentos de corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autora (2022)

Para determinar a resistência à tração na flexão, fez-se o cálculo por meio de:

$$F_c = \frac{F_r}{A} \quad (10)$$

Sendo,

$F_c$  = resistência à compressão (MPa);

$F_r$  = Força de ruptura (N) e

$A$  = Área da seção nominal (mm).

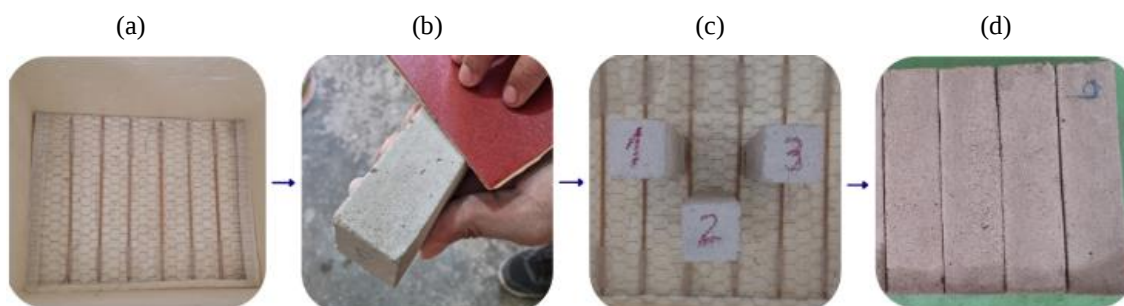
#### b) Absorção de água por capilaridade

Os valores de absorção de água por capilaridade e o índice de capilaridade das argamassas serão definidos a partir dos ensaios descritos na NBR 15259 (ABNT, 2005b).

Após ter passado o período de 28 dias de cura ao ar, os corpos de prova prismáticos foram lixados nas suas superfícies e depois limpos com auxílio de um pincel. Depois, pesou-se cada corpo de prova para coletar o valor da massa inicial. Em seguida, os prismas foram posicionados com a face quadrada sobre os suportes no recipiente de ensaio, permanecendo em contato com 5 mm do nível de água, como mostrado no esquema da figura 31.

Os corpos de prova permaneceram por 10 minutos com a face em contato com a água, foram retirados do recipiente, enxutos e pesados. Depois, imediatamente retornaram para o recipiente, permanecendo por mais 90 minutos com a face inferior em contato com a água. Ao fim, foram retirados, enxutos e pesados novamente.

Figura 31: (a) Recipiente, (b) lixamento, (c) início do ensaio e (d) fim do ensaio.



Fonte: Autora (2022)

A absorção da água por capilaridade e o índice de capilaridade foram calculados por:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad \text{e} \quad C = (m_{90} - m_{10}) \quad (11 \text{ e } 12)$$

Sendo,

$A_t$  = absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>);

$m_t$  = massa do corpo de prova para cada tempo (g);

$m_0$  = massa inicial do corpo de prova (g),

16 é a área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>) e

$C$  = coeficiente de capilaridade (g/dm<sup>2</sup>·min<sup>1/2</sup>).

#### 4.2.4.2.3 Classificação das argamassas

As argamassas produzidas com os diferentes teores de substituição do resíduo serão classificadas de acordo com a NBR 13281, a depender dos resultados obtidos nos ensaios supracitados (ABNT, 2005a).

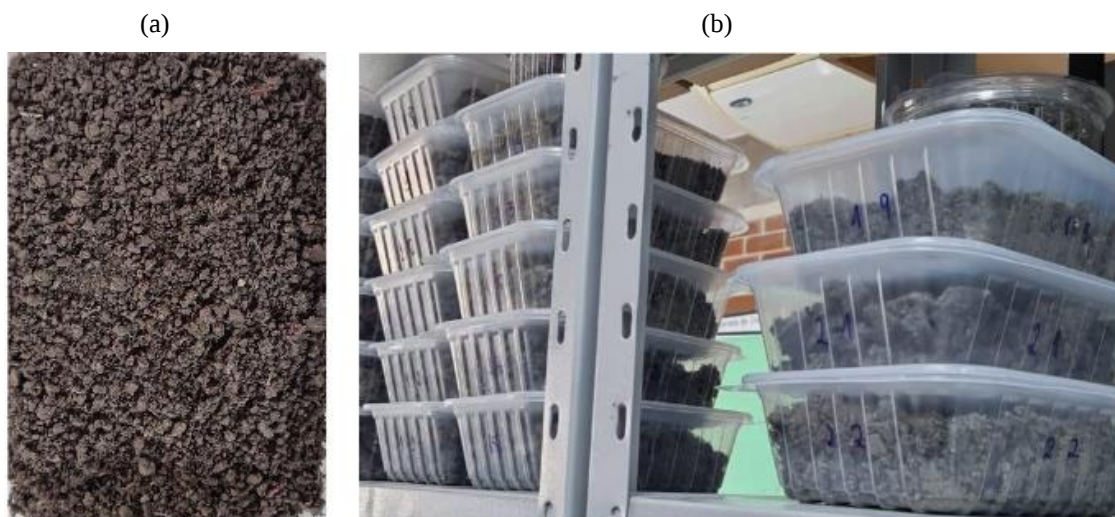
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Resíduo

#### 5.1.1 Tratamento

O tratamento do lodo têxtil foi uma fase necessária para poder caracterizar o material, possibilitando o cálculo do quantitativo de material necessário para incorporação na argamassa e também para a avaliação de quais partes do mesmo seriam utilizados e descartados. Após o tratamento, o resíduo ficou armazenado em recipientes plásticos até o momento de uso experimental, como mostrado na figura 32.

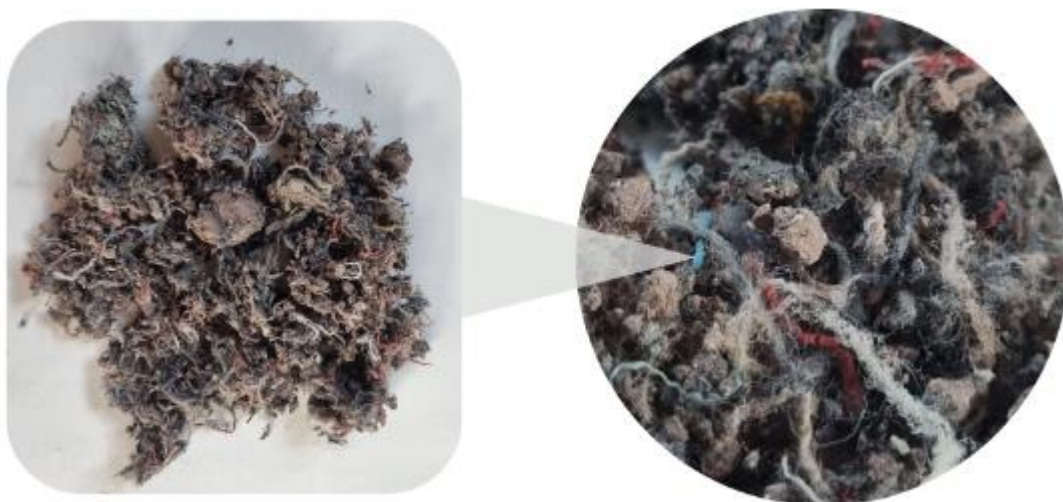
Figura 32: (a) Aparência do resíduo após o tratamento e (b) armazenamento.



Fonte: Autora (2022)

Tanto no primeiro peneiramento quanto no segundo, foi possível identificar e remover uma parcela relativa de fibras presentes no resíduo. A quantidade desse material encontrado no lodo varia de acordo com a batelada e a porção de amostra que se separa em cada forma na etapa de secagem. Separar e remover as fibras presentes no lodo têxtil fez parte do processo de caracterização do material, servindo como indicativo de como elas são predominantes e permanecem no resíduo mesmo passando por todos os processos físicos e químicos na estação de tratamento de efluentes (Figura 33).

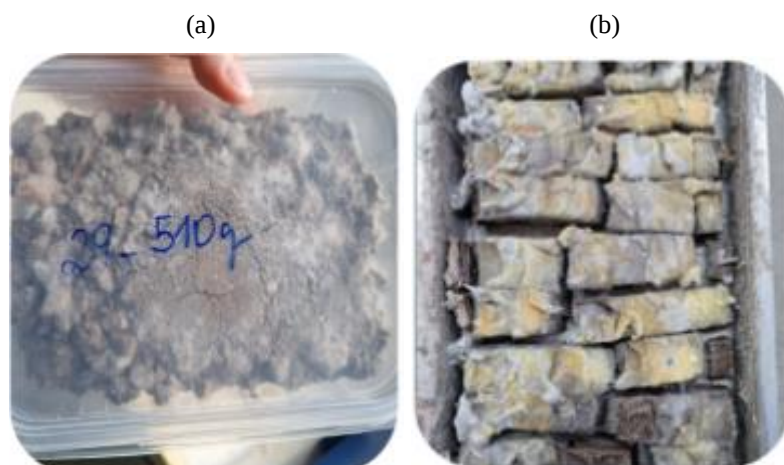
Figura 33: Fibras do lodo têxtil após secagem e tratamento.



Fonte: Autora (2022)

Como citado anteriormente no tópico 7.1.1., devido a possíveis problemas de vedação das vasilhas, que armazenavam o resíduo tratado enquanto se fazia tratamento das demais bateladas, algumas amostras foram danificadas, levando ao aparecimento de fungos na superfície de algumas amostras (figura 34). O aparecimento dos fungos também ocorreu devido a problemas técnicos que inviabilizaram o uso da estufa por aproximadamente uma semana, no meio do processo de secagem, cujas formas permaneceram dentro do equipamento desligado e resultaram em uma proliferação de fungos na camada superficial, em razão das condições internas do aparelho. As amostras foram separadas das demais e descartadas do experimento para não comprometer os resultados dadas as condições em que se encontravam.

Figura 34: (a) Amostras contaminadas por infiltração de ar e (b) contaminação por problemas com a estufa.



Fonte: Autora (2022)

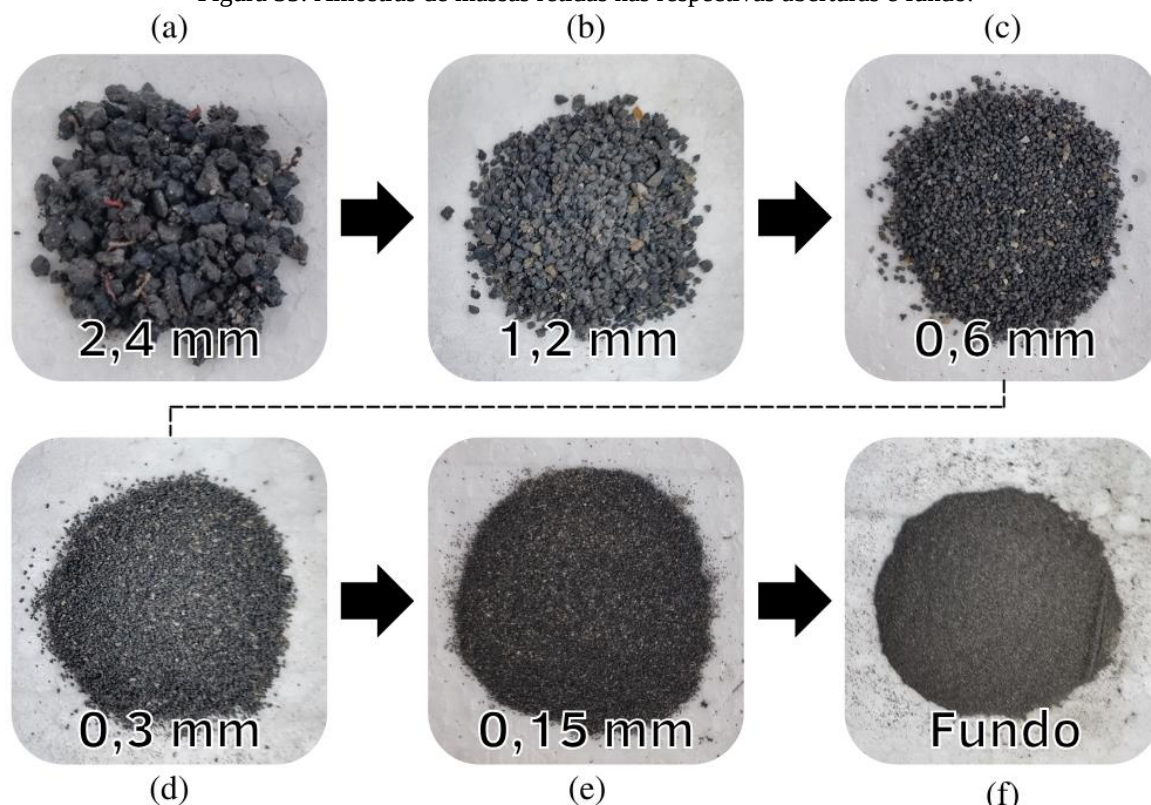
### 5.1.2 Composição granulométrica

De acordo com NBR NM 248 (2003), deve-se determinar a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. O somatório de todas as massas não deve diferir mais de 0,3% da massa inicial.

Dentre os ensaios realizados em laboratório, o que apresentou menor perda de massa foi no valor de 0,37%. Essa perda se dá em razão de uma parte do resíduo, após o tratamento, apresentar características de um material muito fino e pulverulento, que por vezes escapa pelas laterais das peneiras em forma de poeira durante a etapa de peneiramento no agitador de peneiras.

Após a realização do ensaio da composição granulométrica, separou-se uma fração de massa retida nas malhas (a) 2,4 mm, (b) 1,2 mm, (c) 0,6 mm, (d) 0,3 mm, (e) 0,15 mm e (f) fundo (Figura 35), para que fosse possível observar visualmente a estrutura de cada grão do resíduo correspondente à cada série de peneira. A disposição é vista da seguinte maneira:

Figura 35: Amostras de massas retidas nas respectivas aberturas e fundo.

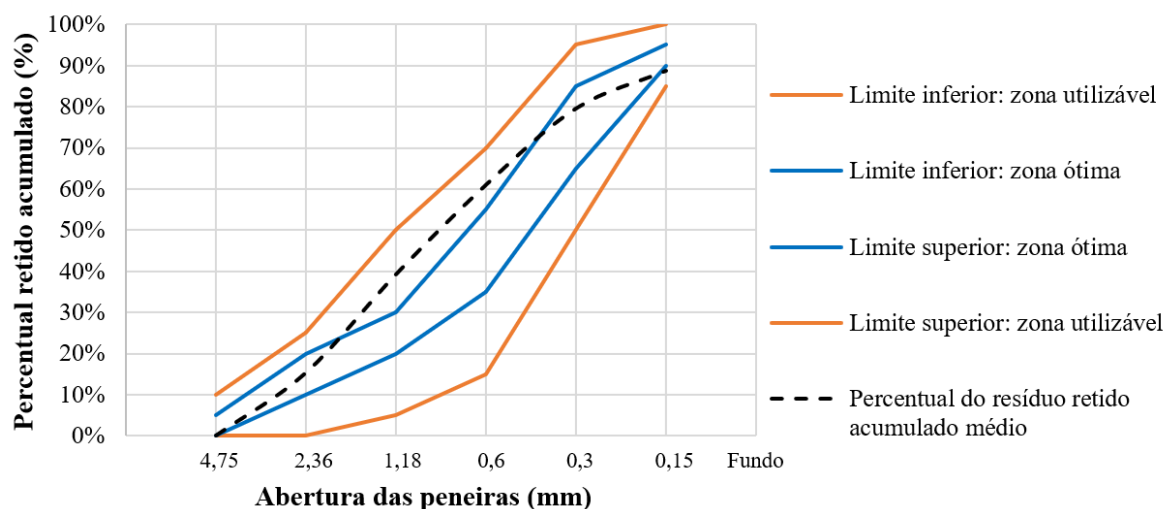


Fonte: Autora (2022)

Por meio do ensaio de granulometria foi possível determinar a curva granulométrica (Figura 36), a qual detalha o percentual de cada fração do grão presente na amostra, constando que o resíduo se encontra entre o limite superior da zona utilizável e o limite inferior da zona ótima, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019). Também se determinou o módulo de finura do lodo, apresentando 0,04%.

Figura 36: Curva granulométrica – Lodo têxtil.

## Composição granulométrica do resíduo



Fonte: Autora (2022)

### 5.1.3 Massa unitária

O ensaio de massa unitária do resíduo foi efetuado três vezes para confirmação de dados. Com a massa do recipiente com 0,5331 kg, conjunto recipiente-água com 11,9291 kg e densidade da água com 997,4 kg/m<sup>3</sup>, calculou-se o volume do recipiente igual a 0,0114 m<sup>3</sup>.

Tendo esse valor, pôde-se realizar o cálculo de massa unitária, que apresentou resultado médio de 706,3 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.1.4 Massa específica

A massa específica do lodo também foi realizada em triplicata. Usando os valores de massa e volumes de leitura inicial e leitura deslocada da proveta, calculou-se a massa específica do resíduo, tendo resultado médio igual a 1,62 g/cm<sup>3</sup>.

## 5.2 Aglomerante

Para os dados do aglomerante, o ensaio de massa unitária do cimento foi resultado em 931,5 kg/m<sup>3</sup>, assim como apresentou massa específica em um valor médio de 2,91 g/cm<sup>3</sup>.

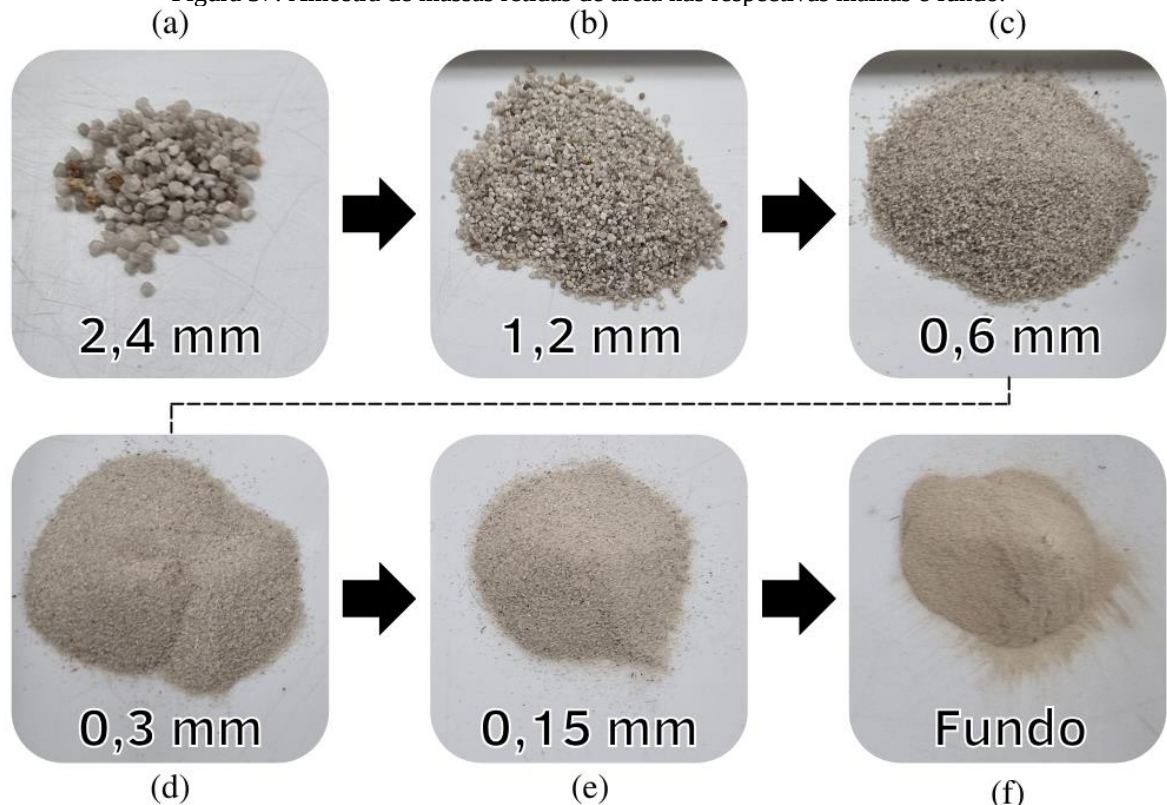
## 5.3 Agregado miúdo

### 5.3.1 Composição granulométrica e módulo de finura

A determinação da composição granulométrica da areia foi feita conforme a NBR NM 248 (2003) e preparada conforme a NBR 16915 (2021a), seguindo a sequência de separação de amostra, revolvimento, medição diametral e de altura do tronco de cone, quartearamento e separação de dois quartos da massa inicial destinadas à série de peneiras sobre o agitador.

Após a realização do ensaio da composição granulométrica, separou-se uma fração de massa retida de cada peneira, para que fosse possível observar visualmente a estrutura de cada grão do agregado correspondente à cada série de peneira. A disposição é vista conforme a Figura 37, que mostra a distribuição dos grãos variando entre as séries (a) 2,36 mm, (b) 1,18 mm, (c) 0,6 mm, (d) 0,3 mm, (e) 0,15 mm e (f) fundo.

Figura 37: Amostra de massas retidas de areia nas respectivas malhas e fundo.

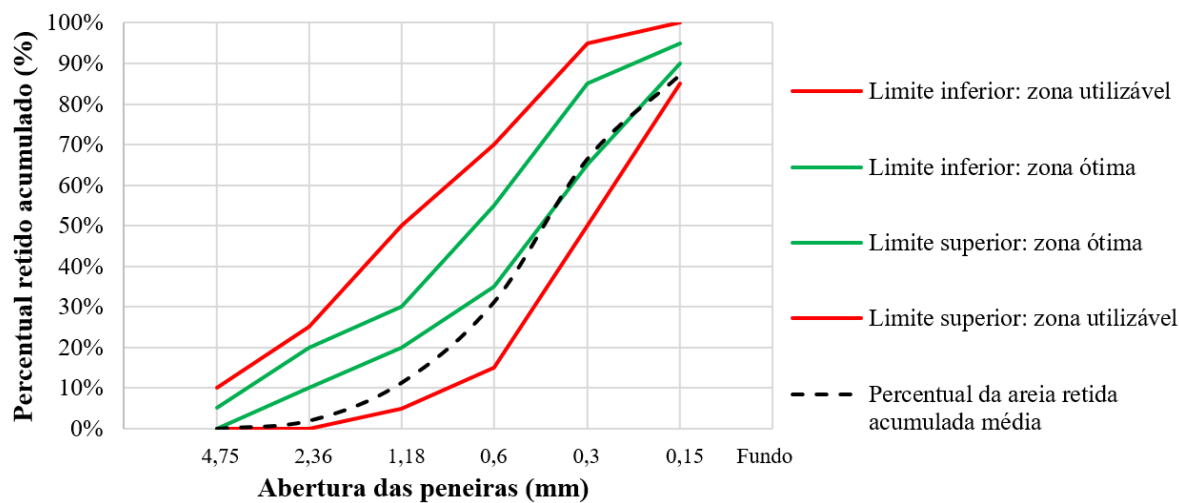


Fonte: Autora (2022)

Por meio do ensaio de granulometria foi possível determinar a curva granulométrica (Figura 38), a qual detalha o percentual de cada fração do grão presente na amostra.

Figura 38: Curva granulométrica – Agregado miúdo.

## Composição granulométrica do agregado miúdo



Para determinação do módulo de finura, de acordo com NBR NM 248 (2003), faz-se a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividida por 100. A areia apresentou módulo de finura igual a 0,03%.

### 5.3.2 Massa unitária

O ensaio de massa unitária do agregado foi efetuado em triplicata para confirmação de dados. Com a massa do recipiente com 0,404 kg, conjunto recipiente-água com 12,02103 kg e densidade da água com 997,2 kg/m<sup>3</sup>, calculou-se o volume do recipiente igual a 0,0118 m<sup>3</sup>.

Tendo esse valor, pôde-se realizar o cálculo de massa unitária, que apresentou resultado médio de 1573,4 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.3.3 Determinação da densidade e da absorção de água

Conforme os métodos da NBR 16916 (2021c) seguiram-se os parâmetros da mesma para determinar os resultados de massa específica, densidade úmida e densidade seca por meio do experimento. Nos métodos deste relatório, menciona-se a massa de 500 gramas de agregado miúdo para condição saturada superfície seca. Em seguida também foram separados 500 gramas para secagem em estufa, que resultou em uma massa seca de 495,6 gramas.

A massa total do conjunto foi lida por 1075,9 gramas, enquanto a massa do conjunto frasco e agregado foi de 769,4 gramas. Sendo assim, o volume de água adicionado ao frasco foi dado por 307,4 cm<sup>3</sup>. A determinação da massa específica foi dada por 2,63 g/cm<sup>3</sup>.

Sabendo-se que a massa da amostra na condição saturada superfície seca foi de 500 gramas, o volume do frasco 500 cm<sup>3</sup> e o volume de água adicionada ao frasco foi 307,4 cm<sup>3</sup>, a

densidade úmida ou massa específica do agregado saturado superfície seca tem como resultado 2,60 g/cm<sup>3</sup>. Por fim, para determinou-se a densidade seca ou massa específica aparente do agregado seco, resultando em 2,57 g/cm<sup>3</sup>.

#### 5.3.4 Teor de umidade

Fez-se a determinação do teor de umidade duas vezes para confirmação de dados. O frasco apresentou leituras de 392 e 393 ml. Aplicando o valor de densidade úmida do agregado saturado superfície seca, de 500 g/ml, obteve-se teores de 62,01 e 62,54 % de umidade, resultando em uma média de 62,28% de umidade para o agregado miúdo.

### 5.4 Argamassas

#### 5.4.1 Índice de consistência

Devido à ausência da mesa de consistência, equipamento solicitado pela NBR 13276 (ABNT, 2016), foi necessária a criação de uma metodologia de adaptação (figura 39), usando uma placa metálica sobre um agitador de peneiras, onde se substituiu as quedas da mesa de consistência pela vibração do aparelho, fixando um tempo de 22 segundos com frequência de 10 Herz.

Figura 39: Equipamento adaptado para o ensaio de consistência e ensaio.



Fonte: Autora (2022)

De acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016), a argamassa deve apresentar, ao fim do ensaio, diâmetro médio dentro do intervalo de 255 mm a 265 mm para passar no teste de consistência. Esses valores caracterizam um espalhamento médio da amostra que garante que a mesma possua um bom nível de trabalhabilidade, propriedade esta considerada como prioritária para um bom desempenho da argamassa. A tabela 3 apresenta os valores do índice de consistência para cada tipo de argamassa:

Tabela 3: Resultados de índice de consistência de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016).

| <b>Tipo da argamassa</b> | <b>Teor (%)</b> | <b>Índice de consistência (mm)</b> |
|--------------------------|-----------------|------------------------------------|
| <b>A-LOTEx0</b>          | 0               | 261                                |
| <b>A-LOTEx10</b>         | 10              | 263                                |
| <b>A-LOTEx20</b>         | 20              | 265                                |
| <b>A-LOTEx25</b>         | 25              | 262                                |

Fonte: Autora (2022)

Foram realizados diversos testes para determinação da relação água/aglomerantes, que inicialmente seria fixa para todos os traços, padrão e com substituição de lodo. Entretanto, ao passo que se finalizava os testes, notou-se que à medida que o teor de lodo na mistura aumentava, menos a argamassa se espalhava, muitas vezes não chegando ao limite mínimo do intervalo solicitado. Esse comportamento pôde se explicar ao fato do resíduo, após o processo de tratamento, apresentar volume significativo de material fino, esses que tendem a consumir a água mais facilmente, deixando a relação desproporcional.

Devido a isso, a relação água/aglomerantes se fixou pelo resultado do espalhamento dado nos testes de consistência e não na quantidade de água para cada mistura. Ou seja, cada traço possui uma massa de água diferente do outro, mas todos eles se encaixam dentro do intervalo de espalhamento de 255 a 265 milímetros. As proporções de cada tipo de argamassa estão detalhadas na tabela 4:

Tabela 4: Relação de água/aglomerantes de cada tipo de argamassa.

| <b>Tipo da argamassa</b> | <b>Teor (%)</b> | <b>a/agl.</b> |
|--------------------------|-----------------|---------------|
| <b>ALOTEx-0</b>          | 0               | 0,78          |
| <b>ALOTEx-10</b>         | 10              | 0,90          |
| <b>ALOTEx-20</b>         | 20              | 1,00          |
| <b>ALOTEx-25</b>         | 25              | 1,05          |

Legenda: a/agl. = água/aglomerantes (cimento e cal).

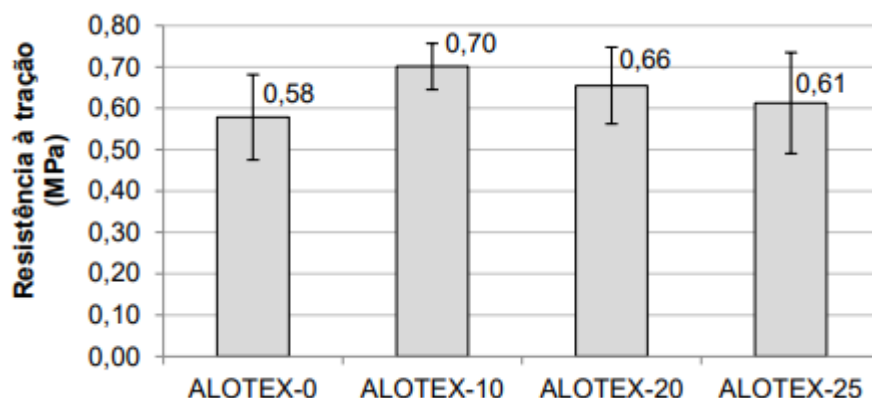
Fonte: Autora (2022)

#### 5.4.2 Estado endurecido

##### a) Resistência à tração na flexão e resistência à compressão

As argamassas com incorporação de lodo apresentam resultados superiores à argamassa padrão em relação à resistência à tração na flexão. A substituição em 10% da massa de areia pelo resíduo apresentou melhor resultado, de 0,70 MPa, um aumento de 20,69%, em comparação à argamassa sem lodo (Figura 40). O resultado de resistência à tração na flexão para a argamassa de referência foi semelhante ao encontrado por Sales, Sá e Santos (2014).

Figura 40: Resistência à tração na flexão.

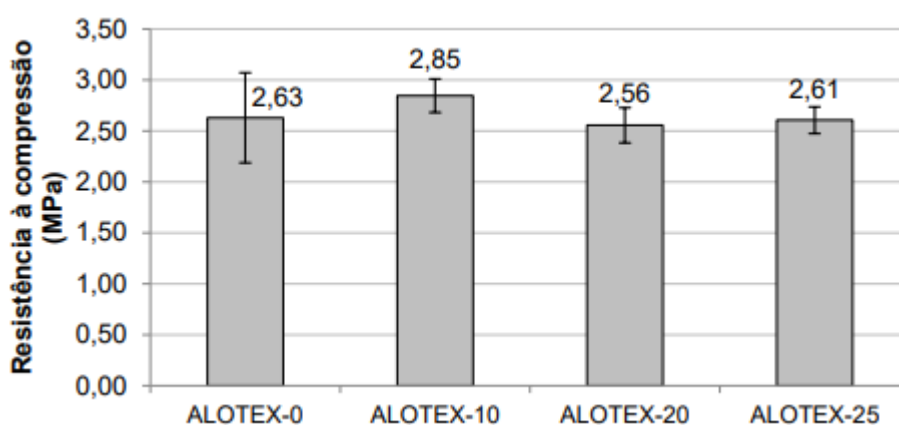


Fonte: Autora (2022)

As resistências à tração das argamassas com 20% e a com 25% de lodo tiveram aumento de 13,79% e 5,17%, respectivamente, em comparação à argamassa com 0% de lodo. Para os resultados de resistência à compressão, também houveram variações entre os traços com e sem o resíduo têxtil. Em 10% de incorporação do resíduo, a resistência média alcançou 2,85 MPa, apresentando aumento de 8,36% da capacidade de resistência à compressão, quando comparada à ALOTEX-0 (Figura 41).

O valor médio obtido para a resistência à compressão da ALOTEX-0 foi semelhante ao observado por Silva e Campiteli (2006), Sales, Sá e Santos (2014) e Marvila et al. (2018).

Figura 41: Resistência à compressão.



Fonte: Autora (2022)

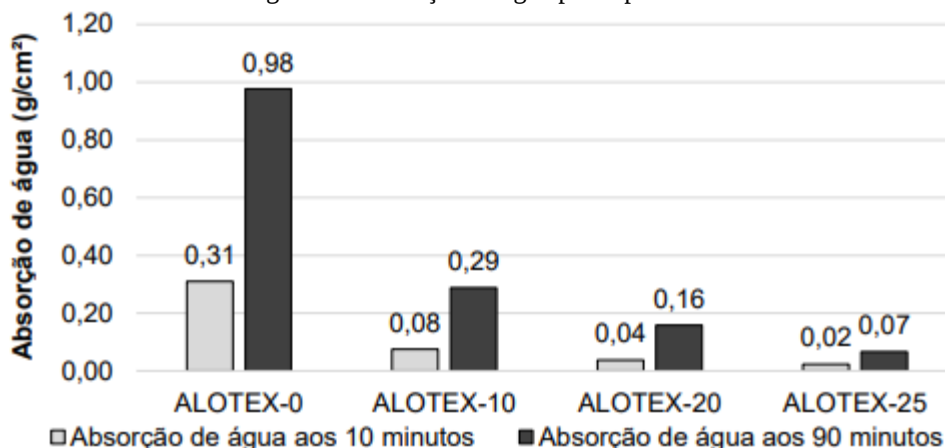
A ALOTEX-20 e ALOTEX-25 apresentaram redução de 2,66% e 0,76%, respectivamente, na resistência à compressão, em relação à argamassa de referência.

#### b) Absorção de água por capilaridade

Com o aumento da incorporação de resíduo nas argamassas há uma diminuição na absorção de água. Pode-se observar que as argamassas sem adição de resíduo, tanto aos 10 quanto aos 90 minutos, apresentaram valores maiores que os das argamassas incorporadas com lodo (Figura 42). Tal comportamento pode ter ocorrido devido à quantidade de material fino

existente na massa de lodo, o que pode justificar o preenchimento dos poros do corpo de prova, diminuindo o percentual de absorção. Aos 90 minutos, observou-se reduções de 70,41% para a argamassa com 10% de lodo, de 83,67% para 20% e de 92,86% para a de 25%, em relação a de referência.

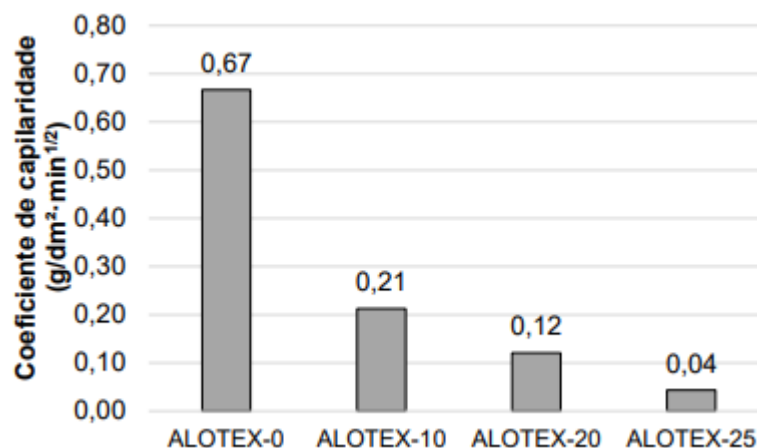
Figura 42: Absorção de água por capilaridade.



Fonte: Autora (2022)

À medida que se aumentou a incorporação dos teores, verificou-se a diminuição de aproximadamente 68,66%, 82,09% e 94,03% do coeficiente de capilaridade, respectivamente, em relação à argamassa padrão (Figura 43).

Figura 43: Coeficiente de capilaridade.



Fonte: Autora (2022)

#### 5.4.3 Classificação das argamassas

As argamassas podem ser classificadas conforme as características e propriedades que as mesmas apresentam, determinadas por métodos de ensaios, alguns desses realizados nesta pesquisa. De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas são designadas com a definição de características que apresentam no estado fresco e estado endurecido. Das

características citadas na norma, realizou-se na pesquisa ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e coeficiente de capilaridade.

A argamassa padrão, aos 28 dias de idade, tomada como referência, apresentou 2,63 MPa de resistência à compressão, 0,61 MPa de resistência à flexão e 0,67 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup> para coeficiente de capilaridade. A A-LOTEx-10 teve como resultados 2,85 MPa em compressão, 0,70 MPa em tração e 0,21 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup> para o coeficiente de capilaridade. Para o teor de 20% de lodo incorporado, os resultados foram de 2,56 MPa de compressão, 0,66 MPa de tração na flexão e 0,12 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup> de capilaridade. A A-LOTEx-25 apresentou valores de 2,61 MPa de resistência à compressão, 0,61 MPa de resistência à tração na flexão e 0,04 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup> para o coeficiente de capilaridade. As argamassas para revestimento estudadas podem ser classificadas de acordo com os intervalos das propriedades apresentadas na NBR 13281 (ABNT, 2005c) (Tabela 5).

Tabela 5: Classificação das argamassas.

| <b>Tipo de argamassa</b> | <b>Teor (%)</b> | <b>Designação</b> |
|--------------------------|-----------------|-------------------|
| <b>ALOTEx-0</b>          | 0               | R1, P3, C1.       |
| <b>ALOTEx-10</b>         | 10              | R1, P3, C1.       |
| <b>ALOTEx-20</b>         | 20              | R1, P3, C1.       |
| <b>ALOTEx-25</b>         | 25              | R1, P3, C1.       |

Fonte: Autora (2022)

## 6. CONCLUSÕES

Dessa forma, foi possível concluir que quanto à caracterização dos materiais houve uma redução dos valores de massa unitária e específica para o resíduo de 55,11% e 39,33%, respectivamente, quando comparado ao agregado miúdo, valendo salientar uma presença significativa da massa de material fino e pulverulento. Ou seja, para um mesmo volume, a quantidade de massa seca de lodo é aproximadamente duas vezes menor que a massa de areia, caracterizando o resíduo como um material menos denso. Também foram obtidos resultados de massa unitária e massa específica para o cimento, a nível de caracterização, como parte dos objetivos solicitados na pesquisa.

Já a granulometria do resíduo, ainda que não apresentasse um comportamento gráfico comum ao que geralmente ocorre com granulometria de areia, se encaixou adequadamente na zona utilizável para agregados miúdos, como exige a norma.

Tratando-se do traço da argamassa, os teores de incorporação do resíduo foram aplicáveis. Por apresentar baixa variação de resultados, comparado com a argamassa de referência, foi observado que a maior variação de comportamento mecânico não ultrapassou

20% de diferença. Isso demonstra que é possível adicionar à mistura um material que seria descartado para diminuir o consumo da areia como matéria prima, além disso o impacto nos resultados, de acordo com esse estudo, teria pouca variação.

Quanto aos ensaios mecânicos, notou-se que o teor de 10% de resíduo incorporado apresentou maiores resistências à compressão e à tração na flexão, em comparação à argamassa padrão. Entretanto, avaliando que os resultados das argamassas modificadas se assemelharam entre si e à de referência e que, ainda que a ALOTEX-10 tenha mostrado valores superiores às demais, o percentual de variação entre essas tem pouca significância. Além disso, a taxa de absorção de água diminuiu com o aumento da substituição gradual do lodo, o que leva a conclusão que o tipo ALOTEX-25 é mais interessante para uma possível aplicabilidade no uso do compósito, uma vez que há uso de maior quantidade de resíduo para resultados semelhantes aos de uma argamassa convencional.

As argamassas foram classificadas como R1, P3 e C1, quanto à resistência à tração na flexão, resistência à compressão e coeficiente de capilaridade, respectivamente, todas incluídas nos valores admitidos pelas normas da ABNT.

Logo, o conjunto desses fatores técnicos afirmam a viabilidade de aplicação, reforçando benefícios econômicos e ambientais, contribuindo tanto com a responsabilidade ambiental das indústrias têxteis, que geram esse resíduo, quanto com a diversificação de materiais concedidos ao setor da construção civil.

## 7. REFERÊNCIAS

ALVES, M. F. A. **Índice de eficiência hídrica em edificações industriais de lavanderias de jeans no Agreste Pernambucano**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

AMORIM, J. F. O.; PRAZERES, R. V.; SANTOS, C. O desenvolvimento do APL de confecções: um estudo socioeconômico sobre o Agreste Pernambucano. **Revista Economia Política do Desenvolvimento**, v. 3, n. 5. p. 39 - 56, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

\_\_\_\_\_. NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR 12208: Projeto de Estações Elevatórias de Esgoto Sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. NBR 13969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

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

\_\_\_\_\_. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

\_\_\_\_\_. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

\_\_\_\_\_. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

\_\_\_\_\_. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

\_\_\_\_\_. NBR 16915: Agregados: Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

\_\_\_\_\_. NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

\_\_\_\_\_. NBR 16972: Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BASTIAN, E. Y. O. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. São Paulo: CETESB; SINDITEXTIL, 2009. 85 p.

BAVARESCO, C. R. **Análise preliminar de riscos em uma estação de tratamento de água: estudo de caso**. 2018. 62 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do trabalho) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CAETANO, C. R. S. **Alternativas de aplicação de lodo gerado em estações de tratamento de água**. 2018. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2018.

COMETTI, J. L. S.; SILVA, F. L.; SANTOS, F. J. H.; LIMA, V. A. Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis (lavanderia de jeans) do município de Toritama-PE. In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2016. Campina Grande. **Anais** [...] Campina Grande/PB. 2016. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/II-024.pdf>

COSTA, R. F.; LIMA, L. R.; SOUZA, I. G. M.; SOUZA, M. V. Um estudo quanto a possível redução dos custos operacionais nas lavanderias têxteis que adotam processos sustentáveis. In: Congresso Brasileiro de Custos - ABC, 2014. Natal. **Anais** [...] Natal. 2014. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3861>. Acesso em: 8 abr. 2022.

DIAS JÚNIOR, M. L. **Incorporação de lodo têxtil em blocos cerâmicos**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Processos Químicos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

FAVARETTO, D. P. C. Análise técnica do processo de tratamento de efluentes de empresa de laticínios da região de Passo Fundo/RS. **Revista CIATEC-UPF**. v. 7, n. 2, 2015.

FERNANDES, A. K. S. **Reúso de Água no Processamento de Jeans da Indústria Têxtil**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2010.

FERRAZ JÚNIOR, A. D. N. **Tratamento de efluente têxtil em reator UASB seguido de biofiltro aerado submerso**. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

GOYAL, S.; SIDDIQUE, R.; JHA, S.; SHARMA, D. Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**. v. 219, p. 169 – 177. 2019. Ed Elsevier, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.023>.

GUIMARÃES, L. B.; MALAGÓN, L. A. G.; SILVA, J.; BARAÚNA, O. S.; MARQUES, J. J. S. Potencial de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água nas lavanderias industriais do APL de confecções do agreste de Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]** Gramado: CBENS, 2018. Autores associados, 10p. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/457>. Acesso em: 22 mar. 2022.

H2O AMBIENTAL. Adensadores. 2022. Disponível em: <https://www.h2oambiental.com.br/adensador/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

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

KASAW, E.; ADANE, Z.; GEBINO, G.; ASSEFA, N.; KECHI, A.; ALEMU, K. Incineration of textile sludge for partial replacement of cement in concrete production: a case of ethiopian textile industries. **Advances in Materials Science and Engineering**. v. 2021, p. 1 – 6. 2021. Hindawi, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1155/2021/9984598>.

LELOUP, W. A. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013.

LIMA, L. R. **Custos ambientais e a externalidade negativa das lavanderias têxteis do Polo de Confecções do Agreste de Pernambuco**. 2014. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.

LIMA, R. A. P. **Concretos Auto-adensáveis com incorporação de cinza de madeira da algaroba como filer alternativo**. 2019. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

LORENA, E. M. G; LORENA, C. M. G; MEDEIROS, R. M.; EL-DEIR, S. G.; HOLANDA, R. M.; ARAÚJO, V. D. Modelo de gestão de riscos em lavanderias de beneficiamento no arranjo produtivo local (APL) têxtil e de confecções de Pernambuco, Brasil. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 2, p. 620-640, 2018.

MENDES, M. R. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de subproduto da mineração de carvão e de lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria têxtil**.

1998. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOURA, L. S.; SILVA, C. L.; REIS, A. C. S.; MARINHO, E. P.; NÓBREGA, A. C. V.; CARNEIRO, A. M. P. Caracterização de lodo produzido nas lavanderias têxteis da região Agreste de Pernambuco para uso em materiais de construção alternativos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. e40910414078-e40910414078, 2021.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 13, n. 2, p. 352-357, 2009.

PETRY, N. S.; DELONGUI, L.; MULLER, A. L.; MASUERO, A. B.; MOLIN, D. C. C. D. Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 6, n. 2, p. 71-92, dez. 2017. ISSN 2318-1109. Doi: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2017.v6i2.1946>.

REIS, M. C. **Incorporação de resíduos de carvão vegetal em argamassas cimentícias**. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

SABOGAL PAZ, L. P. **Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno porte**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** v. 7, n. 4, p. S1983-41952014000400006, 2014.

SILVA, B. F. P.; FALCÃO, M. T. Reutilização dos resíduos do mármore e granito: alternativa sustentável para Boa Vista – Roraima. **Revista Multidisciplinar Pey Këyo Científico**. v. 5, n. 1, p. 79-91, 2019.

SOUTO, T. J. M. P. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no agreste pernambucano**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

SOUZA, W. A. **Tratamento de água**. 2007. 152 f. E-book: ISBN: 978-85-89571-37-1. CEFET/RN. Acesso em: 08 abr. 2022.

VIANA, M. A. **Avaliação da eficiência de estação de tratamento de efluente de lavanderia de beneficiamento de jeans no Arranjo Produtivo Local têxtil do Agreste Pernambucano**

– **Um estudo de caso.** 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.