

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

BRENO BURGUEIRA

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE LODO TÊXTIL  
CALCINADO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

JOINVILLE  
2026

BRENO BURGUEIRA

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE LODO TÊXTIL  
CALCINADO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso  
de Graduação em Engenharia Civil de  
Infraestrutura do Centro Tecnológico de  
Joinville da Universidade Federal de  
Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Viviane Lilian Soethe  
Parucker

Coorientadora: Dra. Valéria Bennack

JOINVILLE

2026

BRENO BURGUEIRA

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE LODO TÊXTIL  
CALCINADO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso  
de Graduação em Engenharia Civil de  
Infraestrutura do Centro Tecnológico de  
Joinville da Universidade Federal de  
Santa Catarina.

Joinville (SC) 03 de julho de 2026.

**Banca Examinadora**

---

Dra. Viviane Lilian Soethe Parucker  
Orientadora/Presidente

---

Dra. Valéria Bennack  
Coorientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Moisés Luiz Parucker  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Burgueira, Breno

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE LODO  
TÊXTIL CALCINADO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS / Breno  
Burgueira ; orientadora, Viviane Lilian Soethe Parucker,  
coorientador, Valéria Bennack, 2026.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,  
Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura,  
Joinville, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil de Infraestrutura. 2. Argamassa. 3.  
Lodo têxtil. 4. Calcinação. 5. Construção civil. I.  
Parucker, Viviane Lilian Soethe. II. Bennack, Valéria.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Civil de Infraestrutura. IV. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que, mesmo quando eu ainda não o conhecia, já me amava e cuidava de mim.

Aos meus pais, José Alberto Ruis Burgueira e Marilena Monteiro de Matos Burgueira, que sempre me amaram e acreditaram na importância da educação e do aprendizado.

Ao meu irmão, Pedro Burgueira, que caminha ao meu lado nos dias bons e ruins, sempre me incentivando a prosseguir.

À minha companheira, Beatriz, por partilhar dos meus sonhos e ansiedades, sempre orando e zelando por mim.

À Dra. Viviane Lilian Soethe e à Dra. Valéria Bennack, por todo o apoio e paciência. São professoras formidáveis, que excedem em gentileza e generosidade.

Ao meu amigo Diogo Zimmermann, que sempre esteve disponível para me auxiliar e me aconselhar na vida profissional e acadêmica.

Ao Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário Católica de Santa Catarina - Joinville.

À Lavanderia Têxtil Soeth, por todo o apoio e gentileza em me receber em suas instalações.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), muito obrigado.

Ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville, eu agradeço.

## RESUMO

A indústria têxtil e as lavanderias industriais geram volumes expressivos de lodo têxtil por meio do tratamento de seus efluentes cuja destinação final desse resíduo em incineradoras, ou aterros industriais gera altos custos logísticos e operacionais para as empresas. Como alternativa sustentável fundamentada na economia circular, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica da incorporação de lodo têxtil calcinado em pó na produção de argamassas de cimento Portland, em substituição parcial ao agregado miúdo. Para atenuar o decréscimo no desempenho mecânico apontado em investigações pregressas com o lodo *in natura*, conforme evidenciado por Anjos (2017) e Silveira (2020), foi proposto um processo térmico de calcinação a 800°C por 2 horas, com o propósito de eliminar a fração de matéria orgânica deletéria do resíduo.

No presente trabalho foi realizada a definição de traços com teores de substituição em massa de 0%, 2% e 5% de resíduo. Os resultados indicaram decréscimo moderado na resistência à compressão média de 12,83 MPa frente aos 15,58 MPa da referência. Em contraste, o teor de 5% mostrou-se tecnicamente inviável, por apresentar aumento expressivo da porosidade aberta 27,79% e uma queda severa na resistência mecânica para 0,95 MPa.

**Palavras-chave:** Argamassa. Lodo têxtil. Calcinação. Construção civil. Reutilização de resíduos.

## **ABSTRACT**

The textile industry and industrial laundries generate substantial volumes of textile sludge through wastewater treatment. The final disposal of this waste in incinerators or industrial landfills incurs high logistical and operational costs for companies. As a sustainable alternative grounded in the circular economy, this study aimed to evaluate the technical feasibility of incorporating calcined textile sludge powder into Portland cement mortars as a partial replacement for fine aggregate. To mitigate the decline in mechanical performance noted in previous investigations using untreated sludge as evidenced by Anjos (2017) and Silveira (2020) a thermal calcination process at 800°C for 2 hours was proposed to eliminate the deleterious organic matter fraction from the waste.

In this study, mix designs were defined with mass replacement levels of 0%, 2%, and 5% of waste. The results indicated a moderate decrease in mean compressive strength to 12.83 MPa compared to 15.58 MPa for the reference mix. In contrast, the 5% content proved to be technically unfeasible, as it led to a significant increase in open porosity to 27.79% and a severe drop in mechanical strength to 0.95 MPa.

**Keywords:** Mortar. Textile sludge. Calcination. Civil construction. Waste reuse.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Fluxograma evidenciando as etapas do tratamento de efluente para uma lavanderia.....                                   | 25 |
| Figura 2 - Sistema esquemático de tratamento de efluente para uma lavanderia têxtil                                               | 26 |
| Figura 3 - Cimento Votoran CP IV-32-RS 50kg.....                                                                                  | 32 |
| Figura 4 - Areia coletada para secagem.....                                                                                       | 33 |
| Figura 5 - Estufa utilizada para a secagem da areia.....                                                                          | 33 |
| Figura 6 - Agitador eletromagnético de peneiras.....                                                                              | 34 |
| Figura 7 - Decantadores e tanques de secagem de lavanderia têxtil.....                                                            | 35 |
| Figura 8 - Lodo têxtil coletado.....                                                                                              | 36 |
| Figura 9 - Fluxograma evidenciando as etapas de beneficiamento do lodo têxtil.....                                                | 38 |
| Figura 10 - Fracionamento em torrões do lodo têxtil para colocação na mufla.....                                                  | 39 |
| Figura 11 - Mufla utilizada para calcinação do lodo têxtil.....                                                                   | 40 |
| Figura 12 - Equipamentos do Moinho de Jarros e moedor manual.....                                                                 | 40 |
| Figura 13 - Moinho de Jarros utilizado para moer o lodo têxtil calcinado.....                                                     | 41 |
| Figura 14 - Lodo têxtil calcinado em pó após moagem com diâmetro inferior a 0,075mm.....                                          | 42 |
| Figura 15 - Misturador mecânico de argamassas.....                                                                                | 45 |
| Figura 16 - Moldes de corpos de prova utilizados para confecção das amostras.....                                                 | 46 |
| Figura 17 - Moldes de corpos de prova utilizados para confecção das amostras.....                                                 | 47 |
| Figura 18 - Corpos de prova desmoldados após 28 dias de cura.....                                                                 | 48 |
| Figura 19 - Curva da distribuição granulométrica da areia fina (agregado miúdo)....                                               | 52 |
| Figura 20 - Resistência mecânica à compressão em função da adição de resíduo.                                                     | 56 |
| Figura 21 - Micrografia obtida em MEV com 5000x de ampliação para traço referência (0% de lodo têxtil calcinado) aos 36 dias..... | 57 |
| Figura 22 - Micrografia obtida em MEV com 5000x de ampliação para traço contendo 2% de lodo têxtil calcinado aos 36 dias.....     | 58 |
| Figura 23 - Micrografia obtida em MEV com 5000x de ampliação para traço contendo 5% de lodo têxtil calcinado aos aos 36 dias..... | 59 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Resultado quantitativo por fluorescência de raios x de elementos presentes no lodo têxtil..... | 36 |
| Tabela 2 - traços definidos para a elaboração dos corpos de prova.....                                    | 44 |
| Tabela 3 - Perda de massa em porcentagem do lodo têxtil após calcinação à 800°C por 2h.....               | 51 |
| Tabela 4 - Índice de consistência para cada traço de argamassa.....                                       | 53 |
| Tabela 5 - Absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta de cada traço de argamassa.....       | 54 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$  – Micrometro

% - Porcentagem

$^{\circ}\text{C}$  – Graus Celsius

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de Alumínio (Alumina)

Ca – Cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

Cl – Cloro

cm – Centímetro

$\text{cm}^2$  - Centímetro Quadrado

$\text{cm}^3$  - Centímetro Cúbico

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

d – Diâmetro

DMC - Dimensão Máxima Característica

ETA – Estação de Tratamento de Águas

ETE – Estação de Tratamento de Efluente

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Óxido de Ferro

$\text{H}_2\text{O}$  – Hidróxido de Oxigênio

K – Potássio

$\text{K}_2\text{O}$  – Óxido de Potássio

kg – Quilograma

m – Metro

M – Mega

MF - Módulo de finura

$m_i$  = massa da amostra imersa

$m_{sat}$  = massa da amostra saturada

$m_s$  = massa da amostra seca

mg – Miligrama

Mg – Magnésio

MgO – Óxido de Magnésio

mm – Milimêtro

MPa - Mega Pascal

N - Newton

Na – Sódio

Na<sub>2</sub>O – Óxido de Sódio

NBR – Normativa Brasileira

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Óxido de Fósforo

P – Fósforo

Pa – Pascal

pH – Potencial Hidrogênionico

S – Enxofre

Si – Silício

SiO<sub>2</sub> – Dióxido de Silício

SO<sub>3</sub> – Óxido de Enxofre

UDESC – Universidade Estadual de Santa Catarina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                    | <b>14</b> |
| 1.1. OBJETIVOS.....                                                          | 15        |
| 1.1.1. Objetivo Geral.....                                                   | 15        |
| 1.1.2. Objetivos Específicos.....                                            | 16        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                         | <b>17</b> |
| 2.1 ARGAMASSAS.....                                                          | 17        |
| <b>2.1.1 Propriedades do estado fresco.....</b>                              | <b>18</b> |
| <b>2.1.2 Propriedades do estado endurecido.....</b>                          | <b>19</b> |
| 2.2 SUSTENTABILIDADE E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....       | 20        |
| <b>2.2.1 Impacto Ambiental da Indústria da Construção e do Cimento.....</b>  | <b>20</b> |
| <b>2.2.2 Conceito de Eco-eficiência e Economia Circular.....</b>             | <b>21</b> |
| <b>2.2.3 Classificação de Resíduos Sólidos Industriais.....</b>              | <b>22</b> |
| 2.3 O LODO DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL.....                              | 23        |
| <b>2.3.1 Composição Química e Física do Lodo Bruto.....</b>                  | <b>27</b> |
| <b>2.3.2 O Papel Deletério da Matéria Orgânica nas Argamassas.....</b>       | <b>27</b> |
| 2.4 ADIÇÕES MINERAIS E O PROCESSO DE CALCINAÇÃO.....                         | 28        |
| <b>2.4.1 O Princípio Térmico da Calcinação.....</b>                          | <b>29</b> |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                            | <b>31</b> |
| 3.1 MATERIAIS.....                                                           | 31        |
| 3.1.1 Aglomerante.....                                                       | 32        |
| 3.1.2 Agregado Miúdo.....                                                    | 32        |
| 3.1.3 Água de Amassamento.....                                               | 34        |
| 3.1.4 Lodo Têxtil.....                                                       | 35        |
| 3.2 MÉTODOS.....                                                             | 37        |
| 3.2.1 Processamento e Calcinação do Lodo Têxtil.....                         | 37        |
| 3.2.2 Distribuição Granulométrica da areia.....                              | 42        |
| 3.2.3 Dosagem e Definição dos Traços.....                                    | 43        |
| 3.2.4 Mistura e Ensaios no Estado Fresco.....                                | 44        |
| 3.2.5 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.....                               | 47        |
| 3.2.6 Ensaios no Estado Endurecido.....                                      | 48        |
| 3.2.7 Resistência à Compressão Axial.....                                    | 49        |
| 3.2.8 Análise de Microestrutura por Microscopia Eletrônica de Varredura..... | 50        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                        | <b>51</b> |
| 4.1 PERDA DE MASSA DO LODO CALCINADO.....                                    | 51        |
| 4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....                                     | 51        |
| 4.3 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....                                              | 53        |
| 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE E POROSIDADE ABERTA.....            | 54        |
| 4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA.....                                                | 55        |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 4.6 MEV.....                       | 56        |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b> | <b>60</b> |
| <b>6 TRABALHOS FUTUROS.....</b>    | <b>62</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>            | <b>63</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil possui elevada demanda de materiais construtivos e a cada dia busca melhorar o desempenho e diminuir os custos de materiais com a incorporação de novos aditivos e técnicas. Nesse contexto, observa-se um potencial material de incorporação na construção civil como o lodo têxtil, produzido a partir de processos de lavagem ou fabricação de artigos para o setor têxtil (FERNANDES, 2023).

A produção desse resíduo decorre do tratamento de efluentes (ETE), onde o material é depositado em tanques decantadores. O lodo têxtil é o resultado de toda a linha de produção, sendo composto majoritariamente por líquido e o restante por sólidos. Por esta razão, ele possui um aspecto pastoso, geralmente com coloração acinzentada e odor pungente, resultante da combinação de impurezas, produtos químicos e pigmentos para tingimento de tecidos (ANJOS, 2017).

O descarte inadequado deste rejeito representa um problema ambiental significativo. O lodo é contaminado por pigmentos variados e produtos químicos, sendo que muitos corantes contêm teores pequenos (porém não irrelevantes em uma escala produtiva) de metais pesados, formaldeído e solventes orgânicos, que representam riscos para os seres vivos quando não tratados corretamente (FERNANDES, 2023). A disposição deste resíduo em rios pode contaminar o solo e a água, além de gerar turbidez excessiva, dificultando a passagem natural de luz e prejudicando a manutenção do ecossistema aquático. Para o solo, a disposição incorreta pode gerar contaminação superficial e infiltrações para o lençol freático.

Para as indústrias, a destinação final do lodo têxtil em aterros industriais ou incineração são práticas de alto custo e que demandam uma logística significativa. O alto teor de umidade e o volume exacerbado que o lodo ocupa, mesmo após a secagem e prensagem, geram custos altos de transporte e de uso de aterro, por exemplo (SILVEIRA, 2020).

A reutilização de resíduos sólidos industriais em matrizes sólidas, como argamassas e argilas cerâmicas tem sido cada vez mais desenvolvida em diversas

linhas de pesquisa como alternativa de reaproveitamento e diminuição de impacto ambiental. Estudos precursores demonstraram ser possível a incorporação do resíduo na fabricação de blocos cerâmicos com resultados satisfatórios e inércia comprovada nos testes de lixiviação (HEREK et al., 2009).

Já para estudos focados na incorporação do lodo têxtil *in natura* em argamassas, como os realizados por Daniel Chraim dos Anjos (2017) e Edna Cristina de Aguiar Silveira (2020), resultaram em uma perda considerável em resistência mecânica do material. Contudo, é pertinente analisar minuciosamente os comportamentos obtidos nesses estudos, para que se possa propor e prosseguir com alternativas que possam viabilizar a incorporação do resíduo em argamassas, além de contornar os obstáculos mais críticos da influência do resíduo sobre o traço das amostras.

Dessa forma, o presente trabalho propõe com base em estudos antecessores, avaliar as tendências obtidas e propor uma nova abordagem para a incorporação do lodo têxtil em substituição ao agregado fino da argamassa por meio da incorporação de uma etapa de tratamento prévio do resíduo: o beneficiamento térmico de calcinação. Esta abordagem visa eliminar somente a fração orgânica do lodo e transformá-lo em uma adição mineral em pó com potencial pozolânico e refinador de poros. Espera-se que com a calcinação, o resíduo adquira características minerais que promovam melhor desempenho na matriz cimentícia, superando a perda de resistência observada anteriormente.

## 1.1. OBJETIVOS

Com a finalidade de proporcionar o uso do resíduo têxtil na construção civil e diminuir seu descarte em aterros, propõe-se os objetivos a seguir.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Verificar a viabilidade do uso do lodo têxtil calcinado na composição de argamassas em substituição parcial ao agregado miúdo, em acordo com os padrões e normas técnicas vigentes.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar os agregados quanto ao módulo de finura, dimensão máxima característica e curva granulométrica;
- Realizar pré-tratamento de calcinação no lodo têxtil e ajuste granulométrico para a incorporação e substituição de agregado miúdo;
- Definir o traço da argamassa em diferentes quantidades de resíduo têxtil;
- Documentar o efeito do lodo têxtil calcinado nos corpos de prova, desde seu estado fresco até o fim de seus 28 dias de cura;
- Determinar a resistência de compressão dos corpos de prova em acordo com a NBR 13279;
- Analisar as características morfológicas do lodo de lavanderia industrial calcinado através da realização de Microscopia Eletrônica de Varredura de Raios X (MEV).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo estabelece a base teórica para a compreensão e fundamentação do trabalho. Inicialmente, serão exploradas as definições e as funções físico-químicas dos componentes da argamassa convencional, detalhando suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Sequencialmente, a discussão é ampliada para o panorama da sustentabilidade na construção civil a fim de incentivar a promoção de uma solução circular para o ciclo de produção e destinação do resíduo estudado. Adiante, é feita uma descrição sobre o lodo têxtil e sua natureza de forma objetiva, analisando o impacto de sua fração orgânica e demais componentes. Por fim, é apresentada a ciência da calcinação como beneficiamento térmico que busca ativar o potencial pozolânico do resíduo.

### 2.1 ARGAMASSAS

Uma das classes de materiais cimentícios mais antigas e essenciais para a engenharia civil são as argamassas. Normativamente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 13281-1 define a argamassa como uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições com propriedades de aderência e endurecimento”. O desempenho das argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido é diretamente influenciado pela proporção mútua de seus constituintes e pela qualidade das interações físico-químicas que ocorrem na interface entre a pasta de aglomerante que usualmente compreende a relação proporcional entre a água e o material cimentício e as partículas de agregado.

As argamassas possuem ampla funcionalidade na construção civil e podem ser utilizadas para o assentamento de alvenaria de vedação ou estrutural, encunhamento de alvenaria, em revestimentos internos e externos, sendo também utilizadas para rebocos e até para fins decorativos (NBR 13281-1). Silveira (2020, *apud* AMBROZEWICZ, 2012) menciona alguns dos tipos mais comuns de argamassa, como: argamassa de cal, de cimento, mista, gesso, gesso projetada, industrializada e graute.

A compreensão do comportamento de uma argamassa tradicional requer a análise concisa de seus componentes básicos e seus respectivos papéis na estrutura final do material. Segundo Ornelles (2018), o aglomerante inorgânico, notadamente o cimento Portland, configura-se como o elemento ativo que atua como a base estrutural da mistura, agindo como um aglutinante que ao interagir com a água, deflagra reações exotérmicas de hidratação responsáveis pela pega, endurecimento e resistência mecânica. Complementarmente, o agregado miúdo, comumente constituído por areia natural, desempenha a função de esqueleto inerte, preenchendo volumetricamente a matriz para reduzir custos e conferindo estabilidade dimensional ao sistema ao absorver tensões internas de retração durante o processo de cura (HAWLITSCHKE, 2014). Por fim, o solvente de amassamento ou água, atua de forma dupla e interdependente, funcionando como agente fluido que confere a trabalhabilidade necessária no estado fresco e simultaneamente, como agente químico ativador que possibilita a hidrólise dos silicatos e aluminatos anidros do cimento, viabilizando a evolução da estrutura endurecida (SEGUNDO FILHO, 2020).

### **2.1.1 Propriedades do estado fresco**

A argamassa no estado fresco marca seu início após a mistura de seus componentes que, para o estudo em questão representa o cimento, água, areia e o lodo têxtil beneficiado em substituição parcial ao agregado miúdo. Nesta etapa a argamassa é manipulável para aplicação até que se atinja o tempo de pega. Para Segundo Filho (2020), a trabalhabilidade é uma das características fundamentais do estado fresco, sendo evidenciada pela “consistência, coesão e homogeneidade” do material utilizado. Uma argamassa com boa trabalhabilidade é aquela que não possui segregação excessiva ou perda de homogeneidade, além de possuir coesão e consistência suficientes para ser moldada, espalhada e compactada. Características como a incorporação de ar e presença de vazios, retenção de água e densidade da massa (NBR 13281-1) também influenciam nas características da argamassa em seu estado fresco.

As peculiaridades mencionadas previamente compõem apenas uma parcialidade de importantes propriedades da argamassa. É fundamental que seja realizado o controle dos materiais utilizados na fabricação da argamassa, a fim de

que esta possua as características desejadas durante sua manipulação. Caso seja necessário, ajustes no traço escolhido, alterações na granulometria dos materiais agregados e incorporação de aditivos podem modificar significativamente as características da argamassa no estado fresco (NATALLI et al., 2021).

### **2.1.2 Propriedades do estado endurecido**

Após o tempo de pega, a argamassa inicia a transição para uma estrutura sólida e organizada. Segundo Silveira (2020, apud BAÍA; SABATINI, 2012), as principais propriedades nesse estado são:

- **Resistência Mecânica:** Capacidade de suportar cargas (compressão, tração e flexão) sem fissurar ou deformar. É inversamente proporcional à relação água/cimento: menos água livre resulta em uma matriz mais densa e resistente.
- **Aderência:** Capacidade de se fixar de forma firme e durável aos substratos (blocos, tijolos ou concreto). É essencial para que os revestimentos de paredes e tetos trabalhem em conjunto com a estrutura.
- **Permeabilidade:** Grau de susceptibilidade do material à passagem de fluidos através de seus poros. É controlada pela compacidade da mistura e, se necessário, pelo uso de aditivos impermeabilizantes que barram a água por capilaridade.
- **Durabilidade:** Capacidade de manter o desempenho e as características originais ao longo da vida útil, resistindo a agentes climáticos (vento, calor e ciclos de umidade).

De uma perspectiva intrínseca ao material, pode-se dizer que as características supracitadas que começam a surgir no período de transição da argamassa do estado plástico para o estado endurecido, dependem diretamente da cinética de hidratação do cimento Portland. Ao reagirem com a água de amassamento, as fases minerais do clínquer dão origem a produtos hidratados dos quais o silicato de cálcio hidratado (gel C-S-H) é o constituinte majoritário e o principal responsável pelas propriedades de resistência do material (DA FONSECA,

2010). Paralelamente ao gel C-S-H, a hidratação libera cristais de hidróxido de cálcio, também denominado portlandita e fases aluminadas cristalinas.

À medida que os cristais crescem e se aglomeram, eles começam a preencher os espaços originalmente ocupados pela água livre, consolidando a microestrutura do material (DA FONSECA, 2010). A qualidade dessa matriz endurecida é avaliada por parâmetros físicos, como densidade aparente, a porosidade aberta e a absorção de água por imersão, que mede a capacidade da matriz de percolar fluidos por capilaridade. A magnitude desses índices físicos correlaciona-se com as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e resistência à flexão, isto é, quanto maior a densidade e menor o índice de vazios e poros abertos, maior tende a ser a capacidade de suporte apresentada pela argamassa (NEVILLE, 2016).

## 2.2 SUSTENTABILIDADE E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da construção civil desempenha um dualismo no desenvolvimento dos centros urbanos. Se por um lado, ele é um dos pilares no desenvolvimento de infraestrutura urbana, saneamento básico, habitação e crescimento econômico, por outro, atua como um dos maiores agentes de degradação ambiental desde a produção de seus insumos, até a geração de resíduos ao final da cadeia produtiva. Diante da crescente escassez de recursos naturais e do espaço limitado nos centros urbanos para a destinação de aterros e locais de descarte, o setor da construção civil tem sido motivado a repensar e reestruturar seus processos. Essa reestruturação passa obrigatoriamente pela busca de materiais eco-eficientes, por cadeias produtivas de insumos circulares, bem como o desenvolvimento de metodologias que viabilizem a incorporação de subprodutos e resíduos sólidos de outros setores industriais na matriz cimentícia (FERNANDES, 2023), mitigando o impacto gerado tanto pela extração de matérias-primas quanto pelo descarte inadequado de efluentes e lodos no meio ambiente.

### 2.2.1 Impacto Ambiental da Indústria da Construção e do Cimento

A sustentabilidade na construção civil exige uma análise holística que venha abranger desde a extração da matéria-prima até a destinação final do ciclo de vida

útil das edificações. Historicamente, o setor é caracterizado por um elevado consumo de insumos naturais, com destaque para agregados miúdos e graúdos.

Consoante a isto, o cimento Portland destaca-se como um insumo crítico no balanço ecológico global. O processo de fabricação do cimento, que envolve a descarbonatação do calcário em altas temperaturas, é uma atividade intensiva na emissão de gases de efeito estufa, sendo isoladamente responsável por mais de 8% de todas as emissões antrópicas globais de dióxido de carbono no planeta (ANDREW, 2019). Diante desse cenário, a otimização do uso do cimento e a substituição de frações dos componentes da argamassa por materiais alternativos deixaram de ser apenas escolhas econômicas e tornaram-se uma necessidade ecológica imediata para a redução da pegada de carbono do setor.

### **2.2.2 Conceito de Eco-eficiência e Economia Circular**

Como resposta aos impactos ambientais gerados ao longo dessas cadeias de processos produtivos, os conceitos de eco-eficiência e economia circular ganharam centralidade na engenharia de materiais (SISINNO; MOREIRA, 2005). A ideia base que circunda estes termos consiste em dissociar o crescimento industrial do consumo linear de recursos finitos, substituindo o modelo tradicional de extração, produção e descarte por fluxos circulares, onde o resíduo de uma cadeia produtiva passa a ser incorporado como insumo de valor agregado em outra. Tratando dos princípios da ecoeficiência, Sisinnno e Moreira (2005) afirmam que o “gerenciamento dos resíduos deveria privilegiar, em ordem de prioridade, a não-geração, a redução da geração, a reciclagem, e finalmente o tratamento ou disposição final”.

No âmbito dos materiais cimentícios como argamassas e concretos, a aplicação da economia circular viabiliza-se por meio do aproveitamento de resíduos industriais que podem atuar como adições minerais ou como substitutos parciais e totais dos agregados miúdos tradicionais (SISINNO; MOREIRA, 2005). Pesquisas consolidadas na literatura demonstram o sucesso técnico do reaproveitamento de materiais que outrora representavam passivos ambientais críticos para indústrias específicas, transformando-os em constituintes ativos ou inertes em concretos e argamassas (FERNANDES; SANTOS; NETO, 2024). Exemplos notáveis incluem a incorporação de cinza de casca de arroz (LUCIANA; ÂNGELA BORGES MASUERO; CARPENA, 2014), resíduos de fundição (DYER et al., 2021), sílica ativa e

metacaulim (FIGUEIREDO et al., 2014), os quais não apenas reduzem a demanda por insumos naturais virgens, mas frequentemente refinam a microestrutura das matrizes, aprimorando propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade do compósito final (NATALLI et al., 2021).

### **2.2.3 Classificação de Resíduos Sólidos Industriais**

A classificação e a sistematização de resíduos industriais, considerando sua toxicidade e enquadramento em categorias específicas são regidas pela norma ABNT NBR 10004-1, que fornece as diretrizes e normativas fundamentais para esse processo. Para viabilizar a reinserção de subprodutos industriais na construção civil, é imprescindível seguir as diretrizes normativas e garantir a segurança ambiental do material incorporado. Com base nessa norma, os resíduos industriais em estados sólidos e semissólidos, como os lodos provenientes de estações de tratamento de água e esgoto (ETA e ETE) são estratificados em duas grandes classes, conforme os riscos potenciais que apresentam à saúde pública e ao meio ambiente, como descrito a seguir:

- Classe I (Perigosos): Resíduos que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
- Classe II (Não Perigosos): São subdivididos em Classe II A (Não Inertes), que possuem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e Classe II B (Inertes), que quando submetidos a testes de solubilização estáticos e dinâmicos, não têm seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

A identificação precisa da classe do resíduo dita a complexidade de seu manejo, transporte e custos de destinação final. Em geral, resíduos considerados tóxicos necessitam de cuidados mais elevados e seu tratamento muitas vezes não é vantajoso (SISINNO; MOREIRA, 2005) para a incorporação de argamassas na construção civil. Os resíduos de classe II A, por sua vez, não possuem toxicidade elevada e muitas vezes são mais simples de serem estabilizados, ou de serem aplicados a uma solução que impede sua lixiviação.

Lodos originados de processos químicos industriais frequentemente carregam metais e elementos complexos em sua composição (FERNANDES, 2023), o que restringe seu descarte em aterros sanitários comuns e impõe custos elevados de gerenciamento às empresas geradoras (ANJOS, 2017). É exatamente essa classificação restritiva e o alto impacto financeiro associado ao descarte seguro que impulsionam o desenvolvimento de pesquisas voltadas à solidificação e ao encapsulamento desses lodos semi-sólidos dentro de matrizes de argamassa, unindo a viabilidade econômica do setor produtivo ao apelo sustentável da engenharia de infraestrutura.

### 2.3 O LODO DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL

O Brasil destaca-se como um dos principais protagonistas no cenário têxtil global, detendo a maior cadeia produtiva completa do Ocidente, a ponto de demandar a importação de expressivos volumes de insumos para suprir o pleno funcionamento do setor (ABIT, 2024).

Contudo, essa robustez industrial acarreta em significativos impactos ambientais decorrentes da geração de resíduos, dentre os quais o lodo têxtil desponta como um passivo ambiental no gerenciamento das indústrias de confecção e beneficiamento do vestuário. Estima-se que 1 tonelada de lodo têxtil é gerada a cada 24 toneladas de material têxtil produzido pela indústria (PINTO, 2009).

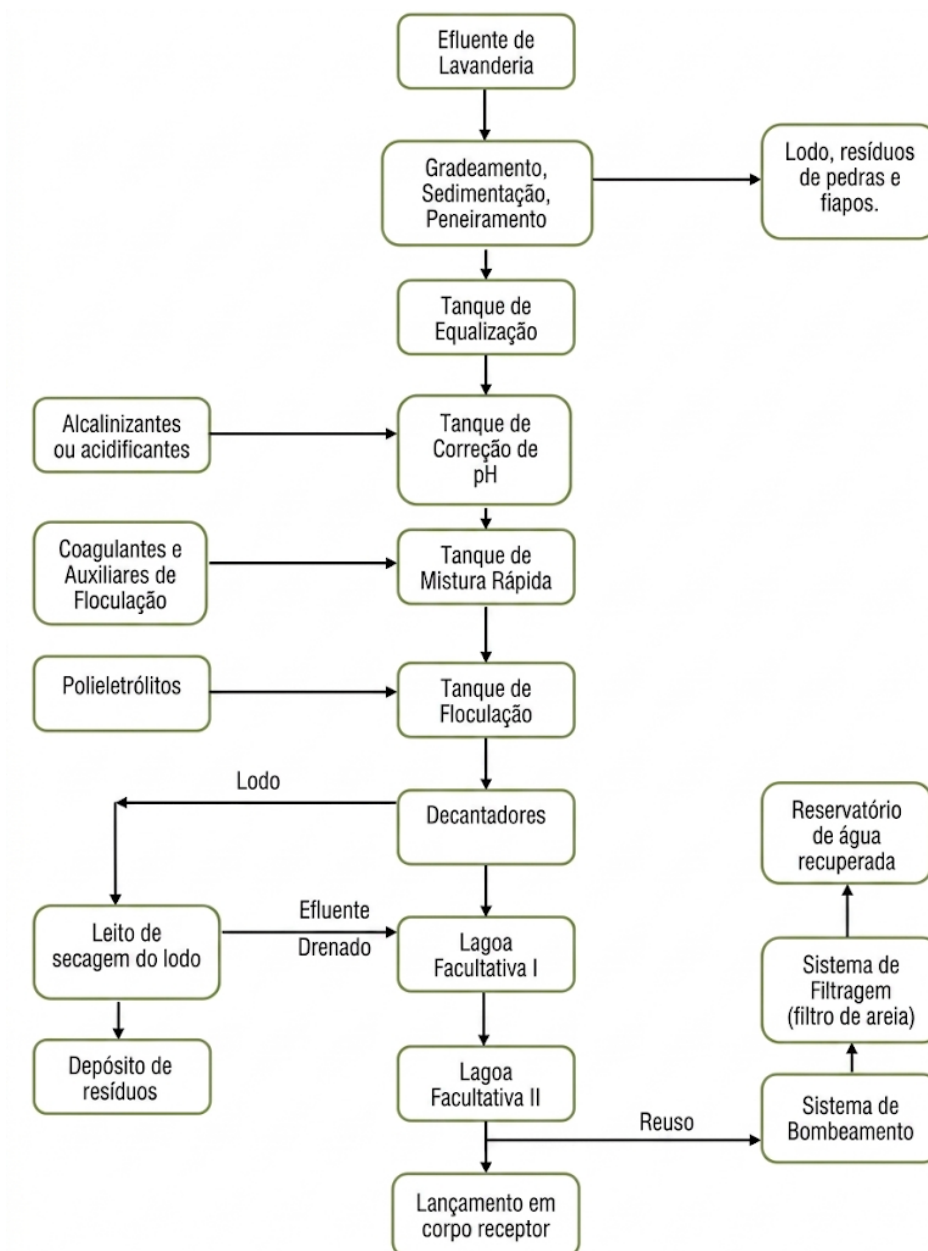
A geração deste resíduo está diretamente atrelada às Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) de indústrias e lavanderias industriais. Estas últimas operam em larga escala para conferir acabamento final, características estéticas e toque comercial a milhares de peças diárias de vestuário, uniformes e enxovais (COMETTI et al., 2016). Tal processo exige um consumo expressivo de recursos hídricos e uma ampla gama de insumos químicos complexos para lavagem e desinfecção, englobando detergentes ricos em tensoativos, percloroetileno, hidrocarbonetos alifáticos e agentes oxidantes, a exemplo do peróxido de hidrogênio e hipoclorito de sódio (SILVA, 2016).

Como o efluente bruto resultante dessas lavagens possui alta carga poluidora, seu descarte direto em rios e em descarga de esgoto urbano não são

permitidos (MOURA *et al.*, 2021). Diante disso, o líquido é direcionado ao tratamento primário da ETE, onde é submetido ao processo físico-químico de coagulação-floculação. Nessa etapa, agentes alcalinizantes ou acidificantes como a cal hidratada, são adicionados para a correção do pH, atuando em conjunto com coagulantes, frequentemente sulfato de alumínio ou sulfato de ferro, e polieletrólitos auxiliares (FERNANDES, 2023). Esses compostos químicos reagem com as impurezas em suspensão, corantes e fibras de tecido dissolvidas, promovendo a aglutinação das partículas em flocos densos que precipitam nos tanques decantadores.

A Figura 1 fundamentada nos estudos de Anjos (*apud* CASTRO, 2010), ilustra de maneira detalhada a progressão dessas fases operacionais. Nota-se que em lavanderias industriais de grande porte, a aplicação integral das etapas demonstradas no fluxograma é tecnicamente viável; todavia, o cenário se altera em empreendimentos de menor escala. Nestes casos, a implementação de lagoas facultativas costuma ser descartada, motivada prioritariamente pela restrição de espaço físico disponível para tais estruturas em zoneamentos urbanos de capitais e cidades com maior contingente populacional (MEDEIROS, 2011).

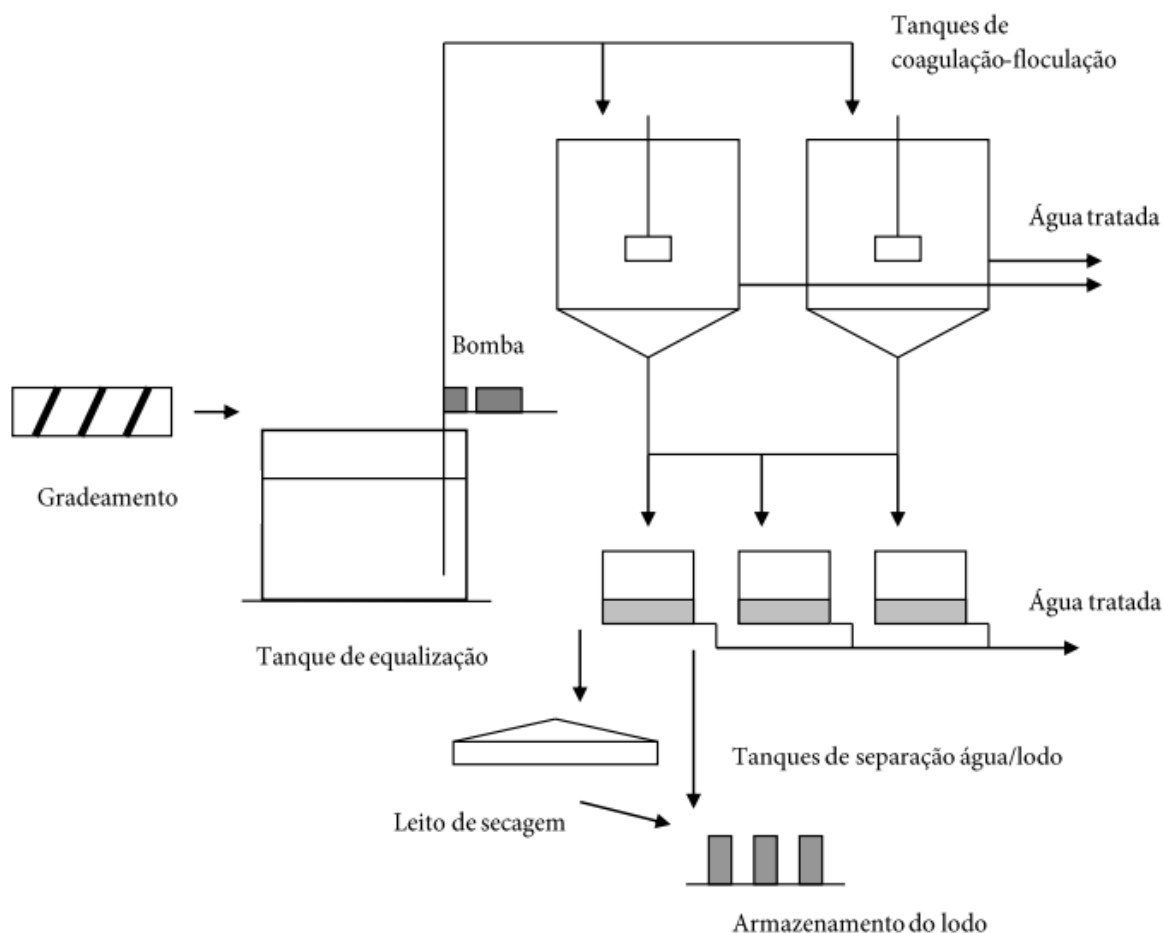
Figura 1 - Fluxograma evidenciando as etapas do tratamento de efluente para uma lavanderia



Fonte: Anjos (apud CASTRO, 2010).

Para uma lavanderia industrial têxtil local e em região urbana, como apresentado na Figura 2, pode-se verificar o arranjo dos equipamentos de tratamento principais que representam os separadores e geradores de lodo, juntamente com os depósitos de resíduos nos quais o lodo têxtil é depositado ainda em sua forma pastosa como uma etapa de depósito e perda adicional de água.

Figura 2 - Sistema esquemático de tratamento de efluente para uma lavanderia têxtil



Fonte: Buss *et al.* (2015)

A massa sedimentada no fundo dos decantadores apresenta inicialmente um aspecto pastoso e coloração acinzentada, reflexo da combinação de impurezas e pigmentos de tingimento (SILVEIRA, 2020), sendo composta majoritariamente por água, cerca de 95% de sua constituição total e apenas 5% de frações sólidas (BALOTA, 2018). Para viabilizar seu gerenciamento e transporte subsequente para aterros industriais, o lodo é conduzido a leitos de secagem externos para exposição à luz solar e ao vento. Esse procedimento elimina a água livre e reduz o material a uma massa semi-sólida com umidade residual que após passar por prensagem mecânica para redução volumétrica definitiva, condensa toda a carga química residual do processo produtivo.

### 2.3.1 Composição Química e Física do Lodo Bruto

Fisicamente, o lodo extraído diretamente dos decantadores e leitos de secagem apresenta-se como uma pasta de consistência semi-sólida e coloração escura, caracterizada por um teor de umidade livre que pode variar a mais de 90%, a depender do nível de desidratação mecânica da planta industrial (BALOTA, 2018). Do ponto de vista químico, os óxidos mais comuns encontrados no lodo têxtil *in natura* variam de acordo com o país, região e especificidade da indústria em que o material têxtil é beneficiado. Moura *et al.* (2021) demonstra essa diferença para diversas regiões do Brasil associadas a partir de obras de diversos autores. Dentre os óxidos de maior preponderância na composição do resíduo, destaca-se o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ).

A elevada concentração de óxido de cálcio e alumina está intrinsecamente ligada ao uso intensivo de cal e sulfato de alumínio na etapa de neutralização e floculação do efluente na ETE (ANJOS, 2017). Paralelamente à sua fração mineral, o lodo em seu estado natural abriga uma fração orgânica altamente expressiva. Conforme Moura *et al.* (2021), a partir da relação de perda de massa dada pelo processo de calcinação e posterior análise química, a matéria orgânica total presente no lodo da lavanderia industrial bruto ficou em torno de 20%. Essa coexistência de uma fração mineral rica em óxidos com uma abundante fração orgânica confere ao lodo têxtil bruto características complexas e reações altamente deletérias quando inserido de forma direta em sistemas cimentícios alcalinos.

### 2.3.2 O Papel Deletério da Matéria Orgânica nas Argamassas

O principal obstáculo técnico identificado nas investigações pioneiras sobre a incorporação direta de lodo têxtil bruto ou meramente seco em matrizes de cimento Portland reside na ação prejudicial exercida por sua fração orgânica. Estudos experimentais prévios, como os conduzidos por Anjos (2017) e Silveira (2020) na UFSC, evidenciaram que a introdução do resíduo sem beneficiamento prévio do resíduo provoca uma degradação severa nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas.

Quimicamente, a matéria orgânica e os tensoativos residuais presentes no lodo interferem de forma direta nas reações cinéticas de hidratação do cimento. Estes compostos orgânicos atuam retardando o tempo de pega e adsorvendo-se na superfície dos grãos de cimento anidros, o que cria uma barreira física que dificulta o contato com a água de amassamento e impede a precipitação e o crescimento adequado das agulhas cristalinas de silicato de cálcio hidratado (NEVILLE, 2016).

Fisicamente, a presença da matéria orgânica e das fibras não dissolvidas altera de forma crítica a reologia do material no estado fresco. O lodo bruto demanda volumes de água substancialmente maiores para atingir índices de trabalhabilidade aceitáveis, o que eleva a relação água/cimento global da mistura. Durante o processo de cura, a evaporação dessa água em excesso que não reagiu combinada com a incapacidade da matéria orgânica de estabelecer ligações químicas estáveis com a pasta endurecida, resulta em um aumento linear da porosidade aberta e do índice de absorção de água por capilaridade (SILVEIRA, 2020).

O mapeamento microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de Anjos (2017), demonstrou que a interface matriz-resíduo converte-se em uma zona frágil, densamente povoada por macroporos abertos e vazios internos que se torna mais perceptível a cada acréscimo de teor de lodo têxtil nos traços subsequentes ao referência (0%). Como consequência macroscópica direta dessa fragilização estrutural, observa-se um decréscimo drástico na resistência à compressão axial e na resistência à flexão das argamassas, mesmo para baixos teores de adição, mas com perdas acentuadas para os corpos de prova a partir de 2% (SILVEIRA, 2020).

Diante desse comportamento limitante, Fernandes *et al.* (2024) aponta para a necessidade de se realizar o processo de calcinação do lodo têxtil, eliminando-se a fração orgânica deletéria e promovendo-se a ativação térmica de seus constituintes minerais antes de sua introdução em matrizes cimentícias.

## 2.4 ADIÇÕES MINERAIS E O PROCESSO DE CALCINAÇÃO

No aproveitamento de resíduos industriais complexos, como o lodo de lavanderia têxtil, a eficácia de sua adição no traço da argamassa está intrinsecamente ligada à aplicação de tratamentos preliminares de moagem e térmicos, para alterar algumas de suas características negativas supracitadas que

dificultam a consolidação de um processo de cura satisfatório, resistência mecânica e durabilidade na aplicação de argamassas. O processo térmico de calcinação visa contornar parte desses obstáculos promovendo a eliminação de componentes prejudiciais como a matéria orgânica e alterando a estrutura cristaloquímica dos óxidos presentes.

Desta forma, a aplicação de calcinação e diminuição dos granulares através de processos mecânicos, busca transformar o resíduo em adição mineral que tem como característica a capacidade de reagir quimicamente com os produtos da hidratação do cimento Portland. Essas adições denominadas pozolanas são compostas por silício ou alumínio em estado amorfo que possuem propriedades aglomerantes somente quando dispersos em um meio altamente alcalino na presença de água. Então, esses óxidos reagem com o hidróxido de cálcio ou Portlandita, resultando no silicato de cálcio hidratado (NEVILLE, 2016).

A formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) dada pelo agente pozolânico, influencia diretamente no aumento da resistência mecânica e na promoção de uma matriz cimentícia coesa (DA FONSECA, 2010). Além do efeito químico, as adições minerais exercem o chamado "efeito fíler" ou físico, no qual suas partículas finas preenchem os espaços vazios existentes entre os grãos de cimento e os agregados miúdos. Essa ação conjunta promove um refinamento na estrutura de poros abertos, reduzindo o diâmetro dos capilares internos, dificultando a percolação de agentes agressivos como sulfatos, elevando de forma significativa a durabilidade e a capacidade de suporte mecânico do compósito final.

#### **2.4.1 O Princípio Térmico da Calcinação**

A calcinação consiste no beneficiamento térmico de queima controlada conduzido em temperaturas elevadas, geralmente utilizando fornos mufla ou rotativos, com o objetivo de induzir a decomposição térmica, a transição de fases minerais e a eliminação de frações voláteis de um material.

No beneficiamento do lodo têxtil, o aumento progressivo da temperatura desencadeia uma sequência de reações físicas e químicas. Inicialmente, o aquecimento promove a completa eliminação da água livre e daquela adsorvida nos poros da massa semi-sólida. Subsequentemente, ao atingir faixas de temperatura superiores a 300°C e 500°C, ocorre a combustão e a volatilização integral de toda a

matéria orgânica residual, tensoativos e gorduras presentes no lodo, etapa crucial para a eliminação dos compostos que de outra forma, retardariam o tempo de pega do cimento (NBR 9382). Por fim, em temperaturas ainda mais elevadas, verifica-se a desidratação das fases argilosas e minerais cristalinas, como os hidróxidos de alumínio.

Ao observar o trabalho desenvolvido por Fernandes (2023), é possível compreender na prática os resultados da calcinação do lodo têxtil e sua aplicação como material cimentício suplementar. O mesmo autor demonstra que calcinações entre 600°C a 800°C do material, resultam na faixa ideal de desempenho, onde a partir da obtenção do patamar de 600°C, ocorre a eliminação da matéria orgânica.

Em outro estudo publicado, desta vez sobre o uso de lodo têxtil calcinado para a elaboração de concreto seco, Fernandes *et al.* (2024) demonstrou que a amostra de lodo bruta não é ideal para a aplicação em concreto, mas que o lodo calcinado e moído, de fato trazia melhorias de resistência mecânica e redução de porosidade, com destaque para o uso de até 10% de lodo têxtil calcinado no traço.

Neville (2016) traz a ideia de que materiais de potencial pozolânico possuem seus efeitos mais aproveitados quando moídos em menor granulometria, pois também se beneficiam do fator de empacotamento gerado no material, o que corrobora com os resultados obtidos por Fernandes *et al.* (2024).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados no programa experimental, bem como os procedimentos adotados para o processamento do resíduo, a caracterização das matérias-primas, a dosagem, a moldagem e a execução dos ensaios no estado fresco e endurecido dos respectivos traços de argamassa.

O roteiro experimental desta obra foi elaborado em observação aos estudos precursores de Anjos (2017) e Silveira (2020), nos quais a presença de matéria orgânica e a umidade do lodo têxtil bruto resultaram em zonas frágeis e perda acentuada de resistência mecânica. Desta forma, na expectativa de sanar alguns dos questionamentos gerados nos estudos anteriores, introduziu-se a etapa de calcinação do resíduo antes de sua incorporação como substitutivo parcial ao agregado miúdo.

#### 3.1 MATERIAIS

Para a confecção das matrizes cimentícias deste estudo, foram empregados quatro materiais principais: cimento Portland, agregado miúdo, água de amassamento e o lodo têxtil calcinado em pó. Cada um desses constituintes desempenha um papel específico e interdependente no comportamento da argamassa, influenciando diretamente suas propriedades tanto no estado fresco quanto no endurecido.

O cimento Portland atua como o aglomerante ativo da mistura, deflagrando as reações de hidratação essenciais para o ganho de resistência mecânica da argamassa. Já agregado miúdo natural atua como o esqueleto inerte da matriz, fornecendo estabilidade dimensional ao sistema e auxiliando no controle da retração por secagem.

A água de amassamento funciona como o agente fluido ativador, sendo indispensável para a hidratação dos grãos de cimento e para conferir a trabalhabilidade adequada à mistura.

Por fim, o lodo têxtil calcinado em pó insere-se como o maior agente de variabilidade de estudo neste trabalho, atuando como uma adição cuja substituição parcial visa avaliar não apenas a viabilidade de encapsulamento sustentável do resíduo, mas também os reflexos de sua nova estrutura mineralógica na microestrutura do material endurecido.

### 3.1.1 Aglomerante

Foi utilizado o Cimento Portland Pozolânico da linha “VOTORAN TODAS AS OBRAS”, classificado comercialmente como CP IV-32-RS (Figura 3) indicado para a aplicação em rebocos, concretos tradicionais, contrapiso e lajes. A escolha desse aglomerante é dada por sua ampla aplicação comercial na indústria da construção civil local e por servir de linha de base comparativa direta com os trabalhos de Anjos (2017) e Silveira (2020).

Figura 3 - Cimento Votoran CP IV-32-RS 50kg



Fonte: Votorantim Cimentos (2026)

### 3.1.2 Agregado Miúdo

O material utilizado como agregado miúdo foi a areia fornecida pelo Laboratório de Materiais de Construção da UFSC – Campus Joinville. O depósito do material era em local externo e sua coleta foi realizada manualmente com auxílio de ferramentas básicas e fracionado em bandejas metálicas (Figura 4).

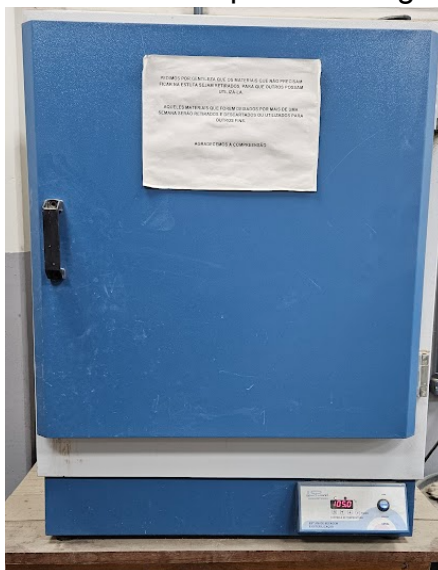
Figura 4 - Areia coletada para secagem.



Fonte: Autor (2026)

Visando eliminar a umidade residual que poderia comprometer o controle da relação água/cimento nos traços de argamassa, o agregado foi submetido a um processo de secagem em estufa (Figura 5) a uma temperatura média de 105°C durante um período de 24 horas.

Figura 5 - Estufa utilizada para a secagem da areia.



Fonte: Autor (2026)

Posteriormente, a areia foi caracterizada quanto a sua distribuição granulométrica para garantir um maior controle e homogeneidade dos traços. Nesta etapa, a areia já seca foi fracionada e passou por um processo de peneiramento por vibração em um agitador eletromagnético de peneiras, apresentado na Figura 6. Para este processo foram utilizadas as peneiras com as aberturas relevantes dos tamanhos 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 600 $\mu$ m, 300 $\mu$ m, 150 $\mu$ m e fundo. Os procedimentos e recomendações da secagem na estufa, peneiramento e classificação do módulo de finura foram obtidos em atendimento à normativa vigente NBR NM 248 .

Figura 6 - Agitador eletromagnético de peneiras



Fonte: Autor (2026)

### 3.1.3 Água de Amassamento

A água empregada para o amassamento das argamassas provém da rede pública de abastecimento local (Águas de Joinville), livre de teores prejudiciais de impurezas, óleos, ácidos ou matéria orgânica, conforme os parâmetros normativos da NBR 15900 para produção de matrizes cimentícias.

### 3.1.4 Lodo Têxtil

O resíduo utilizado consiste no lodo têxtil gerado no processo de tratamento de efluentes de uma lavanderia industrial situada no município de Joinville, estado de Santa Catarina. O resíduo obtido para os ensaios neste trabalho pertencem à mesma fonte de coleta dos trabalhos de Anjos (2017) e Silveira (2020). A coleta do lodo foi realizada de forma manual com ferramentas básicas. O material foi extraído do tanque de secagem apresentado na Figura 7 e armazenado em um recipiente de fecho hermético para ser transportado.

Figura 7 - Decantadores e tanques de secagem de lavanderia têxtil.



Fonte:Autor (2026).

O lodo em seu estado natural apresenta caráter pastoso, elevado teor de umidade e expressiva fração orgânica decorrente do processamento de lavagem e higienização de tecidos. Sabe-se que sua composição pode variar para cada tipo de indústria, região e tipo de beneficiamento realizado nos tecidos, como lavagem, pigmentação, estamparia e afins (SILVEIRA, 2020).

Como pode ser observado na Figura 8, o material coletado possui característica de coloração acinzentada, areia e granulares diversos e o restante da massa possui aspecto físico aglutinado com teor de umidade residual.

Figura 8 - Lodo têxtil coletado



Fonte: Autor (2026)

Considerando a variabilidade da composição do resíduo, Anjos (2017) realizou a caracterização química do material proveniente do mesmo tanque de secagem captado pelo presente estudo, por meio da técnica de Fluorescência de raios x, com os resultados apresentados na Tabela 1. Portanto, no presente será considerado que as características do lodo indicadas na Tabela 1 se mantiveram equivalentes a do material analisado por Anjos (2017), uma vez que a fonte da matéria prima foi a mesma.

Tabela 1 - Resultado quantitativo por fluorescência de raios x de elementos presentes no lodo têxtil

| Elemento | % na Amostra | Padrão                         |
|----------|--------------|--------------------------------|
| Al       | 17           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Ca       | 63,1         | CaO                            |
| K        | 0,4          | K <sub>2</sub> O               |
| Cl       | 0,2          | Cl                             |
| S        | 4,1          | SO <sub>3</sub>                |
| P        | 2,2          | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |
| Si       | 5,1          | SiO <sub>2</sub>               |
| Na       | 1,2          | Na <sub>2</sub> O              |
| Mg       | 6,3          | MgO                            |
| Fe       | 0,3          | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Sr       | 0,1          | SrO                            |

Fonte: Anjos (2017)

Analisando a Tabela 1, pode-se obter as informações a respeito das concentrações de materiais presentes no resíduo onde o cálcio, o alumínio e o magnésio na forma de óxidos se sobressaem em sua composição. Na sequência, é feito um detalhamento sobre a manipulação deste resíduo através do beneficiamento térmico e moagem para transformá-lo em uma adição mineral em pó com potencial pozolânico.

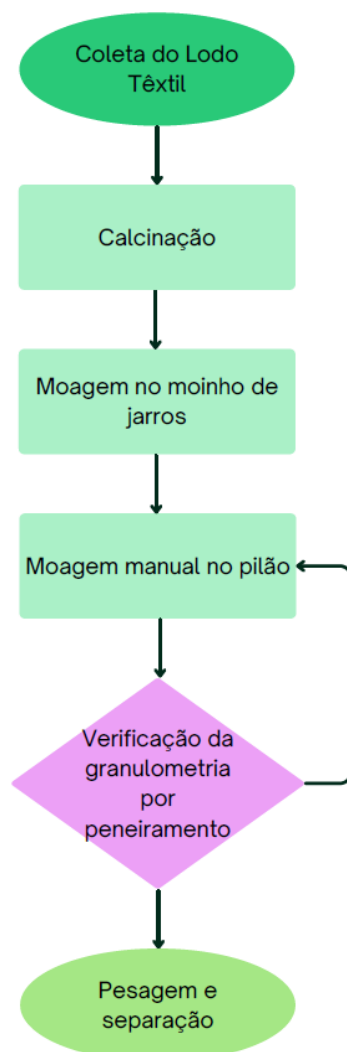
### 3.2 MÉTODOS

A definição dos métodos utilizados para a elaboração dos corpos de prova e ensaios foram baseados nos equipamentos disponíveis e nas normativas vigentes, que serão devidamente descritos para cada uma das etapas adiante. O roteiro de ensaios para fins de compreensão pode ser percebido em uma primeira parte que compreende o pré-tratamento do lodo têxtil, a preparação e separação da areia como agregado miúdo, água de amassamento e cimento. Uma segunda parte realizada consistiu na preparação dos traços, execução do ensaio de espalhamento na *flow table* para avaliação do índice de consistência da argamassa em seu estado fresco e moldagem dos corpos de prova. No final desta seção é apresentada a forma de verificação da porosidade aberta e da absorção de água da argamassa após 28 dias de cura, caracterização por MEV-EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura - Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X).

#### 3.2.1 Processamento e Calcinação do Lodo Têxtil

O processo de pré-tratamento do lodo têxtil foi realizado como apresentado na Figura 9:

Figura 9 - Fluxograma evidenciando as etapas de beneficiamento do lodo têxtil



Fonte: Autor (2026)

A coleta do lodo têxtil foi realizada manualmente *in loco* nos tanques de decantação secundários mencionados na seção anterior. O material estava em condição aparentemente seca, contando apenas com umidade residual por conta de sua armazenagem prévia pelo próprio sistema de tratamento de efluentes e resíduos. Desta forma, foi apenas armazenado em um recipiente sem incidência de luz direta e sem contato com umidade. A Figura 8 demonstra o aspecto visual do resíduo no dia da coleta.

Dando início ao procedimento de calcinação, o lodo passou por um fracionamento em pequenos torrões. Essas porções (cerca de 50g cada) tiveram a pesagem aferida para permitir o cálculo da perda de massa após a conclusão do

ciclo térmico (Figura 10). Na sequência, o material foi transferido para cadinhos cerâmicos resistentes a altas temperaturas, sendo então organizados no interior da mufla para o beneficiamento.

Figura 10 - Fracionamento em torrões do lodo têxtil para colocação na mufla.



Fonte: Autor (2026)

Em estudos correlatos, foi obtido que a temperatura ótima para calcinar lodos oriundos de ETE partem de 700°C a um patamar de cerca de 2h para que a amostra possa atingir a temperatura de trabalho da mufla e garantir os efeitos da calcinação no material por inteiro (HENGGEN, 2014).

A mufla representada na Figura 11, foi configurada para operar a uma temperatura de pico de 800°C. Durante o processo, o lodo foi inserido a temperatura ambiente, sofrendo incrementos graduais de temperatura até alcançar seu patamar de 800°C por cerca de 2 horas. O material permaneceu nesse patamar até lentamente retornar à temperatura ambiente (cerca de 24 horas depois), tempo proposto para ocorrer a completa volatilização da matéria orgânica residual e desidratação das fases minerais, induzindo a formação de uma estrutura potencialmente de efeito pozolânico (FERNANDES; SANTOS; NETO, 2024).

Figura 11 - Mufla utilizada para calcinação do lodo têxtil



Fonte: Autor (2026)

Após o resfriamento natural do forno até a temperatura ambiente, o lodo calcinado foi submetido a um processo de destorroamento e moagem mecânica em um moinho de jarros. A Figura 12 demonstra o jarro, as bolas cerâmicas, o dispositivo metálico de acoplamento do jarro e o moedor manual para apiloamento posterior do resíduo granular.

Figura 12 - Equipamentos do Moinho de Jarros e moedor manual



Fonte: Autor (2026)

O processo de moagem iniciou-se com a inserção do lodo têxtil calcinado no jarro com as bolas. Sequencialmente inserido no dispositivo de acoplamento metálico e posicionado nos rolos do moinho de jarro. O processo de moagem ocorreu em etapas de frequências variadas para que ocorresse o tombamento e atrito do material com as bolas ao longo de 2 ciclos de 1 hora (Figura 13). O material foi então retirado, apilado manualmente e, depositado em um recipiente separado.

Figura 13 - Moinho de Jarros utilizado para moer o lodo têxtil calcinado



Fonte: Autor (2026)

Sequencialmente, o material foi levado para uma etapa de peneiramento, para a obtenção de uma granulometria pulverulenta homogênea, compatível com a granulometria de materiais de característica pozolânica utilizados como filer em cimentos portland (BORGES *et al.*, 2025). A granulometria separada para uso foi apenas dos granulares passantes da peneira de Peneira #200 (0,075mm). O aspecto final do lodo têxtil beneficiado é a demonstrada na Figura 14, onde observa-se uma coloração acinzentada, com particulados de diâmetro inferior a 0,075mm, sem a presença do odor de matéria orgânica e umidade aparente.

Figura 14 - Lodo têxtil calcinado em pó após moagem com diâmetro inferior a 0,075mm



Fonte: Autor (2026)

### 3.2.2 Distribuição Granulométrica da areia

Para a avaliação da granulometria da areia, adotou-se o método de peneiramento mecânico, utilizando o conjunto de peneiras instalado no vibrador mecânico, com o material separado após retirada da estufa. O procedimento para o lodo seguiu as seguintes etapas (NBR NM 248):

- Pesagem de 1kg de material;
- Montagem das peneiras por tamanho de abertura (mais abertas para o topo);
- Deposição da areia na série de peneiras mais ao topo e vedando com a tampa metálica;
- Acoplamento da trava e acionamento do peneirador elétrico por 15 minutos;
- Retirada das peneiras e realizada a medição da massa da areia retida acumulada em cada peneira.

Após a obtenção das massas, calculou-se o Módulo de Finura (MF) e a Dimensão Máxima Característica (DMC) conforme a NBR 7211. O MF foi calculado através da equação 1, definida como a soma das porcentagens retidas acumuladas

nas peneiras dividida por 100. A DMC foi determinada como a abertura da malha, em milímetros, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% em massa.

$$MF = \frac{\Sigma \% \text{ retida acumulada nas peneiras}}{100} \quad (1)$$

Onde:

- $MF$  = módulo de finura.

### 3.2.3 Dosagem e Definição dos Traços

Adotou-se como referência o traço padrão utilizado por Silveira (2020), de argamassa de assentamento na proporção 1:3 (cimento Portland:areia fina) em massa. A partir deste traço piloto (0% de resíduo), estabeleceram-se os planos de substituição parcial, em massa, do agregado miúdo pelo lodo têxtil calcinado.

As substituições foram delimitadas nos teores experimentais de 0% para o traço de referência, 2% de incremento de lodo têxtil moído calcinado em substituição a areia fina e, 5% de lodo têxtil calcinado. A escolha dos traços foi realizada tendo em vista o traço mais elevado que Silveira (2020) utilizou em seus estudos, além da adição da faixa de 5% como uma faixa de estudo limite.

A relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,64 para o traço de referência, de modo a obter uma trabalhabilidade aceitável no intervalo de espalhamento (ensaio *flow table*). Essa escolha visa mensurar o impacto direto da substituição do agregado nas propriedades reológicas, trabalhabilidade no estado fresco e no índice de vazios endurecido sem a interferência de oscilações significativas no volume de água de amassamento.

Tendo em vista estudos prévios, o índice de consistência avaliado na *flow table* teve como alvo, o limite máximo sugerido pela normativa NBR 13276 de 260mm com variação de 5mm para o traço de referência. Apesar deste índice de abertura para mensurar a trabalhabilidade estar descrito na normativa, ele representa apenas uma recomendação, visto que argamassas em diferentes

aplicações, ou com uso de materiais não convencionais, podem obter valores diversos. Anjos (2017) retrata que em suas análises, o valor de abertura para uma argamassa em limites toleráveis de trabalho permeiam o espalhamento de  $230 \pm 20$  mm, representando um valor muito mais abrangente que o recomendado pela NBR 13276.

Desta forma, a Tabela 2 representa o traço, bem como a dosagem de cada material, buscando variar o mínimo possível da relação a/c entre as argamassas.

Tabela 2 - traços definidos para a elaboração dos corpos de prova

| Lodo (%) | Cimento (g) | Areia (g) | Lodo (g) | a/c  | Traço |
|----------|-------------|-----------|----------|------|-------|
| 0        | 625         | 1875      | 0        | 0,64 | 1:3   |
| 2        | 625         | 1837,5    | 37,50    | 0,64 | 1:3   |
| 5        | 625         | 1781,25   | 93,75    | 0,68 | 1:3   |

Fonte: Autor (2026)

### 3.2.4 Mistura e Ensaio no Estado Fresco

O procedimento de mistura dos componentes seguiu a norma NBR 16541, utilizando um misturador mecânico de argamassas do laboratório (Figura 15). Os materiais secos foram separados, pesados e depositados de acordo com cada traço em embalagens de fecho hermético e foram homogeneizados previamente por agitação manual por cerca de 1 minuto, antes de serem depositados na cuba antes da introdução fracionada da água de amassamento.

Figura 15 - Misturador mecânico de argamassas



Fonte: Autor (2026)

Uma vez inseridos os materiais na cuba, os procedimentos realizados foram conduzidos para a mistura de argamassa, com o objetivo de fabricar corpos de prova de argamassa prismáticos de 40x40x160mm e realização de *flow table test*. O processo de elaboração da argamassa foi realizado em conformidade com a NBR 16541 na seguinte descrição de etapas:

- O misturador de argamassas é acionado na velocidade de operação lenta por 30 segundos, adicionando ao processo cerca de 75% da solução ativadora dentro do recipiente metálico do misturador mecânico;
- O misturador de argamassas com pás mecânicas é acionado a uma velocidade alta para a criação da pasta de argamassa por um período de 60 segundos;
- Após o período de mistura o equipamento foi desligado, as pás mecânicas foram erguidas e, com uma espátula foi realizada a mistura manual dos materiais com raspagem nas laterais e fundo da cuba metálica por um período de 90 segundos;
- Novamente o misturador é acionado com velocidade de mistura por um período de 60 segundos, de forma a garantir homogeneidade da mistura.

Imediatamente após o término da mistura, realizou-se o ensaio de Índice de Consistência utilizando a mesa de espalhamento (Figura 16), em conformidade com a NBR 13276.

Figura 16 - Moldes de corpos de prova utilizados para confecção das amostras.



Fonte: Autor (2026)

O ensaio iniciou-se com a limpeza prévia do tampo da mesa de consistência e da superfície interna do molde tronco-cônico, empregando-se uma esponja umedecida para garantir que as superfícies ficassem ligeiramente úmidas e livres de partículas soltas. Imediatamente após a finalização da mistura da argamassa, o molde tronco-cônico foi posicionado centralizado sobre o tampo da mesa. O preenchimento do molde ocorreu em três camadas consecutivas de volumes semelhantes, sendo cada etapa submetida ao adensamento por meio de golpes com o soquete padrão, aplicando-se respectivamente 15 golpes na primeira camada, 10 na segunda e 5 na terceira, visando garantir uma distribuição uniforme do material e a eliminação de grandes vazios (NBR 13276).

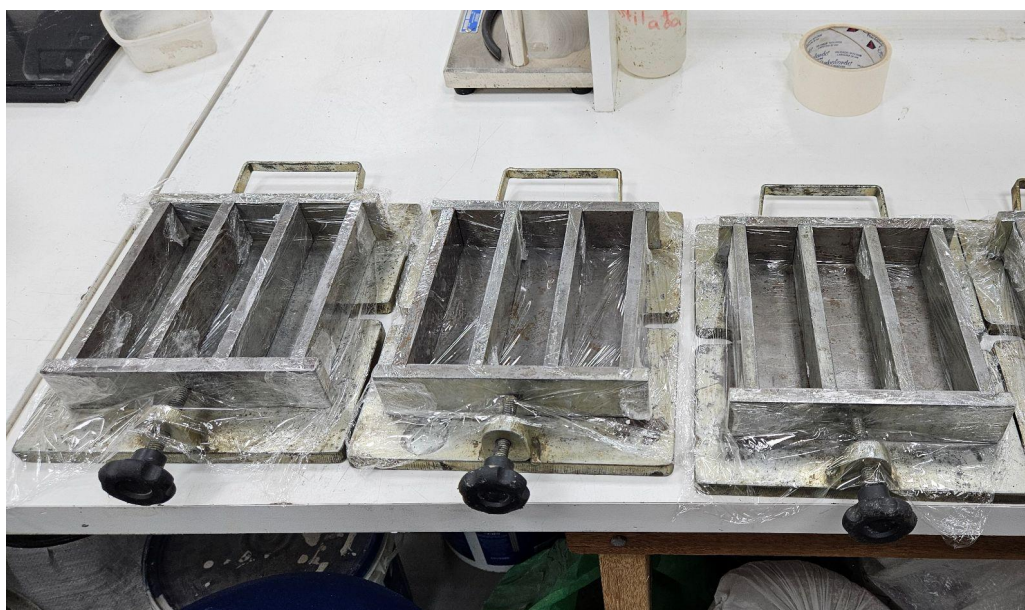
Concluído o adensamento da última camada, realizou-se o rasamento da superfície superior da argamassa com o auxílio de uma régua metálica para nivelá-la com a borda do molde. Na sequência, o molde foi removido verticalmente de forma cuidadosa, deixando apenas a massa moldada no centro do equipamento. O acionamento da mesa de consistência foi efetuado imediatamente após a

desmoldagem, aplicando-se um total de 30 golpes contínuos em um intervalo exato de 30 segundos, promovendo o espalhamento radial do material. Por fim, mediu-se o diâmetro da argamassa espalhada em três direções distintas com o uso de uma régua metálica, registrando-se os valores para a obtenção da média aritmética final, a qual define o índice de consistência da amostra.

### 3.2.5 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Para cada traço delineado, foram moldados 3 corpos de prova prismáticos com dimensões de 40x40x160mm, conforme estabelecido pela NBR 13279. Os moldes foram preparados conforme a Figura 17, onde suas partes móveis foram acopladas e lubrificadas, para garantir o processo de desmoldagem facilitado.

Figura 17 - Moldes de corpos de prova utilizados para confecção das amostras.

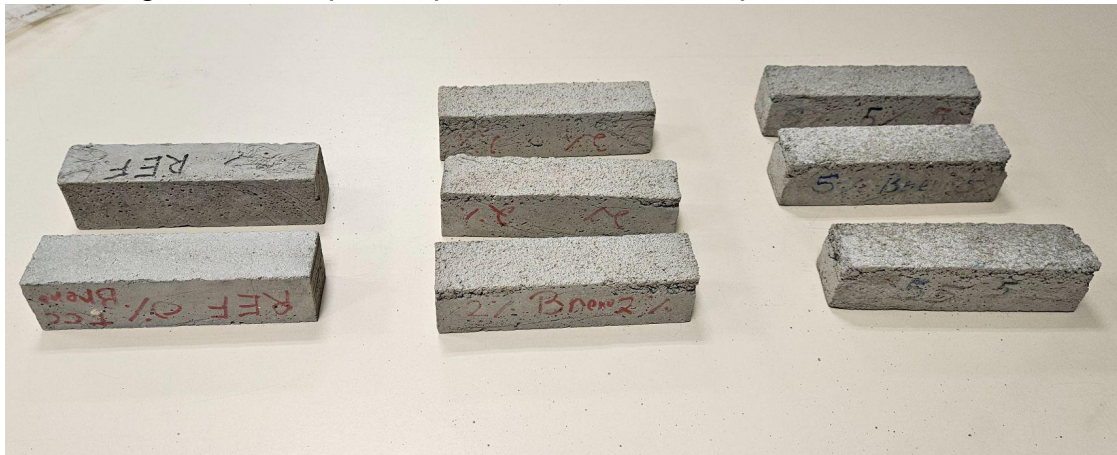


Fonte: Autor (2026)

A moldagem foi executada em duas camadas sucessivas sobre mesa de adensamento mecânico, aplicando-se 30 golpes por camada para garantir a correta compactação e a eliminação de bolhas de ar aprisionadas. Após o rasamento, os moldes preenchidos permaneceram em ambiente laboratorial protegido por um período de 24 horas. Decorrido este tempo, os corpos de prova foram desmoldados,

devidamente identificados e repousaram por 28 dias em ambiente de luminosidade, temperatura e umidade controlados, seguindo a NBR 13279 (Figura 18).

Figura 18 - Corpos de prova desmoldados após 28 dias de cura



Fonte: Autor (2026)

### 3.2.6 Ensaios no Estado Endurecido

Ao completarem a idade de cura de 28 dias, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente, conforme NBR 9778.

Os corpos de prova foram inicialmente secos em estufa a 105°C por 24 horas e pesados para obter a massa da amostra seca ( $m_s$ ). Posteriormente, foram imersos em água por 72 horas para a pesagem da massa imersa ( $m_i$ ) e, após a secagem superficial com pano úmido, determinou-se a massa saturada ( $m_{sat}$ ). Utilizando as formulações matemáticas baseadas no princípio de Arquimedes, calcularam-se os percentuais de absorção de água por imersão, o índice de vazios (porosidade aberta) e a densidade aparente da matriz (NBR 9778).

O cálculo da absorção de água (%) da argamassa foi realizado conforme a equação 2.

$$\text{absorção de água (\%)} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

- $m_{sat}$  = massa da amostra saturada
- $m_s$  = massa da amostra seca

Assim, para a obtenção da porosidade aberta (%) da argamassa, foi utilizada a equação 3:

$$porosidade\ aberta\ (\%) = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

- $m_i$  = massa da amostra imersa

Além disso, pela equação 4 é possível obter-se a densidade aparente:

$$densidade\ aparente = \frac{ms}{msat - mi} \quad (4)$$

### 3.2.7 Resistência à Compressão Axial

A avaliação do desempenho mecânico das argamassas à compressão foi realizada em corpos de prova prismáticos, seguindo as diretrizes da NBR 13279. O ensaio de compressão foi executado no Centro Universitário Católica de Santa Catarina - Joinville, utilizando uma Máquina universal de ensaios da EMIC com módulo de acoplamento para ensaios de resistência mecânica à compressão.

O ensaio foi realizado para 3 corpos de prova de cada traço. Para a realização do teste, empregou-se uma prensa hidráulica digital microprocessada, que possui pratos metálicos rígidos retificados com área padrão, para a aplicação de carga constante.

Cada prisma foi posicionado centralizadamente no dispositivo de ensaio, de modo que a carga fosse aplicada nas faces laterais moldadas do corpo de prova, e não na face superior que recebeu o rasamento, para evitar carregamentos excessivos em zonas frágeis ocasionadas por eventuais acúmulos de tensão oriundos de irregularidades superficiais dos corpos de prova. A aplicação do esforço mecânico foi conduzida de forma contínua e progressiva sob uma taxa de carregamento controlada de  $50 \pm 10$  N/s até a ruptura total do material.

### 3.2.8 Análise de Microestrutura por Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a caracterização morfológica e identificação dos produtos microscópicos de hidratação das matrizes cimentícias, realizou-se o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas amostras selecionadas após as idades de ruptura mecânica. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Materiais da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) - Joinville.

O procedimento teve início com a coleta de fragmentos internos representativos obtidos imediatamente após o ensaio de ruptura mecânica, descartando-se as superfícies externas expostas que pudessem conter contaminações.

Os fragmentos fraturados foram fixados individualmente em suportes metálicos de alumínio, conhecidos como *stubs*, com o auxílio de uma fita de carbono dupla-face condutiva. Devido à natureza não condutora da argamassa, as amostras foram introduzidas em uma câmara de metalização a vácuo para receberem a deposição de uma camada ultrafina de ouro, tornando as superfícies eletricamente condutivas e aptas para a interação com o feixe de elétrons (CPMTC, 2026).

Por fim, os suportes foram inseridos na câmara do microscópio eletrônico de varredura, onde as análises foram conduzidas. As varreduras e capturas das micrografias foram realizadas em diferentes regiões dos fragmentos com foco nas zonas de transição entre a pasta e o agregado, adotando-se ampliações padronizadas de 1000x e 5000x, para permitir a posterior análise comparativa direta entre o traço de referência e as argamassas modificadas com o lodo têxtil.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PERDA DE MASSA DO LODO CALCINADO

Após a pesagem e o destorroamento do lodo têxtil, o material submetido ao processo de calcinação teve novamente aferição de seu peso. Os resultados desse processo possuem o intuito de compreender a perda mássica do lodo têxtil após o processo de calcinação. A Tabela 3 demonstra a seguinte relação de perda mássica para as amostras da Figura 10:

Tabela 3 - Perda de massa em porcentagem do lodo têxtil após calcinação à 800°C por 2h

| Peso antes (g) | Peso depois (g) | Perda mássica (%) |
|----------------|-----------------|-------------------|
| 48,093         | 17,199          | 35,76             |
| 53,528         | 21,234          | 39,67             |
| 50,968         | 21,142          | 41,48             |

Fonte: Autor (2026)

Para 3 amostras submetidas ao processo de calcinação à 800°C por cerca de 2 horas, a perda média de massa das amostras foi de 38,97%. Esse valor de perda mássica pode ser atribuído, em partes, a evaporação da umidade residual encontrada no lodo têxtil, bem como a queima de matéria orgânica e a dissipação de materiais mais voláteis (HENGEN, 2014).

### 4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA

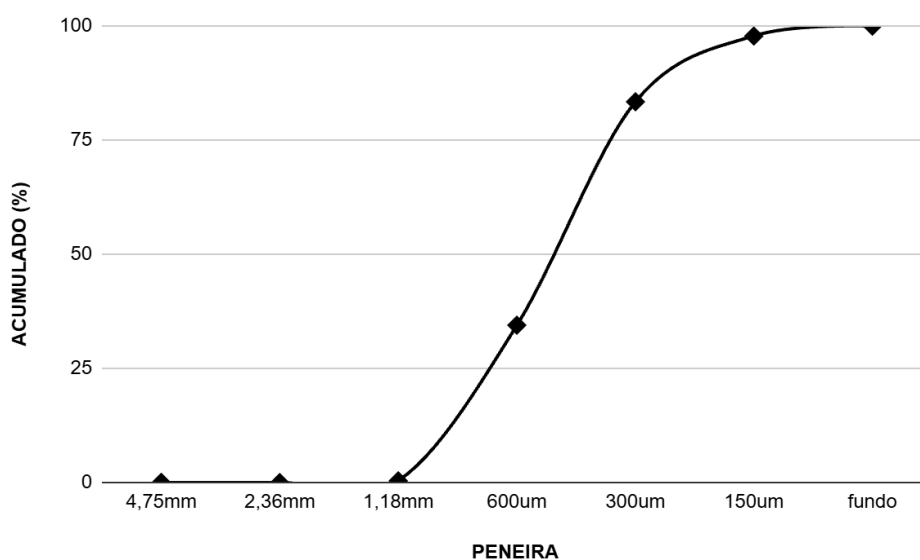
Em um peneiramento preliminar da areia foi obtido um módulo de finura de 1,91. Posteriormente, procedeu-se a uma nova etapa de peneiramento do agregado miúdo, visando a extração das frações granulares excessivamente finas. Tal refinamento granulométrico teve como objetivo elevar o módulo de finura do material, em busca de atenuar possíveis fenômenos de retração volumétrica na matriz cimentícia e prevenir o decréscimo da capacidade de suporte mecânica (FERREIRA *et. al*, 2019).

Na Figura 19, apresentam-se os resultados obtidos na determinação da distribuição granulométrica do agregado miúdo. A análise da curva revela a ausência de grãos com dimensões acima de 1,18 mm e uma predominância de partículas com diâmetro nas faixas de 600  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , o que estabelece a dimensão máxima característica desse material em 1,18 mm.

Quanto ao módulo de finura, a soma do material acumulado nas peneiras foi de 2,16, representando uma elevação significativa ao módulo de 1,91 do primeiro peneiramento, enquadrando o agregado próximo ao limite superior da categoria de areia fina, próximo da areia média (NBR NM 248).

Silveira(2020) e Anjos(2017) utilizaram areia com módulo de finura correspondente à categoria de areia média. Essa faixa de granulometria de areia utilizada em argamassas, tende a possuir resistência mecânica à compressão mais elevada e menos retração em comparação a areia fina (FERREIRA *et. al*, 2019), contudo não é o mais recomendado para aplicação em rebocos e acabamentos, pois os granulares maiores da areia dificultam a trabalhabilidade e acabamento adequados (LEROY MERLIN, 2023).

Figura 19 - Curva da distribuição granulométrica da areia fina (agregado miúdo)



Fonte: Autor (2026)

### 4.3 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Para as análises do índice de consistência dos traços de argamassa, foram obtidos os valores demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Índice de consistência para cada traço de argamassa

| Lodo (%) | IC (cm) | a/c  | Traço |
|----------|---------|------|-------|
| 0        | 24,9    | 0,64 | 1:3   |
| 2        | 19,2    | 0,64 | 1:3   |
| 5        | 19,0    | 0,68 | 1:3   |

Fonte: Autor (2026)

Em observação aos dados obtidos, o índice de consistência dos corpos de prova apresentou significativa variação. De acordo com a Tabela 4, o IC da amostra com 0% de lodo têxtil calcinado demonstrou o maior índice de fluidez e trabalhabilidade, enquanto que o traço de 2% apresentou uma diferença de 5,7 cm de abertura em relação a anterior.

Por conta de apresentar IC de 19,2 cm, os blocos de argamassa com 2% aparentavam estar no limite de trabalhabilidade para a moldagem dos corpos de prova. Desta forma, por conta da tendência de queda da trabalhabilidade com o incremento de lodo, foi identificada a necessidade de um aumentar a água para o traço de 5%, para que se obtivesse uma margem mínima de trabalhabilidade para a moldagem correta dos corpos de prova. Baseado na elaboração de corpos de prova prévios com condições similares, arbitrado um incremento de água para uma relação a/c de 0,68 e, obtendo assim a abertura de 19 cm no índice de consistência.

Os estudos de Silveira (2020) também partiram de uma relação a/c de 0,64 e, conforme os traços tiveram incremento de lodo têxtil em sua composição, o IC também foi diminuindo. Mesmo utilizando areia média, a queda IC entre os traços de 0% de lodo têxtil e 2% de lodo Têxtil de Silveira (2020), foi de cerca de 14 cm. Já para o presente estudo, a queda do IC entre os mesmos traços foi de apenas 5,7 cm. Portanto, esse comportamento de diminuição de trabalhabilidade que possui relação direta com o lodo têxtil, ainda se faz presente, porém em menor influência, para o lodo têxtil calcinado.

Mesmo se considerarmos o intervalo inferior de índice de consistência (IC) de 210mm de abertura mencionado por Anjos (2017), em detrimento da

recomendação da NBR 13276, o IC de ambos os traços contendo lodo têxtil calcinado foi inferior à proposta de referência. A obtenção deste índice não inviabilizou a moldagem e o ensaio de compressão nos corpos de prova, mas certamente contribuiu para o aumento da criação de zonas frágeis, devido ao aumento de vazios causados pela baixa trabalhabilidade da argamassa. Além do lodo têxtil, outra grande contribuição para estes resultados pode ser atribuída à utilização de areia fina na composição da argamassa. Geralmente, argamassas com areia fina em sua composição necessitam de relação a/c mais elevada para compensar a superfície específica dos grãos (KOCH e SOUSA JÚNIOR, 2024).

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE E POROSIDADE ABERTA

Na Tabela 5, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente das formulações contendo diferentes teores de incorporação de lodo (0%, 2% e 5%).

Tabela 5 - Absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta de cada traço de argamassa

| Lodo (%) | Absorção de Água (%) | Porosidade Aberta (%) | Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| 0        | 13,62                | 25,04                 | 1,81                                    |
| 2        | 13,21                | 25,95                 | 1,78                                    |
| 5        | 22,42                | 27,79                 | 1,69                                    |

Fonte: Autor (2026)

Os resultados sugerem que a incorporação do resíduo têxtil altera de forma sistemática a microestrutura e o empacotamento da matriz cimentícia. Observa-se uma correlação direta entre o incremento do teor de lodo e o aumento da porosidade aberta, a qual evoluiu de 25,04% (traço de referência) para 27,79% na mistura com 5% de substituição. Este comportamento pode ser atribuído à natureza higroscópica do lodo (SILVEIRA, 2020), uma vez que, por reter água em sua estrutura, o resíduo pode exigir um ajuste na água de amassamento ou liberar essa umidade tardiamente, gerando canais capilares adicionais após a evaporação da água livre durante o processo de cura e hidratação do cimento.

Como consequência direta do aumento volumétrico desses vazios na pasta endurecida, a densidade aparente apresentou uma trajetória descendente contínua, reduzindo de  $1,81\text{g/cm}^3$  (0% de lodo) para  $1,69\text{g/cm}^3$  (5% de lodo).

No que tange à absorção de água por capilaridade, o comportamento na amostra com 2% de lodo calcinado demonstrou um comportamento semelhante ao traço de referência de 0% de lodo calcinado. Onde, embora tenha ocorrido um aumento sutil na porosidade total aberta (se comparado a 0% de lodo), a absorção de água decresceu de 13,62% para 13,21%. É possível que de forma sutil, efeito fíler induzido por adições minerais ultrafinas tenham contribuído para os resultados (KOCH e SOUSA JÚNIOR, 2024), mesmo o traço de 2% de lodo calcinado apresentando trabalhabilidade bem reduzida comparada ao traço referência.

Em contrapartida, as amostras contendo 5% de resíduo apresentaram geração de vazios acentuada da microestrutura. Esse incremento expressivo, quando comparado ao traço de 2%, indica que o volume de resíduo e a relação a/c utilizados, contribuíram para aumentar a porosidade com a evaporação da água no processo de cura do material (NEVILLE, 2016) .

#### 4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA

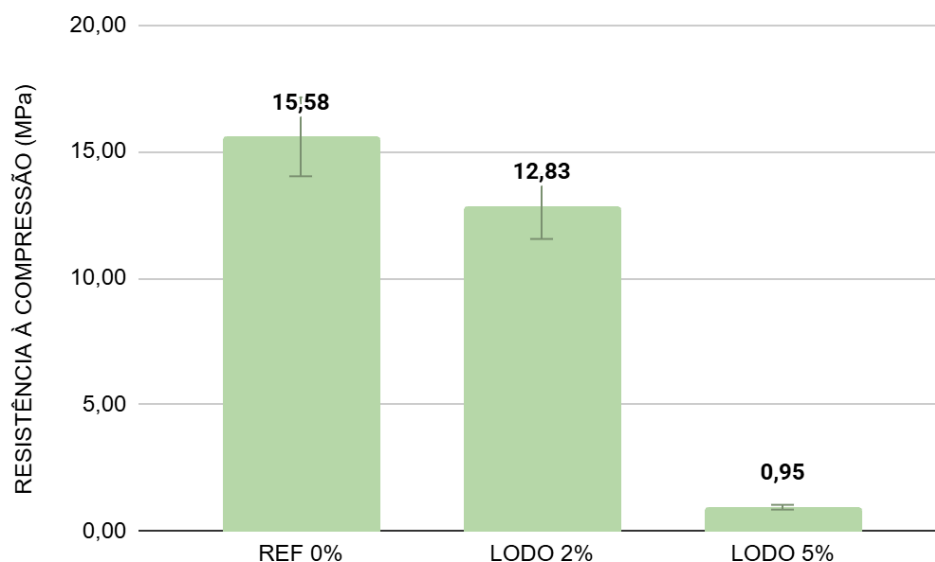
Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mecânica da Figura 20, revelam uma tendência de diminuição das propriedades mecânicas do material à medida que o teor de lodo incorporado à mistura é elevado. A amostra de referência, sem qualquer adição de resíduo, estabeleceu a linha de base do experimento ao atingir a maior resistência média registrada, correspondente a 15,58 MPa. Com a introdução de 2% de lodo, observou-se uma redução moderada no desempenho estrutural da matriz, a qual passou a apresentar uma resistência média de 12,83 MPa.

Essa variação de resultados representa um decréscimo de aproximadamente 17,6% em relação ao traço de referência, sugerindo que, apesar da perda de desempenho, a utilização do lodo calcinado é elegível para aplicações estruturais (NBR 13281-2). Se comparado com os resultados de Silveira (2020), o

decréscimo de resistência mecânica do traço de 2% de lodo, comparado ao de 0%, foi de 72,53%. Muito superior aos 17,6% obtidos neste estudo, o que mostra a contribuição da calcinação como agente responsável por melhorar o desempenho.

Por outro lado, o acréscimo do teor de resíduo para 5% provocou uma redução drástica na capacidade de carga do material (Figura 20), cuja resistência à compressão ficou em 0,95 MPa. Esse resultado indica uma perda de desempenho superior a 93% em comparação à amostra de referência, o que inviabiliza a utilização prática desse traço específico para fins de engenharia que demandem resistência mecânica à compressão.

Figura 20 - Resistência mecânica à compressão em função da adição de resíduo.



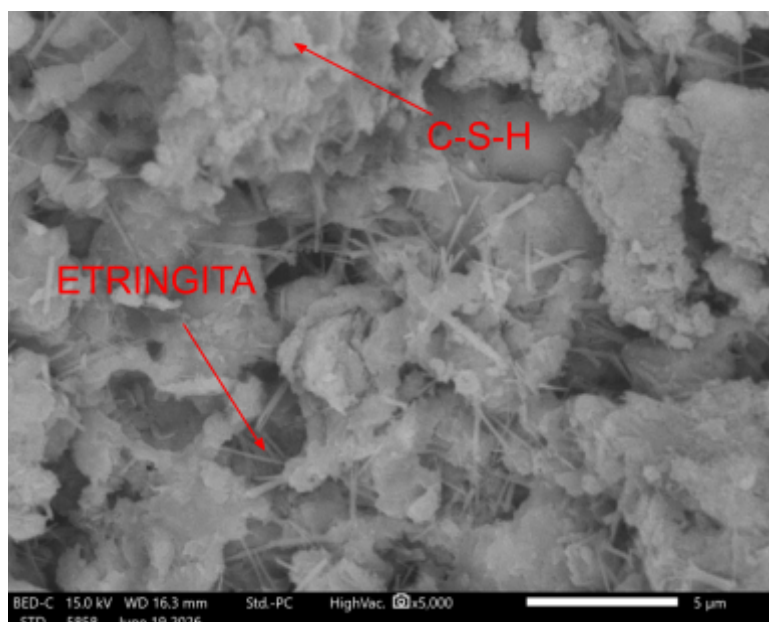
Fonte: Autor (2026)

#### 4.6 MEV

A análise morfológica das amostras, obtidas Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no presente estudo, foi utilizada como uma ferramenta para a verificação dos indicadores obtidos nos demais ensaios. Nela é possível observar os possíveis agentes de maior contribuição para os resultados de resistência mecânica, trabalhabilidade, absorção de água, porosidade aberta, densidade aparente e a trabalhabilidade de forma indireta.

A análise do MEV com aumento de 5000X para o traço de 0% (Figura 21), corrobora com os resultados de uma estrutura com porosidade aberta reduzida, apontando também a presença de etringita em formato de agulhas apontado pela seta azul na figura e, regiões mais amorfas que aparentam ser silicato de cálcio hidratado (C-S-H) circulado em vermelho na figura, mostrando que a hidratação da argamassa aparentou ser adequada para o traço. Essas características auxiliam a compreender também, a razão de uma capacidade de resistência a compressão elevada.

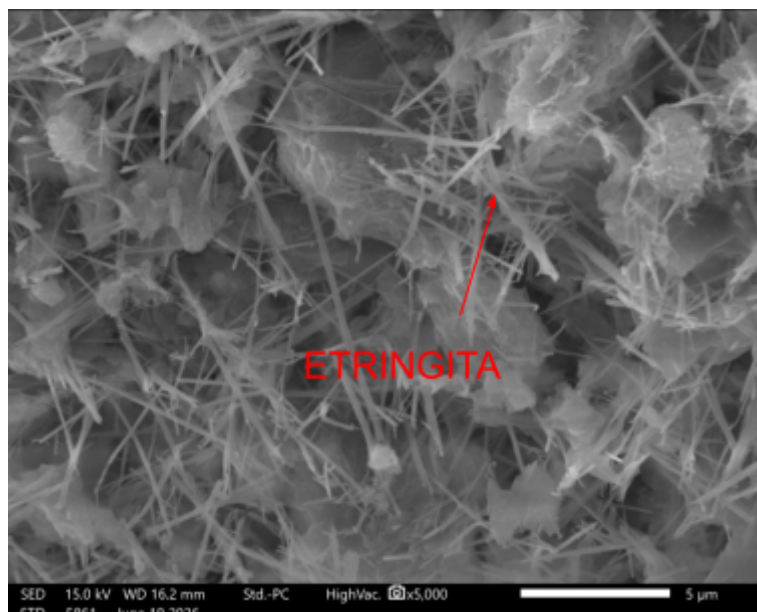
Figura 21 - Micrografia obtida em MEV com 5000x de ampliação para traço referência (0% de lodo têxtil calcinado) aos 36 dias



Fonte: Autor (2026)

A Figura 22 apresenta o MEV com aumento de 5000X para o corpo de prova com 2% de lodo têxtil, onde na imagem é possível visualizar agulhamentos de etringita em formatos bem alongados, oriundos de direções diversas, fazendo uma espécie de emaranhamento (MARTINS FILHO; MARTINS, 2017). O plano de fundo da etringita também aparenta ser composto de C-S-H e com alguma quantidade de vazios, representando certa porosidade na região analisada.

Figura 22 - Micrografia obtida em MEV com 5000x de ampliação para traço contendo 2% de lodo têxtil calcinado aos 36 dias



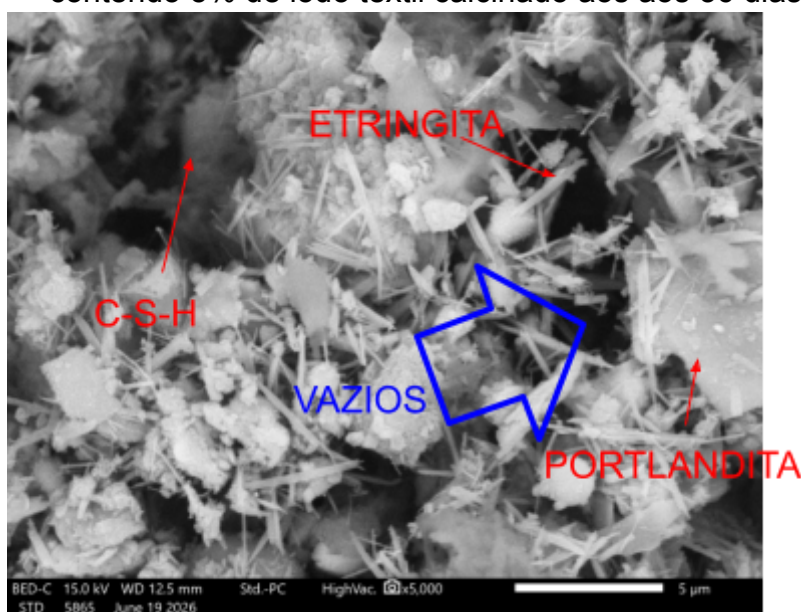
Fonte: Autor (2026)

Na referência, as fases de hidratação parecem crescer de forma isolada e concentrada. Já na amostra com 2% de lodo, a distribuição dos cristais foi muito mais homogênea e espalhada, indicando que os grãos finos do resíduo serviram como pontes ou pontos de ancoragem (efeito fíler) para que os produtos de hidratação preenchessem os vazios da matriz de forma muito mais eficiente (BORGES *et al.*, 2025).

Ao confrontar a microestrutura do traço de referência (0% de resíduo) com àquela apresentada pela argamassa contendo 2% de lodo têxtil calcinado, evidenciam-se modificações morfológicas substanciais na matriz cimentícia. A amostra de referência exibe uma estrutura um pouco menos compacta, caracterizada pelo predomínio de massas amorfas descontínuas e pela presença de vazios intergranulares proeminentes. Nota-se que, na ausência do resíduo, a formação de cristais de etringita ocorre de forma mais dispersa e em menor quantidade. Essa configuração morfológica justifica os maiores índices de porosidade aberta observados para o traço sem adição (Tabela 5), contrastando com o efeito de refinamento de vazios e densificação microestrutural alcançado com a introdução de 2% do lodo calcinado, que atuou estimulando a formação de uma rede mais cristalina e intrincada.

Avaliando a microestrutura obtida por MEV na amostra com 5% de lodo têxtil (Figura 23), verifica-se que a mesma apresenta o mesmo comportamento que as demais amostras, contudo com vazios mais aparentes, sem conexão clara entre os elementos visíveis, podendo representar possível desagregação entre os materiais, o que justifica a elevada porosidade e baixa resistência mecânica à compressão.

Figura 23 - Micrografia obtida em MEV com 5000x de ampliação para traço contendo 5% de lodo têxtil calcinado aos 36 dias



Fonte: Autor (2026)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O lodo têxtil calcinado se mostrou um resíduo com significativo potencial de utilização para a construção civil. Para além da aplicação em argamassas, torna-se relevante pensá-lo para usos mais diversos.

Com relação aos resultados obtidos, foi possível observar que mesmo sendo calcinado, o lodo ainda oferece significativa alteração na trabalhabilidade da argamassa em seu estado fresco. Uma alternativa para mitigar essa característica seria fazer uso de superplastificantes, ou agentes similares.

Outra solução para a redução de trabalhabilidade seria a aplicação do lodo têxtil calcinado em argamassas com areias médias, já que argamassas que utilizam areia fina como agregado miúdo tendem a demandar uma relação a/c mais elevada (ORNELLES, 2018) e possuem uma margem de trabalhabilidade de resistência mecânica inferior as com areia média.

Para o estudo proposto, o traço com 2% de lodo têxtil calcinado, é compatível para uso como argamassa assentamento estrutural pela NBR 13281-2, visto que a classificação da argamassa levando conta seu resultado de resistência mecânica à compressão de 12,83 MPa, a coloca na categoria AAE12.

Outras opções de aplicação para este resíduo seria em artefatos decorativos, ou de vedação, como cobogós, que por serem caracteristicamente elementos não estruturais, não possuem um rigor para possuírem alta resistência mecânica à compressão. Outro tipo de aplicação válida para testes, seria a elaboração de paver e bloquetes variados para passeios, garagem e até pavimentação de vias locais.

Para além das aplicações, também torna-se imperativo a obtenção de uma temperatura e tempo ótimos para a calcinação do resíduo, a fim de obter eficiência energética, e eliminar a matéria orgânica mantendo os minerais relevantes em sua composição.

Ainda, sobre os resultados obtidos, apesar do traço de 5% ter apresentado baixa resistência mecânica à compressão, senão pela desagregação elevada dos corpos de prova, este ainda poderia representar uma faixa elegível de análise. Portanto, torna-se evidente que a principal característica a ser melhorada para viabilizar seu uso comercial, seria a de melhora na trabalhabilidade do material, com o uso de superplastificantes, ou com uso de areia média.

Finalmente, é pertinente mencionar que a elaboração de corpos de prova com diferentes traços foi reduzida neste estudo, em razão da limitação de infraestrutura para a calcinação e moagem do lodo, onde foi tratado ao longo dos estudos a perda de volume, além da baixa capacidade interna da mufla para a inserção do resíduo.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a argamassa com alteração da relação a/c para cada incremento de lodo têxtil para uma trabalhabilidade mais consistente;
- Melhorar a trabalhabilidade da argamassa com o uso de superplastificantes, sem aumentar a relação a/c;
- Analisar o pH da argamassa;
- Analisar a lixiviação do material;
- Utilizar areia média para a composição das argamassas visando aumentar a resistência mecânica à compressão e diminuir a relação a/c, para verificar possíveis aplicações estruturais como classe superior de argamassa.

## REFERÊNCIAS

ABIT – **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confeção (2018)**. Perfil do Setor Disponível em: <http://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor> Acesso em: 31 mar. 2026.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2017. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ANDREW, R. M. **Global CO<sub>2</sub> Emissions from Cement production, 1928–2018**. Earth System Science Data, v. 11, n. 4, p. 1675–1710, 20 nov. 2019.

ANJOS, Daniel Chraim dos. **Estudo sobre a influência do lodo têxtil gerado por uma lavanderia industrial, aplicado em argamassa de Cimento Portland composto de fíler**. 2017. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/181766>. Acesso em: 24 abr. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-1**: Resíduos sólidos: classificação: Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-1**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-2**: Argamassa para assentamento e argamassa para fixação de alvenaria – Requisitos, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9382**: Produtos orgânicos e inorgânicos: determinação da perda por calcinação. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.

BALOTA, Mariana Medeiros Martins. **Lodo têxtil: revisão sistemática de métodos de tratamento e potencial uso como insumo combustível de caldeira**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: [http://cassiopea.ipt.br/teses/2018\\_PI\\_Mariana\\_Balota.pdf](http://cassiopea.ipt.br/teses/2018_PI_Mariana_Balota.pdf). Acesso em: 24 abr. 2026.

BUSS, M. V. et al. Tratamento dos Efluentes de Uma Lavanderia Industrial: Avaliação da Capacidade de Diferentes Processos de Tratamento. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 2, n. 1, p. 2–10, 30 abr. 2015.

COMETTI, J. L. S.; SILVA, F. L.; SANTOS, F. J. H.; LIMA, V. A. **Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis do município de Toritama-PE**. In: , 2016, Campina Grande. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental (ConGeA). Campina Grande: [s. n.], 2016. p. 6.

DA FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS8ALHAQ/1/disserta\\_\\_o\\_mestrado\\_gustavo.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS8ALHAQ/1/disserta__o_mestrado_gustavo.pdf). Acesso em: 25 mar. 2026.

DYER, P. P. O. L. et al. O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 1, 2021.

FERREIRA, R. L. DA S. et al. Efeitos do uso de areia de praia nas propriedades de argamassas mistas: análise da variação granulométrica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.

FERNANDES, Igor Vieira *et al.* Potencial pozzolânico de cinzas de lodo têxtil em pastas de hidróxido de cálcio por difração de raios-X. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, [S.L.], v. 20, p. 1-12, 7 out. 2024. UFAL. <http://dx.doi.org/10.46421/entac.v20i1.5941>.

FERNANDES, I.; SANTOS, M.; NETO, A. A. Avaliação da Pozolanicidade do Lodo Têxtil bruto e beneficiado para uso como substituto parcial do Cimento em Concreto

**Seco. Anais - 7º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, 14 maio 2024.

FIGUEIREDO, C. et al. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 685–708, 5 ago. 2014.

HAWLITSCHK, Gustav. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/D.3.2014.tde-22052015-150106. Acesso em: 2026-06-21.

HENGEN, Mirdes Fabiana. **Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto - (resistência à compressão axial)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/16131>. Acesso em: 25 jun. 2026.

HEREK, L. C. S. et al. **Incorporação de lodo de lavanderia industrial na fabricação de tijolos cerâmicos**. Cerâmica, Maringá, p. 326-331, 5 2009.  
MOURA, L. S. DE et al. 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. 1-11, 16 abr. 2026.

LEROY MERLIN. **Tipos de areia: descubra quais são e para que servem**. Blog Leroy Merlin, 22 mar. 2023. Disponível em: <https://blog.leroymerlin.com.br/tipos-de-areia-quais-sao-e-para-que-servem/>. Acesso em: 25 jun. 2026.

LOPES BORGES, Alexandre; LAURA, Sergio Andrés Apaza; FREITAS, Taís Oliveira Gonçalves; FERREIRA, Fernanda Giannotti da Silva. **Efeitos filer e pozolânico do pó de vidro em argamassa**. Ambiente Construído, [S. l.], v. 25, 2025. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/144814>. Acesso em: 25 jun. 2026.

LUCIANA; ÂNGELA BORGES MASUERO; CARPENA, D. **Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA) através da técnica de Refinamento de Rietveld**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 19, n. 2, p. 150–158, 1 jun. 2014.

MARTINS FILHO, Sergio Tunis; MARTINS, Carlos Humberto. **Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá, v. 10, n. 4, p. 1205-1225, out./dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n4p1205-1225>.

MEDEIROS, Mônica. **Pós-tratamento de efluente de lagoa facultativa fotossintética em filtros biológicos percoladores visando remoção de nitrogênio amoniacal**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) -

Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.  
doi:10.11606/D.3.2011.tde-19072011-163229. Acesso em: 2026-07-05.

NATALLI, J. F. et al. A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, 28 jul. 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ORNELLES, Debora Betti. **Comparativo do desempenho de agregados miúdos naturais e britados utilizados em argamassas**. 2018. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em:  
<https://repositorio.ufmg.br/items/6948df45-df24-4620-9c8a-0c966ef12e87>. Acesso em: 11 jun. 2026.

PINTO, Carolina Portugal Bastos. **Estudo de caso: reaproveitamento do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em:  
<http://hdl.handle.net/11422/17616>. Acesso em: 11 jun. 2026.

Ricardo Helmuth KOCH, & Leondiniz Gomes de SOUSA JÚNIOR. (2024). **Influência da granulometria da areia natural nas propriedades do concreto e argamassas na construção civil**. REVISTA NOVOS DESAFIOS, 4(2), 176–183.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.14201688>

SEGUNDO FILHO, Claro Alvino. **Influência da granulometria nas propriedades do concreto**. 2020. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

SILVA, R. A. J. DA. **Modelo de Gestão Ambiental para Reuso de Águas de Lavanderias do Agreste de Pernambuco**. 2016. 129 f. - Universidade Federal Rural de Pernambuco, [s. l.], 2016.

SILVEIRA, Edna Cristina de Aguiar. **Avaliação da resistência mecânica de argamassa de assentamento com substituição de agregado miúdo por lodo têxtil**. 2020. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

SISINNO, C. L. S.; MOREIRA, J. C. Ecoeficiência: um instrumento para a redução da geração de resíduos e desperdícios em estabelecimentos de saúde. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 21, n. 6, p. 1893–1900, dez. 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Instituto de Geociências. Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa. **Laboratório de Microscopia Eletrônica – LMEV**. Belo Horizonte: UFMG, [2026]. Disponível em:

<https://igc.ufmg.br/cpmte/laboratorios-cpmte/laboratorio-de-microscopia-eletronica/>.  
Acesso em: 25 jun. 2026

VOTORANTIM CIMENTOS. **Cimento Todas as Obras**. Disponível em:  
<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos/todas-as-obras/>. Acesso  
em: 22 jun. 2026.