



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

VICTOR ALVES SANTOS

INERTIZAÇÃO DE LODO TÊXTIL EM CONCRETO PARA USO EM PAVIMENTO  
INTERTRAVADO

Recife – PE  
Julho/2024

VICTOR ALVES SANTOS

INERTIZAÇÃO DE LODO TÊXTIL EM CONCRETO PARA USO EM PAVIMENTO  
INTERTRAVADO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. Área de Concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente - Linha de Pesquisa: Controle e Remediação da Poluição.

Orientador: Dr. Romildo Morant de Holanda.

Coorientadora: Dra. Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo.

Recife - PE  
Julho/2024

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

S237i Santos, Victor Alves.

Inertização de iodo têxtil em concreto para uso em pavimento intertravado / Victor Alves Santos. - Recife, 2024.

93 f.; il.

Orientador(a): Romildo Morant de Holanda.

Co-orientador(a): Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências.

1. Resíduos sólidos. 2. Gestão integrada de resíduos sólidos. 3. Concreto. 4. Pavimentos de concreto I. Holanda, Romildo Morant de, orient. II. Araújo, Fernanda Wanderley Corrêa de, coorient. III. Título

CDD 620.8

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus, por ter abençoado toda a minha trajetória até aqui bem como por me dar força para superar os desafios da vida.

Aos meus pais, Jocélia Alves da Silva Santos e Vitor Alves dos Santos Sobrinho, por todo apoio, amor e incentivo que sempre me deram não só nos estudos, mas também na vida. Aos meus irmãos Vinícius Alves Santos e Sebastião Conceição Alves por todo incentivo, apoio e por sempre acreditarem no meu potencial.

À minha noiva Jolinda Mércia de Sá, em especial, por sempre acreditar em mim e me apoiar em todos os momentos de dificuldades, tristezas, alegrias, conquistas e superação dos obstáculos. Aos meus amigos Isaac, Liliane, Ana Luíza, Karine, Lucas, Eduarda, pelo apoio e incentivo.

Aos meus orientadores, professor Romildo e professora Fernanda pelo incentivo, apoio e dedicação durante todo o período de orientação.

Ao Grupo de Pesquisa Centro de Inovação Tecnológica aplicada aos Recursos Naturais – CITAR.

À Lavanderia Nossa Senhora do Carmo e à Jacqueline por sua colaboração durante as visitas técnicas e a coleta de material para a pesquisa. Sua disposição em apresentar e explicar os processos da lavanderia de forma clara e prestativa foi fundamental.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPEAMB) pelo suporte e estrutura fornecidos, bem como aos professores e funcionários do programa, cuja expertise e apoio foram inestimáveis.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela organização e pela excelente estrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido.

*“ Não sabendo que era impossível, foi lá e fez. ”*

*Jean Cocteau*

## RESUMO

O lodo têxtil refere-se aos resíduos sólidos que são gerados durante o processo de tingimento de tecidos na indústria têxtil. Estes resíduos podem incluir corantes, solventes, fibras de tecido e outras impurezas que são lavadas ou filtradas durante o processo de tingimento. Esse resíduo pode afetar o meio ambiente de várias maneiras negativas, incluindo a contaminação da água, do solo e do ar, impactando a saúde humana. Essa poluição ambiental destaca a importância de práticas sustentáveis de gestão de resíduos da indústria têxtil para mitigar esses impactos adversos. O estudo em questão pretendeu realizar a destinação ambientalmente adequada do lodo têxtil, através da análise da viabilidade de inertização do resíduo no concreto para fins de utilização em pavimentos intertravados, em adição de 6%, 8% e 10% em relação ao agregado miúdo natural utilizado. Para a dosagem de concreto, utilizouse o método desenvolvido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), definindo-se um traço na proporção de 1: 1,19: 2,18: 0,40 (cimento, areia, brita e água, respectivamente), a partir do qual moldaram-se blocos prismáticos de concreto com e sem a adição do resíduo têxtil. Após o período de cura de 28 dias, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e ensaios de absorção de água para avaliar se os blocos moldados com adição de lodo enquadram-se nos parâmetros de resistência à compressão e absorção de água estabelecidos pela NBR 9781/2013, sendo 35 Mpa de resistência mínima e 6% como limite máximo aceitável para absorção de água em peças de concreto para pavimentação. Para obter uma compreensão mais abrangente das composições físicas e químicas do lodo têxtil, foram realizados ensaios de caracterização, como o teor de umidade, massa específica, granulometria, teor de matéria orgânica, análise da composição química através do ensaio de fluorescência Raio-X e avaliação do comportamento do resíduo a variações de temperatura por meio da análise térmica. Os blocos moldados apresentaram diminuição gradativa na resistência à compressão axial à medida em que se aumentavam os percentuais de lodo adicionados ao concreto, alcançando, porém, a resistência desejada de 35 Mpa em todos os percentuais de lodo adicionados. A absorção de água dos blocos moldados aumentou de forma diretamente proporcional à quantidade de lodo têxtil adicionado em cada dosagem, mas mantendo-se abaixo de 6%. O teor de umidade média do lodo têxtil foi de 67,7%, o teor de matéria orgânica 4,6%, o módulo de finura 2,95 e a dimensão máxima de 4,75 mm. Quanto à composição química destacam-se a presença de óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A massa específica do lodo foi de 1,85 g/cm<sup>3</sup>, sendo 26,67% mais leve do que o agregado miúdo utilizado em estudo. Os blocos de concreto moldados com adição de lodo apresentaram-se como uma estratégia de destinação ambientalmente correta do resíduo, ao mesmo tempo em que aumentou o volume de produção em 14,29% nos traços moldados com 8% e 10% de adição de lodo têxtil.

Palavras-chave: Lodo têxtil. Adição. Concreto. Pavimento intertravado. Inertização.

## ABSTRACT

Textile sludge refers to the solid waste generated during the fabric dyeing process in the textile industry. These residues may include chemicals, dyes, solvents, fabric fibers, and other impurities that are washed or filtered out during the dyeing process. This waste can negatively impact the environment in various ways, including water and soil contamination, which can affect human health. Additionally, some sludge treatment processes can emit toxic gases, contributing to air pollution. This environmental pollution highlights the importance of sustainable waste management practices in the textile industry to mitigate these adverse impacts. The study in question aims to achieve environmentally sound disposal of textile sludge by analyzing the feasibility of inertizing the residue in concrete for use in interlocking pavements, adding 6%, 8%, and 10% relative to the natural fine aggregate used (washed sand). For concrete dosing, the method developed by the Brazilian Portland Cement Association (ABCP) was used, defining a mix ratio of 1:1.19:2.18:0.40 (cement, sand, gravel, and water, respectively), from which concrete prism blocks were molded with and without the addition of textile waste. After a curing period of 28 days, axial compression strength tests and water absorption tests were conducted to evaluate whether the molded blocks with added sludge meet the compression strength and water absorption parameters established by NBR 9781/2013, which are a minimum strength of 35 MPa and a maximum acceptable water absorption of 6% for concrete paving blocks. To obtain a more comprehensive understanding of the physical and chemical compositions of textile sludge, characterization tests were conducted, including moisture content, specific gravity, particle size distribution, organic matter content, chemical composition analysis using X-ray fluorescence, and evaluation of the residue's behavior under temperature variations through thermal analysis. The molded blocks showed a gradual decrease in axial compression strength as the percentages of added sludge increased in the concrete, while still maintaining the desired strength of 35 MPa in all percentages of added sludge. The water absorption of the molded blocks increased directly proportional to the amount of textile sludge added in each dosage but remained below 6%. The average moisture content of the textile sludge was 67.7%, the organic matter content was 4.6%, the fineness modulus was 2.95, and the maximum particle size was 4.75 mm. Regarding the chemical composition, the presence of calcium oxide (CaO), silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>), and aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) stands out. The specific gravity of the sludge was 1.85 g/cm<sup>3</sup>, being 26.67% lighter than the fine aggregate used in the study. The concrete blocks molded with the addition of sludge proved to be an environmentally sound disposal strategy for the residue, while also increasing the production volume by 14.29% in the mixtures molded with 8% and 10% added textile sludge.

Keywords: Textile sludge. Addition. Concrete. Interlocking flooring. Inertization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização da área de coleta do lodo têxtil.....	24
<b>Figura 2</b> - Fluxograma das etapas metodológicas. ....	25
<b>Figura 3</b> - Procedimento de caracterização da massa específica do cimento.....	27
<b>Figura 4</b> - Procedimento de caracterização da densidade e absorção de água da areia.....	30
<b>Figura 5</b> - Determinação do volume do recipiente e massa unitária da areia.....	32
<b>Figura 6</b> - Procedimento do ensaio de granulometria da areia.....	33
<b>Figura 7</b> - Ensaio do teor de matéria orgânica da areia.....	34
<b>Figura 8</b> - Procedimento de caracterização da densidade e absorção de água da brita.....	36
<b>Figura 9</b> - Procedimento para a determinação da massa unitária da brita.....	37
<b>Figura 10</b> - Procedimento do ensaio de granulometria da brita.....	38
<b>Figura 11</b> - Processo de destorroamento do lodo têxtil.....	38
<b>Figura 12</b> - Etapas do ensaio do teor de umidade do lodo têxtil.....	39
<b>Figura 13</b> - Procedimento para determinação da massa unitária do lodo têxtil.....	40
<b>Figura 14</b> - Procedimento para determinação da massa específica do lodo têxtil.....	41
<b>Figura 15</b> - Procedimento de granulometria do lodo têxtil.....	41
<b>Figura 16</b> - Determinação do Teor de matéria orgânica do lodo têxtil.....	42
<b>Figura 17</b> - Separação e pesagem prévia dos materiais em balança de precisão.....	45
<b>Figura 18</b> - Procedimento de preparação de concreto em laboratório.....	46
<b>Figura 19</b> - Procedimento do ensaio de abatimento do tronco de cone.....	47
<b>Figura 20</b> - Criação da Base e Compactação da mistura por agitação mecânica.....	48
<b>Figura 21</b> - Realização do acabamento com o uso de desempenadeira.....	48
<b>Figura 22</b> - Primeiro estágio do processo de cura.....	49
<b>Figura 23</b> - Desmoldagem e cura úmida dos blocos de concreto.....	49
<b>Figura 24</b> - Ensaio de resistência à compressão.....	50
<b>Figura 25</b> - Procedimento do ensaio de absorção de água.....	52
<b>Figura 26</b> - Curva granulométrica da areia.....	56
<b>Figura 27</b> - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	60
<b>Figura 28</b> - Consistência do concreto com adição de lodo têxtil úmido.....	61
<b>Figura 29</b> - Curva granulométrica do lodo têxtil.....	63
<b>Figura 30</b> - Curvas termogravimétricas (TG) e derivada termogravimétrica (DTG).....	67
<b>Figura 31</b> - Determinação da relação água/cimento através da curva de Abrams.....	68

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Características do recipiente para o ensaio de massa unitária.....	30
<b>Tabela 2</b> - Coeficiente de Student.....	51
<b>Tabela 3</b> - Massa específica do cimento Portland .....	54
<b>Tabela 4</b> - Densidade da areia na condição seca e saturada superfície seca.....	55
<b>Tabela 5</b> - Absorção de água do agregado miúdo.....	55
<b>Tabela 6</b> - Massa unitária do agregado miúdo.....	56
<b>Tabela 7</b> - Teor de matéria orgânica .....	57
<b>Tabela 8</b> - Densidade da brita na condição seca e saturada superfície seca .....	58
<b>Tabela 9</b> - Absorção de água do agregado graúdo.....	58
<b>Tabela 10</b> - Massa unitária do agregado graúdo .....	59
<b>Tabela 11</b> - Teores de umidade das amostras .....	60
<b>Tabela 12</b> - Massa unitária do lodo têxtil .....	62
<b>Tabela 13</b> - Massa específica do lodo têxtil.....	62
<b>Tabela 14</b> - Teor de matéria orgânica .....	64
<b>Tabela 15</b> - Análise da composição química .....	65
<b>Tabela 16</b> - Consumo de água aproximado (Ca) (L/m <sup>3</sup> ).....	69
<b>Tabela 17</b> - Volume de Brita (m <sup>3</sup> ) .....	71
<b>Tabela 18</b> - Proporção dos materiais para cada mistura de concreto.....	73
<b>Tabela 19</b> - Leitura do abatimento através do slump test .....	74
<b>Tabela 20</b> - Valores de resistência à compressão axial dos corpos de prova (Mpa) .....	75
<b>Tabela 21</b> - Análise de variância da resistência à compressão .....	77
<b>Tabela 22</b> - Teste de Tukey .....	77
<b>Tabela 23</b> - Absorção de água .....	78
<b>Tabela 24</b> - Análise de variância da absorção de água .....	79
<b>Tabela 25</b> - Teste de Tukey .....	80
<b>Tabela 26</b> - Quantidade de <i>Pavers</i> moldados .....	80

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Resistência característica à compressão para pavimento intertravado.....	44
<b>Quadro 2</b> - Classes de consistência.....	69

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1. Geral</b> .....	15
<b>2.2. Específicos</b> .....	15
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	16
<b>3.1. Indústria têxtil</b> .....	16
<b>3.2. Relação entre as lavanderias industriais e a geração do efluente têxtil</b> ...	17
<b>3.3. Processos de tratamento do efluente têxtil</b> .....	19
<b>3.4. Alternativas de reaproveitamento do resíduo têxtil</b> .....	22
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
<b>4.1. Localização da área de estudo e etapas metodológicas</b> .....	24
<b>4.2. Método de dosagem do Concreto</b> .....	25
<b>4.3. Materiais utilizados</b> .....	26
<b>4.4. Caracterização dos materiais</b> .....	26
4.4.1 <i>Cimento Portland</i> .....	26
4.4.2 <i>Agregado miúdo (areia lavada)</i> .....	28
4.4.3 <i>Agregado Graúdo (brita)</i> .....	34
4.4.4 <i>Lodo têxtil</i> .....	38
<b>4.5. Parâmetros de dosagem do concreto</b> .....	43
4.5.1 <i>Resistência média à compressão do concreto</i> .....	43
4.5.2 <i>Determinação da relação água/cimento</i> .....	44
4.5.3 <i>Consumo materiais</i> .....	44
4.5.4 <i>Traço de concreto</i> .....	44
<b>4.6. Preparação do concreto e ensaio de abatimento do tronco de cone</b> .....	45
<b>4.7. Moldagem e cura dos blocos de pavimento intertravado</b> .....	47
<b>4.8. Determinação da resistência à compressão</b> .....	49
<b>4.9. Absorção de água</b> .....	51
<b>4.10. Análise estatística</b> .....	52
<b>4.11. Rendimento da moldagem e consumo de cimento por bloco moldado</b> ....	53
<b>5. RESULTADOS</b> .....	54

<b>5.1. Caracterização dos materiais</b> .....	54
5.1.1 <i>Massa específica do cimento</i> .....	54
5.1.2 <i>Agregado Miúdo</i> .....	54
5.1.3 <i>Agregado Graúdo</i> .....	57
5.1.4 <i>Lodo Têxtil</i> .....	60
<b>5.2. Parâmetros de dosagem do concreto</b> .....	68
5.2.1 <i>Resistência média à compressão do concreto</i> .....	68
5.2.2 <i>Determinação da relação água cimento</i> .....	68
5.2.3 <i>Consumo materiais</i> .....	69
5.2.4 <i>Determinação do traço de concreto</i> .....	72
<b>5.3. Preparação do concreto e ensaio de abatimento do tronco de cone</b> .....	73
<b>5.4. Determinação da resistência à compressão dos blocos moldados</b> .....	75
<b>5.5. Absorção de água</b> .....	78
<b>5.6. Rendimento da moldagem e consumo de cimento por bloco moldado</b> ....	80
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	82
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor da indústria têxtil representa uma grande contribuição econômica e social. Segundo dados do Cadastro Geral de Empregados e Desempregados (CAGED), apenas em 2021 foram gerados quase 120 mil postos de trabalho no ramo; e, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), houve uma receita estimada em 194 bilhões de reais no mesmo ano. Todo o processo da indústria têxtil inicia-se nos diversos polos industriais de confecção, dentre os quais destacam-se: os polos industriais do Ceará, do Vale do Itajaí (no estado de Santa Catarina), do Agreste Pernambucano, e também do Polo de Americana, no estado de São Paulo (Tuon, 2021).

O estado de Pernambuco destaca-se por possuir o Arranjo Produtivo Local (APL), conhecido por ser um dos maiores polos de confecção têxtil do Brasil. Os municípios pernambucanos que fazem parte desse arranjo são: Caruaru, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe, Brejo da Madre de Deus, Vertentes, Surubim, Riacho das Almas e Taquaritinga do Norte. Durante o processo produtivo de fabricação têxtil, existem diversas outras etapas que vão além da confecção como, por exemplo, lavagem, amaciagem, tingimento e descoloração. Essas importantes etapas são realizadas pelas indústrias de beneficiamento, que na indústria têxtil são conhecidas como lavanderias industriais (Moura et al., 2021).

Por sua vez, as atividades desenvolvidas por essas lavanderias geram um resíduo industrial conhecido como lodo têxtil. Na etapa de lavagem de tecidos, por exemplo, são utilizados diversos produtos químicos, como detergentes, alvejantes e amaciantes para remover sujeira, manchas e impurezas dos tecidos. Esses produtos químicos podem se misturar com a água utilizada na lavagem, formando o efluente têxtil contendo resíduos químicos e orgânicos. Na etapa de tingimento, as lavanderias têxteis aplicam cor aos tecidos por meio da imersão em banhos de corantes (Pensupa et al. 2017). Nesse processo, ocorre a perda de corantes que, de acordo com Martins (1997), representa cerca de 30 a 40% da poluição orgânica gerada em lavanderias têxteis.

Segundo Souto (2017), o efluente têxtil apresenta mais de 80% dos produtos químicos que foram utilizados nas etapas de beneficiamento têxtil, podendo acarretar uma série de problemas sociais e ambientais significativos, como a contaminação de corpos d'água próximos se descartados sem tratamento adequado. Dessa forma, o lodo têxtil caracteriza-se como um resíduo industrial que é produzido em larga escala em decorrência de atividades das diversas indústrias têxteis espalhadas ao redor do planeta, sendo essencial que os estudos que propõem alternativas de destinação adequada para o resíduo de lavanderia têxtil também sejam diversos,

a fim de que haja soluções suficientes para lidar com a demanda de lodo produzido pela indústria têxtil.

Nesse sentido, o estudo em questão pretendeu realizar a destinação ambientalmente adequada do lodo têxtil, através da inertização do resíduo no concreto para fins de utilização em pavimentos intertravados. Pretendeu-se realizar essa inertização com o lodo têxtil seco, adicionando-o à proporção de materiais utilizados para preparar o concreto, com o auxílio do método de dosagem de concreto desenvolvido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (1995).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Geral

Realizar a análise da viabilidade de inertização do lodo têxtil através do adicionamento do resíduo no traço de concreto.

### 2.2. Específicos

Caracterizar o lodo têxtil quanto à sua composição físico-química;

Avaliar diferentes proporções de inertização de lodo têxtil seco no concreto em adição ao agregado miúdo natural;

Determinar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos moldados por meio dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água;

Avaliar a significância do efeito da adição de lodo têxtil nos *pavers* de concreto, em termos de resistência à compressão e absorção de água, por meio de análise estatística.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Indústria têxtil**

Mais da metade da indústria têxtil global tem origem asiática, com a China se destacando como um dos principais impulsionadores desse cenário. Os países asiáticos ocupam as primeiras posições em todas as métricas do setor, liderando em exportações, produção, empregabilidade, cultivo de algodão e investimentos, conforme destacado pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil. No ocidente, o Brasil possui uma posição de destaque, sendo a maior cadeia têxtil completa do Ocidente. Com uma história de quase dois séculos no país, a indústria têxtil é singular por possuir uma cadeia que abrange a produção das fibras, como o cultivo de algodão, fiações, tecelagens, beneficiadoras, confecções e um varejo robusto (ABIT, 2024).

De acordo com o Instituto de Estudos e Marketing Industrial (IEMI), em 2023 o setor têxtil brasileiro registrou um faturamento de R\$190 bilhões em 2021. No ano seguinte, em 2022, esse faturamento aumentou para R\$193,2 bilhões. Em termos de produção, foram fabricadas 8,07 bilhões de peças em 2022, em comparação com 8,5 bilhões de peças em 2021. A região do Agreste de Pernambuco é responsável por uma parcela significativa da produção nacional de confecções. Em 2021, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pernambuco e Sergipe concentravam 14,6% do valor da produção do Brasil e 91,5% da Região Nordeste. Tratando-se de Pernambuco, essa produção concentra-se, majoritariamente, na região do Agreste, em decorrência das atividades desenvolvidas no Arranjo produtivo Local (APL) da região.

O APL do agreste pernambucano é uma concentração geográfica de empresas e instituições interconectadas, sendo conhecida nacionalmente e internacionalmente pela sua relevância no setor têxtil brasileiro. Os municípios inseridos no arranjo produtivo local incluem Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e outras cidades circunvizinhas, com uma longa tradição na fabricação de roupas, tecidos e acessórios (SEBRAE, 2003).

Esse processo de fabricação de roupas não acaba na confecção. Após essa etapa entra em cena o processo de acabamento têxtil, que é uma etapa fundamental na produção de tecidos e confecções. Esta etapa é realizada pelas lavanderias industriais, que desenvolvem as atividades de acabamento têxtil, garantindo que os produtos finais atinjam os padrões de qualidade desejados pelos clientes, agregando valor aos produtos têxteis (Ramos et al., 2020).

### 3.2. Relação entre as lavanderias industriais e a geração do efluente têxtil

A indústria têxtil, conhecida por seu considerável faturamento e alta produção, também contribui substancialmente para a produção de resíduos, com destaque para o lodo têxtil e as cinzas de biomassa. Esses resíduos são predominantemente gerados nas lavanderias, devido aos processos químicos e físicos envolvidos nos tratamentos de tecidos e peças de vestuário, como lavagem, tingimento, amaciamento, impermeabilização e acabamentos: antimicrobiano, resistência às rugas e retardante de chamas. Essas atividades são cruciais na produção têxtil, pois são responsáveis por conferir características específicas aos tecidos, tornando-os mais atraentes, funcionais e confortáveis para os consumidores (Moura, 2021).

Durante o processo de lavagem são utilizados detergentes e alvejantes para remover sujeira, manchas e resíduos provenientes da etapa de produção e confecção. Os detergentes utilizados pelas lavanderias têxteis são compostos por surfactantes que reduzem a tensão superficial da água e ajudam a remover sujeira e óleos dos tecidos. Além disso, os detergentes podem conter ingredientes adicionais, como agentes de branqueamento, enzimas e fragrâncias, dependendo das necessidades específicas de limpeza e cuidado dos tecidos. Os tecidos são então colocados em máquinas de lavar industriais, onde passam por um ciclo de lavagem e centrifugação que envolve a agitação mecânica (Rezende et al., 2009).

As lavanderias também realizam o tingimento, aplicando produtos químicos aos tecidos para alterar sua cor. Nesse processo, os tecidos são submersos em um banho de tingimento contendo corantes dissolvidos em água. Os corantes sintéticos são os mais comumente utilizados na indústria têxtil devido à sua maior durabilidade e variedade de cores disponíveis. Eles são compostos por moléculas que se ligam às fibras dos tecidos por meio de processos de difusão e adsorção, resultando em uma coloração uniforme. O banho de tingimento pode ocorrer em máquinas de tingimento de lotes ou em tanques de tingimento (Narimatsu et al., 2021).

Além dos corantes, outros produtos químicos auxiliares são utilizados durante o processo de tingimento como, agentes niveladores que ajudam a garantir uma distribuição uniforme dos corantes nos tecidos, prevenindo manchas e irregularidades na cor final, e agentes de fixação que ajudam a fixar os corantes aos tecidos, garantindo uma cor duradoura e resistente à lavagem (Narimatsu et al., 2021).

O amaciamento é um processo utilizado para tornar os tecidos mais macios ao toque. Isso é especialmente importante para tecidos de algodão e outros materiais ásperos. Os amaciantes são produtos químicos adicionados à água de lavagem ou aplicados diretamente nos

tecidos para revestir as fibras e reduzir o atrito entre elas. Os amaciantes podem ser catiônicos, aniônicos ou não iônicos, e sua seleção depende do tipo de tecido e das propriedades desejadas (Santos & Do carmo, 2020).

A impermeabilização é um processo que confere aos tecidos a capacidade de repelir a água e outros líquidos. Isso é especialmente útil para tecidos utilizados em roupas de chuva, guarda-chuvas, estofados e outros produtos que precisam resistir à penetração de líquidos. Os agentes de impermeabilização são geralmente compostos por substâncias hidrofóbicas, como silicones ou fluoroquímicos, que são aplicados aos tecidos por meio de pulverização, imersão ou revestimento (Ferreira, 2023).

O acabamento antimicrobiano é utilizado para conferir propriedades antibacterianas aos tecidos, reduzindo o crescimento de microorganismos e odores desagradáveis. Os agentes antimicrobianos podem ser incorporados por meio de tratamentos químicos. Substâncias como sais de prata, triclosan e quaternários de amônio são comumente utilizadas como agentes antimicrobianos (Santos, 2016).

O acabamento para resistência às rugas é aplicado para reduzir a formação de vincos e rugas nos tecidos, facilitando o processo de engomar e melhorando a aparência das peças de vestuário. Os agentes de resistência às rugas são frequentemente polímeros sintéticos que são aplicados aos tecidos por meio de pulverização, imersão ou revestimento (Badaró, 2019).

Tecidos utilizados em aplicações que requerem resistência ao fogo, como uniformes de bombeiros e equipamentos de proteção pessoal, podem passar por um acabamento retardante de chamas. Esses acabamentos são geralmente à base de produtos químicos inorgânicos, como fosfatos e boratos, que retardam a propagação do fogo ao reduzir a inflamabilidade dos tecidos (Teixeira, 2015).

Como resultado, parte desses produtos químicos utilizados no tratamento de tecidos e peças de vestuário é transferida para a água residual, conhecida como efluente têxtil. De acordo com Arslan-Alaton, Gursoy e Schmidt (2008), em torno de 50 a 100 litros de efluente por quilo de tecido são gerados durante os processos de acabamento têxtil. Os efluentes provenientes das lavanderias têxteis são submetidos a um processo de tratamento para remover sua carga poluente antes de serem descarregados nos corpos d'água. Durante esse tratamento é gerado um resíduo sólido conhecido como lodo têxtil. Esse material possui alta umidade e apresenta uma composição química diversificada devido à complexidade dos processos de beneficiamento (Vasconcelos, 2020).

### 3.3. Processos de tratamento do efluente têxtil

Conforme apontado por Souto (2017) as lavanderias têxteis destacam-se como uma das principais fontes de contaminação ambiental, devido à produção significativa de resíduos, incluindo o lodo têxtil. Esse tipo de resíduo é resultante dos processos de tratamento do efluente utilizados nas lavanderias industriais. Dentre os processos de tratamento mais utilizados destacam-se o tratamento físico, químico, biológico e o tratamento por ozonização.

O tratamento físico envolve a remoção de sólidos suspensos da água residual por meio de técnicas físicas, como sedimentação, filtração e centrifugação. Durante a sedimentação, os sólidos suspensos são separados da água por gravidade, formando um lodo que pode ser removido posteriormente. Na filtração, a água residual passa por um meio filtrante que retém os sólidos suspensos. A centrifugação utiliza a força centrífuga para separar os sólidos da água residual (Silva & Xavier, 2020).

O tratamento químico envolve o uso de coagulantes, como sulfato de alumínio ou cloreto férrico, que ajudam a aglomerar os sólidos suspensos, facilitando sua remoção por sedimentação ou filtração. Além disso, podem ser utilizados produtos químicos oxidantes, como cloro ou peróxido de hidrogênio, para desinfetar a água e destruir organismos patogênicos (Ramos et al., 2020).

O tratamento biológico utiliza micro-organismos para degradar poluentes orgânicos presentes na água residual. Isso pode ser feito em reatores biológicos, onde os micro-organismos são cultivados em condições controladas para maximizar a eficiência da degradação dos poluentes. Os micro-organismos consomem a matéria orgânica presente na água residual, convertendo-a em produtos mais estáveis, como água e dióxido de carbono (Ramos et al., 2020).

A ozonização é um processo de tratamento avançado que utiliza ozônio para oxidar e degradar poluentes presentes na água residual. O ozônio é um oxidante muito potente que pode destruir uma ampla gama de poluentes, incluindo compostos orgânicos persistentes e micro-organismos patogênicos. Este processo é eficaz na remoção de odores desagradáveis e na desinfecção do efluente (Castilhos, 2015).

No polo de confecções do Agreste Pernambucano o método de tratamento se concentra principalmente em uma abordagem físico-química simplificada. As etapas essenciais envolvem gradeamento, equalização, coagulação/floculação/decantação e filtração. No processo de gradeamento ocorre a remoção inicial de sólidos grosseiros e grandes objetos do efluente. Isso é feito passando a água por grades ou peneiras que retêm os sólidos maiores, como pedaços de

tecido, fibras e detritos. Essa etapa ajuda a proteger equipamentos subsequentes de danos causados por sólidos indesejados e facilita o tratamento posterior da água (Moura, 2021).

Após o gradeamento a água residual vai para o tanque de equalização, no qual sua composição e características são uniformizadas. Isso é importante porque o fluxo de efluentes de uma lavanderia têxtil pode variar ao longo do tempo em termos de volume e composição química. A equalização ajuda a garantir um tratamento mais consistente e eficaz dos efluentes, minimizando flutuações na carga orgânica e nos poluentes presentes na água (Cometti, 2016).

Posteriormente, são adicionados agentes coagulantes à água residual para promover a aglutinação de partículas suspensas, formando flocos maiores que podem ser facilmente removidos. Os agentes coagulantes mais comuns utilizados são o policloreto de alumínio ( $Al_2(OH)_3Cl_3$ ) e o sulfato de alumínio ( $Al_2SO_4$ ). Os flocos formados aglutinam os sólidos em suspensão na água, facilitando sua remoção por decantação. Durante a decantação, os flocos sedimentam no fundo do tanque separando-se da água clarificada, que é então direcionada para a próxima etapa de tratamento (Silva, 2023).

Na etapa final, a água clarificada passa por um processo de filtração para remover os flocos restantes e outras partículas suspensas finas. Isso é feito passando a água através de leitos de areia, carvão ativado ou outros meios filtrantes que retêm os sólidos suspensos remanescentes. O líquido filtrado resultante é então considerado tratado e pode ser reutilizado em processos industriais, como lavagem, ou descartado de forma segura no meio ambiente, dependendo dos regulamentos locais (Pimentel; Gonçalves; Rezende, 2018).

O lodo têxtil retido nos filtros, que consiste nos flocos de sólidos suspensos removidos durante o processo de tratamento, passa por um processo de secagem em leitos específicos. O resíduo têxtil, como resultado do tratamento físico-químico, é inicialmente composto por uma alta porcentagem de água, o que o torna volumoso e difícil de manusear e transportar. O processo de secagem visa reduzir esse teor de umidade, consequentemente diminuindo o volume do lodo. Isso facilita o armazenamento e o transporte do material para a disposição final. A secagem também contribui para a estabilização microbiológica do material, inibindo a atividade de microrganismos patogênicos e reduzindo o potencial de contaminação ambiental. A redução do teor de umidade cria um ambiente menos favorável para o crescimento microbiano, ajudando a tornar o lodo mais seguro para a disposição final (Cometti, 2016).

Além disso, o lodo têxtil apresenta odor desagradável devido à decomposição anaeróbica de matéria orgânica pelos microrganismos presentes. Ao submeter o lodo ao processo de secagem a atividade microbiana é reduzida, resultando em uma diminuição do odor

associado ao material. Isso é importante para evitar reclamações de moradores vizinhos e minimizar impactos negativos no ambiente local (Santos, 2022). Após ser submetido ao processo de secagem, e ter adquirido uma consistência mais sólida e estável, o lodo deve ser descartado de maneira adequada, isso pode envolver a compostagem, queima ou disposição em aterros sanitários adequados (Santos, 2023).

Segundo Barboza (2011) o lodo têxtil resultante do processo de tratamento de efluentes possui composição química variada, contendo uma concentração significativa de metais pesados e outras substâncias químicas. Entre essas substâncias destacam-se o alumínio, manganês, ferro, sódio, cálcio, fósforo, silício, carbono total, carbono orgânico e cloretos. Essas substâncias podem causar uma série de prejuízos ambientais e sociais, incluindo contaminação do solo e da água, toxicidade para organismos aquáticos e terrestres, impactos na saúde humana e poluição atmosférica.

A disposição inadequada do lodo têxtil no meio ambiente pode resultar na lixiviação de metais pesados (como alumínio, manganês e ferro) para o solo, especialmente em áreas próximas aos locais de disposição. Esses metais podem ser absorvidos por plantas e entrar na cadeia alimentar, representando um risco à saúde humana e ambiental. Além disso, a infiltração desses metais pesados do lodo têxtil para lençóis freáticos e corpos d'água próximos pode contaminar fontes de água potável e ecossistemas aquáticos. Isso pode afetar a biodiversidade aquática e comprometer a qualidade da água para consumo humano e atividades recreativas (Viotto, 2019).

A presença de substâncias químicas variadas no lodo têxtil (como sódio, cálcio, fósforo, silício, carbono total, carbono orgânico e cloretos) pode alterar a composição e o pH do solo afetando sua fertilidade e capacidade de suportar o crescimento de plantas. Isso pode resultar em perdas na produção agrícola e degradação de ecossistemas naturais. Alguns desses compostos, como cloretos em altas concentrações, podem representar um risco à saúde humana se forem liberados no meio ambiente (Júnior, 2011).

A exposição prolongada a essas substâncias pode causar problemas de saúde, como distúrbios gastrointestinais e desequilíbrios eletrolíticos. Durante a disposição do resíduo têxtil podem ocorrer emissões de gases e partículas para a atmosfera. Isso pode contribuir para a poluição do ar e afetar a qualidade do ar em áreas próximas aos locais de disposição, potencialmente causando impactos na saúde respiratória da população local (Yuliana, 2022).

### 3.4. Alternativas de reaproveitamento do resíduo têxtil

O reaproveitamento do lodo têxtil é de extrema importância, não apenas para reduzir os impactos ambientais associados à sua disposição inadequada, mas também para aproveitar seus recursos potenciais. O lodo têxtil contém uma variedade de substâncias, incluindo metais pesados e compostos orgânicos, que podem ser recuperados e utilizados em diversas aplicações. Além disso, o reaproveitamento desse resíduo pode contribuir para a economia circular, promovendo a reutilização de recursos e a redução do desperdício (Lima, 2022).

Em função disso, ao longo dos últimos anos, diversas pesquisas vêm estudando a possibilidade de reaproveitamento do resíduo têxtil. Uma alternativa promissora é a utilização do lodo têxtil na agricultura, onde pode ser aplicado como fertilizante orgânico ou em processos de compostagem. Devido à presença de nutrientes em sua composição química, como fósforo, cálcio, magnésio e enxofre, o lodo têxtil pode contribuir para melhorar a fertilidade do solo e promover o crescimento saudável das plantas. Além disso, o uso do lodo têxtil na agricultura representa uma forma de fechar o ciclo de nutrientes, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos e minimizando os impactos ambientais associados à sua produção e uso (Águida et al., 2016).

Na indústria da construção civil pesquisas têm estudado a possibilidade de utilização do lodo têxtil como matéria-prima alternativa em diferentes aplicações. O estudo de Lima (2023) explorou o uso do resíduo têxtil em substituição parcial ao agregado miúdo natural (areia) nos teores de 10 %, 20 % e 25% para aplicação em argamassas de revestimento de paredes e tetos. Os resultados indicaram que as argamassas com incorporação de lodo têxtil apresentaram redução na densidade de massa aparente e na resistência à compressão, porém, observou-se uma melhoria significativa na absorção de água por capilaridade, demonstrando a viabilidade de substituição de até 20% para esse tipo de aplicação.

Em outro estudo desenvolvido por Aquino et al. (2015) analisou-se a adição do lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação, utilizando-se percentuais do resíduo na argamassa em escala industrial, nas proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de lodo. Com o estudo concluíram que é possível utilizar 2% de adição de lodo em massas argilosas utilizadas pelas indústrias de cerâmica vermelha para produção de blocos cerâmicos de vedação sem que haja perdas de resistência ou de qualidade das propriedades das peças.

Oliveira (2014) realizou um estudo para verificar a utilização da técnica de solidificação/estabilização com incorporação de 10%, 15% e 20% de lodo em solo para aplicação em base e sub-base de pavimentos rodoviários. Através desse estudo, demonstrou-se

que a incorporação de até 10% do lodo têxtil como parte integrante das camadas de base e sub-base dos pavimentos pode ser uma alternativa viável e sustentável para a destinação desse resíduo, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado ao seu descarte inadequado.

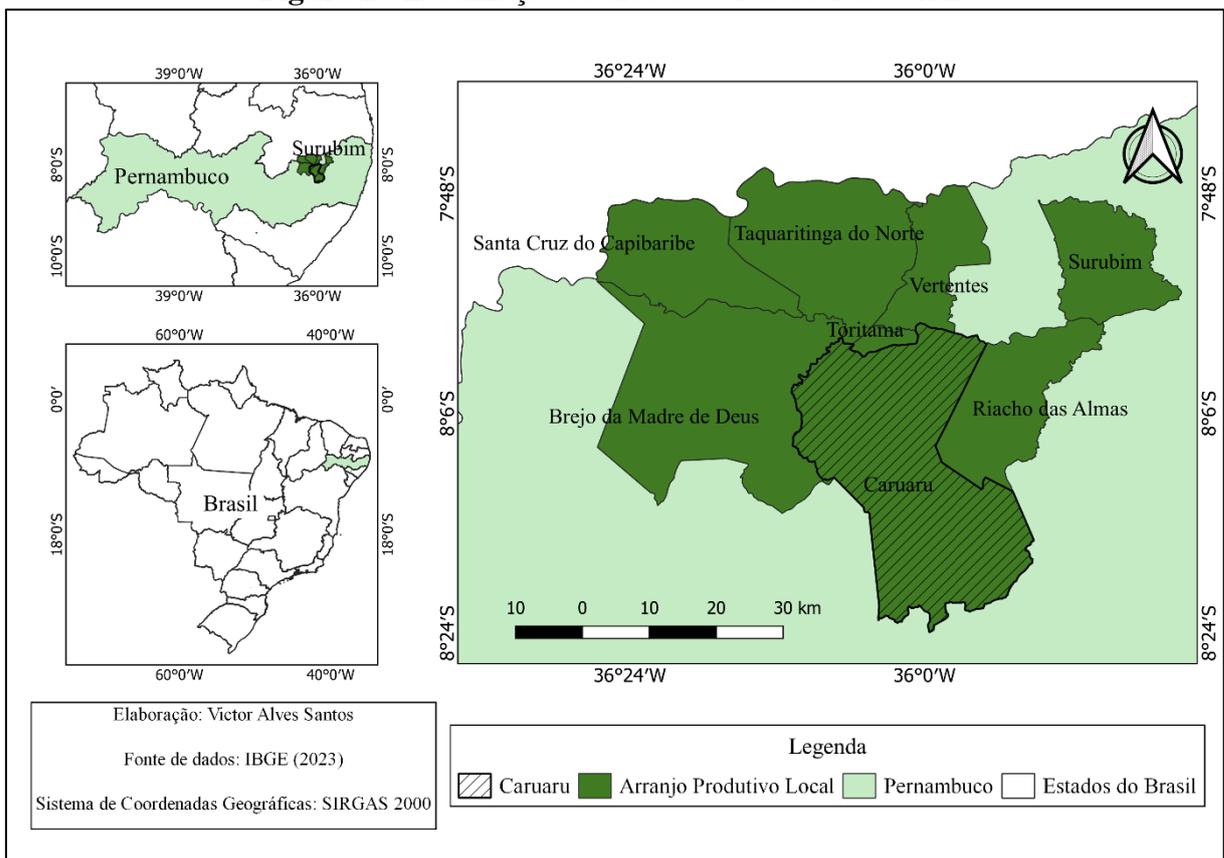
Por sua vez, Moura (2021) explorou a incorporação de 2%, 3%, 4% e 5% de lodo têxtil em misturas de concreto asfáltico como material constituindo do revestimento. Por meio do estudo, demonstrou-se que, em comparação com as amostras de referência sem o resíduo, a adição de 2% e 3% de lodo não causou efeitos prejudiciais na resistência à tração, deformação permanente e rigidez das misturas, indicando um eficaz aprisionamento do lodo têxtil dentro da matriz asfáltica, reduzindo os impactos ambientais.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Localização da área de estudo e etapas metodológicas

O lodo têxtil foi coletado na estação de tratamento de efluentes (E.T.E), em uma lavanderia têxtil, localizada no município de Caruaru – PE, que faz parte do Arranjo produtivo local (Figura 1). O material coletado foi proveniente da pós-secagem em leitos, que é a última etapa do tratamento do efluente têxtil. O estudo de inertização do lodo em concreto foi conduzido no laboratório de materiais de construções sustentáveis da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) Campus de Recife-PE.

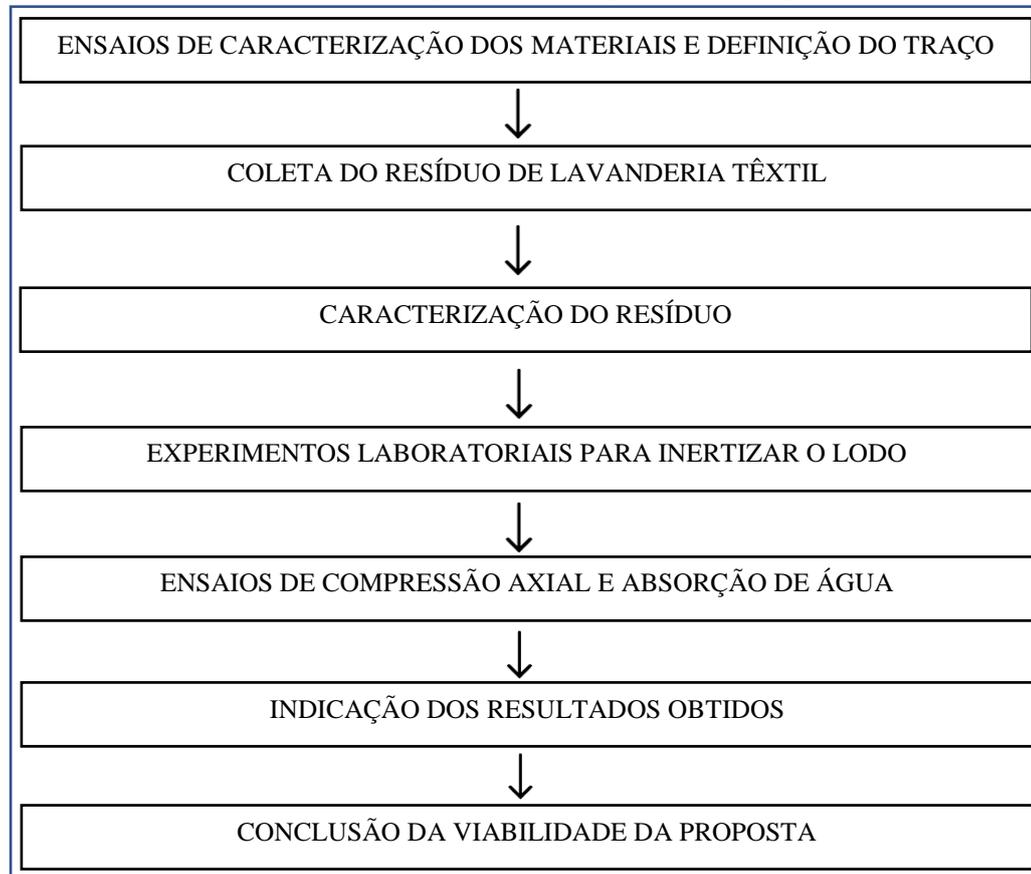
**Figura 1** - Localização da área de coleta do lodo têxtil



Fonte: Autor, 2024

As etapas metodológicas para o desenvolvimento do trabalho em estudo estão apresentadas na Figura 2.

**Figura 2 - Fluxograma das etapas metodológicas.**



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.2. Método de dosagem do Concreto

O método de dosagem de concreto utilizado no estudo, baseou-se no estudo técnico - Parâmetros de dosagem de concreto - desenvolvido pela ABCP (1995). Para a realização do método é fundamental que as características dos materiais a serem utilizados sejam preestabelecidas através de ensaios laboratoriais, normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a fim de que hajam dados suficientes para a execução da dosagem do método em estudo. Referindo-se esses dados à: Dimensão Máxima Característica (DMC), Módulo de Finura (MF), Massa Específica e Massa Unitária dos agregados e aglomerante.

O método ABCP é um método experimental, o que significa que ao se produzir o concreto após o cálculo, alguns parâmetros foram observados como, por exemplo, resistência, coesão, plasticidade e segregação. Caso algum destes não estejam de acordo com o esperado,

corrige-se a proporção de materiais (traço) até atingir a resistência e trabalhabilidade aceitáveis para a aplicação típica pretendida.

### **4.3. Materiais utilizados**

Para a confecção dos blocos de pavimento intertravado, também conhecido como *paver*, utilizou-se o aglomerante Cimento Portland do tipo CP II Z 32. As especificações físicas, químicas e mecânicas do aglomerante atendem à ABNT NBR 16697/2018: *Cimento Portland – Requisitos*.

Quando necessário ajustar a trabalhabilidade, mantendo a relação água/cimento, utilizou-se o aditivo Sika® Concreto Forte, o qual, conforme especificações técnicas fornecidas pelo fabricante, atua como um plastificante, fluidificante e redutor de água para concretos, apresentando uma densidade de  $1,06 \pm 0,02 \text{ kg L}^{-1}$  (SIKA, 2024).

Como agregado miúdo utilizou-se a areia lavada, também conhecida como areia natural, sendo a mais utilizada na construção civil e extraída dos leitos dos rios através da decantação. Por sua vez, para agregado graúdo utilizou-se a brita 19, produzida através de um processo de britagem de rochas graníticas (LUZ; ALMEIDA, 2012). Ambos agregados foram fabricados pela empresa Granumix em Vitória de Santo Antão – PE. A água utilizada foi proveniente do abastecimento público.

### **4.4. Caracterização dos materiais**

Os materiais utilizados no estudo foram disponibilizados à equipe do laboratório de materiais de construções sustentáveis para o desenvolvimento de estudos científicos à nível de pós-graduação.

#### **4.4.1 Cimento Portland**

A caracterização do cimento consistiu na determinação da sua massa específica. O ensaio foi realizado em duplicata observando-se os procedimentos da NBR 16605/2017: *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*.

##### **4.4.1.1 Massa específica do cimento**

Com o auxílio de uma haste longa encheu-se de querosene o frasco de Le Chatelier até a marca correspondente entre 0 e  $1 \text{ cm}^3$ , em seguida o frasco foi colocado em um banho de água

à temperatura ambiente e em posição vertical por um período de 30 min. Retirado do banho após esse período, registrou-se a primeira leitura ( $V_1$ ).

Tomando-se uma massa de cimento ( $m$ ), pesado previamente em cadinho, preencheu-se o frasco de Le Chatelier com o auxílio de uma haste curta, provocando um deslocamento do querosene compreendido entre as marcas de  $18 \text{ cm}^3$  e  $24 \text{ cm}^3$ . Colocou-se novamente o frasco em um banho térmico por mais 30 min, registrando-se em seguida a leitura final ( $V_2$ ). O ensaio foi realizado em triplicata (figura 3). Calculou-se a massa específica do material através da equação 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

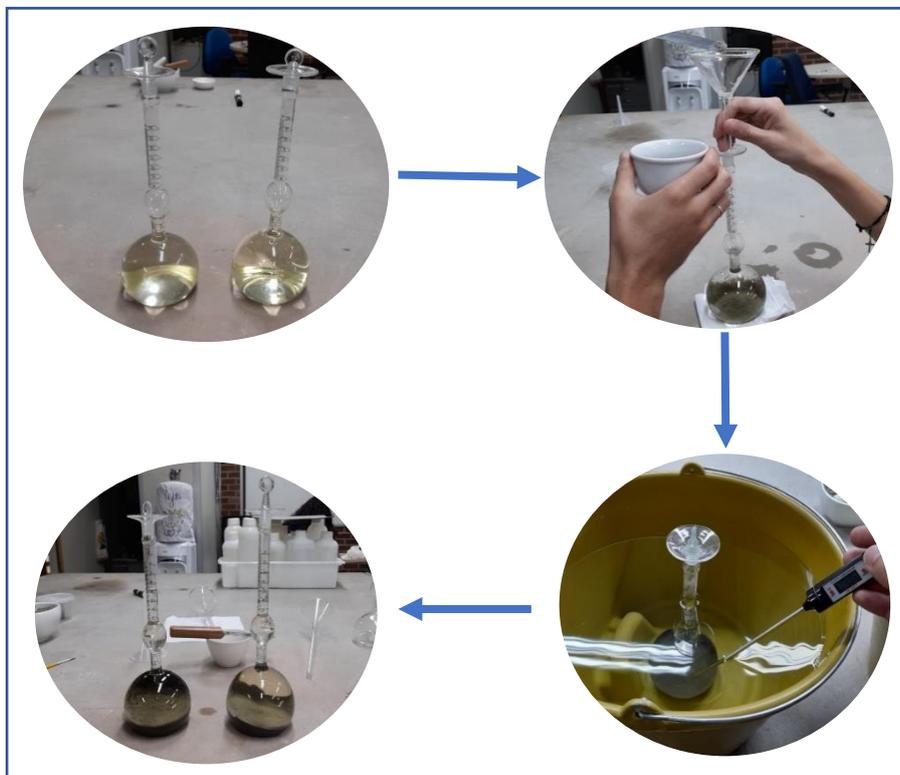
Sendo:

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

$m$  = massa do cimento (g);

$V$  = Volume deslocado pela massa do cimento ( $V_2 - V_1$ ) expresso em  $\text{cm}^3$ ;

**Figura 3** - Procedimento de caracterização da massa específica do cimento



Fonte: Autor, 2023

#### 4.4.2 Agregado miúdo (areia lavada)

A caracterização do agregado miúdo consistiu na determinação da densidade (massa específica) e absorção de água, massa unitária, características granulométricas e teor de matéria orgânica. Utilizou-se como referências as normas mais recentes da ABNT estabelecidas para cada um dos ensaios.

##### 4.4.2.1 Densidade e absorção de água

A Densidade e absorção de água do agregado miúdo foram obtidas através da NBR 16916/2021: *Agregado miúdo - Determinação da Densidade e da absorção de água*. Espalhou-se em uma bandeja uma amostra de 2,5 kg de areia, submergindo-a em água por um período de 24 horas. Em seguida retirou-se a amostra da água estendendo-a sobre uma superfície plana até que os grãos não estivessem mais fortemente aderidos entre si.

Colocou-se a amostra no molde tronco metálico, aplicando suavemente em sua superfície 25 golpes com a haste de compactação. Repetiu-se este procedimento em intervalos frequentes até que, ao levantar-se verticalmente o molde, o cone de agregado miúdo desmoronasse, significando que o agregado atingiu a condição saturada superfície seca. Colocou-se 500 g da amostra na condição saturada superfície seca ( $M_b$ ) no frasco e determinou-se a massa do conjunto ( $M_c$ ), compreendido por  $M_b$  mais a massa do frasco. Encheu-se o frasco até a marca de 500 ml, colocando-o em seguida em um banho térmico à temperatura constante de 23°C. Após 1h determinou-se a massa total ( $M_d$ ), que corresponde à massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, mais a massa da água.

Tomou-se, concomitantemente à etapa anterior, 500 g da amostra na condição saturada superfície seca, colocando-a em uma bandeja e secando-a em estufa à 110°C por um período de 24 h. Após a amostra esfriar em temperatura ambiente, determinou-se a massa da amostra seca ( $M_a$ ). O ensaio foi realizado em duplicata (figura 4). Dessa forma, calculou-se densidade do agregado na condição seca através da equação 2.

$$\rho_s = \frac{M_a}{V - V_a} \quad (2)$$

Sendo:

$\rho_s$  = densidade do agregado na condição seca (g/cm<sup>3</sup>);

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

$V$  = volume do frasco calibrado em cm<sup>3</sup>;

$V_a$  = volume de água adicionado ao frasco (cm<sup>3</sup>), obtida através da equação 3:

$$V_a = \frac{M_d - M_c}{\rho_a} \quad (3)$$

Sendo:

$M_c$  = massa conjunto, formado pela massa da amostra na condição saturada superfície seca ( $M_b$ ), mais a massa do frasco (g);

$M_d$  =  $M_c$ , mais a massa da água (g);

$\rho_a$  = densidade da água à 23°C (g/cm<sup>3</sup>), considerada pela NBR como sendo 0,9975 g/cm<sup>3</sup>.

Por sua vez, a densidade na condição saturada superfície seca foi calculada através da equação 4:

$$\rho_{ss} = \frac{M_b}{V - V_a} \quad (4)$$

Sendo:

$\rho_{ss}$  = densidade do agregado na condição saturada superfície seca (g/cm<sup>3</sup>);

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

$V$  = volume do frasco calibrado em cm<sup>3</sup>;

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

A absorção de água do agregado miúdo foi calculada utilizando a equação 5:

$$Abs = \frac{M_b - M_a}{M_a} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

Abs = absorção de água (%);

$M_a$  = massa da amostra seca em estufa a (105 ± 5) °C expressa em gramas (g);

$M_b$  = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g).

**Figura 4** - Procedimento de caracterização da densidade e absorção de água da areia



Fonte: Autor, 2023

#### 4.4.2.2 Massa unitária e índice de vazios do agregado miúdo

A massa unitária do agregado miúdo foi obtida através da NBR 16972/2021: *Agregados — Determinação da massa unitária*. Essa norma estabelece 3 métodos diferentes (A, B e C) para a realização do ensaio. Para o agregado miúdo utilizou-se o método C, empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto. A NBR determina que o recipiente utilizado em estudo deve ser de forma cilíndrica, estabelecendo a tabela 1 a seguir para a capacidade mínima, o diâmetro interior e a altura aproximados que o recipiente deve ter.

**Tabela 1** - Características do recipiente para o ensaio de massa unitária

Dimensão máxima característica do agregado mm	Recipiente		
	Capacidade mínima	Diâmetro interior	Altura interior
dm 3			
$d \leq 37,5$	10	220	268
$37,5 \leq d \leq 50$	15	260	282
$50 < d \leq 75$	30	360	294

Fonte: NBR 16972/2021

O seguinte procedimento estabelecido pela norma foi realizado para determinar o volume do recipiente, a fim de verificar se o mesmo atendia aos parâmetros mínimos

estabelecidos pela NBR. O recipiente foi preenchido com água a uma temperatura de 23 °C e coberto com uma placa de rasamento, a fim de eliminar as bolhas de ar e o excesso de água. Em seguida, foi determinada a massa de água contida no recipiente. O volume (V) do recipiente foi então calculado dividindo-se a massa de água necessária para preenchê-lo pela sua densidade (considerando para este cálculo a densidade da água igual a 997,5 kg/m<sup>3</sup> a 23 °C, como recomenda a NBR). Alternativamente, foi possível calcular o fator para o recipiente (1/V), dividindo-se a densidade da água pela massa de água necessária para enchê-lo. Para o cálculo da massa unitária do agregado, o volume do recipiente foi expresso em metros cúbicos e o fator foi considerado como o inverso de metros cúbicos.

Com o volume do recipiente calculado prosseguiu-se para a determinação da massa unitária. Nesse processo, inicialmente, determinou-se a massa do recipiente vazio. Posteriormente, o recipiente foi preenchido até transbordar, utilizando-se uma concha, com o agregado despejado de uma altura não superior a 50 mm acima da borda superior do recipiente. Em seguida, nivelou-se a superfície da camada de agregado com uma régua. Após essas etapas, determinou-se a massa do recipiente juntamente com seu conteúdo. O ensaio de massa unitária foi realizado em triplicata (figura 5).

Dessa forma, a massa unitária foi calculada através da seguinte equação:

$$\rho_{ap} = \frac{M_{ar} - M_r}{V} \quad (6)$$

Sendo:

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

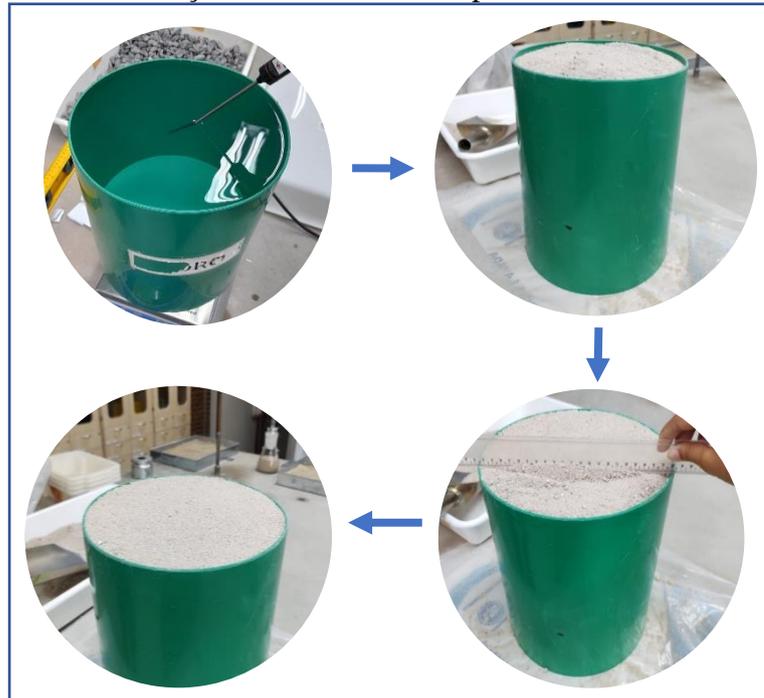
$M_{ar}$  = massa do recipiente com o agregado (kg);

$M_r$  = massa do recipiente vazio (kg);

V = o volume do recipiente (m<sup>3</sup>);

F = fator para o recipiente (1/m<sup>3</sup>).

**Figura 5** - Determinação do volume do recipiente e massa unitária da areia



Fonte: Autor, 2024.

#### **4.4.2.3 Composição granulométrica**

O módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC) do agregado miúdo foram determinados através do ensaio de granulometria, realizado conforme a NBR 17054/2022: *Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio*. A NBR estabelece um conjunto de peneiras sucessivas para a realização do ensaio.

A areia é um agregado miúdo, o que significa que sua dimensão máxima característica não deve passar de 4,75 mm. Para a realização do ensaio, utilizou-se o conjunto de peneiras de 0,15 mm até 4,75 mm. A amostra foi submetida a um processo de secagem por 24 horas a uma temperatura de 105 °C. Em seguida, foi determinada a massa  $m_1$  da amostra. Posteriormente, a amostra foi posicionada sobre a peneira superior do conjunto e agitada mecanicamente por 5 minutos, utilizando o agitador de peneiras.

O material retido em cada peneira foi removido para uma bandeja identificada (figura 6), e a tela de cada peneira foi escovada em ambos os lados para limpeza. O material removido do lado interno é considerado como retido e foi transferido para a bandeja, enquanto o material despreendido na parte inferior é considerado como passante. Posteriormente, foi determinada a massa total do material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. Ao final, elaborou-se o relatório do ensaio, contendo a curva granulométrica, a

porcentagem retida em cada peneira, a porcentagem retida acumulada em cada peneira, a dimensão máxima característica e o módulo de finura.

A dimensão máxima característica corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5 % em massa. Por sua vez, o módulo de finura representa a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal, dividida por 100.

**Figura 6** - Procedimento do ensaio de granulometria da areia



Fonte: Autor, 2024

#### **4.4.2.4 Teor de matéria orgânica do agregado miúdo**

O teor de matéria orgânica do agregado miúdo foi determinado por meio da NBR 13600/2022: *Determinação do teor de matéria orgânica - por queima a 440°C*. Inicialmente, amostras de areia em cadinhos foram pesadas e enumeradas. Os cadinhos contendo as amostras foram colocados em uma estufa, mantida a uma temperatura de 105°C, onde permaneceram por 24 horas. Em seguida, os cadinhos foram removidos da estufa com o auxílio de uma pinça e transferidos para um dessecador, onde permaneceram até atingir a temperatura ambiente. Em seguida, a massa do conjunto foi determinada e registrada.

Posteriormente, os cadinhos contendo as amostras previamente secas em estufa foram colocados na mufla (figura 7). A temperatura da mufla foi gradualmente aumentada até atingir 440°C. As amostras permaneceram na mufla até a queima total, ou seja, até que a massa se tornasse constante, o que levou aproximadamente 12 horas.

Após a queima, os cadinhos foram retirados da mufla com uma pinça e transferidos para o dessecador, onde permaneceram até atingirem a temperatura ambiente. Em seguida, a massa

do conjunto foi novamente determinada e registrada. Dessa forma, determinou-se o teor de matéria orgânica, utilizando-se a equação 7:

$$M_o = (1 - B/A) \times 100 \quad (7)$$

Sendo:

MO = teor de matéria orgânica (%);

A = massa da amostra seca em estufa (g), à temperatura de 105°C;

B = massa da amostra queimada em mufla (g), à temperatura de 440°C.

**Figura 7** - Ensaio do teor de matéria orgânica da areia



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.4.3 Agregado Graúdo (brita)

A caracterização do agregado graúdo consistiu na determinação da densidade (massa específica) e absorção de água, massa unitária, e das características granulométricas. Utilizou-se como referências as normas mais recentes da ABNT estabelecidas para cada um dos ensaios.

##### 4.4.3.1 Densidade e absorção de água

A densidade e absorção de água do agregado graúdo foram obtidas através da NBR 16917/2021: *Agregado graúdo - Determinação da Densidade e da absorção de água*. No procedimento utilizou-se uma massa de 3 kg conforme estabelece a NBR para agregado graúdo com dimensão máxima de 19 mm. A amostra foi lavada sobre uma peneira de malha de 4,75 mm em água corrente para eliminar quaisquer impurezas da superfície das partículas. Posteriormente, a amostra foi distribuída em bandejas e coberta com água potável, permanecendo nessa condição por um período de 24 horas.

Após a remoção da amostra da água, esta foi enxugada com um pano absorvente até a remoção completa da água visível, mesmo que a superfície das partículas permanecesse úmida. Fragmentos maiores foram enxugados individualmente, tomando-se cuidado para evitar a evaporação da água dos poros do agregado durante o processo de enxugamento, a fim de manter a condição de saturada superfície seca.

Imediatamente após o enxugamento, a massa da amostra na condição saturada superfície seca ( $M_b$ ) foi determinada. A amostra foi então colocada em um cesto de arame, submersa em água a uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C, e a massa da amostra submersa ( $M_c$ ) foi registrada. A balança foi previamente ajustada com o cesto de arame vazio imerso na água.

Posteriormente, a amostra foi seca em estufa a uma temperatura de 105 °C por um período de 24 horas. Após resfriamento à temperatura ambiente por um período de 1 hora, a massa da amostra seca em estufa ( $M_a$ ) foi medida (figura 8). Dessa forma, calculou-se a densidade do agregado na condição seca por meio da equação 8:

$$\rho_s = \frac{M_a}{M_b - M_c} \quad (8)$$

Sendo:

$\rho_s$  = densidade do agregado na condição seca ( $\text{g/cm}^3$ );

$M_a$  = massa da amostra seca em estufa a  $(105 \pm 5)$  °C, em (g);

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

$M_c$  = massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca (g).

Por sua vez, a massa específica do agregado graúdo na condição saturada superfície seca foi calculada por meio da equação 9:

$$\rho_{SS} = \frac{M_b}{M_b - M_c} \quad (9)$$

Sendo:

$\rho_{SS}$  = densidade do agregado na condição saturada superfície seca ( $\text{g/cm}^3$ );

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

$M_c$  = massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca (g).

A absorção de água do agregado graúdo foi calculada utilizando a equação 10:

$$Abs = \frac{Mb - Ma}{Ma} \times 100 \quad (10)$$

Sendo:

Abs = absorção de água (%);

Ma = massa da amostra seca em estufa a  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  expressa em gramas (g);

Mb = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g).

**Figura 8** - Procedimento de caracterização da densidade e absorção de água da brita



Fonte: Autor, 2024

#### 4.4.3.2 Massa unitária do agregado graúdo

Assim como a areia, a massa unitária do agregado graúdo foi calculada conforme a NBR 16972/2021: *Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Para a realização do ensaio, utilizou-se o método A, que é empregado para determinar a massa unitária de material compactado, quando os agregados possuem dimensão máxima característica de 37,5 mm ou menor.

O recipiente utilizado foi o mesmo empregado para o ensaio da massa unitária da areia. Inicialmente, a massa do recipiente foi determinada. Posteriormente, preencheu-se o mesmo com o agregado graúdo até alcançar um terço de sua capacidade e a superfície foi adensada com

25 golpes uniformemente distribuídos na superfície do material, utilizando uma haste de adensamento. O processo de enchimento do recipiente foi continuado até que dois terços de sua capacidade fossem alcançados, seguindo-se então as mesmas etapas descritas anteriormente. Finalmente, o recipiente foi totalmente preenchido e adensado mais uma vez. A superfície da camada do agregado foi nivelada com uma régua e haste, de modo a ficar nivelada com a borda superior do recipiente. Finalmente, a massa do recipiente com seu conteúdo foi determinada (figura 9). Dessa forma, a massa unitária foi calculada através da equação 11:

$$\rho_{ap} = \frac{M_{ar} - M_r}{V} \quad (11)$$

Sendo:

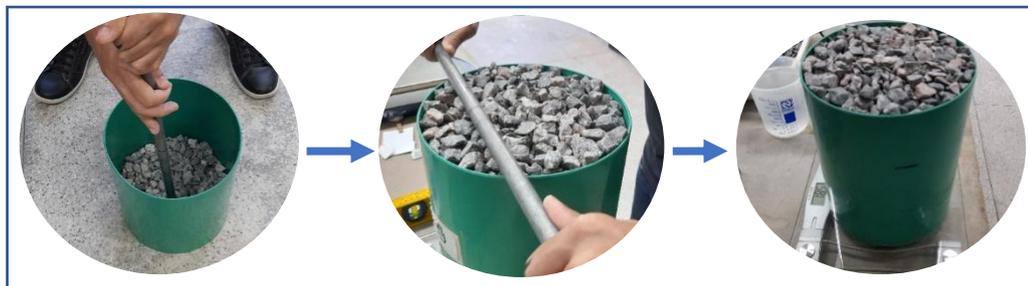
$\rho_{ap}$  = massa unitária do agregado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$M_{ar}$  = massa do recipiente com o agregado (kg);

$M_r$  = massa do recipiente vazio (kg);

$V$  = o volume do recipiente ( $\text{m}^3$ );

**Figura 9** - Procedimento para a determinação da massa unitária da brita



Fonte: Autor, 2024

#### 4.4.3.3 Composição granulométrica

O agregado graúdo utilizado foi a brita de 19 mm, cuja granulometria corresponde à brita 1, que varia entre 9,5 mm e 19 mm (ABNT NBR 9935/2011). A brita 1 é o tipo mais utilizado pela construção civil, devido ao fato de ser apropriada tanto para a fabricação de concreto destinado à edificação de colunas, vigas e lajes quanto para diversas aplicações na construção civil, como é o caso do pavimento intertravado pretendido pelo estudo (FERNANDES, 2013).

Assim como o agregado miúdo, a dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo foi determinada através do ensaio de granulometria (figura 10), realizado conforme a NBR 17054/2022: *Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de*

*ensaio*. O conjunto de peneiras sucessivas utilizadas para a realização do ensaio foi de 6,3 mm até 25 mm.

A preparação da amostra e o procedimento realizado foi o mesmo utilizado no ensaio de granulometria da areia. O relatório do ensaio representou: a curva granulométrica, a porcentagem retida em cada peneira, a porcentagem retida acumulada em cada peneira e a dimensão máxima característica.

**Figura 10** - Procedimento do ensaio de granulometria da brita



Fonte: Autor, 2024

#### 4.4.4 Lodo têxtil

O lodo têxtil em estudo foi caracterizado quanto ao teor de umidade, massa unitária, massa específica, composição granulométrica, teor de matéria orgânica, fluorescência de raios X (FRX) e análise térmica (TG/DTG). Com exceção do ensaio do teor de umidade, todos os demais ensaios de caracterização do lodo têxtil foram realizados com o resíduo seco e destorroado. A secagem foi realizada em estufa à 110 °C por um período de 24h. Por sua vez, o destorroamento do material seco em estufa foi realizado manualmente com o auxílio de um almofariz de porcelana com pistilo (figura 11).

**Figura 11** - Processo de destorroamento do lodo têxtil



Fonte: Autor, 2024

#### 4.4.4.1 Teor de umidade

O teor de umidade do lodo têxtil foi determinado por meio da NBR 6457/2024: *Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Foram separadas em cadinhos de porcelana, 5 amostras de lodo sem secagem prévia, sendo cada uma das amostras pesadas e numeradas. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa a  $105 \pm 5$  °C por um período de 24 h (figura 12). Após a secagem em estufa, as amostras foram pesadas novamente. Dessa forma, calculou-se o teor de umidade de acordo com a equação 12.

$$h = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (12)$$

Sendo:

$h$  = umidade (%);

$M_u$  = massa úmida do lodo (g);

$M_s$  = massa seca do lodo (g).

**Figura 12** - Etapas do ensaio do teor de umidade do lodo têxtil



Fonte: Autor, 2023

#### 4.4.4.2 Massa unitária

A massa unitária do lodo têxtil foi calculada utilizando-se a NBR 16972/2021: *Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Utilizou-se o mesmo método e procedimento do item 4.4.2.2 para o cálculo do volume do recipiente e da massa unitária do lodo têxtil, que é empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto (figura 13).

**Figura 13** - Procedimento para determinação da massa unitária do lodo têxtil



**Fonte:** Autor, 2024

#### 4.4.4.3 Massa específica

A massa específica do lodo têxtil foi calculada através da NBR 11513/2016, que delinea os procedimentos para a determinação da massa específica utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier. O ensaio teve início com a introdução de um líquido de querosene no frasco, até a marca correspondente entre 0 e 1 cm<sup>3</sup>, em seguida o frasco foi imerso em um banho termostático para alcançar o equilíbrio térmico. A leitura inicial do volume (V<sub>1</sub>) foi então registrada e uma amostra do material granular de lodo foi inserido no frasco usando um funil, provocando um deslocamento do querosene, compreendido entre as marcas de 18 cm<sup>3</sup> e 24 cm<sup>3</sup>.

Posteriormente, foi realizado um segundo banho térmico, seguido de uma segunda leitura do volume (V<sub>2</sub>). O ensaio foi realizado em triplicata (figura 14). Assim como no ensaio da massa específica do cimento, o resultado foi obtido pela relação entre a massa do material granular utilizado e a diferença de volume antes e depois da inserção do material granular (equação 13).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (13)$$

Sendo:

$\rho$  = massa específica do material ensaiado (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  = massa do material ensaiado (g);

$V$  = Volume deslocado pela massa do material ensaiado (V<sub>2</sub> – V<sub>1</sub>) expresso em cm<sup>3</sup>.

**Figura 14** - Procedimento para determinação da massa específica do lodo têxtil



Fonte: Autor, 2024

#### 4.4.4.4 Granulometria do lodo têxtil

O módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC) do lodo têxtil foram determinados por meio do ensaio de granulometria, realizado conforme a NBR 17054/2022: *Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio*. Para a realização do ensaio, utilizou-se o conjunto de peneiras de 0,15 mm até 6,3 mm.

O procedimento realizado, e representado na figura 15, foi o mesmo utilizado no ensaio de granulometria da areia. O relatório do ensaio representou a curva granulométrica, a porcentagem retida em cada peneira, a porcentagem retida acumulada em cada peneira, a dimensão máxima característica e o módulo de finura. A fim de prevenir a perda de material durante a agitação devido à presença de partículas finas, foi aplicada fita crepe ao redor das peneiras.

**Figura 15** - Procedimento de granulometria do lodo têxtil



Fonte: Autor, 2024

#### 4.4.4.5 Teor de matéria orgânica

O teor de matéria orgânica do lodo têxtil foi determinado por meio da NBR 13600/2022: *Determinação do teor de matéria orgânica - por queima a 440°C*. Inicialmente, amostras de lodo têxtil em cadinhos foram pesadas e enumeradas. O procedimento e fórmula utilizados foram os mesmos utilizados no ensaio do teor de matéria orgânica da areia (figura 16).

**Figura 16** - Determinação do Teor de matéria orgânica do lodo têxtil



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.4.4.6 Fluorescência de Raios-X

O ensaio de Fluorescência de Raios-X foi utilizado para realizar a análise química do lodo têxtil. Essa análise é utilizada para fornecer uma estimativa da quantidade de substâncias químicas presentes em uma amostra (Janssens; van Grieken, 2004). O ensaio foi realizado em colaboração com o laboratório do Núcleo de Estudos Geoquímicos e de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE) do Departamento de Geologia, Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Inicialmente, a amostra foi secada em estufa a 110°C. Uma porção da amostra seca foi levada a uma mufla a 1000°C por 2 horas para determinação de perda ao fogo. Uma outra porção da amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. A pastilha prensada foi analisada em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados foram recalculados para 100% com a introdução do valor da perda ao fogo (PF) e então expressos em peso percentual (%) e em Traços (tr).

#### 4.4.4.7 Análise Térmica (TG/DTG)

O comportamento do lodo têxtil em meio a mudanças de temperatura, identificando eventos térmicos importantes, como transições de fase, decomposição, reações químicas e perda de massa foi observado por meio do ensaio de Análise Térmica (TG/DTG). A análise foi realizada em parceria com o laboratório de Mineralogia do Solo do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Inicialmente, uma amostra de 20 mg foi aquecida gradualmente a uma taxa constante de 10 °C/min, até alcançar 1100°C. Utilizou-se o equipamento: Netzsch STA 449 F3 Júpiter. Durante o aquecimento dois tipos de sinais foram registrados: TG (Termogravimetria), medindo a variação da massa da amostra em função da temperatura, e DTG (derivada termogravimétrica), registrando os picos de transições durante as perdas de massa por meio da derivada primeira da variação de massa em relação à temperatura.

#### 4.5. Parâmetros de dosagem do concreto

Encontrados os dados referentes à caracterização dos agregados graúdo, miúdo e do aglomerante, procedeu-se a realização dos cálculos referentes aos seguintes parâmetros de dosagem do concreto: resistência média à compressão do concreto ( $f_{cm}$ ), relação água/cimento ( $a/c$ ), consumo de água e consumo de cimento e agregados. De acordo com o estudo técnico da ABCP esses parâmetros são essenciais para a determinação do traço de concreto, que determina a proporção de materiais ideal para se chegar a uma determinada resistência média.

##### 4.5.1 Resistência média à compressão do concreto

A resistência média à compressão do concreto, também chamada de resistência de dosagem, foi determinada através da equação 14 como recomenda a NBR 12655/2022: *Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento*.

$$F_{cm} = 1,65 \times S_d + F_{ck} \quad (14)$$

Sendo:

$F_{cm}$ = resistência média à compressão do concreto (Mpa);

$S_d$  = Desvio Padrão da dosagem (Mpa);

$F_{ck}$ = resistência característica do concreto à compressão (Mpa).

A adoção do desvio padrão ( $Sd$ ) varia em três classes referentes ao controle da produção: controle rigoroso ( $Sd = 4,0$ ), adotado para situações em que há um rigor maior no controle de massa e umidade, como em concretos usinados, onde há profissionais especializados em tecnologia do concreto, bem como em concretos preparados em laboratório; controle razoável ( $Sd = 5,5$ ), considerado para um traço misto e utilizado para dosagens em que há um controle razoável de massa e umidade, havendo um profissional habilitado permanente na obra; e controle regular (com  $Sd = 7,0$ ), tomado para um traço misto de concreto produzido em canteiro de obra sem controle de massa e umidade (NBR 12655/2022).

A resistência característica do concreto à compressão ( $Fck$ ) depende da aplicação típica pretendida para o estudo. Como a aplicação típica do projeto refere-se ao pavimento intertravado, o  $Fck$  foi determinado pelo quadro 1 extraída da ABNT NBR 9781/2013: *peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio*.

**Quadro 1** – Resistência característica à compressão para pavimento intertravado

Solicitação	Resistência Característica à compressão ( $Fck$ ) aos 28 dias (Mpa)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	$\geq 35$
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	$\geq 50$

Fonte: ABNT NBR 9781, 2013.

#### 4.5.2 Determinação da relação água/cimento

A relação água cimento foi determinada pela curva de Abrams, que leva em consideração a resistência de dosagem do concreto e a classe do cimento utilizado (ABCP, 1995).

#### 4.5.3 Consumo materiais

A determinação do consumo de materiais foi realizada através das equações e inter-relações extraídas do estudo técnico da ABCP (1995).

#### 4.5.4 Traço de concreto

O traço de concreto determinando a proporção dos diferentes materiais constituintes que são utilizados para produzir uma mistura de concreto com as propriedades desejadas para a aplicação específica foi representado em relação ao cimento, a partir do consumo de materiais.

#### 4.6. Preparação do concreto e ensaio de abatimento do tronco de cone

Para a dosagem experimental do concreto, todos os materiais foram previamente pesados em balança de precisão (figura 17). O procedimento da mistura dos materiais foi realizado em betoneira de 120 litros (figura 18). Seguindo as instruções da NBR 12821/2009: *Preparação de concreto em laboratório — Procedimento*. Inicialmente, o agregado graúdo e parte da água de amassamento (aproximadamente 1/3 do volume) foram adicionados e a betoneira foi acionada por 30 segundos. Em seguida, o cimento foi adicionado juntamente com mais aproximadamente 1/3 do volume da água e a betoneira foi acionada novamente por aproximadamente 30 segundos. Posteriormente, o agregado miúdo e o restante da água foram adicionados e a betoneira foi acionada pelo tempo necessário para garantir a homogeneidade e a trabalhabilidade do concreto.

Considerando que o estudo em questão trabalhou com um desvio padrão ( $Sd = 4,0$ ) para um controle rigoroso de umidade, todos os agregados utilizados na mistura (brita, areia e lodo têxtil) foram previamente secos em estufa à  $105^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 horas. Na preparação de concreto com adição de lodo têxtil, além da secagem em estufa, o resíduo têxtil passou por um processo de destorroamento utilizando um almofariz e pistilo. Na sequência de colocação dos materiais em betoneira com adições de lodo têxtil a 6%, 8% e 10% da areia, o resíduo foi introduzido em conjunto com o agregado miúdo.

**Figura 17** - Separação e pesagem prévia dos materiais em balança de precisão



Fonte: Autor, 2024

**Figura 18** - Procedimento de preparação de concreto em laboratório



**Fonte:** Autor, 2024

O Ensaio de abatimento do tronco de cone, foi realizado logo após o preparo de todos os concretos dosados. O teste serve como uma medida da consistência do concreto fresco, realizado para determinar a fluidez do concreto, o que pode indicar sua trabalhabilidade, ou seja, o quão fácil é manipulá-lo e colocá-lo em uma forma durante a construção. Especificamente, mede a deformação do concreto fresco sob a ação da gravidade quando é moldado em uma forma padronizada e depois removido (Assunção, 2009).

O ensaio foi realizado por meio da NBR 16889/2020: *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Inicialmente, foi preparada uma superfície limpa e nivelada onde o molde de abatimento foi posicionado. Em seguida, o molde foi preenchido em três camadas iguais, cada uma compactada com 25 golpes uniformemente distribuídos. Após a última camada o excesso de concreto foi removido do topo do molde com uma régua.

Após a preparação do concreto no molde, este foi levantado verticalmente permitindo que o concreto se espalhasse livremente. Em seguida, segurou-se o molde firmemente pela base, retirando-o verticalmente, deixando o concreto em uma forma cônica. Com uma régua, a altura do abatimento do tronco de cone foi medida verticalmente, a partir da parte superior do molde até a superfície do concreto deformado (figura 19). O valor resultante foi registrado como o abatimento do tronco de cone do concreto.

**Figura 19** - Procedimento do ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor, 2024

#### **4.7. Moldagem e cura dos blocos de pavimento intertravado**

Para a confecção dos *pavers*, utilizaram-se fôrmas prismática de base retangular de 10 cm, por 20 cm e 6 cm de altura. Logo após o ensaio de abatimento do tronco de cone, o concreto foi colocado nas fôrmas de *pavers* com o auxílio de uma colher de pedreiro. O interior de todas as fôrmas foi previamente coberto por uma fina camada de óleo mineral para que o material não fosse danificado durante a desforma.

A mesa vibratória é um equipamento muito utilizado pela indústria para compactar a mistura de concreto dentro dos moldes. A vibração ajuda a eliminar bolhas de ar e a garantir que a mistura se espalhe uniformemente por todo o molde preenchendo todos os espaços e detalhes do design (Hallack, 2001). Como o laboratório em que o estudo foi conduzido não dispunha de tal equipamento, desenvolveu-se um modelo para emular o seu funcionamento através da criação de uma base plana feita de poliestireno expandido, colocando-a sobre um agitador mecânico de peneiras (figura 20). Isso permitiu que todos os moldes contendo a mistura de concreto fossem compactadas por vibração mecânica.

**Figura 20** - Criação da Base e Compactação da mistura por agitação mecânica



Fonte: Autor, 2024

Após a compactação, uma desempenadeira foi utilizada para realizar o acabamento dos *pavers* moldados (figura 21), com o objetivo de uniformizar a superfície e garantir sua planicidade para os ensaios de resistência à compressão axial.

**Figura 21** - Realização do acabamento com o uso de desempenadeira



Fonte: Autor, 2024

Em seguida, as formas foram protegidas por lona plástica e colocadas em local protegido de sol e chuva (figura 22), onde permaneceram por um período de 24 horas, dando início ao primeiro estágio do processo de cura. Esse procedimento ajuda a manter a umidade do concreto, prevenindo sua rápida evaporação, o que poderia resultar em fissuras e na redução da resistência do material. Além disso, ao simular uma estufa, mantém-se uma temperatura mais estável e favorável para o processo de cura (NBR 5738/2015).

**Figura 22** - Primeiro estágio do processo de cura



Fonte: Autor, 2024.

Após transcorrido o intervalo de 24 horas, procedeu-se à desmoldagem dos *pavers*, os quais foram submersos em um ambiente aquoso, onde permaneceram por 27 dias (Figura 23). Este ciclo de cura é considerado essencial para a realização do ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias após a moldagem, em peças de concreto destinadas à pavimentação. A cura úmida é essencial para garantir o desenvolvimento adequado da resistência do concreto, minimizando a retração e reduzindo o risco de fissuras, o que resulta em uma estrutura mais durável e resistente (NEVILLE, 2015).

**Figura 23** - Desmoldagem e cura úmida dos blocos de concreto



Fonte: Autor, 2024

#### **4.8. Determinação da resistência à compressão**

A resistência característica à compressão das peças de concreto foi determinada por meio da NBR 9781/2013: *Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio*. 10 amostras foram utilizadas tanto para o traço padrão (com 0% de adição de lodo têxtil) quanto para os traços com 6%, 8% e 10% de adição. Inicialmente, cada bloco foi disposto, individualmente, sobre a placa auxiliar da máquina de ensaio de compressão com sua face

superior em alinhamento com a placa cilíndrica auxiliar superior. Para garantir a centralização do eixo vertical da peça com o centro de carga do cilindro, criou-se um gabarito auxiliar. O carregamento foi efetuado continuamente até a ruptura (figura 24).

**Figura 24** - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor, 2024

Em seguida, a carga de ruptura dada pela Prensa em tonelada-força (Tf) foi convertida para Newtons (N). Posteriormente, o valor da resistência à compressão foi calculado de acordo com a equação 15.

$$F_{pk} = \frac{F (N)}{A (mm^2)} \quad (15)$$

Sendo:

$F_{pk}$  = Resistência característica à compressão (Mpa);

F = Carga de ruptura (N);

A = Área de carregamento (mm<sup>2</sup>).

A NBR 9781/2013 ainda estabelece as seguintes equações para estimar a Resistência característica à compressão de acordo com o número de amostras em estudo.

$$F_{pk, est} = F_p - t \times s \quad (16)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (17)$$

Sendo:

$f_p$  = resistência média das peças(MPa);

$f_{pi}$  = resistência individual das peças(MPa);

$f_{pk,est}$  = resistência característica estimada à compressão (MPa);

$n$  = número de peças da amostra;

$s$  = desvio-padrão da amostra (MPa);

$t$  = coeficiente de Student, fornecido na Tabela 2, em função do tamanho da amostra.

**Tabela 2** - Coeficiente de Student

<b>n</b>	<b>t</b>
6	0,920
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883

Fonte: NBR 9781, 2013.

De acordo com a referida norma, a resistência à compressão estimada é uma medida prevista ou calculada da capacidade de um material resistir a forças de compressão, permitindo prever o desempenho do material em determinadas condições de uso. No contexto do concreto, por exemplo, a resistência à compressão estimada pode ser calculada com base na dosagem dos materiais constituintes e em ensaios de laboratório antes da aplicação prática em pavimentos.

#### **4.9. Absorção de água**

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9781/2013, e 3 amostras foram utilizadas para cada traço (figura 25). A norma estabelece que a amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7 %. A análise indica o aumento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em comparação com sua massa no estado seco.

Os corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente por 24 horas. Cada corpo de prova foi pesado individualmente na condição saturada após a remoção da água superficial visível com um pano úmido, registrando-se então a massa saturada ( $m_2$ ). Em

seguida, os corpos de prova saturados foram levados à estufa a 110°C por 24 horas e pesados individualmente na condição seca, registrando-se então a massa seca ( $m_1$ ). Dessa forma, o valor da absorção de água de cada bloco foi calculado utilizando-se a seguinte equação:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (18)$$

Sendo:

A = absorção de cada corpo de prova (%);

$m_1$  é a massa do corpo de prova seco (g);

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

**Figura 25** - Procedimento do ensaio de absorção de água



Fonte: Autor, 2024

#### 4.10. Análise estatística

Para determinar se a presença de lodo têxtil nos blocos de concreto afetou significativamente sua resistência à compressão e capacidade de absorção de água, foram realizadas análises estatísticas através do Software Sisvar (Ferreira, 2011). O software é um programa para análise estatística e planejamento de experimentos, disponível gratuitamente para uso. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) em conjunto com o teste de Tukey, que permite comparar múltiplos grupos de dados com um nível de confiança de 95%.

#### **4.11. Rendimento da moldagem e consumo de cimento por bloco moldado**

O rendimento da moldagem de *pavers* foi calculado através da análise da quantidade de blocos produzidos para os traços de concreto com adições de lodo têxtil a 0%, 6%, 8% e 10% em relação a areia. Os blocos foram moldados de maneira a evitar o desperdício de material, descartando apenas quando a sobra de concreto foi insuficiente para moldar mais um *paver*. O consumo de cimento por bloco foi calculado por meio da relação entre a massa de cimento (kg) utilizada nas misturas e a quantidade de blocos moldados.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Caracterização dos materiais

#### 5.1.1 Massa específica do cimento

A média da massa específica do cimento Portland CP II-Z 32 em estudo foi de 2,87 g/cm<sup>3</sup>, como disposto na tabela 3. Barreto, Costa e Cândido (2019) e Lima (2023) encontraram resultados similares para o aglomerante CP II 32.

**Tabela 3** - Massa específica do cimento Portland

	m (g)	V <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	V(cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ média(g/cm <sup>3</sup> )
<b>Ensaio 1</b>	61	0,4	21,6	21,2	2,877	2,87
<b>Ensaio 2</b>	61	0,7	22	21,3	2,864	

Fonte: Autor, 2024

A massa específica do cimento influencia diretamente na proporção de agregados e água necessários para obter uma mistura de concreto adequada. Conhecer a massa específica do cimento permite calcular com precisão a quantidade de cimento a ser utilizada na mistura, garantindo a obtenção das propriedades desejadas no concreto final (Marar & Eren, 2011).

Além disso, A massa específica do aglomerante também influencia nas propriedades mecânicas e físicas do concreto endurecido, como resistência à compressão, durabilidade e permeabilidade. Uma caracterização precisa da massa específica do cimento permite otimizar a formulação da mistura de concreto, garantindo um desempenho adequado do material no contexto da inertização do lodo têxtil (Aginam, Umenwaliri, Nwakire, 2014).

#### 5.1.2 Agregado Miúdo

##### 5.1.2.1 Densidade e absorção de água

A densidade ou massa específica da areia na condição seca teve média de 2,52 g/cm<sup>3</sup> e a densidade na condição saturada superfície seca foi de 2,56 g/cm<sup>3</sup>, conforme demonstrado na tabela 4. Resultados semelhantes também foram encontrados por Meert, Hastenpflug e Andrade (2021) e Oliveira (2020).

**Tabela 4** - Densidade da areia na condição seca e saturada superfície seca

	$M_a(g)$	$M_b(g)$	$M_c(g)$	$M_d(g)$	$V(cm^3)$	$V_a(cm^3)$	$\rho_s(g/cm^3)$	$\rho_{sss}(g/cm^3)$
<b>Ensaio 1</b>	492,8	500	767,3	1071,6	500	305,1	2,528	2,565
<b>Ensaio 2</b>	492,5	500	690	993,5	500	304,3	2,516	2,554

Fonte: Autor, 2024

O agregado miúdo em estudo possui uma densidade elevada ( $\rho_s \geq 2,40g/cm^3$ ) indicando que os grãos de areia estão mais próximos uns dos outros, o que sugere uma maior compactidade do material. Isso significa que há menos espaço vazio entre os grãos, resultando em uma estrutura mais densa e coesa. Quando os espaços entre os grãos estão mais preenchidos, há menos espaço para a penetração de ar ou água, o que resulta em uma porosidade reduzida. Isso é importante em materiais de construção, como o concreto, onde uma baixa porosidade está associada a uma maior resistência e durabilidade (Kosmatka e Wilson, 2011).

Por sua vez, a absorção de água média do agregado miúdo foi de 1,49%, como representado pela tabela 5.

**Tabela 5** - Absorção de água do agregado miúdo

	$M_a(g)$	$M_b(g)$	Abs(%)	Abs média (%)
<b>Ensaio 1</b>	492,8	500	1,46	1,49
<b>Ensaio 2</b>	492,5	500	1,52	

Fonte: Autor, 2024

Com isso, a areia pode ser classificada como tendo uma absorção baixa ( $abs \leq 1,5\%$ ). Isso indica que o agregado miúdo tem uma capacidade limitada de retenção de água, o que pode ser vantajoso em muitas aplicações de construção, especialmente aquelas que requerem concretos com menor teor de água para alcançar maior resistência. Uma absorção baixa também pode contribuir para a durabilidade do concreto ou argamassa, isso porque uma menor quantidade de água retida nos poros do agregado significa que há menos chance de congelamento e descongelamento prejudiciais, o que pode aumentar a durabilidade do material em climas frios (Smith & Collis, 2001).

#### 5.1.2.2 Massa unitária do agregado miúdo

A massa unitária média do agregado miúdo foi de  $1429 kg/m^3$ , conforme representado na tabela 6. Carasek et al. (2016) e Fonseca et al. (2023) encontraram valores similares.

**Tabela 6** - Massa unitária do agregado miúdo

	Mar (kg)	Mr (kg)	V (m <sup>3</sup> )	ρ <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )
Ensaio 1	17,086	0,5332	0,011561504	1431,71	
Ensaio 2	17,023	0,5332	0,011561504	1426,28	1429
Ensaio 3	17,050	0,5332	0,011561504	1428,61	

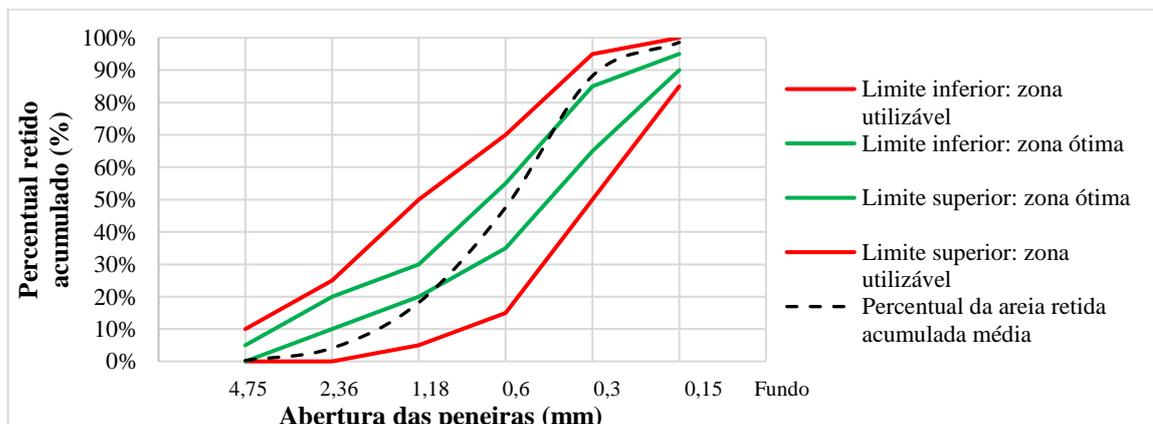
Fonte: Autor, 2024

De acordo com Ribeiro, Pinto e Starling (2013), A areia em estudo se enquadra na categoria de agregado miúdo normal. Isso significa que a areia possui uma massa unitária da faixa típica para agregados miúdos considerados normais, que geralmente variam de 1000 a 2000 kg/m<sup>3</sup>. Essa característica é relevante na formulação de misturas de concreto, onde a massa unitária dos agregados influencia diretamente nas proporções utilizadas nas misturadoras de concreto.

### 5.1.2.3 Composição granulométrica

Após a execução da metodologia do ensaio de granulometria, procedeu-se à elaboração da curva granulométrica do agregado miúdo (figura 26). De acordo com a NBR 7211/2022, a análise da curva granulométrica da areia revelou que o material permaneceu completamente dentro dos limites da zona utilizável, ocasionalmente adentrando a zona ótima para agregado miúdo, entre as peneiras de 1,18 e 0,3 mm. Isso sugere que a distribuição de tamanho de partículas da areia está mais próxima da faixa média, com uma proporção significativa de partículas de tamanho intermediário, podendo ser classificada como areia média. Materiais cuja distribuição foge dos limites da zona utilizável devem passar por análise prévia de dosagem para verificar sua utilidade prática.

**Figura 26** - Curva granulométrica da areia



Fonte: Autor, 2024.

O módulo de finura (MF), um parâmetro granulométrico diretamente relacionado ao tamanho das partículas, foi determinado como 2,57. Conforme orientado pela NBR 7211/2022, um módulo de finura entre 2,20 e 2,90 indica uma distribuição na zona ótima. A dimensão máxima característica (DMC), obtida pela abertura nominal da peneira onde 5% do material foi retido, ou o valor imediatamente inferior a esse percentual, foi registrada com um valor de 2,36, resultado também encontrado por Lima (2023) e Parente (2023).

#### 5.1.2.4 Teor de matéria orgânica do agregado miúdo

O ensaio de teor de matéria orgânica apresentou valor médio de 0,42%, conforme a tabela 7.

**Tabela 7** - Teor de matéria orgânica

	m estufa (g)	m mufla (g)	Teor de matéria orgânica (M.O%)	M.O% média
<b>Ensaio 1</b>	52,42	52,23	0,36	
<b>Ensaio 2</b>	54,37	54,10	0,50	0,42
<b>Ensaio 3</b>	55,75	55,52	0,41	

Fonte: Autor, 2024

O agregado miúdo apresentou um baixo teor de matéria orgânica. De acordo com a NBR 7211/2022, o teor limite máximo aceitável para impurezas orgânicas em agregado miúdo para concreto é de 10% da sua massa. Isso porque, a matéria orgânica pode reagir com os componentes do cimento durante o processo de hidratação, enfraquecendo a matriz do concreto (Ting et al., 2020).

#### 5.1.3 Agregado Graúdo

##### 5.1.3.1 Densidade e absorção de água do agregado graúdo

A densidade ou massa específica da brita na condição seca teve média de 2,62 g/cm<sup>3</sup> e a densidade ou massa específica média na condição saturada superfície seca foi de 2,63 g/cm<sup>3</sup>, conforme demonstrado na tabela 8. Resultados semelhantes também foram encontrados por Teixeira e Barbosa (2023) e Lima et al. (2021).

**Tabela 8** - Densidade da brita na condição seca e saturada superfície seca

	$M_a(g)$	$M_b(g)$	$M_c(g)$	$\rho_s (g/cm^3)$	$\rho_s \text{ média } (g/cm^3)$	$\rho_{sss} (g/cm^3)$	$\rho_{sss} \text{ média } (g/cm^3)$
Ensaio 1	2968	2978	1841	2,610		2,619	
Ensaio 2	2960	2962	1841,7	2,642	2,62	2,644	2,63
Ensaio 3	2940	2963	1839,7	2,617		2,638	

Fonte: Autor, 2024

No caso da brita granítica em estudo, a densidade encontrada ( $\rho_s \geq 2,4 \text{ g/cm}^3$ ) sugere que há uma alta quantidade de partículas sólidas compactadas em uma unidade de volume. Isso pode ser interpretado como boa compactação, pois indica que há poucos vazios ou poros entre as partículas. Uma baixa porosidade também é sugerida, pois a densidade alta indica que há menos espaços vazios disponível para a penetração de água ou ar. Dessa forma, a alta densidade é geralmente considerada uma característica desejável para agregados graúdos em aplicações de concreto, pois contribui para a resistência e durabilidade do material final (Kosmatka; Wilson, 2011).

Por sua vez, a absorção de água média do agregado graúdo foi de 0,4%, como representado pela tabela 9.

**Tabela 9** - Absorção de água do agregado graúdo

	$M_a (g)$	$M_b(g)$	Abs(%)	Abs média (%)
<b>Ensaio 1</b>	2968	2978	0,34	
<b>Ensaio 2</b>	2960	2962	0,07	0,4
<b>Ensaio 3</b>	2940	2963	0,78	

Fonte: Autor, 2024

Uma absorção de água de 0,4% para a brita granítica indica que este agregado graúdo possui uma baixa capacidade de absorção de água. Isso significa que uma quantidade muito pequena de água é absorvida pelo material quando exposto a condições úmidas. Essa característica é desejável em agregados para concreto, pois indica que o material será menos suscetível a danos relacionados à umidade, como expansão por gelo ou deterioração. Uma baixa absorção de água também pode contribuir para a durabilidade e estabilidade do concreto produzido com esse agregado (Smith & Collis, 2001).

### 5.1.3.2 Massa unitária do agregado graúdo

A massa unitária média do agregado graúdo foi de 1543 kg/m<sup>3</sup>, conforme representado da tabela 10.

**Tabela 10** - Massa unitária do agregado graúdo

	<b>Mar (kg)</b>	<b>Mr (kg)</b>	<b>V (m<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ<sub>ap</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ<sub>ap</sub> média (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Ensaio 1	18,3892	0,5332	0,011562	1544,44	
Ensaio 2	18,3738	0,5332	0,011562	1543,10	1543
Ensaio 3	18,3709	0,5332	0,011562	1542,85	

**Fonte:** Autor, 2024

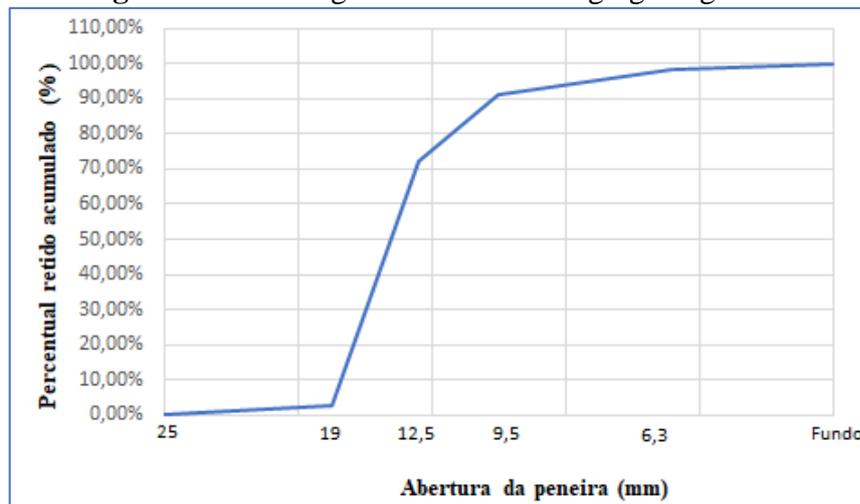
Com base na massa unitária média encontrada, a brita em estudo está dentro da faixa de um agregado normal, conforme definido por Ribeiro, Pinto e Starling (2013). Isso sugere que a brita possui uma densidade adequada para uso em concreto convencional, proporcionando uma boa relação entre resistência e trabalhabilidade.

### 5.1.3.3 Composição granulométrica da brita

Após a execução da metodologia do ensaio de granulometria, o diâmetro máximo característico encontrado para a brita foi de 19 mm, correspondendo à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira, na qual o agregado apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5 % em massa. De acordo com a NBR 7211/2022, o agregado graúdo em estudo recebe a classificação de brita 1, pois possui dimensão máxima característica (DMC) entre 9,5 mm e 19 mm. Essa categoria de brita é comumente empregada na produção de massa asfáltica, lajes pré-moldadas, estruturas de ferragem densa, artefatos de concreto pré-moldados, chapiscos e brita graduada para base de pistas. Segundo a referida norma, agregado graúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

A partir dos dados coletados, elaborou-se também a curva granulométrica do agregado graúdo (figura 27), representando o percentual retido acumulado dos grãos da amostra na série de peneiras.

**Figura 27** - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor, 2024.

#### 5.1.4 Lodo Têxtil

##### 5.1.4.1 Teor de umidade

O teor de umidade médio das amostras foi de 67,72%, como representado na tabela 11. Outros autores também encontraram altos teores de umidade. Münch e Odisi (2022) encontraram 68,3%, Lima (2023) encontrou 68,9%, Anwar, Behrose e Ahmed (2018) encontraram 80% de teor de umidade.

**Tabela 11** - Teores de umidade das amostras

	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	umidade(h%)
<b>Ensaio 1</b>	241,2	73,5	69,53
<b>Ensaio 2</b>	262,9	93,1	64,59
<b>Ensaio 3</b>	199,9	64,2	67,88
<b>Ensaio 4</b>	160,5	54,9	65,79
<b>Ensaio 5</b>	244,6	71,4	70,81
		<b>Teor de umidade média</b>	<b>67,72</b>

Fonte: Autor, 2024

Como atestado, por meio do ensaio, foi possível observar que a maior parte do lodo coletado era composta por água. Antes da definição da dosagem do concreto com a adição do lodo têxtil seco, foram realizadas dosagens experimentais de concreto com adições de 4% e 10% de lodo têxtil úmido em relação à areia, descontando-se, da água calculada para a dosagem, o teor de umidade presente no resíduo. Contudo as misturas de concreto com o lodo úmido

apresentaram consistência muito seca, inviabilizando sua moldagem mesmo com o uso do aditivo para concretos (figura 28).

**Figura 28** - Consistência do concreto com adição de lodo têxtil úmido



Fonte: autor, 2024.

De acordo com Fernandez et al. (2018), essa consistência seca é influenciada pela viscosidade irregular do lodo, o que dificulta a suspensão uniforme e homogênea das partículas sólidas durante o processo de hidratação do cimento. Conseqüentemente, a água presente no lodo não está prontamente disponível para interagir com os grãos dos agregados e o cimento, assim como a água livre. Para garantir a relação água/cimento necessária para atingir a resistência desejada (item 5.2.2), não foi adicionada água além da quantidade calculada na dosagem original. Portanto, a fim de manter uma boa trabalhabilidade e evitar variações na relação água/cimento das misturas de concreto com adições de lodo têxtil, foi determinada um tratamento prévio do material, com a secagem a 105°C por um período de 24 horas e o destorroamento em almofariz de porcelana.

#### **5.1.4.2 Massa unitária do lodo têxtil**

A massa unitária média do lodo têxtil foi de 753 kg/m<sup>3</sup>, conforme mostrado na tabela 12. O resíduo demonstrou uma massa unitária 47,3% menor que a da areia. Em sua pesquisa, Brito et al. (2023) registraram uma massa unitária do lodo de 706,3 kg/m<sup>3</sup>, enquanto Alcantara e Da Nóbrega (2020) encontraram uma massa unitária de 900 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 12** - Massa unitária do lodo têxtil

	Mar (kg)	Mr (kg)	V (m <sup>3</sup> )	ρ <sub>pap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>pap média</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
Ensaio 1	8,389	0,5145	0,010472	751,89	
Ensaio 2	8,412	0,5145	0,010472	754,14	753
Ensaio 3	8,400	0,5145	0,010472	753,02	

**Fonte:** Autor, 2024

Considerando que o lodo têxtil foi adicionado à mistura de concreto como um agregado inerte, o resíduo enquadra-se na categoria de agregado leve ( $\rho_{\text{pap média}} \leq 1000$ ). A densidade do concreto é influenciada pela massa unitária do agregado. Agregados mais leves resultam em um concreto menos denso, enquanto agregados mais pesados produzem um concreto mais denso (Ribeiro; Pinto; Starling, 2013).

#### 5.1.4.3 Massa específica do lodo têxtil

A média da massa específica do lodo têxtil em estudo foi de 1,85 g/cm<sup>3</sup>, como disposto na tabela 13. Em comparação com a areia em estudo, a massa específica do lodo têxtil seco é 26,6% menor do que a do agregado miúdo natural. Brito et al. (2023) e Moura et al. (2021) encontraram, respectivamente 1,62 g/cm<sup>3</sup> e 2,20 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 13** - Massa específica do lodo têxtil

	m(1)	V <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	V(cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>média</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Ensaio 1</b>	40	0,6	22,8	22,2	1,802	
<b>Ensaio 2</b>	40	0,5	21,5	21	1,905	1,85
<b>Ensaio 3</b>	40	0,4	22,1	21,7	1,843	

**Fonte:** Autor, 2024

A presença de substâncias orgânicas e inorgânicas menos densas, como resíduos de produtos químicos utilizados no processamento têxtil, contribui para a sua menor densidade em comparação com agregado miúdo natural. A areia é essencialmente mineral, composta principalmente de minerais como o quartzo (SiO<sub>2</sub>), que possui uma densidade alta (Luz e Lins, 2008). Por sua vez, como demonstrado pelo item 5.1.4.6, o lodo têxtil possui compostos menos

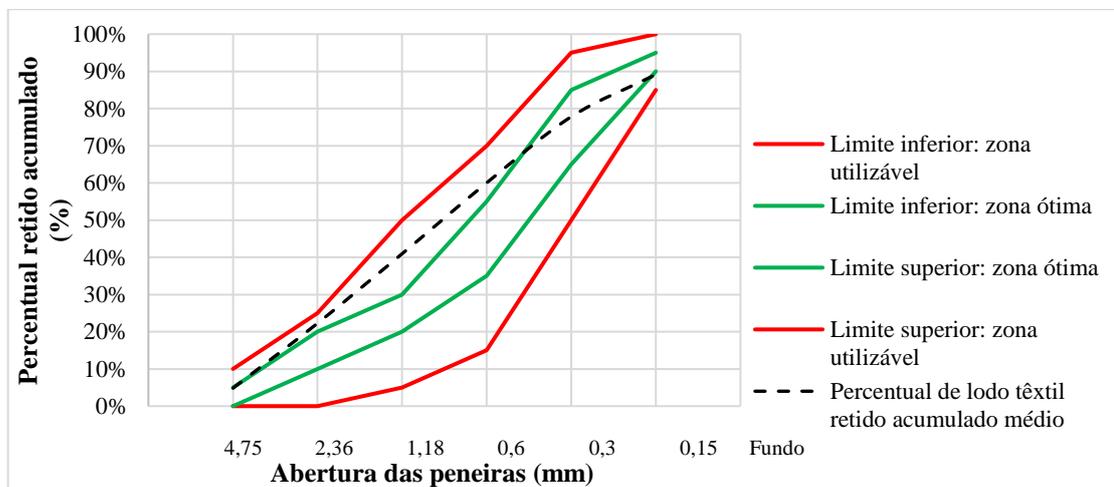
densos como MgO, Cl, SO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A combinação desses componentes, especialmente quando dispersos em uma matriz porosa, resulta em um material mais leve.

A massa específica consideravelmente menor do que a areia, pode resultar em um concreto menos denso quando adicionado à mistura, podendo afetar a resistência do concreto e sua capacidade de suportar cargas. Além disso, a presença de partículas com massa específica significativamente menor no concreto pode aumentar sua porosidade, deixando-o mais suscetível à penetração de umidade (Kosmatka; Wilson, 2011).

#### 5.1.4.4 Composição granulométrica do lodo têxtil

Após a execução da metodologia do ensaio de granulometria, procedeu-se à elaboração da curva granulométrica do lodo têxtil (figura 29). A análise da curva granulométrica do resíduo revelou que o material permaneceu dentro dos limites da zona utilizável, ocasionalmente adentrando a zona ótima para agregado miúdo, entre as peneiras de 0,6 e 0,15 mm.

**Figura 29** - Curva granulométrica do lodo têxtil



Fonte: Autor, 2024.

O módulo de finura (MF) foi determinado como 2,95. Conforme orientado pela norma NBR 7211/2022, um módulo de finura entre 2,90 e 3,50 indica uma distribuição na zona utilizável superior. A dimensão máxima característica (DMC) do agregado foi registrada com um valor de 4,75 mm, resultado também corroborado por estudos anteriores. Lima (2023) encontrou DMC igual a 4,75 mm e MF com valor de 2,84.

#### 5.1.4.5 Teor de matéria orgânica

O ensaio de teor de matéria orgânica apresentou valor médio de 4,6 %, conforme a tabela 14.

**Tabela 14** - Teor de matéria orgânica

	m estufa (g)	m mufla (g)	Teor de matéria orgânica (M.O%)	M.O% média
<b>Ensaio 1</b>	132,057	125,911	4,654	
<b>Ensaio 2</b>	98,214	93,460	4,840	4,60
<b>Ensaio 3</b>	98,770	94,529	4,294	

Fonte: Autor, 2024

Apesar de ser superior ao teor de matéria orgânica encontrado para a areia (5.1.2.4), o valor está dentro do limite máximo de 10% estabelecido pela NBR 7211/2022 para impurezas orgânicas em agregado miúdo. O resultado obtido foi próximo ao relatado por Lima (2023), que identificou 3,33% de matéria orgânica. No entanto, foi significativamente inferior ao observado por outros pesquisadores que também investigaram o lodo têxtil. Por exemplo, Moura et al. (2021) e Souto (2017) caracterizaram, respectivamente, o lodo têxtil com 20% e 12,82% de matéria orgânica.

Dependendo dos tipos de fibras, produtos químicos e métodos de tratamento utilizados, diferentes empresas ou processos têxteis podem produzir lodos com composições químicas diferentes. Consequentemente a quantidade de matéria orgânica pode variar. Por exemplo, tecidos de algodão, poliéster ou nylon podem resultar em diferentes quantidades de matéria orgânica no lodo, dependendo de como são processados e tratados durante a lavagem e amaciagem. Durante o ensaio de composição granulométrica foi possível observar a presença de restos de tecidos retidos na peneira de 4,75 mm. Além disso, produtos químicos, como corantes, agentes de acabamento e produtos de limpeza, utilizados no processo de tingimento e descoloração, podem adicionar compostos orgânicos ao lodo (Azanaw; Birlie; Teshome; Jemberie, 2022).

#### 5.1.4.6 Fluorescência de Raios-X

A análise da composição química (Tabela 15) apontou que as substâncias químicas mais presentes no lodo têxtil foram: óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e óxido de

alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Outras substâncias também se destacaram, porém em quantidades menores, como: óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), cloro ( $\text{Cl}$ ), trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ), óxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Resultados semelhantes também foram encontrados por Lima (2023) e Fernandes (2023).

**Tabela 15** - Análise da composição química

<b>Composto</b>	<b>Quantidade (%)</b>	<b>Composto</b>	<b>Quantidade (%)</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2,01	<b>MnO</b>	0,83
<b>MgO</b>	3,29	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,54
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	9,08	<b>CuO</b>	0,02
<b>SiO<sub>2</sub></b>	12,81	<b>ZnO</b>	tr
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	2,01	<b>Br</b>	tr
<b>SO<sub>3</sub></b>	2,34	<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	tr
<b>Cl</b>	2,28	<b>SrO</b>	0,08
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,77	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,03
<b>CaO</b>	18,78	<b>BaO</b>	0,05
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,10	<b>PF</b>	43,83
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,02	<b>Total</b>	100

**Fonte:** Autor, 2024

A presença do óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) pode estar relacionado ao seu uso como agente neutralizante para ajustar o pH da água durante os processos de lavagem e acabamento têxtil. O dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) pode ser proveniente de produtos usados como agentes de acabamento têxtil à base de silício, que são aplicados para melhorar a resistência à abrasão e ao desgaste. O óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pode ser encontrado em agentes químicos para conferir propriedades de resistência ao amarrotamento dos tecidos (Silva Filho; Duarte; Sinesio; Silva; Pessôa, 2021).

O óxido de Magnésio ( $\text{MgO}$ ) pode ser utilizado como um aditivo em produtos químicos para tratamento de água ou como parte de detergentes e agentes de limpeza para remoção de sujeira em tecidos. O cloro ( $\text{Cl}$ ) pode estar presente como um componente de alvejantes e desinfetantes utilizados na lavanderia para a remoção de manchas e desinfecção de tecidos. O trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) pode ser encontrado em produtos químicos utilizados para o branqueamento e desinfecção de tecidos, bem como em agentes de limpeza (Naiwen et al., 2021).

O óxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) pode ser encontrado em detergentes e produtos químicos utilizados para remover manchas e sujeira de tecidos, bem como em agentes de branqueamento. O óxido de sódio ( $Na_2O$ ) pode estar presente em produtos de limpeza e detergentes como um agente alcalino para auxiliar na remoção de sujeira e manchas dos tecidos. Por sua vez, o óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) pode ser encontrado em pigmentos utilizados para colorir tecidos ou como impureza em materiais utilizados na produção de roupas (Chao-yue et al., 2022).

Algumas dessas substâncias presentes no lodo têxtil podem representar riscos, especialmente se liberadas no meio ambiente sem o devido tratamento. Por exemplo, o óxido de cálcio pode reagir com a água para formar hidróxido de cálcio, que é uma substância alcalina e pode aumentar o pH da água, afetando negativamente os ecossistemas aquáticos. O dióxido de silício e o óxido de alumínio, em quantidades elevadas, podem causar problemas de sedimentação e poluição em corpos d'água, além de potencialmente interferir na saúde de organismos aquáticos (DE MATOS, 2020).

#### **5.1.4.7 Análise térmica**

Na análise termogravimétrica (TG) do lodo têxtil (figura 30), foi observada uma perda total de massa de 42,33% ao longo da faixa de temperatura de 35°C a 1100°C. Este processo foi observado em três etapas distintas: Entre 35°C e 215°C, uma redução de -8,51% na massa foi registrada, podendo ser atribuída à eliminação da umidade residual presente no material. Quando o lodo têxtil foi submetido à secagem em estufa antes do ensaio, a maior parte da umidade presente na amostra foi removida. No entanto, mesmo após a secagem, ainda pode haver pequenas quantidades de umidade retidas nos poros ou interstícios da amostra (Fernandes, 2023).

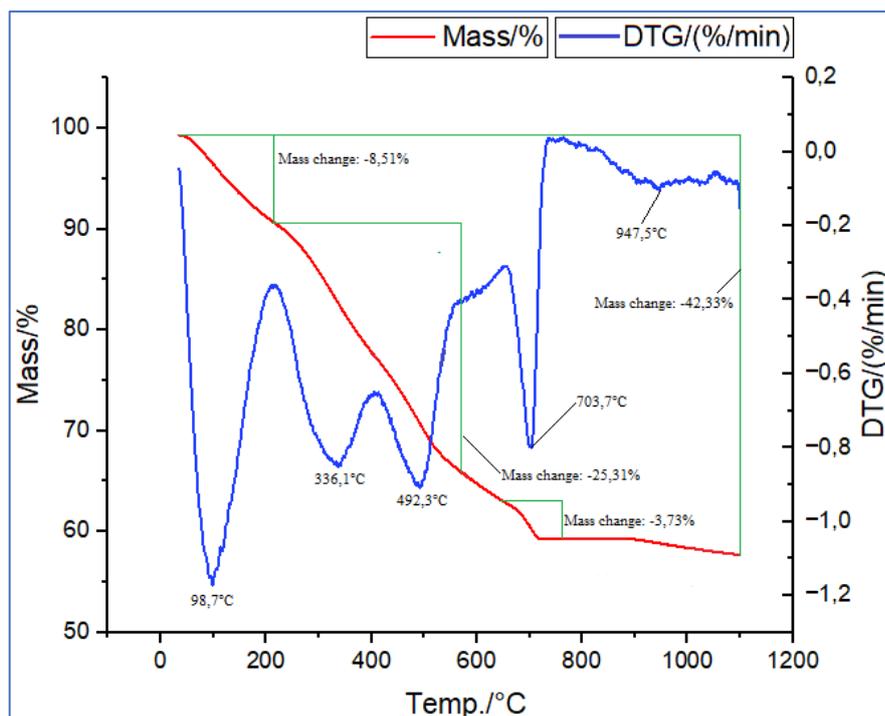
Durante o segundo estágio, que compreendeu a faixa de temperatura entre 215°C e 575°C, houve uma perda adicional de 25,32% na massa. Este fenômeno pode ser explicado pelo processo de combustão e volatilização da matéria orgânica e do carbono presentes na amostra (Ferreira, 2018). Quando o lodo têxtil é aquecido nessa faixa de temperatura, os compostos orgânicos presentes nele começam a se decompor e a liberar gases, como dióxido de carbono ( $CO_2$ ). A combustão é um processo químico onde os compostos orgânicos reagem com o oxigênio presente na atmosfera do equipamento de análise térmica. Durante essa reação, os compostos orgânicos são quebrados em seus componentes básicos, liberando calor e gases. O carbono presente na amostra pode se combinar com o oxigênio para formar  $CO_2$ , enquanto

outros compostos orgânicos podem se volatilizar, ou seja, transformar-se em vapores que são liberados da amostra (Leloup, 2013).

No terceiro estágio, observou-se uma diminuição de 3,73% na massa até aproximadamente 765°C, indicando a decomposição de materiais inorgânicos presentes na amostra. Quando aquecidos a altas temperaturas, certos materiais inorgânicos podem se decompor, ou seja, quebrar em componentes mais simples, podendo levar à liberação de gases (Sathiya e Swaminathan, 2022).

A curva de Derivada Termogravimétrica (DTG) é uma técnica que mostra a taxa de variação da perda de massa em função da temperatura. Quando ocorrem picos na curva DTG, eles indicam mudanças abruptas na taxa de decomposição da amostra. No caso em estudo, os picos na curva DTG sugerem que, a temperaturas em torno de 703,7°C e 947,5°C, houve uma decomposição acentuada de certos componentes inorgânicos da amostra. Esses compostos provavelmente são mais resistentes à decomposição e podem persistir mesmo em condições de alta temperatura. A presença desses picos sugere que esses compostos podem representar uma preocupação ambiental, pois podem não se degradar completamente durante processos de tratamento ou descarte, potencialmente persistindo no meio ambiente por longos períodos de tempo (PENG et al., 2015).

**Figura 30** - Curvas termogravimétricas (TG) e derivada termogravimétrica (DTG)



Fonte: Autor, 2024

## 5.2. Parâmetros de dosagem do concreto

### 5.2.1 Resistência média à compressão do concreto

A resistência média à compressão do concreto foi calculada com base na equação 19:

$$F_{cmj} = 1,65 \times Sd + F_{ckj} = 1,65 \times 4,0 + 35 = 41,60 \text{ Mpa} \quad (19)$$

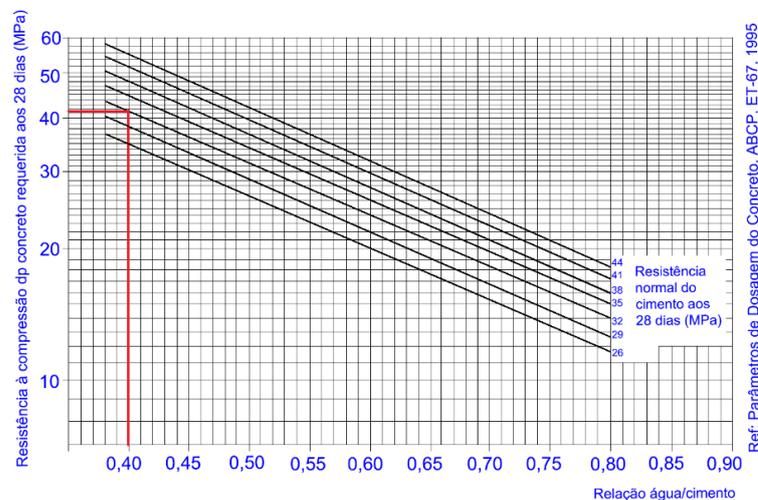
A escolha de um desvio padrão (Sd) igual a 4,0 para o controle rigoroso da produção se justifica pelo fato de que o concreto foi preparado em laboratório, onde houve um rigoroso controle de massa e umidade. Os materiais foram previamente secos em estufa, para garantir uma menor variabilidade nos resultados dos ensaios.

Quanto à determinação da resistência característica do concreto à compressão (Fck) como sendo  $\geq 35$  MPa, esta escolha está alinhada com a aplicação típica do projeto, que se refere à produção de blocos de pavimento intertravado. Esses blocos são destinados ao uso em áreas sob o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, demandando a referida resistência mínima para suportar as cargas e as condições de uso previstas (NBR 9781/2013).

### 5.2.2 Determinação da relação água/cimento

Com a resistência média à compressão definida, determinou-se a relação água/cimento por meio da curva de Abrams (figura 31).

**Figura 31** - Determinação da relação água/cimento através da curva de Abrams



Fonte: ABCP (1995)

Como a resistência de dosagem do concreto foi definida em 41,60, traçou-se, no gráfico da curva de Abrams, uma linha reta horizontal até a linha diagonal referente aos 32 Mpa do cimento CP II – 32. Em seguida, traçou-se uma linha reta na vertical, encontrando-se o fator da relação água cimento igual a 0,4.

### 5.2.3 Consumo materiais

#### 5.2.3.1 Consumo de água

O consumo de água aproximado foi determinado como 195 L/m<sup>3</sup> por meio da inter-relação entre o diâmetro máximo do agregado graúdo e o abatimento desejado do concreto (tabela 16).

**Tabela 16** - Consumo de água aproximado (Ca) (L/m<sup>3</sup>)

Abatimento (mm)	Diâmetro máximo do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: ABCP, 1995

Como visto no item 5.1.3.3, a dimensão máxima do agregado graúdo foi definida como 19 mm por meio do ensaio de granulometria. Por sua vez, o abatimento foi definido para classe S10: variando entre 10 e 50 mm, considerando aplicação típica para concreto vibroprensado, conforme o quadro 2 extraída da NBR 8953/2015.

**Quadro 2** – Classes de consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto
S220	$\geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT NBR 8953, 2015.

O abatimento, também conhecido como *slump*, é uma medida da fluidez do concreto fresco e é determinado pela queda vertical do material quando é moldado em uma forma padronizada de tronco de cone e depois removido. Para um concreto destinado ao uso como pavimento intertravado, o abatimento entre 15 e 30 milímetros oferece um equilíbrio ideal entre fluidez e coesão do concreto. Isso significa que o material é fluido o suficiente para preencher completamente as formas dos blocos, ao mesmo tempo em que mantém uma coesão adequada para suportar a manipulação e a compactação sem perder sua forma ou estrutura (Taylor & Wang, 2015).

Pavimentos intertravados são geralmente produzidos por meio de processos de vibroprensagem. Isso ocorre porque a vibroprensa é uma máquina projetada especificamente para a fabricação eficiente e precisa de blocos intertravados de concreto. Ela é composta por uma mesa de moldagem onde a mistura de concreto é colocada em moldes específicos. Após o preenchimento dos moldes, a vibroprensa aplica vibração de alta frequência e pressão sobre o concreto, compactando-o uniformemente e garantindo a remoção de possíveis bolhas de ar (Canuto, 2022).

A combinação de vibração e pressão durante o processo de fabricação resulta em blocos intertravados de alta qualidade, com resistência e durabilidade adequadas para uso em pavimentos. A vibroprensagem também proporciona uma produção eficiente em termos de tempo e custo, permitindo a fabricação de grandes quantidades de blocos em um curto período de tempo (Leal; Parsekian; Marques neto, 2017).

### 5.2.3.2 Consumo de cimento

O consumo de cimento foi calculado, através da equação 20, diretamente com base no consumo de água ( $C_a$ ) e na relação  $a/c$ , estabelecida nos dois itens anteriores:

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} = \frac{195}{0,4} = 487,50 \text{ kg/m}^3 \quad (20)$$

Sendo:

$C_c$  = consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ );

$C_a$  = Consumo de água aproximado ( $\text{L/m}^3$ );

$a/c$  = Fator da relação água cimento.

### 5.2.3.3 Consumo de brita

O consumo de brita foi determinado por meio da equação 21:

$$C_b = V_b \cdot \rho_{ap} = 0,69 \cdot 1543 = 1064,67 \text{ Kg/m}^3 \quad (21)$$

Sendo:

$C_b$  = Consumo de Brita ( $\text{kg/m}^3$ );

$V_b$  = Volume de Brita ( $\text{m}^3$ );

$P_{ap}$  = Massa unitária compactada do agregado graúdo (kg);

Como calculado no item 5.1.3.2 a massa unitária do agregado graúdo foi estabelecida como  $1543 \text{ kg/m}^3$ . Por sua vez o volume de brita foi determinada por meio da inter-relação entre dimensão máxima do agregado graúdo e o módulo de finura (MF) do agregado miúdo, conforme a tabela 17.

**Tabela 17 - Volume de Brita ( $\text{m}^3$ )**

MF	Dimensão máxima do agregado Graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	31,5	37,5
1,6	0,665	0,790	0,815	0,840	0,865
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: ABCP, 1995

#### 5.2.3.4 Consumo de areia

O consumo de areia foi determinado por meio da equação 22:

$$C_{areia} = V_{areia} \cdot \rho_{areia} = 0,23 \times 2523 = 578,53 \text{ kg/m}^3 \quad (22)$$

Sendo:

$C_{areia}$  = Consumo de areia ( $\text{kg/m}^3$ );

$V_{areia}$  = Volume de areia ( $\text{m}^3$ );

$\rho_{areia}$  = Massa específica da areia ( $\text{kg/m}^3$ ).

Para encontrar o volume de areia utilizou-se a equação 23:

$$V_{areia} = 1 - (C_c/\rho_c + C_b/\rho_b + C_a/\rho_a) \quad (23)$$

$$V_{areia} = 1 - (487,50/2871 + 1064,67/2623 + 195/1000) = 0,23 \text{ m}^3$$

Sendo:

$V_a$  = Volume de areia ( $\text{m}^3$ );

$C_c$  = consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_c$  = massa específica do cimento ( $\text{kg/m}^3$ );

$C_b$  = Consumo de Brita ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_b$  = massa específica da brita na condição seca ( $\text{kg/m}^3$ );

$C_a$  = Consumo de água aproximado ( $\text{L/m}^3$ );

$\rho_a$  = Massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ ). Para fins de cálculo adota-se  $\rho_a = 1000 \text{ kg/cm}^3$ .

#### 5.2.4 Determinação do traço de concreto

Uma vez calculado o consumo de cada um dos materiais fundamentais para a mistura de concreto (cimento, areia, brita e água), representou-se o traço de concreto inicial pretendido para o estudo por meio da equação 24.

$$C_c/C_c : C_{areia}/C_c : C_b/C_c : C_a/C_c \quad (24)$$

$$487,50/487,50 : 578,53/487,50 : 1064,67/487,50 : 195/487,50$$

$$1 : 1,19 : 2,18 : 0,4$$

Sendo:

$C_c$  = Consumo de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$C_{\text{areia}}$  = Consumo de areia ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$C_b$  = Consumo de Brita ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$C_a$  = Consumo de água aproximado ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

Considerando que o traço calculado apresenta valores unitários, foi estabelecido um fator multiplicativo igual a 10 para a preparação do concreto em laboratório. Dessa forma, a dosagem prática foi realizada utilizando 10 kg de cimento, 11,90 kg de areia, 21,80 kg de brita e 4 kg de água.

### 5.3. Preparação do concreto e ensaio de abatimento do tronco de cone

Após a determinação do traço, procedeu-se a preparação e moldagem do concreto em betoneira, conforme os itens 4.6 e 4.7, respectivamente. No total foram dosadas 4 misturas de concreto, cada uma com distintos percentuais de lodo têxtil seco em relação à areia, conforme a tabela 18.

**Tabela 18** - Proporção dos materiais para cada mistura de concreto

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Lodo têxtil (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
0% de adição de lodo têxtil	10	11,90	0	21,80	4
6% de adição de lodo têxtil	10	11,90	0,714	21,80	4
8% de adição de lodo têxtil	10	11,90	0,952	21,80	4
10% de adição de lodo têxtil	10	11,90	1,19	21,80	4

Fonte: Autor, 2024

Outros estudos adotaram percentuais similares de incorporação de lodo têxtil em concreto. Beg et al. (2022), por exemplo, investigou a inertização desse resíduo utilizando 5% e 10% como substituição à areia, alcançando boa resistência com 5%. Kasaw et al. (2021) incorporou lodo têxtil em proporções variando de 0% a 50% em substituição à massa de cimento, obtendo bom desempenho com 10%. Cheng et al. (2023) utilizou 0%, 10%, 15% e 20% de lodo têxtil em substituição à massa de cimento, alcançando resistência satisfatória até 15%. Notou-se, através do ensaio de granulometria no item 5.1.4.4, que o lodo têxtil apresentou

uma composição granulométrica mais próxima do agregado miúdo do que do agregado graúdo. Dessa forma, optou-se em adicionar os percentuais de lodo têxtil em relação à areia.

A leitura do abatimento realizada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, após a mistura de cada concreto, foi representada na tabela 19.

**Tabela 19** - Leitura do abatimento através do slump test

<b>Traço</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
<b>0% de adição de lodo têxtil</b>	15
<b>6% de adição de lodo têxtil</b>	35
<b>8% de adição de lodo têxtil</b>	15
<b>10% de adição de lodo têxtil</b>	5

Fonte: Autor, 2024

Após a realização da dosagem do traço sem adição de lodo têxtil, constatou-se que o valor do abatimento foi próximo do limite mínimo para garantir a adequada manipulação do concreto. Conforme indicado na seção 5.3.4.1, em *pavers*, é crucial manter esse abatimento entre 10 e 50 mm para facilitar a manipulação e a colocação do concreto durante a produção e instalação dos pavimentos intertravados. Um abatimento inferior a 10 mm pode dificultar a manipulação e compactação adequadas do concreto, o que pode prejudicar a qualidade e uniformidade do pavimento (Taylor & Wang, 2015).

Os traços de concreto com 6%, 8% e 10% de lodo têxtil representaram uma maior adição de matéria seca. Para manter uma trabalhabilidade adequada, sem alterar a relação água cimento, optou-se por utilizar um aditivo plastificante e fluidificante da fabricante Sika nas misturas de concreto com a incorporação do resíduo. Esse aditivo foi aplicado na proporção de 20 mililitros (ml) para cada 1 kg de cimento, conforme recomendações da fabricante (Sika, 2024). Considerando que os traços de concreto foram todos moldados com 10 kg de cimento, foram utilizados 200 ml de aditivo nas misturas de concreto com adição de lodo.

Durante a preparação do concreto em laboratório, o aditivo foi misturado com parte da água de amassamento para garantir uma homogeneização adequada com os agregados e aglomerante. Através da tabela 19, foi possível verificar que o aditivo contribuiu para manter o concreto com boa coesão e trabalhabilidade, mantendo-o dentro da faixa de abatimento desejada nos traços com adição de 6% e 8% de lodo têxtil.

No traço de concreto com adição de 10% do resíduo têxtil, a mistura apresentou deslocamento vertical de apenas 5mm durante a retirada do cone metálico no ensaio de

abatimento, indicando que o concreto teve uma consistência relativamente seca, mas ainda capaz de fluir e se deformar em certa medida, permitindo a aplicação e manipulação do concreto no local da moldagem.

#### 5.4. Determinação da resistência à compressão dos blocos moldados

O ensaio de resistência à compressão axial das peças de concreto moldadas foi executado aos 28 dias após a moldagem de cada traço, conforme o item 4.8. Foram ensaiadas 10 amostras para cada dosagem, com um total de 40 corpos de prova. A tabela 20 representa a resistência à compressão axial de cada peça ( $F_{pk}$ ), a média das resistências, o desvio padrão da amostra e a resistência à compressão estimada de cada traço ( $F_{pk, est}$ ).

**Tabela 20** - Valores de resistência à compressão axial dos corpos de prova (Mpa)

<b>Resistências dos blocos para cada traço de concreto expressas em Mpa</b>				
<b>Corpo de prova</b>	<b>0% de adição de lodo seco</b>	<b>6% de adição de lodo seco</b>	<b>8% de adição de lodo seco</b>	<b>10% de adição de lodo seco</b>
<b>1</b>	43,28	40,32	37,88	36,76
<b>2</b>	46,94	44,77	38,44	39,46
<b>3</b>	44,59	40,62	41,69	36,35
<b>4</b>	45,94	40,24	40,62	35,22
<b>5</b>	46,91	42,71	42,48	35,48
<b>6</b>	46,98	43,75	37,12	37,92
<b>7</b>	45,73	43,02	41,53	35,17
<b>8</b>	44,94	42,31	38,11	39,32
<b>9</b>	44,32	40,93	38,80	40,55
<b>10</b>	45,37	40,84	41,19	38,40
<b>Média</b>	45,55	41,62	39,71	37,34
<b>Desvio padrão</b>	1,25	1,59	1,91	1,94
<b>Fpk, est</b>	44,45	40,22	38,02	35,62

Fonte: Autor, 2024

Com base nos dados fornecidos na tabela 20, verificou-se que as resistências à compressão das amostras aos 28 dias excederam 35 Mpa, cumprindo, assim, o requisito mínimo de resistência estabelecido pela NBR 9781/2013 para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. É relevante notar que as resistências demonstraram uma relação

inversa com a quantidade de lodo têxtil adicionado ao concreto. Em comparação com o traço sem adição de lodo, o traço com 6% de resíduo apresentou uma redução média de 8,63% na resistência, enquanto o traço com 8% registrou uma diminuição média de 12,82%, e o traço com 10% exibiu uma queda média de 18,02%.

Esse efeito pode ser atribuído à interferência das propriedades físicas e químicas do lodo têxtil na matriz do concreto, influenciando sua capacidade de suportar cargas de compressão. Como observado através do ensaio de FRX, item 5.1.4.6, o lodo possui óxidos e substâncias orgânicas em sua composição. A alta concentração do óxido de cálcio (CaO) pode levar à formação de cal livre ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) durante a hidratação do cimento. A cal livre pode causar expansões indesejadas e microfissuras dentro da matriz de concreto, comprometendo sua resistência à compressão (Scherer, 2023). O óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) do lodo têxtil pode promover a formação de etringita secundária quando reage com sulfatos presentes na mistura de concreto. A etringita expansiva pode causar fissuração interna, prejudicando a integridade estrutural do concreto (Ferreira, 2018).

Por sua vez, a matéria orgânica presente no lodo pode formar uma camada, nas superfícies dos agregados, que atua como uma barreira entre o agregado e a pasta de cimento, impedindo a formação de uma ligação mecânica e química eficaz. A aderência fraca resulta em uma interface de transição agregados-pasta mais frágil, comprometendo a resistência à compressão do concreto (Ting et al., 2020).

Apesar da queda na resistência, os valores obtidos ainda atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma técnica para aplicações específicas, como o tráfego de pedestres e veículos leves. Isso sugere que, mesmo com a adição de lodo têxtil, o concreto mantém uma performance aceitável para determinadas utilizações, o que é relevante considerando os benefícios ambientais associados à reciclagem desse resíduo na construção civil. Além disso, a variação na redução da resistência conforme a quantidade de lodo adicionado indica a importância de se encontrar um equilíbrio entre a incorporação do resíduo e a manutenção das propriedades mecânicas do concreto.

De acordo com a análise de variância (ANOVA), a diferença nas resistências à compressão entre os diferentes percentuais de adição de lodo têxtil foi estatisticamente significativa (com  $P < 0,01$ ). Um valor de p inferior a 0,01 indica que existe uma probabilidade muito baixa de os resultados observados ocorrerem apenas por acaso, sob a hipótese nula de que não há diferença real entre os grupos. Portanto, os diferentes percentuais de adição de lodo

têxtil influenciaram significativamente a resistência à compressão do concreto. Os resultados dessa análise estão representados na tabela 21.

**Tabela 21** - Análise de variância da resistência à compressão

Fonte da variação	GL	SQ	QM	Fc	Valor - P
Percentual de adição de lodo	3	350,16	116,72	38,44	
Repetição	9	21,59	2,40	0,79	< 0,01
Erro	27	81,99	3,07		
Coefficiente de variação % (CV)	4,23				

Fonte: Autor, 2024.

Sendo:

GL = Grau de liberdade;

SQ = Soma de quadrados;

QM = Quadrado médio;

Fc = Fator crítico.

O Teste de Tukey indicou que os concretos com adição de lodo apresentaram redução significativa nas resistências à compressão, demonstrando um comportamento decrescente na medida em que se aumentou a adição de lodo têxtil nas misturas de concreto. A maior média foi observada no tratamento sem adição do resíduo (0%) e a menor média no tratamento com o maior percentual de adição estudado (10%). Os resultados do teste estão representados na tabela 22 abaixo.

**Tabela 22** - Teste de Tukey

Tratamentos	Resistência à compressão
0	45,50 a
6	41,95 b
8	39,79 c
10	37,46 d
Diferença mínima significativa (DMS)	2,13

Fonte: Autor, 2024

As letras a, b, c e d indicam grupos que são estatisticamente diferentes entre si. A diferença mínima significativa (DMS) de 2,13 MPa indica o quanto duas médias precisam ser diferentes para serem consideradas estatisticamente distintas. Dessa forma, os tratamentos com diferentes percentuais de adição de lodo têxtil têm médias de resistência à compressão significativamente diferentes entre si.

### 5.5. Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme descrito no item 4.9, com três amostras de *paver* de concreto para os traços: sem adição de lodo têxtil e também com 6%, 8% e 10% de adição. A tabela 23 representa os resultados encontrados.

**Tabela 23** - Absorção de água

		<b>m<sub>1</sub></b>	<b>m<sub>2</sub></b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Média</b>
<b>Traço sem adição de lodo</b>	Ensaio 1	2885,2	2939,9	1,90	1,90
	Ensaio 2	2871,1	2929,2	2,02	
	Ensaio 3	2853,8	2904,4	1,77	
<b>Traço com 6% de adição de lodo</b>	Ensaio 1	2787,2	2857,1	2,45	2,65
	Ensaio 2	2745,7	2824,7	2,80	
	Ensaio 3	2746,4	2822,6	2,70	
<b>Traço com 8% de adição de lodo</b>	Ensaio 1	2736,7	2820,2	2,96	3,04
	Ensaio 2	2754,3	2841,4	3,07	
	Ensaio 3	2731	2818,3	3,10	
<b>Traço com 10% de adição de lodo</b>	Ensaio 1	2770,6	2870,3	3,47	3,57
	Ensaio 2	2716,2	2825,2	3,86	
	Ensaio 3	2742,5	2838,5	3,38	

**Fonte:** Autor, 2024

A NBR 9781/2013 estabelece que as peças de concreto para pavimentação devem apresentar absorção igual ou inferior a 6%. A partir da tabela 23, observou-se que todos os blocos moldados enquadraram-se dentro desse intervalo. Nota-se também que a absorção de água foi diretamente proporcional à adição de lodo têxtil ao concreto, de maneira que o traço de concreto com maior absorção média foi o traço com 10% de adição de lodo.

O aumento linear na absorção de água do concreto com a adição progressiva de lodo têxtil pode ser atribuído devido a alguns fatores. Com uma densidade significativamente menor do que a da areia, o lodo têxtil pode introduzir porosidade adicional no concreto devido à presença de partículas finas e espaços vazios entre elas, o que facilita a penetração e absorção de água. A interface entre o lodo têxtil e a matriz de concreto pode não ser completamente homogênea, criando zonas de transição com diferentes características físicas que favorecem a absorção de água. Além disso, como visto no item 5.1.4.5, o lodo têxtil apresentou 4,6% de teor de matéria orgânica, podendo aumentar a absorção de água devido à sua capacidade de reter umidade (Dutra et al. 2015).

Segundo a análise de variância (ANOVA), a diferença nos ensaios de absorção de água entre os diferentes percentuais de adição de lodo têxtil foi estatisticamente significativa (com  $P < 0,01$ ). Com um valor de  $p < 0,01$ , a diferença é considerada estatisticamente significativa a um nível de significância de 1%. Isso sugere que a quantidade de lodo têxtil adicionada ao concreto influenciou de forma significativa a absorção de água pelo material. Os resultados foram representados na tabela 24.

**Tabela 24** - Análise de variância da absorção de água

Fonte da variação	GL	SQ	QM	Fc	Valor - P
<b>Percentual de adição de lodo</b>	3	4,47	1,49	86,65	
<b>Repetição</b>	2	0,13	0,07	3,90	
<b>Erro</b>	6	0,10	0,02		< 0,01
<b>Coefficiente de variação % (CV)</b>	4,70				

Fonte: Autor, 2024

Segundo o teste de Tukey, os concretos com adição de lodo apresentaram aumento significativo na absorção de água, demonstrando um comportamento crescente na medida em que se aumentou a adição de lodo têxtil nas misturas de concreto. A maior média foi observada no tratamento com o maior percentual de adição estudado (10%) e a menor, no tratamento sem adição do resíduo (0%). Os resultados encontram-se na tabela 25.

**Tabela 25** - Teste de Tukey

Tratamentos	Absorção de água
0	1,90 a
6	2,65 b
8	3,04 c
10	3,57 d
Diferença mínima significativa (DMS)	0,37

Fonte: Autor, 2024

A diferença mínima significativa (DMS) de 0,37 fornece um limite para determinar se as diferenças entre os tratamentos são estatisticamente significativas. Se a diferença entre dois tratamentos for maior que a DMS, então esses tratamentos são considerados estatisticamente diferentes. Dessa forma, os resultados do teste também corroboram que as diferenças entre os tratamentos são estatisticamente significativas.

### 5.6. Rendimento da moldagem e consumo de cimento por bloco moldado

A tabela 26 representa a quantidade de blocos moldados para cada mistura de concreto dosada em betoneira.

**Tabela 26** - Quantidade de *Pavers* moldados

Traço	Nº de blocos
0% de lodo têxtil	14
6% de lodo têxtil	15
8% de lodo têxtil	16
10% de lodo têxtil	16

Fonte: Autor, 2024

Em comparação com o traço de concreto sem adição de lodo têxtil, os traços com adições apresentaram aumento de produção em 7,14% para 6% de adição do resíduo e 14,28% para 8% e 10% de adição. Esse aumento permite aproveitar um resíduo que de outra forma seria descartado, promovendo uma abordagem mais sustentável e eficiente no uso de recursos. A massa de cimento utilizada nas dosagens de concreto foi de 10 kg para todas as misturas (item 5.3). Dessa forma, o consumo de cimento por bloco moldado foi 0,714 kg/bloco para o traço

sem adição de lodo, 0,666 kg/bloco para o traço com 6% do resíduo, e 0,625 kg/bloco para os traços com 8% e 10% de adição de lodo têxtil (uma redução 12,5% em comparação com o traço padrão). Levando em conta que o aglomerante é o material mais caro utilizado em concreto, essa redução do consumo de cimento por *paver* produzido representa uma economicidade desejável para o mercado.

## 6. CONCLUSÕES

A caracterização química do lodo têxtil por meio do ensaio de Fluorescência de Raios-X indicou a presença de substâncias químicas variadas, como cloro, cálcio, alumínio, manganês, fósforo, sódio, magnésio, ferro, silício e enxofre. Essas substâncias podem causar uma série de prejuízos ambientais e sociais, incluindo contaminação do solo e da água, toxicidade para organismos aquáticos e terrestres, impactos na saúde humana e poluição atmosférica. Além disso, a Análise térmica demonstrou a decomposição de compostos inorgânicos à elevadas temperaturas (entre 703,7°C e 947,5°C), indicando que esses compostos podem representar uma preocupação ambiental, pois podem não se degradar completamente durante processos de tratamento ou descarte, potencialmente persistindo no meio ambiente por longos períodos de tempo.

O reaproveitamento desse resíduo, em adição ao agregado miúdo natural, em matrizes de concreto se configura como uma alternativa para a redução desses danos ambientais. Com base nos resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão dos *pavers* de concreto, com idade de 28 dias, constatou-se que as resistências médias obtidas nas dosagens estudadas foram superiores à 35 MPa, estando, portanto, em conformidade com o limite mínimo estabelecido pela NBR 9781/2013, para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

As amostras de concreto com adição de lodo têxtil seco na proporção de 6% apresentaram maior resistência à compressão estimada do que as dosagens com 8% e 10% de adição. Contudo as dosagens com adições de 8% e 10% do resíduo obtiveram melhor rendimento de blocos moldados e menor consumo de cimento por bloco produzido quando comparado às dosagens com 0% e 6% de adição do resíduo.

A mistura de concreto com o maior percentual de lodo estudado (10%) apresentou uma consistência relativamente seca, com apenas 5 mm de abatimento, mas ainda capaz de fluir e se deformar permitindo a moldagem. Levando em conta a resistência à compressão, a absorção de água, a trabalhabilidade e o rendimento de *Pavers* moldados, a melhor proporção de adição estudada foi o traço de concreto com 8% de adição de lodo. Por outro lado, levando-se em conta o fator reaproveitamento de resíduos e consumo de cimento, o traço de concreto com 10% de lodo têxtil gera um melhor equilíbrio entre desempenho técnico, eficiência de produção, economia e sustentabilidade ambiental.

Por meio do ensaio de absorção de água, identificou-se que os traços de concreto com adições de lodo apresentaram absorção de água levemente maiores do que o traço sem adição

de lodo. Isso pode estar relacionado à densidade do lodo têxtil, pois a presença de partículas com massa específica significativamente menor no concreto pode aumentar sua porosidade, deixando-o mais suscetível à penetração de umidade. Porém, todas as misturas apresentaram valores de absorção inferiores a 6%, estando, portanto, em concordância com a normativa.

Com base nos dados obtidos, é possível concluir que a inertização do lodo têxtil em pavimentos intertravados consiste em uma alternativa viável para reduzir os impactos ambientais decorrentes da disposição do resíduo no meio ambiente, uma vez que ao incorporá-lo à matriz do concreto em adição ao agregado miúdo proporciona-se uma destinação adequada do lodo têxtil dentro dos parâmetros técnicos exigidos no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- AGINAM, C. H.; UMENWALIRI, S. N.; NWAKIRE, C. **Influence of mix design methods on the compressive strength of concrete**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 8, n. 6, p. 438-444, 2013.
- AGUIDA, Leandro Mazzuco; DEPINE, Haline; OLIVEIRA, Daniela Aparecida; KAUFMANN, Vander; PINHEIRO, Adilson. **Caracterização de resíduos da suinocultura, da indústria têxtil e de urina humana para aplicação como fertilizante**. Revista de estudos ambientais, v. 18, n. 2, p. 52-61, 2016.
- ALCANTARA, Lidiane Fernanda Jochem; DA NÓBREGA, Ana Cecília Vieira (2020). **Avaliação das propriedades físicas de blocos intertravados de concreto com substituição do agregado miúdo por resíduo de cerâmica vermelha e lodo têxtil gerado no agreste pernambucano**. Revista Técnico Científica do Crea PR.
- ANWAR, Touhid Bin; BEHROSE, Bushra; AHMED, Shoeb. **Utilization of textile sludge and public health risk assessment in Bangladesh**. Sustainable environment research, v. 28, n. 5, p. 228-233, 2018.
- AQUINO, R. C. (2015). **Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, 10, 29 – 35.
- ARSLAN-ALATON, I.; GURSOY, B. H.; SCHMIDT, J. E. **Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes**. Dyes and Pigments, v. 78, p. 117-130, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTEL E DE CONFECÇÃO – ABIT. **Relatório de atividades**. 2023. Disponível em [www.abit.org.br](http://www.abit.org.br). Acesso em: 18 abril de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Parâmetros de dosagem de concreto**: estudo técnico 67. 2. ed. São Paulo: ABCP, 1995. 32 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregado Graúdo - Determinação da Densidade e da absorção da água**. NBR 16917: 2021. São Paulo: ABNT, abr. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. NBR 16916: 2021. São Paulo: ABNT, abr. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. NBR 17054:2022. São Paulo: ABNT, jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados** - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. NBR 16972:2021. São Paulo: ABNT, jun. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados** – Terminologia. NBR 9935:2011. São Paulo: ABNT, fev. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados para concreto** — Requisitos. NBR 7211:2022. Rio de Janeiro: ABNT, out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Amostras de solo** - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457:2024. São Paulo: ABNT, jun. 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland Composto**. NBR 11578:1991. Rio de Janeiro: ABNT, jul. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland e outros materiais em pó** – Determinação da massa específica. NBR 16605:2017. Rio de Janeiro: ABNT, mai. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland Requisitos**. NBR 16697:2018. Rio de Janeiro: ABNT, mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto** – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR 16889:2020. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto** — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR 16889:2020. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto** — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova prismáticos e cilíndricos. NBR 5738:2015. Rio de Janeiro: ABNT, jun. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto de cimento Portland** — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. NBR 12655:2022. Rio de Janeiro: ABNT, fev. 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto para fins estruturais** - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. NBR 8953:2015. Rio de Janeiro: ABNT, mar. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Determinação do teor de matéria orgânica** - por queima a 440°C. NBR 13600:2022. Rio de Janeiro: ABNT, mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Materiais granulares** – Determinação de massa específica pelo uso do frasco volumétrico de “Le Chatelier”. NBR 11513:2016. Rio de Janeiro: ABNT, jul. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Peças de Concreto para pavimentação** – Especificação e métodos de ensaio. NBR 9781:2013. Rio de Janeiro: ABNT, jul. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Preparação de concreto em laboratório** — Procedimento. NBR 12821:2009. Rio de Janeiro: ABNT, jul. 2009.

ASSUNÇÃO, J. W. **Dosagem racional do concreto**. Maringá: Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, 2009.

AZANAW, Aklilu; BIRLIE, Bantamlak; TESHOME, Bayu; JEMBERIE, **Muluken**. **Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater**. Case Studies In Chemical And Environmental Engineering, Bahir Dar, v. 6, n. 8, p. 1-10, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>.

BADARÓ, Adair Divino Silva. **Estudo sobre o efeito do plasma com diferentes gases na solidez a lavagem do repelente a insetos a base de permetrina aplicado em tecidos de poliéster**. 2019. Dissertação de Mestrado. Brasil.

BARBOZA, A. A. S. **Desenvolvimento de Argamassas de Revestimento com Adição Concomitante de Cinzas de Lenha e Lodo Têxtil Gerados no APL de Confecções Pernambucano**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. p. 1–94, 2011.

BARRETO, J.M.L.; COSTA, H.N.; CÂNDIDO, L.F. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de blocos de concreto prensados sem função estrutural com incorporação de PET reciclado**. Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.

BEG, T. et al. **Utilization of textile denim sludge waste in high load-bearing structural applications**. Polimery/Polymers, v. 67, n. 7/8, p. 298–307, 2022.

Brito, E. P. C., Lima, K. P. B. de A., Cunha, A. L. X., Santos, V. A., de Araújo, F. W. C., Lins, C. M. M. S., Moraes, A. S., & de Holanda, R. M. (2023). **Comportamento de argamassas de revestimento com incorporação do lodo gerado por lavanderia industrial de jeans do**

**agreste pernambucano. DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, 16(47), 2610–2627. <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n47-00>.

CANUTO, Gabriel Lima. **Avaliação do potencial de uso de agregados reciclados na fabricação de paver por empresas de pré-moldado na cidade de Fortaleza**, Ceará. 2022.

CAO, Naiwen et al. Superior selective adsorption of MgO with abundant oxygen vacancies to removal and recycle reactive dyes. **Separation and Purification Technology**, v. 275, p. 119236, 2021.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. **Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento**. Revista Matéria, v.21, n.3, pp. 714 –732, 2016.

CASAGRANDE, C. A.; CAVALARO, S. H. P.; REPETTE, W. L. **Ultra-high performance fibereinforced cementitious composite with steel microfibres functionalized with silane**. Construction and Building Materials, v. 178, p. 495–506, jul. 2018.

CASTILHOS, Stefani. **Emprego de ozonização para o tratamento de efluente têxtil**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CASTRO, Vinicius Gomes de. Cimento Portland. **Compósitos Madeira-Cimento: um produto sustentável para o Futuro**, [S.L.], p. 13-21, 2021. EdUFERSA. <http://dx.doi.org/10.7476/9786587108612.0002>.

CHENG, Z. et al. **Effect of textile sludge on strength, shrinkage, and microstructure of polypropylene fiber concrete**. Buildings, v. 13, n. 2, 2023.

COMETTI, José Luís Said et al. Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis (lavanderia de jeans) do município de Toritama-PE. In: **VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campina Grande/PB**. 2016.

DE MATOS, Antônio Teixeira. **Poluição ambiental: impactos no meio físico**. Editora UFV, 2020.

DUTRA, R. et al. **Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 10, n. 1, p. 29-35, 2015.

FERNANDES, I. Blocos e Pavers. **Produção e Controle de Qualidade**. São Paulo, 2013.

FERNANDES, I. V. **Avaliação da pozolanicidade do lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil para uso como material cimentício suplementar**. 2023, 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

- FERNANDES, Igor Vieira. **Avaliação da pozolanicidade do lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil para uso como material cimentício suplementar**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- FERNANDEZ, L. P.; MIKOWSKI, P. C. B.; MACIOSKI, G; NAGALLI, A.; FREIRE, F. B. Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado. **Revista Matéria**, v.23, n.3, 2018.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: **A computer statistical analysis system**. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v.35, p.1039-1042, 2011.
- FERREIRA, Juliana de Souza. Processos físico-químicos sustentáveis para o tratamento de efluentes da indústria têxtil: uma análise bibliográfica. 2023.
- FERREIRA, M. N. **Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de Lavanderia Industrial em Cerâmica Vermelha**. 2018. 93 f. - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, [s. l.], 2018.
- FERREIRA, Thiago Laurindo. Estudo do efeito da adição de óxido de alumínio no concreto submetido à altas temperaturas. 2018.
- FERREIRA, Verônica; MERÇON, Fábio. **Metais Pesados no Ensino de Química**. Brasil: Química Nova na Escola, 2011. Disponível em: [http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc33\\_4/199-CCD-7510.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc33_4/199-CCD-7510.pdf). Acesso em: 03 jun. 2023.
- FONSECA, T. D. dos S.; BASTOS, P. K.; DE OLIVEIRA, T. M.; MENDES, J. C. Desenvolvimento de argamassa termo isolante para revestimento de paredes de alvenaria em edificações com uso de areia de britagem e vermiculita, 2023. **Anais do XIV simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas**. DOI: 10.46421/sbta.v14.2812. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/2812>. Acesso em: 22 abr. 2024.
- GAZZOLA, Ana Cecília. **Efeito da amônia e do oxigênio dissolvido na sobrevivência de Alevino de dourado**. 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85945/193967.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- Goyal, S., Rafat S., Sujant J. & Devender S. (2019). **Utilization of textile sludge in cementmortar and paste**. **Construction and Building Materials**, 214, 169 – 177.
- HALLACK, Abdo. **Pavimento Intertravado**: Uma solução universal, Revista Prisma. 2001.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Industrial Anual (PIA)**: Valor bruto da produção industrial (mil reais), Fabricação de produtos têxteis, 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1849>. Acesso em: 13 set. 2023.

INSTITUTO DE ESTUDOS E MARKETING INDUSTRIAL - IEMI. Perfil do Setor Têxtil e de Confecção no Brasil - 2023. São Paulo, 2023.

JANSSENS, K.; van GRIEKEN, R. **Non-Destructive Microanalysis of Cultural Heritage Materials**. 1 th Ed. Amsterdam: Ed. Elsevier, 2004.

JUANGA-LABAYEN, Jeanger P.; LABAYEN, Ildefonso V.; YUAN, Qiuyan. **A Review on Textile Recycling Practices and Challenges**. Textiles, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 174-188, 16 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/textiles2010010>.

JÚNIOR, Genelicio Souza Carvalho et al. **Atributos químicos de um latossolo vermelho tratado com resíduo têxtil**. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 8, n. 1, 2011.

KASAW, E. et al. **Incineration of textile sludge for partial replacement of cement in concrete production: a case of ethiopian textile industries**. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, 2021.

KOSMATKA, Steven H.; WILSON, Michelle L.. **Design and Control of Concrete Mixtures**. 15. ed. Illinois: Portland Cement Association, 2011. 459 p. Disponível em: <https://secement.org/wp-content/uploads/2019/01/eb001.15.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2024.

LEAL, C. E. F.; PARSEKIAN, G. A.; MARQUES NETO, J. C. Concrete paving units: the influence of vibring-pressed production on the final quality of products. in: workshop de tecnologia de processos e sistemas construtivos, 1., 2017. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2017. DOI: 10.17648/tecsic-2017-72123. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/2459>. Acesso em: 23 abr. 2024.

LELOUP, W. D. A. **Efeitos da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013. 110 f. - Universidade Federal de Pernambuco - Centro Acadêmico do Agreste, [s. l.], 2013.

LIMA, Carlos Eduardo de; AMORIM, Enio Fernandes; OLIVEIRA, Hudson da Silva; MOURA, Lucas Fernandes de. **Concreto asfáltico a quente dosado com resíduos de construção e demolição (rcd) aplicado em pavimento flexível**. HOLOS, [S. l.], v. 1, p. 1-18, 2021. DOI: 10.15628/holos.2021.9576. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/9576>. Acesso em: 22 abr. 2024.

LIMA, Iara Lícia Pereira et al. **Inovação nas rotas tecnológicas para implantação da ecologia industrial e economia circular no setor têxtil do agreste de Pernambuco: estudo de preceitos para a sustentabilidade setorial**. 2022.

LIMA, Karina Paula Barbosa de Andrade. **Perspectivas para a inovação ambiental e tecnológica na reutilização de resíduos têxteis para o setor da construção civil no Estado de Pernambuco**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023.

LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2012. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2043>. Acesso em: 01 maio 2023.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. Areia industrial. **CETEM**, 2008.

MARAR, Khaled; EREN, Özgür. Effect of cement content and water-cement ratio on fresh concrete properties without admixtures. 2011.

MARMITTI, Benno Aluisio *et al.* **Estudo comparativo de métodos para dosagem de concreto**. 2016. Disponível em: <https://www.confeca.org.br/sites/default/files/uploads-imce/contecc2016/civil/estudo%20comparativo%20de%20m%C3%A9todos%20para%20dosagem%20de%20concreto.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

MARTINS, G.B.H. **Práticas limpas aplicadas às indústrias têxteis de Santa Catarina**. Dissertação de M.Sc., UFSC, Florianópolis, SC, 1997.

MEERT, Rúbia; HASTENPFLUG, Daniel; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Contribuição para o uso de lodo de estação de tratamento de água in natura como agregado miúdo em concretos de cimento Portland: avaliação da consistência, massa específica, porosidade, absorção, resistência à compressão e tração na compressão diametral**. Matéria (Rio de Janeiro), Porto Alegre, v. 26, n. 3, p. 1-16, 7 abr. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13025>.

MOURA, L. S. de .; REIS, A. C. dos S. .; SILVA, C. L. .; BEZERRA , J. P. S. .; NÓBREGA, A. C. V. da .; CARNEIRO , A. M. P. . Evaluation of the adhesiveness of the asphalt binder modified with textile sludge by means of digital image processing. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. e12110413975, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.13975. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13975>. Acesso em: 23 apr. 2024.

MOURA, Lyneker Souza de. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos: uma análise mecânica, microscópica e ambiental**. 2021.

MOURA, Lyneker Souza de; SILVA, Carina Lessa; REIS, Ana Carolina dos Santos; MARINHO, Erika Pinto; NÓBREGA, Ana Cecília Vieira da; CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. **Caracterização de lodo produzido nas lavanderias têxteis da região Agreste de Pernambuco para uso em materiais de construção alternativos**. 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14078>. Acesso em: 29 abr. 2023.

MÜNCH, Pierre Arthur; ODISI, Francisco. REMOÇÃO DE UMIDADE DE LODO TÊXTIL POR SECAGEM TÉRMICA. *Revista da UNIFEPE*, v. 1, n. 27, 2022.

NARIMATSU, Bárbara Mayume Galeti; BEM, Natani Aparecida; WACHHOLZ, Larissa Aparecida; LINKE, Paula Piva; LIZAMA, Maria de los Angeles Perez; REZENDE, Luciana Cristina Soto Herek. **Corantes naturais como alternativa sustentável na indústria têxtil**. *Revista Valore*, v. 5, p. 5030, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2015. 912 p.

OLIVEIRA, A. G. (2014). **Estudo das propriedades mecânicas do lodo têxtil para fins de utilização em pavimentos rodoviários**. Universidade Federal de Campina Grande.

OLIVEIRA, Tawan Mundim et al. (2020). **Absorção de água e massa específica de agregados graúdos e miúdos de resíduos de concreto**. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.

PARENTE, L. G. C.; CASTRO, L. D. M. da C.; GARCIA, D. C. S. .; SANTOS, W. J. **Estudo sobre a substituição parcial do agregado miúdo natural por reciclado proveniente de resíduos de tijolos cerâmicos na produção de argamassa estrutural**. Encontro nacional de aproveitamento de resíduos na construção, 2023. p. 1–7. DOI: 10.46421/enarc.v8i00.3002. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3002>. Acesso em: 22 abr. 2024.

PENG, Xiaowei; MA, Xiaoqian; XU, Zhibin. **Thermogravimetric analysis of cocombustion between microalgae and textile dyeing sludge**. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 180, p. 288–295, 2015.

PENSUPA, N.; LEU, S.; HU, Y.; DU, C.; LIU, H.; JING, H. LIN, C. S. **Recent trends in sustainable textile waste recycling methods: current situation and future prospects**. *Topics in Current Chemistry*, v. 4, p.189-222, 2017.

PIMENTEL, Rafaela Gamba; GONÇALVES, Fernanda Daniela; REZENDE, Luciana Cristina Soto Herek. Utilização do bagaço de cana de açúcar como bioadsorvente no tratamento de efluentes de lavanderias industriais. **IX Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação Científica**, p. 1-6, 2018.

RAMOS, M. D. N.; CLAUDIO, C. C.; REZENDE, P. H. V.; CABRAL, L. P.; SANTOS, L. A.; COSTA, G. G.; MESQUITA, P. L.; AGUIAR, A. Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. *Revista Virtual de Química*, v. 12, p. 913-929, 2020.

RAPOSO, M.C.; GOMES, G.M. (Coord.). **Estudo de caracterização econômica do polo de confecções do agreste pernambucano**. Relatório final apresentado ao SEBRAE. Recife: FADE/UFPE/SEBRAE, 2003.

REZENDE, Driano; CARVALHO, Karina Querne de; KREUTZ, Cristiane; ARANTES, Eudes José; PASSIG, Fernando Hermes. Avaliação do processo de tratamento de efluentes de uma lavanderia industrial de jeans. **OLAM-Ciência & Tecnologia**, 2009.

RIBEIRO, C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

SANTOS, Cristiane Nunes; DO CARMO, Beatriz Correa. O desafio da sustentabilidade nas lavanderias industriais de Cianorte. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 83771-83785, 2020.

SANTOS, Fernanda Pereira dos. **Indicadores de desenvolvimento sustentável pela caracterização química e tecnológica de corantes, efluentes e lodos provenientes do polo têxtil de Pernambuco**. 2023.

SANTOS, Guilherme de Oliveira Ferreira dos. **Avaliação do tratamento de efluentes do banho de tingimento de indústria têxtil por fungos basidiomicetos em biorreatores**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, Patrícia Nazaré Ferreira dos. **Modelagem da dispersão de odor no ar proveniente de efluente têxtil utilizando o software AERMOD**. 2022.

SATHIYA, Sathiya Prabhakaran; SWAMINATHAN, G. **Thermogravimetric study of textile lime sludge and cement raw meal for co-processing as alternative raw material for cement production using response surface methodology and neural networks**. *Environmental Technology & Innovation*, [s. l.], v. 25, p. 102100, 2022.

SCHERER, Camila. Efeito da substituição parcial do cimento por adições minerais na resistência à corrosão de concretos por ácidos orgânicos. 2023. Dissertação de Mestrado. Brasil.

SIKA. **Sika® Concreto Forte**. 2024. Disponível em: <<https://bra.sika.com/pt/construcao/tecnologia-do-concreto/aditivos-para-concreto-e-argamassa/sika-concreto-forte.html>> Acesso em: 21 abr. 2024.

SILVA FILHO, A. R. A.; DUARTE, A. D.; SINESIO, E. P.; SILVA, G. L. & PESSÔA, S. G. S. (2021). **Classification, characterization and diagnosis of Jeans Processing Laundries in the City of Caruaru-PE, in Agreste Pernambucano**. *Research, Society and Development*, 10 (1), e57810112186.

SILVA, Bruno Lopes; XAVIER, Maria Gilca Pinto. Inovação e tecnologia em lavanderias de jeans do polo têxtil do agreste Pernambucano e a implementação das atividades de reuso de água. **Brazilian Journal of development**, v. 6, n. 6, p. 41458-41476, 2020.

SILVA, Carina Lessa. **Incorporação de lodo têxtil em materiais de construção civil**: uma revisão. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

SIMÃO, Kamila de Oliveira; PEREIRA, Grazielle Gleyde Floriano. **Uso de Paver de concreto para emprego em pavimentação intertravada**: dimensionamento e execução. 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/14653>. Acesso em: 21 jul. 2023.

SMITH, M. R.; Collis, L. (2001). Description and Classification of Aggregates, Chapter 6, p. 145-168; Sampling and Testing, Chapter 7, p. 167-197; Aggregates for Concrete; Chapter 8, p. 199-223; Aggregates in bituminous bound construction material, Chapter 11, p. 255-284. In: Aggregates - Sand, gravel, and crushed rock aggregates for construction purposes, Edited by M. R. Smith and L. Collis, Third Edition, Published by The Geological Society London, 2001.

SOUTO, T. J. (2017). **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do Polo têxtil no Agreste pernambucano**. Universidade Federal de Pernambuco.

SOUZA, Ana Kely Rufino; MORASSUTI, Claudio Yamamoto; DEUS, Warley Batista de. **Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores**. Acta Biomédica Brasiliensia, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 95, 15 dez. 2018. Universidade Iguacu - Campus V. <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.189>.

Taylor, P., and Wang, X., “**Workability and Setting Time for Slipform Paving Concrete Mixtures**,” Concrete International, V. 38, No. 8, Aug. 2016, pp. 41-48.

TEIXEIRA, E. da. C.; BARBOSA, N.P. **Nanoindentação em concretos**: uso da técnica para análise da zona de transição. Revista Semiárido De Visu, v. 11, n. 2, ago. 2023. ISSN 2237-1966.

TEIXEIRA, Lucila Loureiro Ferreira. O impacto das substâncias danosas da química têxtil na sociedade: um estudo de caso. 2015.

TING, Matthew Zhi Yeon; WONG, Kwong Soon; RAHMAN, Muhammad Ekhlalur; JOO, Meheron Selowara. Mechanical and durability performance of marine sand and seawater concrete incorporating silicomanganese slag as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 254. 2020.

- TUON, L. (CNN Brasil). **Setor têxtil tem resultados positivos para contratações e faturamento em 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/setor-textil-tem-resultados-positivos-para-contratacoes-e-faturamento-em-2021/#:~:text=Os%20resultados%20positivos%20da%20ind%C3%BAstria,mil%20pessoas%20empregadas%20no%20segmento..> Acesso em: 14 dez. 2022.
- VALENTE, José Pedro Serra; PADILHA, Pedro Magalhães; SILVA, Assunta Maria Marques. **Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP**. Eclética Química, [S.L.], v. 22, p. 49-66, 1997. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-46701997000100005>.
- VASCONCELOS, G. A. **Secagem de lodo de efluentes da Indústria Têxtil utilizando leito de secagem acoplado a trocador de calor solar**. 2020. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2020.
- VIOTTO, Hugo Gabriel Fernandes et al. **Gestão sustentável do lodo proveniente da lavanderia têxtil**. 2019.
- YULIANA, MARIA; PUTRO, J. N., WIJAYA, C. J., & LUNARDI, V. B. **Environmental impact, health hazards and waste management of medical textile products**. In: Medical Textiles from Natural Resources. Woodhead Publishing, 2022. p. 829-864.
- ZHAO, Chao-yue et al. **Modification of ash fusion behavior of high ash fusion temperature (AFT) coal by textile dyeing sludge addition and its mechanism**. Journal of Fuel Chemistry and Technology, v. 50, n. 6, p. 703-713, 2022.