



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HÉRCULYS GUIMARÃES CARVALHO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM CONCRETO  
PERMEÁVEL COM A COLOCAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ÁGUA**

Recife

2025

HÉRCULYS GUIMARÃES CARVALHO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM CONCRETO  
PERMEÁVEL COM A COLOCAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.

Recife  
2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Carvalho, Hérculys Guimarães.

Avaliação das propriedades mecânicas de um concreto permeável com a colocação de lodo de estação de tratamento de água / Hérculys Guimarães Carvalho. - Recife, 2025.

96f.: il; fig., tab.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Antônio Acácio de Melo Neto.

Inclui referências.

1. Concreto permeável; 2. Cinzas de lodo de tratamento de água; 3. Sustentabilidade. I. Melo Neto, Antônio Acácio de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

HÉRCULYS GUIMARÃES CARVALHO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM CONCRETO  
PERMEÁVEL COM A COLOCAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 27/02/2025

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto – UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda (Examinador Externo)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiro a Deus, por todas as oportunidades concedidas nesta existência.

Aos meus pais, Hibrailton Carvalho e Maria da Guia, por todo incentivo e apoio desde que nasci. Ao meu irmão, Pedro Guimarães, pelo apoio, compreensão e parceria na vivência do dia a dia.

Ao professor Antônio Acácio, pela dedicação ao seu trabalho, pelo apoio de sempre, boa vontade e preocupação para com todos os seus orientandos.

Agradeço aos meus amigos Igor e Marcos, companheiros de mestrado, pela parceria nas tarefas do cotidiano e a convivência diária.

Aos meus amigos César, Pedro, Heleno, João Veras e Rogério pela convivência e parceria em Recife-PE.

Aos meus colegas do LabTag e da UFPE, Nathália, Camilla, Sofia, Paulo Neto, Alisson, Tacila, Victor, Priscila, Danilo e Silvano, pelo convívio e experiências compartilhadas.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco - FACEPE, pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa e pela bolsa concedida.

Agradeço aos demais colegas de outros laboratórios da UFPE que contribuíram de alguma forma com esta pesquisa.

À COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento, pela boa disposição em ceder o lodo de tratamento de água, objeto de estudo dessa pesquisa, e, por meio de alguns servidores da companhia, explicar todo o processo de tratamento de água da barragem de Pirapama.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que estiveram presentes na minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O aumento das superfícies impermeáveis nas cidades compromete a infiltração da água no solo, agravando problemas como inundações e ilhas de calor. Além disso, o descarte inadequado do lodo de estação de tratamento de água representa um desafio ambiental significativo, devido ao seu alto volume e potencial poluente. Neste contexto, este estudo investiga a viabilidade da produção de concretos permeáveis com substituição parcial do cimento Portland pelo lodo de estação de tratamento de água, visando reduzir impactos ambientais e melhorar a gestão hídrica urbana. O objetivo do trabalho inclui a análise de teores ideais de substituição, a adaptação de um método de avaliação da permeabilidade, assim como, para o adensamento do concreto permeável e a verificação do desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável. A pesquisa foi conduzida de forma experimental, com ensaios laboratoriais para a caracterização do lodo e a avaliação das propriedades mecânicas e de permeabilidade de concretos permeáveis. Foram realizados testes de resistência à compressão, permeabilidade, absorção, índice de vazios e massa específica para análise de desempenho dos corpos de prova. Os resultados indicaram que a adição de 10% de lodo in natura proporcionou maior resistência mecânica em comparação ao concreto de referência. Já a substituição de 5% de lodos calcinados proporcionou um aumento de resistência à medida que aumenta a temperatura de calcinação. A permeabilidade cresceu à medida que se aumentou a porcentagem de substituição para amostras com lodo calcinado. Para aplicações estruturais, a adição de 5% de lodo calcinado à 700°C ou 800°C mostrou-se a mais eficiente, pois resultou em concretos com elevada resistência à compressão. Já para aplicações drenantes ou de infiltração de água, os concretos com 15% de lodo calcinado a 700°C e 800°C são mais indicados, pois atendem ao critério mínimo de permeabilidade exigido pela norma brasileira de pavimentos permeáveis, apesar da menor resistência mecânica. Concluiu-se que a substituição parcial do cimento pelo lodo de estação de tratamento de água é tecnicamente viável, sempre observando o equilíbrio entre resistência e permeabilidade a partir das aplicações de interesse.

Palavras-chave: Concreto permeável; cinzas de lodo de tratamento de água; sustentabilidade.

## ABSTRACT

The increase in impermeable surfaces in cities compromises water infiltration into the soil, worsening problems such as floods and heat islands. Furthermore, the improper disposal of water treatment plant sludge represents a significant environmental challenge due to its high volume and polluting potential. In this context, this study investigates the feasibility of producing permeable concrete with the partial replacement of Portland cement by water treatment plant sludge, aiming to reduce environmental impacts and improve urban water management. The objective of this work includes the analysis of ideal replacement percentages, the adaptation of a permeability evaluation method, as well as for the compaction of permeable concrete and the verification of the mechanical and hydraulic performance of permeable concrete. The research was conducted experimentally, with laboratory tests for the characterization of the sludge and the evaluation of the mechanical and permeability properties of permeable concrete. Compression resistance, permeability, absorption, void index, and specific mass tests were carried out for performance analysis of the test specimens. The results indicated that the addition of 10% of in natura sludge provided higher mechanical resistance compared to the reference concrete. On the other hand, the replacement of 5% of calcined sludge resulted in an increase in resistance as the calcination temperature increased. Permeability increased as the replacement percentage was increased for samples with calcined sludge. For structural applications, the addition of 5% of calcined sludge at 700°C or 800°C proved to be the most efficient, as it resulted in concrete with high compressive strength. For drainage or water infiltration applications, concretes with 15% of calcined sludge at 700°C and 800°C are more suitable, as they meet the minimum permeability criterion required by the Brazilian standard for permeable pavements, despite the lower mechanical resistance. It was concluded that the partial replacement of cement by water treatment plant sludge is technically viable, always observing the balance between resistance and permeability based on the intended applications.

Keywords: Pervious concrete; water treatment sludge ash; sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Tipos diferentes de poros.....	28
Figura 2 -	Teste de infiltração normatizado pela ASTM-C1701/2017.....	29
Figura 3 -	Teste de permeabilidade em concreto permeável pelo método de carga variável.....	30
Figura 4 -	Aparelho de teste de carga constante e variável.....	31
Figura 5 -	Esquema do programa experimental.....	38
Figura 6 -	Vista aérea da ETA Pirapama.....	40
Figura 7 -	Coleta e armazenamento do LETA: 1) Exposição ao ar livre, em lonas, para retirada do excesso de umidade; 2) Lodo após secagem em estufa; 3) Armazenamento em bombonas.....	41
Figura 8 -	Aparência das amostras: LETA, CLETA600, CLETA700 e CLETA800.....	42
Figura 9 -	Distribuição granulométrica do agregado graúdo (ABNT NBR NM 248:2003) .....	43
Figura 10 -	Permeabilímetro de Blaine.....	46
Figura 11 -	Metalização das amostras de lodo analisadas pelo MEV.....	48
Figura 12 -	Equipamento utilizado para os ensaios de MEV-EDS.....	49
Figura 13 -	Moldagem de um concreto permeável: 1) Exposição do brilho metálico presente na mistura; 2) Teste da bola no concreto permeável.....	51
Figura 14 -	Execução de adensamento no concreto.....	53
Figura 15 -	Sistema de medição de permeabilidade para concreto.....	54
Figura 16 -	Valores de massa específica do LETA <i>in natura</i> e das cinzas.....	58
Figura 17 -	(a) Imagem da amostra de LETA <i>in natura</i> obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.....	60
Figura 18 -	(a) Imagem da amostra de CLETA600 obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.....	62
Figura 19 -	(a) Imagem da amostra de CLETA700 obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.....	63

Figura 20 - (a) Imagem da amostra de CLETA800 obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.....	64
Figura 21 - Difractogramas das amostras de lodo <i>in natura</i> e calcinadas à 600°C, 700°C e 800°C.....	67
Figura 22 - Resistência à compressão aos 28 dias.....	70
Figura 23 - Permeabilidade à queda constante.....	70
Figura 24 - Permeabilidade à queda variável.....	71
Figura 25 - A relação entre resistência à compressão e permeabilidade.....	72
Figura 26 - Matriz de correlações de Pearson para as propriedades físicas do concreto permeável.....	74
Figura 27 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com inserção de lodo.....	78
Figura 28 - Permeabilidade à queda constante dos concretos com inserção de lodo.....	80
Figura 29 - Permeabilidade à queda variável dos concretos com inserção de lodo.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Parâmetros do concreto permeável estudados por diferentes autores.....	27
Tabela 2 -	Caracterização química do cimento CP V-ARI MAX obtida por FRX.....	39
Tabela 3 -	Características físicas e mecânicas do CP V ARI-MAX.....	40
Tabela 4 -	Caracterização física do agregado graúdo.....	42
Tabela 5 -	Área de superfície específica das amostras estudadas.....	59
Tabela 6 -	Composição química semiquantitativa em óxidos e perda ao fogo para o LETA <i>in natura</i> e para as cinzas de lodo.....	66
Tabela 7 -	Valores de algumas propriedades mecânicas de concretos adensados em 3, 5, 7 e 10 golpes (ABNT NBR 9778:2009) .....	68
Tabela 8 -	Valores de absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos com lodo <i>in natura</i> e calcinados (ABNT NBR 9778:2009).....	75
Tabela 9	Valores de permeabilidade à queda constante e à queda variável convertidos para mm/h.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
a/c	Relação água/cimento
CP V ARI-MAX	Cimento Portland de alta resistência inicial
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto
LETA	Lodo de estação de tratamento de água
CLETA600	Cinza de lodo de estação de tratamento de água calcinado a 600°C
CLETA700	Cinza de lodo de estação de tratamento de água calcinado a 700°C
CLETA800	Cinza de lodo de estação de tratamento de água calcinado a 800°C
DRX	Difração de raios-X
FRX	Fluorescência de raios-X
IN NAT-5	Corpo de prova de concreto com 5% de substituição de cimento Portland por lodo <i>in natura</i>
IN NAT-10	Corpo de prova de concreto com 10% de substituição de cimento Portland por lodo <i>in natura</i>
IN NAT-15	Corpo de prova de concreto com 15% de substituição de cimento Portland por lodo <i>in natura</i>
CLETA600-5	Corpo de prova de concreto com 5% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 600°C
CLETA600-10	Corpo de prova de concreto com 10% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 600°C
CLETA600-15	Corpo de prova de concreto com 15% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 600°C
CLETA700-5	Corpo de prova de concreto com 5% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 700°C
CLETA700-10	Corpo de prova de concreto com 10% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 700°C

CLETA700-15	Corpo de prova de concreto com 15% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 700°C
CLETA800-5	Corpo de prova de concreto com 5% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 800°C
CLETA800-10	Corpo de prova de concreto com 10% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 800°C
CLETA800-15	Corpo de prova de concreto com 15% de substituição de cimento Portland por lodo calcinado a 800°C
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
LABTAG	Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes
NBR	Norma brasileira
NM	Norma Mercosul
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute
PF	Perda ao fogo
POC	Porous concrete
PCP	Pervious concrete pavement
SRI	Solar Reflectance Index
LEED	Leadership energy and enviromental design
CCR	Concreto compactado a rolo
PVC	Policloreto de vinila
DECIV/UFPE	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia de dispersão de energia
NEG-Labise	Laboratório de Isótopos estáveis do Núcleo de estudos geoquímicos
ICDD	International Center for Diffraction Data
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	CONCRETO PERMEÁVEL.....	19
<b>2.1.1</b>	<b>Desenvolvimento histórico.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Concreto permeável e Meio Ambiente.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Propriedades.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Dosagem de concreto permeável.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Permeabilidade do concreto.....</b>	<b>27</b>
2.1.5.1	Determinação do coeficiente de permeabilidade.....	29
<b>2.1.6</b>	<b>Concreto seco.....</b>	<b>31</b>
2.2	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	32
<b>2.2.1</b>	<b>Propriedades do material.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Uso do lodo em materiais de construção.....</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	37
3.2	MATERIAIS.....	39
<b>3.2.1</b>	<b>Cimento Portland.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Lodo de estação de tratamento de água.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Agregado graúdo.....</b>	<b>42</b>
3.3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	43
<b>3.3.1</b>	<b>Caracterização física dos materiais anidros.....</b>	<b>43</b>
3.3.1.1	Massa específica real por meio do frasco de Le Chatelier.....	44
3.3.1.2	Massa específica e absorção de água do agregado graúdo.....	44
3.3.1.3	Granulometria e módulo de finura do agregado graúdo.....	45
3.3.1.4	Superfície específica pelo método de Blaine.....	46
<b>3.3.2</b>	<b>Caracterização química e mineralógica do LETA.....</b>	<b>47</b>
3.3.2.1	Microscopia eletrônica de varredura associada a Espectroscopia de dispersão de energia (MEV-EDS).....	47

3.3.2.2	Fluorescência de raios-X (FRX).....	49
3.3.2.3	Difração de raios-X (DRX) .....	49
<b>3.3.3</b>	<b>Processo de produção do concreto permeável.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Processo de produção do sistema de medição de permeabilidade do concreto.....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Procedimentos dos ensaios de avaliação das propriedades mecânicas do concreto permeável.....</b>	<b>56</b>
3.3.5.1	Resistência à compressão.....	57
3.3.5.2	Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos no seu estado endurecido.....	57
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	58
4.1.1	Análises físicas.....	58
4.1.2	Análises químicas.....	60
4.1.3	Análise mineralógica.....	66
4.2	DETERMINAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL DE REFERÊNCIA..	68
4.3	ANÁLISE MECÂNICA DO CONCRETO PERMEÁVEL COM A COLOCAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	75
4.3.1	Absorção, índice de vazios e massa específica.....	75
4.3.2	Resistência à compressão, permeabilidade à queda constante e à queda variável.....	77
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>85</b>
5.1.1	Conclusões.....	85
5.1.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	87
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>88</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Esta seção contextualiza o tema abordado, justifica a realização deste estudo, apresenta seus objetivos e descreve a organização do documento.

## 1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS

O agravamento das condições socioambientais no planeta, como as mudanças climáticas e o aquecimento global, tem causado inúmeros problemas em diversas áreas. Esses problemas incluem secas prolongadas, esgotamento de recursos hídricos subterrâneos, desertificação, degradação de solos agrícolas, assoreamento de rios, subsidência do solo, intensificação do efeito de ilha de calor urbana e inundações repentinas (HE ET AL, 2022).

Com o crescimento acelerado das cidades e o aumento da população, é essencial adotar práticas de construção mais sustentáveis. Um dos desafios mais urgentes da urbanização é reduzir os impactos gerados pelo aumento de superfícies impermeáveis, como calçadas, áreas construídas e redes de estradas, que impactam diretamente o meio ambiente. Essas superfícies dificultam a infiltração da água no solo, gerando escoamento excessivo de águas pluviais, o que, se bem manejado, pode se transformar em uma solução eficaz para a gestão da água. Além disso, superfícies impermeáveis reduzem a troca entre o solo e a atmosfera, aumentam a absorção e a emissão de calor, afetando o equilíbrio de temperatura e umidade na superfície da Terra, e contribuem significativamente para a redução dos lençóis freáticos (RAMKRISHNAN ET AL, 2018).

No contexto da gestão dos recursos hídricos, o uso de pavimentos permeáveis tem sido amplamente estudado como uma solução viável para minimizar os impactos negativos da urbanização. Esses pavimentos permitem a infiltração eficiente da água pluvial, direcionando-a para camadas subjacentes ou reservatórios destinados ao armazenamento, tratamento e reuso (ADRESI ET AL, 2022).

O concreto permeável é um material caracterizado por uma estrutura porosa obtida pela compactação de agregados graúdos recobertos por uma fina camada de pasta cimentícia (WANG ET AL, 2020). Considerando que a produção de cimento é responsável por cerca de 8% das emissões globais de gases poluentes, busca-se desenvolver materiais alternativos e mais sustentáveis que possam reduzir esse impacto ambiental.

Neste contexto, a pesquisa se embasa no uso de um resíduo, chamado de lodo, gerado pelas operações das estações de tratamento de água (ETA's). No processo de tratamento, a água é submetida à processos físico-químicos na qual o lodo é produzido devido a separação dos componentes existentes na água bruta somados aos produtos químicos utilizados. O lodo de ETA (LETA) é gerado inevitavelmente durante o tratamento do corpo hídrico, o qual é frequentemente descartado em aterros sanitários, agravando a problemática da destinação de resíduos urbanos e contrariando os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Estudos científicos demonstram que o lodo de ETA apresenta compostos que também fazem parte do cimento Portland e outros materiais cimentícios suplementares, como o metacaulim produzido no Brasil e outras pozolanas artificiais e naturais adicionadas ao cimento na produção nacional (MARTINS, 2020).

Este estudo se insere também no escopo da Economia Circular, modelo que propõe a reconfiguração dos sistemas produtivos e de consumo por meio da redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia (GEISSDOERFER ET AL, 2017). A destinação inadequada do lodo proveniente de estações de tratamento de água representa um desafio crescente no contexto urbano, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Ao propor o reaproveitamento desse resíduo como material de substituição parcial ao cimento Portland, um dos insumos mais impactantes da construção civil em termos de emissão de CO<sub>2</sub>, esta pesquisa contribui para a possibilidade de utilização de um subproduto que, geralmente, é descartado em aterros, contrariando os princípios da sustentabilidade e da gestão integrada de resíduos sólidos.

Nesse sentido, o presente trabalho também dialoga com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), com destaque para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao incentivar o uso de tecnologias mais limpas na construção civil; o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao propor soluções para a melhoria da drenagem urbana e da gestão de águas pluviais; o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao fomentar o reaproveitamento de resíduos; e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao mitigar as emissões de gases de efeito estufa associadas à produção convencional de cimento. Assim, o trabalho reforça o papel da engenharia civil no desenvolvimento de soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis para os desafios das cidades contemporâneas Unidas (UNITED NATIONS, 2015).

Dado o exposto, a utilização de materiais suplementares ao cimento tem como objetivo um novo destino de utilização do resíduo, assim como, obter resultados satisfatórios para aquilo que se almeja conseguir em termos de propriedades do material. A introdução deste resíduo em diversos materiais da construção civil, como materiais cerâmicos, argamassas, geopolímeros, dentre outros, vem sendo realizada ao longo dos últimos anos, e para este estudo, o foco principal é a utilização do lodo em um concreto permeável, analisando a melhora ou não, das suas propriedades mecânicas e permeáveis.

## 1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia para a dosagem de concretos permeáveis destinados a pavimentos drenantes, avaliando o potencial do lodo de ETA como material de substituição parcial do cimento Portland.

Como objetivos específicos, podem ser listados:

- Caracterizar o LETA *in natura* e as cinzas de lodo após o tratamento, em relação às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas;
- Analisar eventuais teores ótimos de substituição de cimento Portland por lodo de ETA;

- Adaptar um método de análise de performance da permeabilidade para concretos permeáveis;
- Avaliar o desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável, bem como a viabilidade da construção de um protótipo de pavimento drenante.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 5 capítulos, além das referências bibliográficas. A primeira delas aborda uma introdução ao assunto, contextualizando a problemática da urbanização que traz consigo o aumento de pavimentos impermeáveis e suas consequências negativas para o ambiente, assim como trata sobre o lodo de ETA apresentando, resumidamente, a forma de produção, seu impacto no meio ambiente e o respectivo potencial para aplicação em materiais da construção civil, sempre visando a sustentabilidade. Por fim, são elencados os objetivos gerais e específicos a serem alcançados no trabalho, e a estrutura na qual está organizada esta dissertação.

A seção 2 está dividida em 2 partes e apresenta uma revisão da literatura. A primeira aborda os estudos acerca do concreto permeável, apresentando desde a sua aplicação ao longo do tempo até as particularidades condizentes as suas propriedades. Na sequência, a segunda parte trata sobre o lodo de ETA apresentando os processos de formação deste material, suas propriedades *in natura* e das cinzas, além de trazer algumas aplicações em concretos.

A seção 3, contempla o programa experimental desenvolvido na pesquisa, na qual são descritas suas variáveis e etapas investigadas, apresenta os materiais utilizados no estudo e a metodologia adotada nos ensaios de desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável.

A seção 4 expõe os resultados experimentais obtidos ao longo do estudo e apresenta as respectivas discussões sobre cada um deles, levando em consideração o comportamento do resíduo que substitui parcialmente o cimento Portland em algumas porcentagens.

Por fim, a seção 5 contempla as considerações finais do trabalho decorrentes dos resultados obtidos, além de trazer sugestões futuras para novas pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa, abordando os conceitos e estudos relacionados ao concreto permeável e ao lodo de estação de tratamento de água (ETA).

### 2.1 CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é um tipo de concreto poroso e leve composto por agregados, cimento hidráulico e água, contendo uma elevada quantidade de poros interconectados. No concreto permeável, é feita uma dosagem controlada de água e material cimentício para formar uma pasta que reveste os agregados, criando um sistema de vazios altamente permeável e interconectado que permite um rápido escoamento da água. (ZHONG; WILLE, 2015). A camada superior dos pavimentos porosos é construída de maneira semelhante aos pavimentos convencionais, com a diferença de que a fração fina da areia é removida na mistura dos agregados do pavimento (ARAUJO ET AL, 2000).

O concreto poroso, também chamado de concreto permeável ou porous concrete (POC), é uma variedade especial de concreto amplamente empregada nos Estados Unidos e na Europa, principalmente para fins de pavimentação. Sua composição inclui cimento Portland, materiais de graduação aberta com poucos ou nenhum material fino, agregados graúdos, aditivos e água (FERGUSON, 2005).

Os pavimentos permeáveis possuem estruturas de superfície projetadas para permitir a drenagem eficiente, facilitando a infiltração, armazenamento e percolação da água proveniente do escoamento superficial. Essa água é redirecionada para uma camada de armazenamento temporário no solo, onde é absorvida gradualmente (ALVES; COSTA, 2007). Nesse contexto, as técnicas compensatórias de drenagem urbana, como os pavimentos permeáveis, encontram aplicação principalmente em estacionamentos e ruas com tráfego leve. Além disso, também podem ser utilizados em armazéns e arenas esportivas, entre outros exemplos (ACIOLI, 2005).

O concreto permeável é um material que contribui para a preservação do meio ambiente, permitindo a recarga do lençol freático e a redução do escoamento

de águas pluviais (HO ET AL, 2018). Ele é amplamente empregado em todo o mundo na pavimentação de estradas, calçadas e caminhos devido à sua alta capacidade de permeabilidade e boas propriedades térmicas. No entanto, para alcançar uma alta porosidade e vazios interconectados, o concreto permeável geralmente contém uma quantidade reduzida, ou até mesmo nula, de agregados finos, resultando em uma significativa redução de sua resistência e durabilidade (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016).

### **2.1.1 Desenvolvimento histórico**

Apesar de não ser um material amplamente utilizado no Brasil, este tipo de concreto não é uma tecnologia recente. Durante a Segunda Guerra Mundial, ocorrida entre 1939 e 1945, houve uma crescente demanda por moradias na Europa devido à devastação causada pelo conflito. Essa necessidade urgente incentivou a adoção de métodos de construção simples e de baixo custo, que nunca haviam sido utilizados antes. Nesse contexto, o destaque foi dado ao uso do concreto permeável (HOLTZ, 2011).

Mesmo após a Segunda Guerra Mundial, houve um aumento significativo na adoção do concreto permeável como material de construção. Isso se deu principalmente devido à disponibilidade abundante de agregados graúdos e à urgente necessidade de habitações. Ao longo dos anos, o concreto permeável desempenhou um papel crucial na construção de casas em diversos países, como Reino Unido, Holanda, França, Alemanha, Rússia, Bélgica, Espanha, Hungria, Escócia, Venezuela, regiões da África, Oriente Médio e Austrália (ACI, 2010).

No início, este material era empregado principalmente na fabricação de tubos drenantes, mas com o tempo foi amplamente adotado como concreto de asfalto poroso em diversos países da Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Essa utilização tem como objetivo melhorar a condução dos usuários e garantir uma circulação mais segura do tráfego, frente a algumas condições climáticas (OSPINA e ERAZO, 2007). O uso desse material tem experimentado um crescimento significativo devido aos benefícios ambientais que oferece, tais como a gestão eficiente do escoamento de águas pluviais, a recarga do lençol freático e a redução da poluição da água e do solo. Além disso, ele demonstra um grande potencial para combater as ilhas de calor urbanas e minimizar a poluição sonora nas estradas.

Nas Américas, o emprego do concreto permeável foi impulsionado como uma medida para mitigar as consequências das inundações frequentes em áreas urbanas recentemente desenvolvidas, visando aumentar a permeabilidade dessas regiões em alguns estados americanos. Com resultados promissores, seu uso começou a se expandir para outros estados do país, a partir do aumento da comercialização do concreto através de pequenos fornecedores desse material (MULLIGAN, 2005). No cenário nacional, a utilização do concreto permeável no Brasil é pouco difundida. A aplicação desse tipo de material ainda apresenta resistência, com iniciativas isoladas em estacionamentos de shoppings e condomínios (MAZZONETTO, 2012).

### **2.1.2 Concreto permeável e Meio Ambiente**

Xie et al. (2018) estudaram os diversos benefícios ambientais oferecidos pelos pavimentos permeáveis de concreto (PCP's) e evidenciaram pontos como a ajuda no aperfeiçoamento dos sistemas de escoamento e infiltração das águas das chuvas, melhora na qualidade da água subterrânea e a minimização de problemas como a hidroplanagem, o efeito de ilha de calor e o ruído causado pelo tráfego. Esses benefícios tornam as comunidades e os sistemas de transporte locais mais sustentáveis, seguros e resilientes. Em diversos países, as agências governamentais têm incentivado o uso de estratégias de infraestrutura verde como uma solução eficaz para atender às regulamentações e demandas relacionadas à gestão da água. Os PCP's têm sido monitorados em diferentes locais para analisar seu impacto na quantidade de escoamento de água. Kumar (2016) observou que, apesar de uma redução significativa nas taxas de infiltração após dois anos, devido ao entupimento dos poros, as taxas de infiltração in situ dos PCP's em um estacionamento de Illinois-EUA continuaram sendo "de quatro a cinco vezes superiores à intensidade média das tempestades na região" (Crookes et al., 2017).

Além de contribuir para a redução da quantidade de escoamento superficial de águas pluviais, o uso de PCP's também tem sido amplamente estudado no que diz respeito à melhoria da qualidade da água da chuva. A remoção de contaminantes ocorre através de processos mecânicos e biológicos. Diversos estudos laboratoriais confirmaram os benefícios dos PCP's na purificação da água das chuvas. Por exemplo, Haselbach (2014) observou que concentrações típicas de cobre (Cu) e zinco (Zn) dissolvidos podem ser significativamente removidas do

efluente que passa por uma camada de concreto permeável. Holmes et al. (2017) destacaram que a remoção de metais pesados a longo prazo em PCP's é principalmente atribuída ao aglomerante cimentício presente no pavimento.

Os pavimentos permeáveis de concreto têm ganhado destaque como uma possível solução para o problema das ilhas de calor urbanas, um desafio ambiental diretamente ligado ao crescimento das cidades em todo o mundo (Liu, 2018). Em um estudo realizado por Li et al. (2013), foi feita uma comparação entre as temperaturas de superfície de pavimentos permeáveis e de pavimentos de concreto impermeável, sob as mesmas condições. Os resultados mostraram que, após serem irrigados, os pavimentos permeáveis apresentaram temperaturas de superfície significativamente mais baixas em relação aos pavimentos impermeáveis.

Haselbach (2011) analisou dados de temperatura coletados em uma cidade local e estudou como o calor é armazenado sob diferentes condições climáticas. Segundo o autor, o pavimento permeável de concreto possui um índice de refletância solar (SRI) de 14, enquanto o pavimento de concreto tradicional apresenta um SRI de 37. O programa Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) considera que uma superfície pode ser classificada como "superfície fria" se o SRI for igual ou inferior a 29. Consoante a isso, Zhang (2015) relatou que a radiação refletida por um pavimento permeável diminui de forma linear à medida que sua porosidade aumenta, o que também influencia no desempenho térmico desse material.

Herb (2008) propôs um modelo simples para prever como ocorre a transferência de calor em superfícies de pavimentos impermeáveis e permeáveis, considerando tanto períodos secos quanto úmidos. Em complementação, Qin e Hiller (2016), por meio de ensaios de campo, observaram que a irrigação do pavimento permeável de concreto (PCP) ajuda a manter sua temperatura reduzida por um período de 12 a 24 horas durante os dias quentes de verão. No entanto, sem essa umidificação, o PCP não pode ser efetivamente classificado como um pavimento frio.

O pavimento permeável de concreto tem se destacado também pela sua capacidade de reduzir o ruído gerado pelo tráfego de veículos (Berengier, 1997). Em medições realizadas nos anos de 2009 e 2010, os níveis de ruído em pavimentos de concreto tradicional variaram entre 100 e 110 decibéis ajustados (dBA), enquanto os pavimentos de concreto permeável apresentaram níveis mais baixos, entre 96 e 98

dBA. Além disso, um estudo de laboratório conduzido por Chu et al. (2017) revelou que o concreto permeável possui uma capacidade de absorção sonora superior à do asfalto poroso. Já no início dos anos 2000, pesquisadores da Universidade de Purdue avançaram no desenvolvimento de materiais de pavimentação permeáveis que se destacam por serem mais silenciosos e duráveis (Neithalath, 2006).

A capacidade de absorção sonora do pavimento de concreto permeável é influenciada por diversos fatores, como as características geométricas da superfície e outros parâmetros internos, como a espessura da camada porosa, o tamanho dos agregados, a quantidade de vazios de ar (ou porosidade), a resistência ao fluxo de ar por unidade de comprimento e a tortuosidade dos poros (Arenas, 2010).

### **2.1.3 Propriedades**

De modo geral, a composição do concreto permeável inclui 270-415 kg/m<sup>3</sup> de consumo de cimento, 1190-1480 kg/m<sup>3</sup> de agregado graúdo e uma relação água-cimento que varia de 0,27 a 0,40. A resistência média à compressão após 28 dias varia de 3,5 a 28,0 MPa, e o coeficiente de permeabilidade apresenta variação entre 0,2 e 5,4 mm/s (ACI, 2010). O concreto poroso geralmente possui uma porosidade de 10 a 35%, onde os vazios podem ser interconectados ou não. Os vazios interconectados estão diretamente associados ao coeficiente de permeabilidade do concreto (TENNIS et al., 2004; NEPTUNE & PUTMAN, 2010; BHUTTA et al., 2013). A interconexão entre os vazios no concreto é o que permite a permeabilidade à água, uma propriedade fundamental quando se considera o concreto exposto ao ar, à ação de águas agressivas ou aos agentes atmosféricos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A quantidade de vazios presente no concreto depende da composição granulométrica, da dosagem e do método de compactação empregados, o que resultará em uma disposição específica dos agregados na mistura. Nesse contexto, propriedades como a massa específica e o índice de vazios variam conforme a definição destes parâmetros. A massa específica do concreto permeável em seu estado fresco varia de 1300 a 2100 kg/m<sup>3</sup>. (TENNIS et al., 2004).

Analisando as propriedades mecânicas do concreto e a intenção de produzir este material a partir dos componentes disponíveis e de interesse no estudo, a quantidade de agregados, aglomerante e água varia de acordo com o nível de

resistência desejado para o concreto. Quanto maior a resistência almejada, menor será sua permeabilidade. Para ascender a permeabilidade, é necessário ter um volume maior de vazios, resultando em menor resistência. De acordo com a ACI (2006), a relação cimento/agregado e a maneira empregada para adensar o material utilizadas na produção do concreto permeável são as definições mais importantes da mistura, pois impactam diretamente as propriedades mecânicas do concreto.

Sendo assim, há um grande interesse em investigar o tipo e tamanho dos agregados, a relação água/cimento, a porosidade e o uso de materiais cimentícios suplementares para aprimorar as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto permeável. Entre esses agregados, encontram-se o dolerito, granito, calcário, quartzito, cascalho de rio, areia e escória de aço (REDDY; RAMAKRISHNA, 2017). Nos últimos anos, pesquisas têm explorado como o tamanho dos agregados afeta a resistência à compressão e a permeabilidade do concreto permeável. Em geral, o concreto permeável costuma empregar agregados de tamanho uniforme para formar sua estrutura (ZHONG ET AL, 2018). O tamanho dos agregados tem um impacto significativo nas características dos poros e na espessura da pasta de cimento, que por sua vez, influenciam na resistência à compressão e permeabilidade do concreto permeável. (TORRES ET AL, 2015).

De acordo com Yu et al, existe um tamanho de agregado ótimo para o concreto permeável quando se utiliza diferentes materiais ligantes. Por exemplo, o tamanho do agregado de 9,5 mm foi considerado o ideal para o concreto permeável com cimento Portland comum, enquanto o tamanho de 10 mm foi identificado como o mais adequado para o concreto permeável com outros aglomerantes, como as cinzas volantes, cal e gesso.

Analisando outros parâmetros, segundo Neamitha e Supraja (2017) existe uma relação água/cimento ideal para o concreto permeável com um tamanho específico de agregado, para alcançar a resistência à compressão pretendida. A superfície dos agregados não pode ser completamente revestida quando a mistura está muito seca, devido a uma baixa relação água/cimento, ou quando há insuficiência de pasta de cimento devido a uma relação água/cimento elevada. Além disso, a permeabilidade aumenta em caso de mistura seca devido à alta porosidade, enquanto diminui com o aumento dessa relação água/cimento, uma vez que a pasta preenche os poros.

A proporção de água/cimento (a/c) deve ser mantida entre 0,27 e 0,30, podendo chegar a 0,40. A relação entre rigidez e quantidade de água no concreto permeável não é tão clara quanto em um concreto convencional, devido à presença dos vazios que afetam a resistência geral da estrutura. A quantidade adequada de água é identificada quando a massa adquire um brilho úmido, sem se tornar liquefeita (ACI, 2006).

#### **2.1.4 Dosagem de concreto permeável**

Ibrahim e Razak (2016) realizaram um estudo sobre a adição de resíduos de clínquer de óleo de palma às propriedades do concreto permeável. Nesse estudo, o clínquer de óleo de palma foi utilizado como agregado graúdo na composição do concreto permeável. Os materiais empregados incluíram cimento Portland do Tipo I, agregado graúdo com tamanho de 10 mm e uma relação água/cimento fixa de 0,3. O agregado natural foi substituído por clínquer de óleo de palma em proporções que variaram de 0% a 100%. Os resultados mostraram que, embora a substituição pelo clínquer de óleo de palma reduzisse a resistência do concreto, também aumentava sua porosidade e permeabilidade. A resistência à compressão obtida variou entre 3,43 e 9,52 MPa, sendo que uma substituição total resultou em uma perda de resistência de aproximadamente 65%. No entanto, a substituição de 25% do agregado por clínquer de óleo de palma apresentou o melhor desempenho entre todas as proporções avaliadas, sendo identificada como a mistura ideal para otimizar o desempenho do concreto permeável com clínquer de óleo de palma.

Yeih et al. (2015) investigaram as propriedades de engenharia do concreto permeável utilizando escória de forno elétrico a arco (EAFS), resfriada a ar, como agregado. Os resultados do estudo mostraram que o concreto poroso produzido com agregados de EAFS apresenta desempenho superior em termos de resistência mecânica e permeabilidade à água, quando comparado ao concreto feito com cascalho natural de rio. Além disso, nos testes de durabilidade sonora, o concreto com agregados de EAFS apresentou menor perda de peso em relação ao concreto produzido com cascalho de rio. Foi constatado que o concreto permeável à base de EAFS oferece maior permeabilidade à água e resistência à compressão, com valores superiores a 21 MPa para resistência à compressão e uma taxa de permeabilidade de 0,01 cm/s.

Shah et al. (2014) realizaram um estudo sobre o concreto permeável no seu estado endurecido, abordando aspectos como resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e resistência à flexão. Para avaliar a resistência à compressão, foram confeccionados cubos com dimensões de 150 mm x 150 mm x 150 mm. Já para testar a resistência à flexão, foram utilizadas vigas com dimensões de 500 mm x 100 mm x 100 mm. Os ensaios foram realizados em intervalos regulares de 7, 14 e 28 dias. O concreto foi preparado em diferentes proporções de mistura, sendo elas compostas de 1:6, 1:8 e 1:10, utilizando dois tamanhos distintos de cascalho: 18,75 mm e 9,375 mm, a fim de avaliar o concreto permeável no seu estado endurecido. Os resultados demonstraram que o cascalho de menor tamanho (9,375 mm) apresentou melhor desempenho, alcançando uma resistência à compressão de 12,71 N/mm<sup>2</sup> e uma resistência à flexão de 1,91 N/mm<sup>2</sup>, utilizando uma proporção de mistura de 1:6 e cimento Portland 53 Grau (OPC 53).

Alaica et al. (2010) realizaram um estudo com o objetivo de otimizar a resistência e a permeabilidade do concreto permeável. A pesquisa concentrou-se em avaliar o desempenho de diferentes composições de concreto permeável, buscando uma formulação otimizada que equilibrasse resistência à tração e porosidade. Além disso, o estudo analisou a relação entre permeabilidade e porosidade em várias misturas. Entre as variáveis investigadas estavam a proporção entre agregado e materiais cimentícios (A/C), a gradação dos agregados, a combinação de materiais cimentícios, bem como misturas ternárias que incluíram sílica ativa/escória e metacaulim/escória. Os resultados indicaram que a melhor composição foi obtida com agregados de tamanho entre 10 e 13 mm, proporção de cimento para agregado de 1:4 e uma mistura ternária de cimento contendo sílica ativa e escória.

Lian e Zhuge (2010) investigaram a relação entre a água e o cimento de um concreto permeável, variando entre 0,30 e 0,38, e concluíram que, quando essa relação é superior a 0,34, a resistência à compressão tende a diminuir, enquanto a permeabilidade aumenta. Os melhores resultados foram observados com uma relação de 0,32, e os autores não recomendam utilizar uma relação água/cimento inferior a 0,30. A tabela 1 apresenta parâmetros de misturas permeáveis.

Tabela 1 – Parâmetros do concreto permeável estudados por diferentes autores

Referência	Relação água/cimento	Composição granulométrica (mm)	Porosidade (%)	Coef. de permeabilidade (mm/s)	Resist. à compressão (MPa)
Wang et al. (2006)	0,22 - 0,27	4,8 - 12,5	18,3 - 33,6	2,5 - 14,5	5 - 22,8
Lian & Zhuge (2010)	0,28 - 0,32	4,8 - 9,5	15 - 37	2,5 - 15	11,6 - 19,3
Deo & Neithalath (2010)	0,3	2,4 - 12,5	27 - 36	-	7 - 17
Zaetang et al. (2013)	0,3	4,8 - 12,5	15,5 - 31,8	3,7 - 17,0	2,5 - 20,5
Lim, Tan & Fwa (2013)	-	2,36 - 19	>30	1,4 - 16,8	3 - 13
Megurovast & Narashimhan (2013)	-	-	>20	1,6 - 12,6	3 - 12
Ibrahim et al. (2014)	0,34	4,8 - 19	15 - 30	1,5 - 4,2	2,5 - 12,8
Yahia & Kabagire (2014)	-	4,8 - 19	30 - 35	-	3 - 12
Torres et al. (2015)	0,3	4,8 - 9,5	18 - 33,8	3,8 - 11,9	3,8 - 17,9
Lian, Zhuge & Beecham (2011)	0,3	4,8 - 12,5	30 - 37,6	3,5 - 17,8	4,8 - 12,4
Zhong & Willie (2015)	0,3	4,8 - 12,5	17 - 32	-	7,5 - 6,8
Cosic et al. (2015)	-	4,8 - 12,5	32 - 37	-	-
Zhong & Willie (2016)	-	4,8 - 12,5	17 - 32	-	7,5 - 6,8

Fonte: Carls (2018).

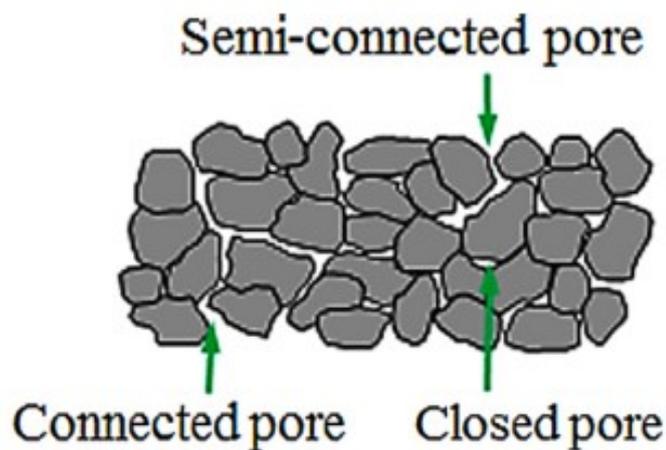
### 2.1.5 Permeabilidade do concreto

O concreto permeável tem como objetivo principal criar uma rede de poros interconectados, permitindo o controle e o gerenciamento do fluxo de água. Esses poros são formados pela conexão dos vazios presentes no concreto, o que facilita a drenagem da água superficial e sua transferência para as camadas inferiores. Dessa forma, a permeabilidade se torna um aspecto essencial no desenvolvimento e na execução de traços de concreto permeável. É importante ressaltar que a porosidade e a permeabilidade estão diretamente relacionadas, mas isso não significa que

misturas com a mesma porosidade apresentem necessariamente os mesmos níveis de permeabilidade (NEITHALATH, 2010).

Segundo Ni et al. (2021), o concreto permeável apresenta três tipos principais de poros: poros abertos ou conectados, poros semiabertos ou semi-conectados e poros fechados. Estudos mostram que a quantidade de poros fechados e semiabertos é significativamente maior do que a de poros conectados. Essa diferença está relacionada a diversos fatores, como o tamanho e o tipo de agregados utilizados, a densidade, a proporção entre cimento e agregado, além da técnica empregada no processo de moldagem. A Figura 1 ilustra essa teoria.

Figura 1 – Tipos diferentes de poros



Fonte: Ni et al. (2021)

Diversos estudos têm relatado intervalos de valores variados para a permeabilidade à água do concreto permeável. Algumas pesquisas apontam que a permeabilidade desse material está na faixa de 1 mm/s a 5 mm/s (GHAFOORI E DUTTA, 1995), enquanto outros estudos sugerem valores mais elevados, entre 20 mm/s e 45 mm/s (MATSUO ET AL, 2005). Em linhas gerais, a permeabilidade do concreto permeável costuma estar no intervalo de 1 mm/s a 20 mm/s. Além disso, essa propriedade também pode ser descrita por meio de parâmetros como coeficiente de permeabilidade, permeabilidade intrínseca ou condutividade hidráulica.

### 2.1.5.1 Determinação do coeficiente de permeabilidade

O método apresentado pela ASTM C1701 é atualmente o principal procedimento padronizado para avaliar a taxa de infiltração do concreto permeável em pavimentos em uso. O ensaio consiste em medir o tempo necessário para que um volume específico de água penetre no pavimento, utilizando um anel fixado à sua superfície. Marcas presentes no anel ajudam a manter um nível uniforme de pressão, representado pela altura da água. Como o teste é realizado em pavimentos já instalados, a taxa de infiltração obtida reflete não apenas a permeabilidade do concreto, mas também a interação com todos os componentes que compõem o sistema de pavimentação (ASTM C1701/2017).

A ABNT NBR 16416/2015 normatiza os requisitos e procedimentos para testes em pavimentos permeáveis de concreto, tal norma segue uma ideia semelhante a norma americana, no que diz respeito a determinação da permeabilidade do pavimento. A Figura 2 apresenta o respectivo teste realizado *in situ*.

Figura 2 – Teste de infiltração normatizado pela ASTM C1701/2017



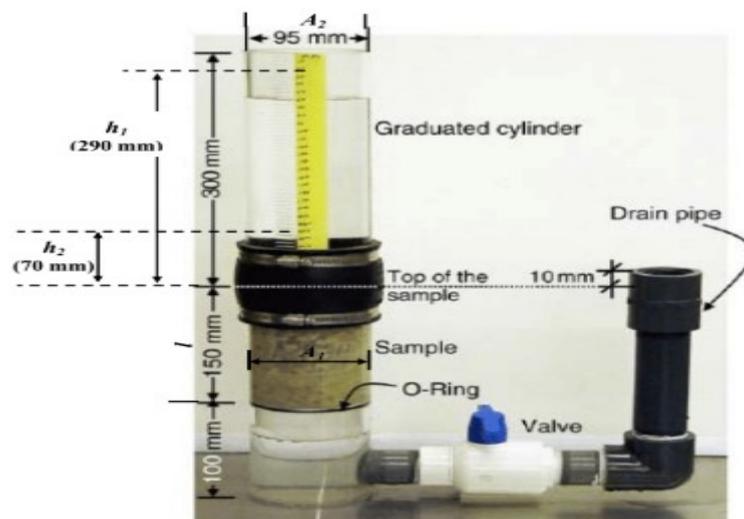
Fonte: Costa et al. (2018)

Existem outras diferentes abordagens para a realização de testes de permeabilidade, sendo os métodos de carga constante e de carga variável os mais amplamente empregados. Embora ambos se fundamentem na Lei de Darcy, eles não seguem um protocolo fixo. Em geral, os pesquisadores ajustam estes métodos para atender às exigências específicas de seus estudos e às limitações dos equipamentos disponíveis em seus laboratórios (ADRESI ET AL, 2023). Menard e Croveti (2006) concluíram em suas pesquisas que o fluxo de água em concretos

permeáveis apresenta características turbulentas, o que torna a aplicação da Lei de Darcy inadequada para calcular a permeabilidade nesse tipo de material. Apesar dessas limitações, os métodos de carga constante e carga variável continuam sendo amplamente utilizados devido à sua simplicidade e baixo custo, fatores que os tornam atrativos para diversos pesquisadores ao redor do mundo.

Sandoval et al. (2017) realizaram um estudo com o objetivo de comparar os métodos laboratoriais utilizados para avaliar a permeabilidade, com foco nos ensaios de carga constante e carga variável, considerando o uso de agregados sustentáveis. Para isso, foram avaliadas as propriedades de porosidade e permeabilidade de quatro tipos de concreto permeável: um produzido com agregado convencional de basalto e outros três utilizando agregados sustentáveis, como escória de alto-forno, resíduos cerâmicos e agregados reciclados de concreto. De acordo com a ACI 522R-06, o método de carga variável proposto por Neithalath et al. é indicado como uma opção para avaliar a permeabilidade à água em concretos permeáveis. A Figura 3 apresenta o esquema deste método.

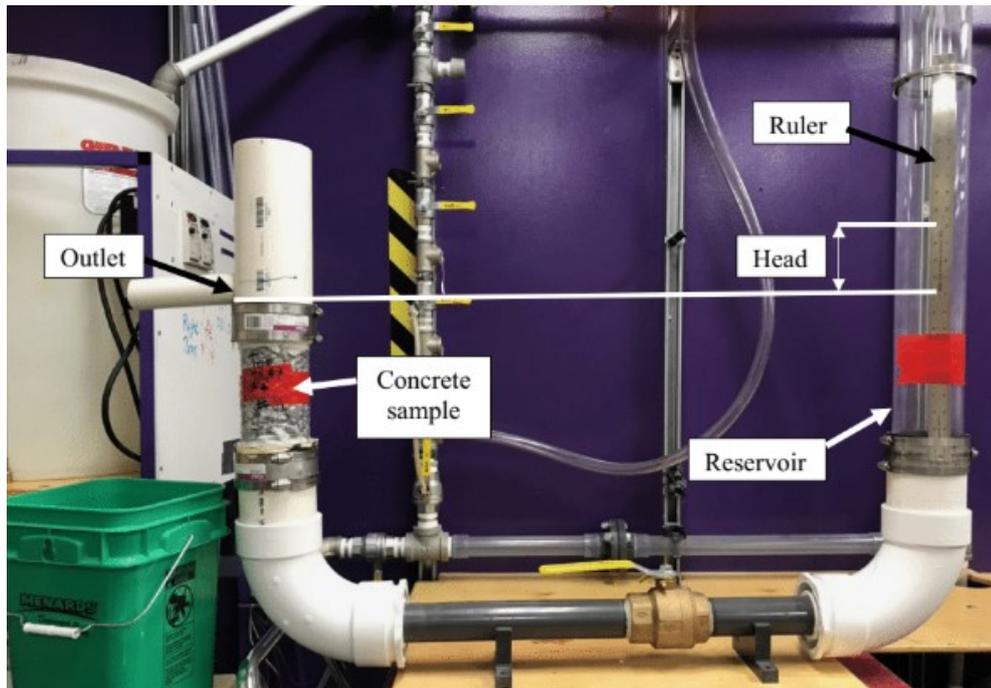
Figura 3 – Teste de permeabilidade em concreto permeável pelo método de carga variável



Fonte: Neithalath et al. (2006)

Lederle et al. (2020) realizaram os ensaios de permeabilidade de carga constante e carga variável utilizando o mesmo aparato experimental. Nesse procedimento, a água é conduzida de um reservatório com diâmetro interno de 102 mm até a amostra de concreto permeável através de um tubo de PVC. A figura 4 ilustra o aparato experimental utilizado pelo autor.

Figura 4 – Aparelho de teste de carga constante e variável



Fonte: Lederle et al. (2020)

O sistema foi projetado para direcionar o fluxo de água no sentido ascendente, ou seja, de baixo para cima na amostra. A pressão motriz é determinada pela diferença de altura entre o nível de água a montante e o ponto de saída da água. Essa configuração permite medir com precisão pequenas variações de pressão. Caso a saída de água fosse posicionada em um nível mais baixo do que o topo da amostra, a altura da pressão motriz poderia ser parcialmente mascarada dentro da amostra ou exigiria ser mantida em níveis excessivamente elevados.

### 2.1.6 Concreto seco

O concreto de baixa trabalhabilidade, também denominado concreto seco, é tipicamente caracterizado por apresentar um abatimento (slump) que varia entre 0 e 25 mm (ACI, 2002). Em 1868, Henry Reed propôs que “o concreto fosse misturado com a menor quantidade possível de água para alcançar os melhores resultados”. A partir dessa ideia, a teoria de utilizar a mínima quantidade de água no concreto foi gradualmente aprimorada. No início do século 20, os concretos misturados a seco, sem a aplicação de uma compactação intensa, resultavam em materiais de qualidade inferior e com baixa resistência. Contudo, com a invenção dos vibradores,

o concreto de baixa trabalhabilidade passou a ser uma alternativa viável para a construção. Desde então, seu campo de aplicação se expandiu para utilizações, como o concreto compactado por rolo (RCC) e o concreto pré-fabricado (SHELESTYNSKY, 1972).

As máquinas utilizadas nestes processos de compactação e fabricação de concreto seco aplicam altos níveis de energia de compactação. Em função disso, a reprodução das condições de dosagem em ambiente laboratorial apresenta dificuldades, uma vez que não há normatização específica nem equipamentos que possibilitem a simulação precisa das forças reais exercidas pelas máquinas em uma escala reduzida (DINIZ ET AL, 2019).

Siqueira et al (2004) realizaram a moldagem de corpos de prova cilíndricos de concreto, com dimensões de 15 x 30 cm, para aplicação em blocos de alvenaria. A amostra foi compactada em três camadas sucessivas, utilizando um cilindro Proctor normal, sendo cada camada submetida a 26 golpes. Frasson Junior (2000), por sua vez, empregou um molde tripartido de 5 x 13 cm para a confecção de blocos de alvenaria e corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm. A moldagem foi realizada em quatro camadas, com compactação conduzida por um soquete.

Trazendo esse contexto do concreto seco para pavimentos permeáveis, é importante destacar que não existe um método racional padronizado para a dosagem de concretos permeáveis, diferentemente dos métodos aplicados aos concretos plásticos convencionais. Além disso, é fundamental reconhecer que princípios consagrados usados na dosagem desses concretos tradicionais, como as Leis de Lyse e Abrams, não se aplicam diretamente aos concretos permeáveis. Isso se deve às particularidades desse material, caracterizado pela ausência de finos e a consistência sempre baixa e/ou seca (BALBO ET AL, 2022).

## 2.2 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Atualmente, diversos estudos estão em curso com o intuito de explorar abordagens adequadas para o beneficiamento do lodo, visando explorar seu potencial de aplicação no campo da Ciência e Tecnologia. Uma das soluções frequentemente propostas em diversos estudos é a utilização do lodo proveniente de estações de tratamento de água em aplicações relacionadas a Engenharia Civil, na qual englobam principalmente o setor de materiais de construção, podendo ser

incorporado em materiais cimentícios como uma alternativa de substituição parcial ao cimento, bem como em materiais cerâmicos como um material substituto parcial da argila. Além disso, outros campos da Engenharia Civil, como pavimentação, geotecnia e recursos hídricos exploram a temática do lodo de estação de tratamento em suas pesquisas.

As Estações de Tratamento de Água (ETA's) constituem instalações essenciais para a purificação de água em grande parte dos centros urbanos ao redor do mundo. O tratamento da água abrange diversas etapas, incluindo peneiramento, coagulação-floculação, sedimentação, filtração granular e desinfecção química (BONTON ET AL., 2012). Durante essas etapas, forma-se um subproduto denominado lodo de tratamento de água (LETA), composto por uma mistura de materiais orgânicos em suspensão provenientes da água bruta e óxidos químicos introduzidos ao longo do processo de tratamento (BABATUNDE E ZHAO, 2007).

Na Austrália, por exemplo, uma estação de tratamento de água do governo local pode gerar até 43.500 toneladas de lodo por ano, e o custo anual associado ao seu descarte em aterros sanitários pode chegar a mais de \$6,2 milhões em dólares australianos. Nos Países Baixos e no Reino Unido, os gastos com o descarte do lodo de ETA foram de até £40 milhões e £5,5 milhões, respectivamente. Portanto, é importante gerenciar este resíduo para economizar milhões por ano (KEELEY ET AL., 2014). Estima-se que uma estação de tratamento de água produza mais de 10.000 toneladas de lodo de tratamento de água diariamente, com uma geração anual superior a 100.000 toneladas (Ahmad et al., 2016).

Nesse contexto, a gestão do lodo gerado nas ETA's (LETA) exige uma análise criteriosa devido ao elevado volume produzido e aos possíveis impactos ambientais adversos associados ao seu descarte. As empresas de saneamento e autoridades locais enfrentam desafios, como a potencial contaminação dos recursos hídricos por diversos poluentes e os elevados custos envolvidos no manejo e na disposição adequada do lodo (BELHAJ ET AL., 2016). O crescente volume diário gerado nesses processos reforça a importância de estratégias eficazes para sua gestão, o que desperta a atenção de todos os envolvidos.

A reutilização de materiais sustentáveis contribui para a mitigação de impactos ambientais, proporcionando simultaneamente redução de custos, aprimoramento das propriedades mecânicas do concreto e incentivo à adoção de práticas construtivas sustentáveis (OYEBISI, 2020).

### 2.2.1 Propriedades do material

O lodo de estação de tratamento de água é composto por uma combinação de substâncias orgânicas e inorgânicas, incluindo partículas de areia e argila, matéria orgânica, resíduos provenientes de efluentes residenciais e industriais liberados nos corpos d'água, além de coagulantes, que são aditivos químicos utilizados para promover a decantação das partículas suspensas. Os coagulantes mais utilizados no processo de tratamento são os sais de alumínio, sais de íons férricos e sais de ferro ferroso (SALES ET AL., 2011).

A incorporação de substâncias químicas durante o processo de tratamento de água pode gerar lodo com elevados teores de ferro ou alumínio. As concentrações desses sais podem alcançar níveis potencialmente tóxicos para organismos aquáticos se não houver tratamento adequado antes do descarte. Além disso, o lodo proveniente das estações de tratamento de água pode conter metais pesados adicionais, oriundos tanto da água bruta quanto de contaminantes introduzidos durante a aplicação de coagulantes. As propriedades do lodo são afetadas pela presença dessas substâncias orgânicas e resíduos químicos, na qual influenciam diretamente seu comportamento e sua aplicação em materiais de construção (SOTERO-SANTOS ET AL., 2007).

Além dos aditivos químicos e metais pesados presentes no lodo *in natura*, suas propriedades cimentícias limitadas, estrutura porosa e a tendência de absorver a água de hidratação do cimento comprometem a formação da microestrutura do cimento Portland (Sales e de Souza, 2009). Por outro lado, alguns componentes do lodo de estação de tratamento, como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , estão presentes também no cimento Portland e em materiais pozolânicos, o que torna o resíduo um material com potencial para ser utilizado como material suplementar para cimento (HAGEMANN ET AL., 2019).

### 2.2.2 Uso do lodo em materiais de construção

Gomes et al. (2017) investigaram a substituição parcial da areia por lodo de estação de tratamento de água (LETA) em sua forma natural e seus efeitos nas propriedades físicas do concreto. Os ensaios demonstraram que a incorporação de LETA úmido resultou em uma diminuição da resistência mecânica e um aumento na

absorção de água, estabelecendo 5% como o limite máximo de substituição viável para aplicações em concretos não estruturais. Além disso, a presença do LETA provocou uma leve modificação na coloração do material, que passou de cinza para tonalidades marrons ou avermelhadas.

O estudo conduzido por Liu et al. (2020) avaliou a incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) em blocos de concreto, utilizando-o como substituto da areia em proporções que variaram de 0% a 30% em massa, com incrementos de 10%. Os resultados obtidos demonstraram que a adição de lodo de ETA comprometeu as propriedades mecânicas das misturas, resultando em reduções significativas nas resistências à compressão e à tração.

Ahmad et al. utilizaram o LETA, como material cimentício suplementar e verificaram um impacto negativo nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos. As características intrínsecas deste resíduo, como sua elevada porosidade, alta absorção de água e presença de resíduos químicos provenientes do processo de tratamento, contribuem para a degradação do desempenho estrutural de amostras de concreto, limitando seu uso em aplicações que demandam elevados padrões de resistência e durabilidade.

Uma tentativa de produzir clínquer utilizando LETA e outros resíduos foi realizada por Yen et al. (2011), que avaliaram as características microestruturais e mecânicas dos materiais cimentícios. Os autores concluíram que, para a mistura com 10% em massa de adição de LETA, a resistência à compressão aos 28 dias foi cerca de 16% (ou 14 MPa) superior à dos materiais produzidos com cimento Portland comum. El-Didamony et al. (2014) incorporaram até 15% em massa de lodo calcinado na matriz cimentícia, com os melhores resultados mecânicos observados em adições máximas de 10% em massa, apresentando desempenho semelhante ou superior à mistura controle.

O lodo proveniente do tratamento de água potável tem sido recomendado como uma alternativa viável para a substituição da argila em produtos cerâmicos, devido à sua composição mineralógica semelhante (LING ET AL., 2017). No entanto, as propriedades físicas do lodo, como sua alta capacidade de absorção de água e estrutura porosa, têm demonstrado efeitos adversos significativos no desempenho mecânico dos produtos cerâmicos. Benlalla et al. (2015) observaram que a resistência à compressão diminuiu de 17 MPa para 7 MPa quando o teor de lodo foi

elevado de 5% para 30%, evidenciando os desafios técnicos associados à incorporação de maiores quantidades desse resíduo em materiais cerâmicos.

Gastaldini et al. (2015) conduziram uma pesquisa abrangente, na qual avaliaram diferentes temperaturas e tempos de calcinação, além de tempos de moagem do lodo calcinado. A viabilidade da incorporação de LETA calcinado na matriz cimentícia com níveis de substituição de até 30% em peso foi confirmada, sendo que a temperatura de calcinação ideal foi de 600°C durante 1 hora, e o tempo de moagem foi de 1 hora. Em termos de resistência à compressão, todos os corpos de prova testados apresentaram resultados superiores aos da mistura controle, com os níveis de 25% e 30% de substituição em massa, proporcionando aumentos de 29,8% e 19,4%, respectivamente, em relação à mistura controle.

He et al. (2023) investigaram a aplicação do lodo de estação de tratamento de água (ETA) na produção de concreto, substituindo parte do cimento por lodo de ETA calcinado a 800 °C por 2 horas, em proporções de 10%, 20% e 30% em massa. A resistência à compressão após 90 dias do concreto com 10% de lodo de ETA aumentou em 7,91%, enquanto a retração por secagem após 150 dias foi reduzida em 14,84% em comparação com o concreto de referência. Em termos das características microestruturais, a adição de 10% de lodo de ETA resultou em uma diminuição no conteúdo das fases porosa e de clínquer, enquanto aumentou o conteúdo da fase C-S-H em comparação com o concreto de referência. Além disso, o concreto contendo lodo de ETA demonstrou um comportamento seguro em relação à lixiviação de metais pesados, além de apresentar menores custos e emissões de carbono.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve o programa experimental, os materiais empregados e os procedimentos adotados para a realização dos ensaios.

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental teve como objetivo desenvolver concretos permeáveis, tanto um concreto de referência, quanto concretos nos quais fossem realizadas a substituição do cimento Portland pelo lodo de estação de tratamento de água *in natura* e calcinado. Sendo analisadas as propriedades mecânicas e permeáveis destas variações de concretos permeáveis e também o comportamento e desempenho do resíduo em estudo.

Na primeira etapa, buscou-se caracterizar os materiais, descritos nos próximos itens, utilizados durante a pesquisa, são estes: o lodo de estação de tratamento de água *in natura*, as cinzas de lodo (CLETA's), o cimento Portland e o agregado graúdo. Inicialmente, realizaram-se caracterizações físicas, no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (DECIV/UFPE), com a determinação da massa específica real dos materiais aglomerantes, por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017), da massa específica do agregado graúdo, seguindo as determinações da NM 53 (ABNT, 2009), e superfície específica por meio do método do permeabilímetro de Blaine, de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015).

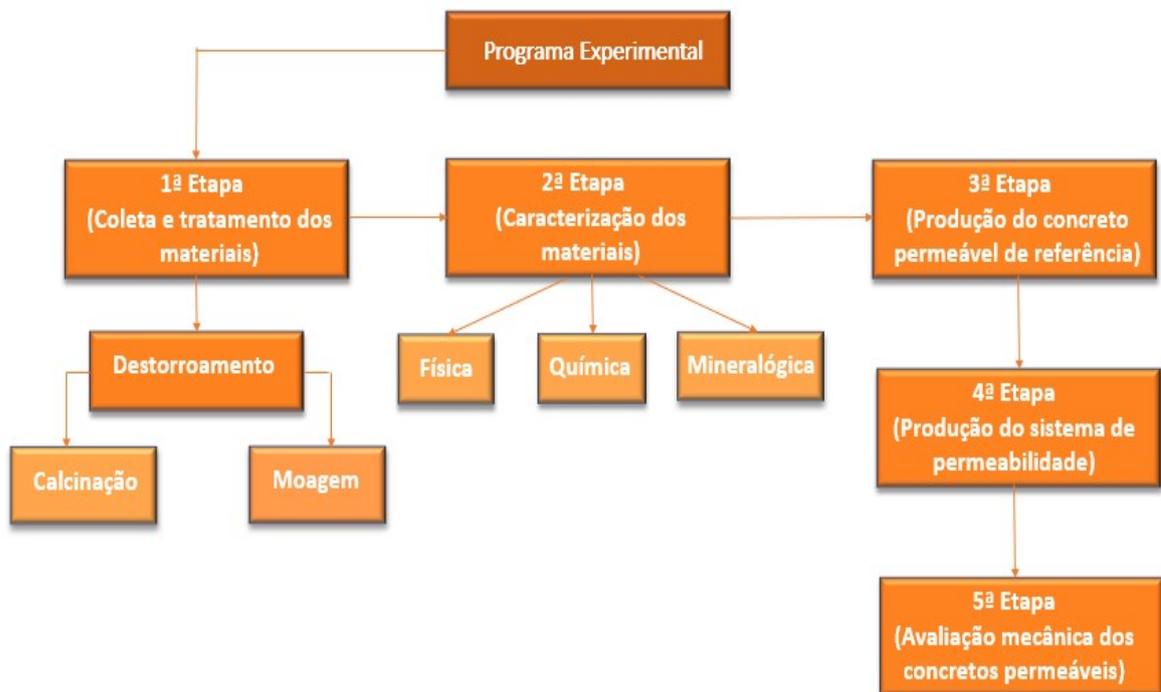
Após os ensaios prévios, foram realizadas também caracterizações químicas do resíduo, por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) associado à Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) e caracterizações mineralógicas, através da difração de raios-X (DRX), tanto do CLETA *in natura* como das cinzas de lodo.

A segunda etapa baseou-se na definição de traços de concreto permeável já utilizados com frequência em diversos estudos. Após esta definição, estabeleceu-se um traço com relação agregado graúdo/ligante pré-estabelecida, onde efetuou-se variações na relação água/cimento. Estas variações de concretos foram conduzidas

a partir da definição de um método de adensamento do concreto permeável em estudo. Por não existir um método padronizado para tal objetivo, foram estudadas variações de metodologias do sistema de adensamento para verificação de resultados satisfatórios de permeabilidade e resistência mecânica.

Simultaneamente a produção do concreto, foi desenvolvido um sistema para medição de permeabilidade do concreto permeável, baseando-se em sistemas apresentados na literatura, tendo em vista que não existem métodos normatizados para estas medições em corpos de prova de concreto permeável. Por fim, após a definição dos métodos de adensamento e de determinação de permeabilidade, foram produzidos os concretos de interesse da pesquisa, sobre a qual, procederam-se os ensaios de resistência à compressão a 28 dias (ABNT NBR 5739:2018), determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos no seu estado endurecido (ABNT NBR 9778:2009), além do ensaio de determinação de permeabilidade mencionado anteriormente. A Figura 5 apresenta o esquema do programa experimental.

Figura 5 - Esquema do programa experimental.



Fonte: O autor (2025)

## 3.2 MATERIAIS

Os materiais empregados foram escolhidos de acordo com os objetivos da pesquisa. Suas características principais são descritas a seguir.

### 3.2.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI MAX, fornecido pela empresa Cimento Nacional. A caracterização química do cimento foi realizada por fluorescência de raios-X no Laboratório de Isótopos Estáveis do Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG-Labise) do Departamento de Geologia da UFPE. As características químicas do cimento, além de sua caracterização físico-mecânica encontram-se na Tabela 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Caracterização química do cimento CP V-ARI MAX obtida por FRX.

Óxidos	Média (%)
CaO	60,14
SiO <sub>2</sub>	15,58
SO <sub>3</sub>	5,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,67
MgO	1,62
K <sub>2</sub> O	1,32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,67
TiO <sub>2</sub>	0,34
Na <sub>2</sub> O	0,19
CuO	0,01
MnO	N.D.
NiO	0,01
PF	7,46

Fonte: O autor (2025).

\*PF: Perda ao fogo

Tabela 3 - Características físicas e mecânicas do CP V-ARI MAX.

Ensaio	Resultados
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,10
Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	442,2
Perda ao fogo	2,77
Resíduo insolúvel	0,99
Início de pega (min)	165
Fim de pega (min)	225
Expansibilidade à quente (mm)	0,2
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	29,6
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	41,7
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	47,3
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	54,3

Fonte: Cimento Nacional (2021).

### 3.2.2 Lodo de estação de tratamento de água

O lodo de estação de tratamento de água utilizado neste programa experimental foi coletado na ETA Pirapama, localizada no município de Cabo de Santo Agostinho, na região metropolitana de Recife. É o maior sistema de abastecimento de água do estado de Pernambuco e um dos maiores do Brasil. A coleta ocorreu em fevereiro de 2022, com o apoio dos funcionários da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). Essa estação apresenta uma vazão de tratamento de água de aproximadamente 5.130 L/s, retirando vários bairros dessas cidades do racionamento de água. A Figura 6 ilustra o Sistema Pirapama.

Figura 6 – Vista aérea da ETA Pirapama.



Fonte: COMPESA (2020).

O lodo foi coletado, transportado e espalhado em lonas plásticas para secagem ao ar por 7 dias. Posteriormente, o lodo foi levado a estufa a 100° C durante 72 horas e armazenado em bombonas. A Figura 7 apresenta esta sequência de procedimentos.

Figura 7 - Coleta e armazenamento do LETA: 1) exposição ao ar livre, em lonas, para retirada do excesso de umidade; 2) lodo após secagem em estufa; 3) armazenamento em bombonas.



Fonte: O autor (2025)

No que diz respeito ao beneficiamento, foi seguido um procedimento realizado por Agra (2022), cujo autor realizou um tratamento térmico no lodo seco (LETA) por meio de calcinação com a finalidade de aumentar suas propriedades pozolânicas. Foram utilizadas três temperaturas de calcinação: 600, 700 e 800°C, onde foram obtidas, respectivamente, as amostras CLETA600, CLETA700 e CLETA800. A escolha por essas faixas de temperatura se deve a existência de trabalhos na literatura com o uso destas temperaturas de calcinação, entre 600 e 800°C, para calcinação de lodo de ETA e ETE. Na sequência, as amostras passaram por um processo de moagem durante 1 hora em um moinho de bolas para homogeneizar o material e promover a redução do tamanho das partículas, com o objetivo de aumentar o potencial pozolânico do mesmo (AGRA, 2022). A Figura 8 traz a aparência das amostras.

Figura 8 – Aparência das amostras: LETA, CLETA600, CLETA700, CLETA800



Fonte: O autor (2025)

### 3.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo foi uma brita zero de origem granítica. O material foi submetido a uma lavagem prévia para a remoção do excesso de material pulverulento e, em seguida, seco em estufa a 105°C por um período de 24 horas, seguindo o seu armazenamento em bombonas até a sua utilização.

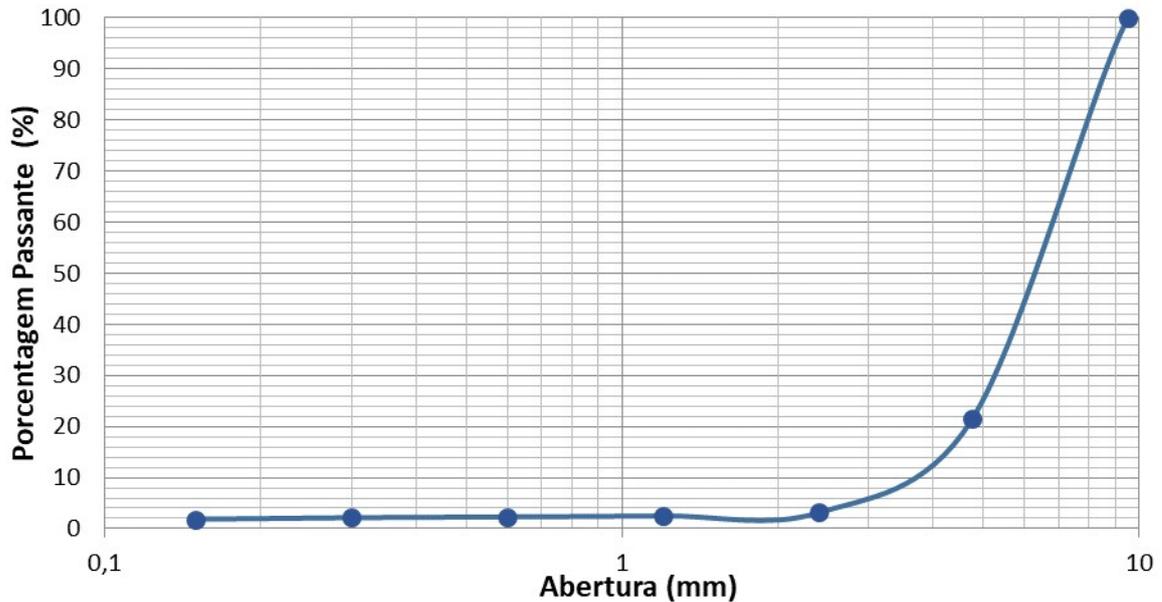
As características físicas e a distribuição granulométrica do agregado utilizado na pesquisa são apresentadas na Tabela 4 e na Figura 9, respectivamente.

Tabela 4 - Caracterização física do agregado graúdo.

Ensaio	Brita 0
Massa específica (ABNT NBR NM 53:2009)	2,75 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água (ABNT NBR NM 53:2009)	0,78 %
Módulo de finura (ABNT NBR NM 248:2003)	5,67
Dimensão máxima característica (ABNT NBR NM 248:2003)	9,5 mm

Fonte: O autor (2025)

Figura 9 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo (ABNT NBR NM 248:2003).



Fonte: O autor (2025)

Observa-se que o agregado graúdo possui uma distribuição uniforme, com pouca variação de tamanho, concentrando-se em uma faixa específica da granulometria. Agregados com essa curva tendem a ter alta permeabilidade, pois a falta de partículas finas reduz o preenchimento dos vazios. Segundo Neville (2016) granulometrias com menor proporção de partículas finas resultam em um volume maior de vazios no agregado, o que influencia diretamente a densidade compactada, a trabalhabilidade da mistura e, conseqüentemente, a resistência mecânica do concreto. Essa característica pode ser vantajosa em aplicações específicas, como em misturas permeáveis.

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

#### 3.3.1 Caracterização física dos materiais anidros

As análises físicas foram feitas a partir dos ensaios de massa específica pelo método do frasco de Le Chatelier, além da superfície específica pelo método do permeabilímetro de Blaine.

### 3.3.1.1 Massa específica real por meio do frasco de Le Chatelier

Os valores de massa específica dos materiais foram obtidos através do uso do frasco volumétrico de Le Chatelier, seguindo os procedimentos regidos pela norma NBR 16605 (ABNT, 2017).

Esse método baseia-se na determinação da relação entre a massa do material e o volume que o mesmo ocupa. Para a realização do procedimento, foi utilizado álcool isopropílico, considerando que o líquido deve apenas não reagir quimicamente com o material em análise e possuir massa específica inferior a ele.

O ensaio foi realizado utilizando um frasco volumétrico de Le Chatelier, no qual o líquido foi adicionado até que seu volume ficasse entre as marcas de 0 cm<sup>3</sup> e 1 cm<sup>3</sup>. O conjunto foi então submetido a um banho termorregulador por cerca de 30 minutos, registrando-se o volume inicial ( $V_1$ ). Posteriormente, o frasco e o líquido foram pesados para permitir a determinação da massa da amostra ensaiada. A quantidade de material adicionada foi suficiente para deslocar o líquido até um volume entre 18 cm<sup>3</sup> e 24 cm<sup>3</sup>.

Após a adição do material, o frasco foi novamente submerso no banho termorregulador por 30 minutos, e o volume final ( $V_2$ ) foi registrado. A massa específica foi determinada pela variação de volume do álcool isopropílico no frasco ( $V_2 - V_1$ ), associada à massa da amostra utilizada no ensaio.

### 3.3.1.2 Massa específica e absorção de água do agregado graúdo

A NM 53 (NBR,2009) especifica o procedimento para determinação da massa específica e absorção de água de agregados graúdos. Esses parâmetros são fundamentais para o controle de qualidade de materiais na construção civil e são obtidos por meio de ensaios que envolvem a secagem, saturação e imersão do agregado.

Para o procedimento de determinação da massa específica, inicialmente, a amostra do agregado graúdo deve ser seca em estufa a uma temperatura de ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) até atingir massa constante. Após o resfriamento em dessecador, o material é imerso em água por ( $24 \pm 4$  horas) para saturação. Em seguida, o agregado é retirado da água, seco superficialmente com um pano úmido, e sua massa em estado saturado ( $m_{ss}$ ) é medida. O material é então submerso em água, e a massa

submersa ( $m_{sub}$ ) é determinada. Por fim, o agregado é seco novamente em estufa para obtenção da sua massa seca ( $m_{sec}$ ). A equação 01 fornece o cálculo da massa específica do agregado:

$$\rho = \frac{m_{sec}}{m_{ss} - m_{sub}} \quad (01)$$

Sendo,

- $\rho$ , a massa específica, em gramas por centímetro cúbico;
- $m_{sec}$ , a massa do agregado seco, em gramas;
- $m_{ss}$ , a massa do agregado saturado e superficialmente seco, em gramas;
- $m_{sub}$ , a massa do agregado submerso, em gramas.

Já a absorção de água é determinada pela relação entre a massa de água absorvida e a massa seca do agregado, expressa em porcentagem. A equação 02 apresenta a respectiva fórmula:

$$A = \frac{m_{ss} - m_{sec}}{m_{sec}} \times 100 \quad (02)$$

Sendo,

- $A$ , a absorção de água, em porcentagem;
- $m_{sec}$ , a massa do agregado seco, em gramas;
- $m_{ss}$ , a massa do agregado saturado e superficialmente seco, em gramas.

### 3.3.1.3 Granulometria e módulo de finura do agregado graúdo

O ensaio de granulometria do agregado foi realizado de acordo com a norma NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica, utilizando peneiramento por série normalizada para definir a distribuição dos grãos. Além disso, foi determinado o módulo de finura (MF), que representa a uniformidade dos grãos e influencia diretamente as propriedades do concreto. Esses parâmetros são essenciais para caracterizar o agregado graúdo e avaliar sua adequação na

formulação de concretos permeáveis, garantindo um equilíbrio entre resistência mecânica e permeabilidade.

#### 3.3.1.4 Superfície específica pelo método de Blaine

A determinação da finura foi realizada pelo método de Blaine, conforme o procedimento da norma NBR 16372 (ABNT, 2015), que determina a área superficial específica por meio da medida da permeabilidade do material, ou seja, é a medição do tempo gasto para um certo volume de ar, sob dada pressão, atravessar o material. A Figura 10 ilustra o permeabilímetro de Blaine, equipamento utilizado no ensaio e é amplamente utilizado para o cimento Portland e outros materiais pulverulentos.

Figura 10 - Permeabilímetro de Blaine



Fonte: O autor (2025)

A superfície específica foi calculada de acordo com a Equação 03.

$$S = \frac{K * \sqrt{\xi^3 * t}}{\rho * (1 - \xi) * \sqrt{0,1 * \eta}} \quad (03)$$

Onde,

- $S$  é a superfície específica, em centímetros quadrados por grama;
- $K$  é a constante do aparelho;
- $\xi$  é a porosidade da camada;
- $t$  é o tempo medido, em segundos;
- $\rho$  é a massa específica do material, em gramas por centímetros cúbicos;
- $\eta$  é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio.

É relevante destacar a importância da realização deste experimento, considerando que materiais com granulometria semelhante podem apresentar diferenças significativas na superfície específica devido à forma, rugosidade das partículas e à presença de vazios internos (CORDEIRO, 2006).

### **3.3.2 Caracterização química e mineralógica do LETA**

Para avaliação química das amostras de lodo foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associado à espectroscopia de dispersão de energia (EDS). Para análise mineralógica foi utilizada a difração de raios-X (DRX). A seguir, serão apresentadas as principais metodologias adotadas para realização de cada um deles.

#### **3.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura associada a Espectroscopia de dispersão de energia (MEV-EDS)**

A princípio, as amostras de LETA *in natura* e as cinzas foram cuidadosamente preparadas para o processo de metalização, tendo em vista que se trata de material não condutor. Neste processo, tem-se o objetivo de tornar a superfície da amostra condutora para evitar o acúmulo de cargas elétricas durante a interação com o feixe de elétrons no microscópio, além de melhorar a qualidade das imagens com o aumento de contraste e reduzindo artefatos.

As amostras foram colocadas dentro da câmara do metalizador e o processo se inicia com a criação de um vácuo para eliminar a presença de gases que podem interferir no processo de deposição. Com um campo elétrico aplicado, o material metálico, que neste caso utilizou-se o ouro (Au), é depositado na superfície da amostra através de bombardeamento iônico. A Figura 11 ilustra a metalização das amostras.

Figura 11 – Metalização das amostras de lodo analisadas pelo MEV



Fonte: O autor (2025)

Após a metalização, as amostras são retiradas do metalizador e estão prontas para serem analisadas no MEV, onde são fixadas em um suporte específico e colocada na câmara de análise do equipamento. O feixe de elétrons é focalizado sobre a amostra e varre a superfície, na qual são gerados sinais de elétrons. O detector de sinais escolhido foi o de elétrons retroespalhados para auxiliar na identificação de contrastes de composição atômica. Os sinais gerados são captados pelos detectores e transformados em imagens de alta resolução, exibindo detalhes da topografia, morfologia e composição da amostra. Em combinação com o EDS, foi possível obter informações sobre a composição química de regiões específicas das amostras. A Figura 12 ilustra o equipamento MEV-EDS utilizado neste ensaio.

Figura 12 – Equipamento utilizado para os ensaios de MEV-EDS



Fonte: O autor (2025)

### 3.3.2.2 Fluorescência de raios-X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva utilizada para a identificação e quantificação da composição presente em diferentes materiais. O método permite a caracterização qualitativa e quantitativa de cada elemento contido na amostra.

A composição química em porcentagem de óxidos foi obtida por meio deste ensaio, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Rigaku modelo ZSX Primus II. Para realização do ensaio foram utilizadas amostras do material passante na peneira com abertura de malha de 75  $\mu\text{m}$  (nº 200).

### 3.3.2.3 Difração de raios-X (DRX)

A difração de raios-X é uma técnica utilizada para identificar as fases mineralógicas presentes em um material. Nesse processo, um feixe de raios-X é direcionado à amostra, causando a excitação dos elétrons de seus átomos. A energia liberada durante a transição dos elétrons entre níveis energéticos varia conforme a estrutura cristalina do mineral e depende do ângulo de incidência do feixe. Essa energia é registrada por um detector, que mede sua intensidade em diferentes intervalos angulares (passos angulares). A relação entre a intensidade e o

ângulo de varredura ( $2\theta$ ) resulta no difratograma, que caracteriza o material analisado.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da UFPE, utilizando um difratômetro da Bruker modelo D2 Phaser. Os parâmetros do ensaio foram: intervalo de varredura ( $2\theta$ ) de 5 a 80°; passo angular = 0,05°; tempo por passo de 0,575 segundos; intensidade da corrente de 10 mA; tensão do equipamento de 30 kV. O tubo do feixe era de cobre, emitindo um comprimento de onda de 1,54 Å.

No procedimento adotado, inicialmente as amostras foram peneiradas na malha n° 200 (75  $\mu$ m). O material passante foi colocado no porta amostras e prensado com lâmina de vidro, para, em seguida ser inserido no difratômetro. A identificação das fases cristalinas resultantes do DRX foi realizada por comparação do difratograma obtido da respectiva amostra com aqueles dos minerais disponíveis no banco de dados PDF-2 do International Center for Diffraction Data (ICDD).

### **3.3.3 Processo de produção do concreto permeável**

A partir do estudo de misturas de concretos permeáveis, definiu-se uma mistura padrão com a relação ligante/agregado graúdo de 1:4. Com essa mistura, o estudo buscou a variação da relação água/cimento, e foram definidos três valores de variação: 0,27; 0,30 e 0,35.

Observa-se que a relação água/cimento ( $a/c$ ) desempenha um papel determinante na resistência e na consistência do concreto. No caso do concreto permeável, a quantidade de água utilizada deve ser suficiente para conferir à mistura um brilho metálico. Consoante a isso, ao retirar uma amostra e moldá-la em forma de uma esfera, esta deve manter sua forma estrutural, sem desagregar ou apresentar fluxo de água pelos vazios presentes na composição, este procedimento é popularmente conhecido com teste da bola (RAMOS, 2018).

Dado o exposto, realizou-se a concretagem das variações dos concretos mencionados anteriormente. O concreto com relação  $a/c$  de 0,27 apresentou uma quantidade de água insuficiente para garantir uma pasta fluida, sem proporcionar um cobrimento adequado dos grãos de agregado graúdo. Já o concreto com relação  $a/c$  de 0,35 apresentou um excesso de água com uma fluidez na pasta que enfraqueceu a aderência da pasta à superfície dos grãos. Por outro lado, aquele que apresentou

a caracterização proposta por autores sobre o aspecto brilhante e boa compacidade ao realizar o teste da bola foi o concreto com relação a/c de 0,30. A Figura 13 ilustra os aspectos visual e tátil da moldagem deste concreto.

Figura 13 – Moldagem de um concreto permeável: 1) exposição do brilho metálico presente na mistura; 2) teste da bola no concreto permeável.



Fonte: O autor (2025)

Silva (2019) produziu dois traços de concreto permeável com objetivo de estudar variações da granulometria dos agregados graúdos do material. Para análise destes resultados, desenvolveu um traço com proporção ligante/agregado graúdo de 1:4,14, sem agregado miúdo, uso de cimento CP V-ARI, e relação a/c de 0,30.

O procedimento de mistura dos concretos permeáveis desenvolvidos na pesquisa apresentou as seguintes etapas:

- 1) Colocação da água mais o ligante, misturando-os por 30 segundos;
- 2) Colocação do agregado graúdo durante 30 segundos;
- 3) Após este primeiro minuto, é interrompida a mistura e realiza-se a retirada de material aderido na pá do misturador, assim como na cuba, durante 30 segundos;
- 4) Reinício da mistura com todos os componentes por mais 60 segundos.

A análise destas variações de concreto permeável também foi conduzida a partir da definição de um método de adensamento para corpos de prova de concreto permeável. Como não existe um método padronizado para tal objetivo, a pesquisa buscou a definição de uma metodologia de adensamento de concretos a serem analisadas as suas propriedades mecânicas e permeáveis.

Conforme exposto no referencial teórico, a compactação de misturas secas em condições equivalentes às *in situ* apresenta desafios significativos. Contudo, a padronização de um método aplicado a todas as misturas possibilita a obtenção de resultados consistentes.

Diniz et al (2019) desenvolveram misturas de concreto seco para pavimento intertravado compactadas em quatro camadas, cada uma submetida a vinte golpes realizados com um cilindro maciço de metal, com 46 mm de diâmetro e peso aproximado de 6 Kg. Durante cada golpe, o cilindro era liberado em queda livre de uma altura aproximada de 15 centímetros em relação à camada a ser compactada. Para evitar o contato do cilindro com as bordas da forma, utilizou-se um tarugo de PVC como proteção. Foram moldados corpos de prova cilíndricos, 5 x 10 cm.

A partir do procedimento mencionado acima, a metodologia desenvolvida neste estudo baseou-se em uma compactação com o mesmo aparato de equipamentos utilizados, assim como, utilizou-se corpos de prova cilíndricos com as mesmas dimensões. Entretanto, efetuou-se algumas adaptações para o adensamento, tendo em vista que o objetivo era produzir concretos permeáveis. Dessa forma, estudou-se variações no número de golpes por camada, definidas em: 3, 5, 7 e 10 golpes. Além de ser estabelecida uma redução de 4 para 3 camadas de compactação, com o objetivo de favorecer a existência de uma maior porosidade do material. A Figura 14 ilustra a execução desta metodologia de adensamento no concreto.

Figura 14 – Execução de adensamento no concreto



Fonte: O autor (2025)

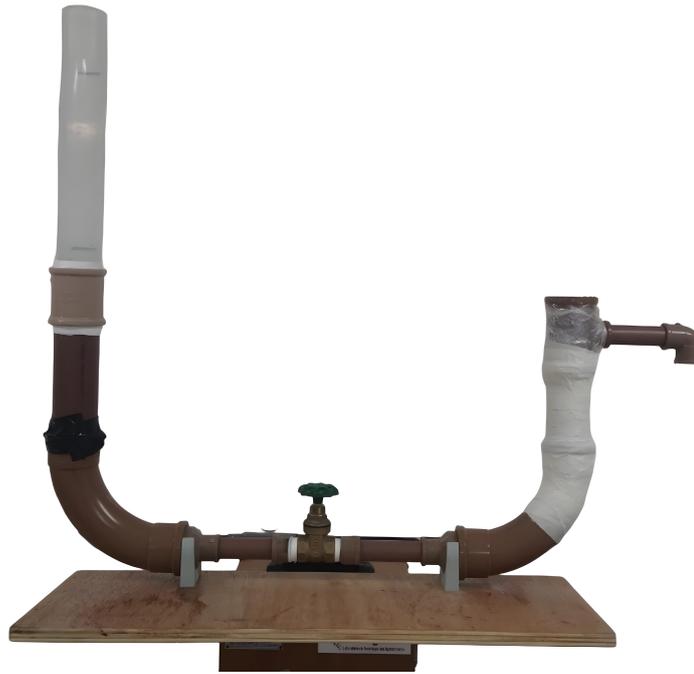
A partir destas variações realizadas no material, efetuou-se a medição das resistências à compressão e da permeabilidade dos mesmos, em que os respectivos resultados serão apresentados no próximo capítulo. Após a escolha do concreto permeável de referência, definiu-se as porcentagens de substituição do cimento pelo LETA. Foram produzidos concretos com 5, 10 e 15% de substituição usando o LETA *in natura*, CLETA600, CLETA700 e CLETA800.

#### **3.3.4 Processo de produção do sistema de medição de permeabilidade do concreto**

Ao passo que foi sendo desenvolvido a metodologia para produzir concretos permeáveis, era analisado também o desenvolvimento de um sistema para medição de permeabilidade dos concretos baseando-se em sistemas apresentados na literatura e posteriormente publicados em revistas com alto fator de impacto, tendo em vista que não existem métodos normatizados para estas medições em corpos de prova de concreto permeável.

A partir destes estudos, alguns deles foram mencionados no referencial teórico deste trabalho, foi definido um sistema de medição de permeabilidade que atendessem algumas condições. A Figura 15 apresenta o sistema desenvolvido para realização dos ensaios de permeabilidade.

Figura 15 – Sistema de medição de permeabilidade para concreto.



Fonte: O autor (2025)

Para chegar na configuração deste dispositivo, foram consideradas algumas condições para a eficácia da proposta apresentada. A primeira delas foi considerar o nível de saída de água mais alto que o topo da amostra. A segunda condição foi garantir uma diferença de queda considerável para viabilizar a realização do teste de queda variável. E por último, colocou-se a saída de água, o mais próximo possível do topo da amostra.

Uma outra escolha definida no sistema foi a localização do concreto a jusante, proporcionando um fluxo de água ascendente (de baixo para cima). Esta configuração permite a identificação de que quando a água a montante estiver na mesma altura da água da tubulação de saída, tem-se que todo o ar contido nos vazios do corpo de prova fora eliminado, assim como, o concreto estará completamente saturado. Para vedar as amostras de concreto foi utilizado filme PVC, reforçado com fita crepe branca.

Com a configuração do dispositivo definida, os concretos foram testados a partir de dois métodos de medição de coeficiente hidráulico. O primeiro deles é o teste de queda constante, cujo ensaio mede o tempo gasto para um dado volume de água atravessar uma amostra, sempre respeitando o princípio de carga constante, em outras palavras, o nível da água à montante do sistema deve permanecer constante. A equação 04 apresenta o cálculo do coeficiente de permeabilidade obtido por meio deste ensaio.

$$k = \frac{V \cdot L}{t \cdot A \cdot h} \quad (04)$$

Sendo,

- k, o coeficiente de permeabilidade, em metros por segundo;
- V, o volume de água despejado no experimento, em metros cúbicos;
- L, o comprimento do corpo de prova no sentido do fluxo, em metros;
- t, o tempo requerido para passar todo o volume de água no sistema, em segundos;
- A, a área da seção transversal do corpo de prova, em metros quadrados;
- h, a altura do nível de água mantida constante, em metros.

Para fins de execução, a princípio era inserida uma certa quantidade de água no sistema para garantir a saturação da amostra. Posteriormente, mediu-se um volume (V) de 2 L de água a ser inserido no sistema e realizada a respectiva contagem do tempo de passagem da mesma pela amostra. A altura padrão do nível de água foi mantida em 0,3 m.

O segundo ensaio realizado para determinar a permeabilidade dos concretos foi o teste de queda variável, cujo funcionamento remete a uma diminuição gradual do nível de queda d'água, criando um fluxo descendente. A equação 05 apresenta o cálculo do coeficiente de permeabilidade obtido por meio deste ensaio.

$$k = \frac{L \cdot Atp}{t \cdot Acp} \cdot \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (05)$$

Sendo,

- $k$ , o coeficiente de permeabilidade, em metros por segundo;
- $L$ , o comprimento do corpo de prova no sentido do fluxo, em metros;
- $t$ , o tempo necessário para a queda do nível de água ir do nível  $h_1$  até  $h_2$ , em segundos;
- $A_{tp}$ , a área da seção transversal do tubo plástico a montante, em metros quadrados;
- $A_{cp}$ , a área da seção transversal do corpo de prova, em metros quadrados;
- $h_1$ , a altura inicial da coluna d'água, em metros;
- $h_2$ , a altura final da coluna d'água, em metros.

Para fins de execução, a princípio era inserida uma certa quantidade de água no sistema para garantir a saturação da amostra. Posteriormente, adicionava-se água para que sua altura inicial atingisse 0,3 m ( $h_1$ ). O registro era aberto e o cronômetro acionado com o objetivo de medir o tempo necessário para a queda do nível de água atingir a marca de 0,1 m ( $h_2$ ).

Para avaliação dos resultados de permeabilidade, determinou-se como objetivo um coeficiente de permeabilidade mínimo de  $10^{-3}$  m/s ou 1 mm/s definido pela ABNT NBR 16416, que define os requisitos para garantir a permeabilidade adequada em sistemas permeáveis e considera esse valor mínimo para que um pavimento de concreto seja considerado permeável.

### **3.3.5 Procedimentos dos ensaios de avaliação das propriedades mecânicas do concreto permeável**

Os concretos produzidos na pesquisa tiveram suas propriedades mecânicas analisadas a partir de alguns ensaios que serão descritos a seguir. Vale salientar que além destes ensaios, os materiais foram submetidos ao ensaio de medição de permeabilidade mencionado anteriormente, para concluir se são de fato permeáveis, ou não.

### 3.3.5.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos concretos foi determinada aos 28 dias, conforme a norma ABNT NBR 5739:2018, que estabelece os requisitos e procedimentos para a realização do teste de resistência à compressão de corpos de prova de concreto. Para esse ensaio, os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com as especificações da norma, e, após o período de cura de 28 dias, foram submetidos à carga de compressão até a ruptura.

### 3.3.5.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos no seu estado endurecido

Foram realizados os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica nos concretos em seu estado endurecido, conforme as diretrizes da ABNT NBR 9778:2009, que especifica os procedimentos para a determinação dessas propriedades físicas do concreto endurecido e que são fundamentais para avaliar a qualidade do material em relação à sua densidade, porosidade e capacidade de absorver água, fatores que influenciam diretamente na durabilidade e resistência do concreto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

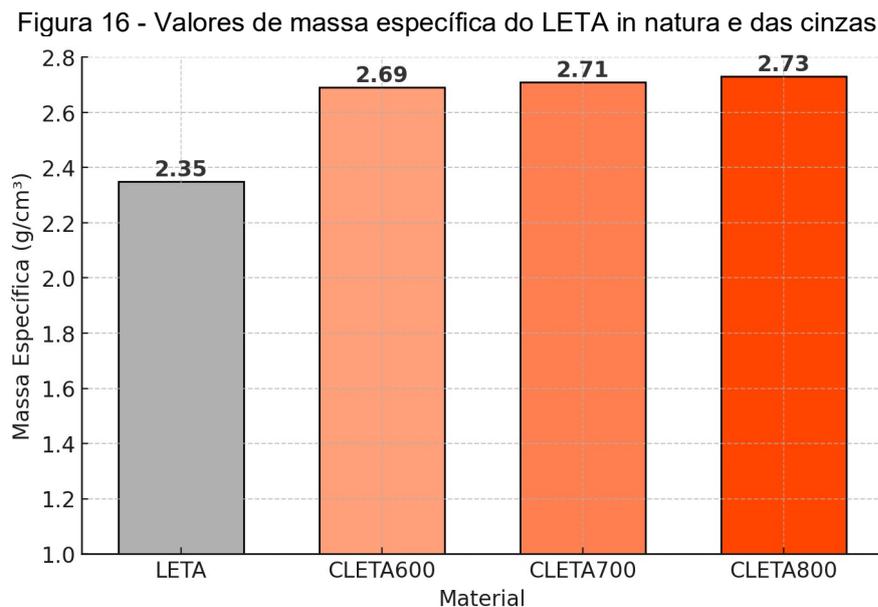
Neste capítulo serão abordados e discutidos os resultados referentes a caracterização do lodo objeto de estudo e o desempenho dos processos de produção do concreto permeável com o resíduo e de seu sistema de medição de permeabilidade.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram analisadas as características físicas, químicas e mineralógicas de todas as amostras de LETA *in natura* e de suas cinzas. A seguir, são apresentados os resultados detalhados de cada um dos ensaios de caracterização.

#### 4.1.1 Análises físicas

A Figura 16 apresenta os valores de massa específica obtidos pelo método de Le Chatelier do LETA *in natura* e das cinzas de lodo. Os resultados indicam um aumento significativo na massa específica após a calcinação, o que ocorreu devido à remoção de quase toda a matéria orgânica do lodo (AGRA ET AL, 2023).



Fonte: O autor (2025)

Os valores de área de superfície específica determinados pelo método de Blaine para as amostras analisadas são apresentados na Tabela 5. A comparação entre as amostras auxilia na compreensão das variações estruturais após os tratamentos aplicados. Dessa forma, os resultados fornecem subsídios para a análise do comportamento dos materiais em diferentes condições.

Tabela 5 – Área de Superfície específica das amostras estudadas.

<b>Amostra</b>	<b>Sup. Específica (m<sup>2</sup>/Kg)</b>
LETA	1358,65
CLETA600	1666,22
CLETA700	1599,44
CLETA800	1390,93

Fonte: O autor (2025)

A partir dos dados obtidos é possível identificar que a finura das cinzas reduziu conforme a temperatura de calcinação aumentou, possivelmente em razão do processo de sinterização do resíduo, fenômeno comum em argilas. Esse processo intensifica as ligações iônicas, resultando em um material mais resistente à moagem. Outra análise que pode ser atribuída a esses dados é a maior tendência de recristalização da sílica amorfa, à medida que a temperatura de calcinação aumenta (BASTO, 2018; TORRES, 2019; AGRA et al., 2023).

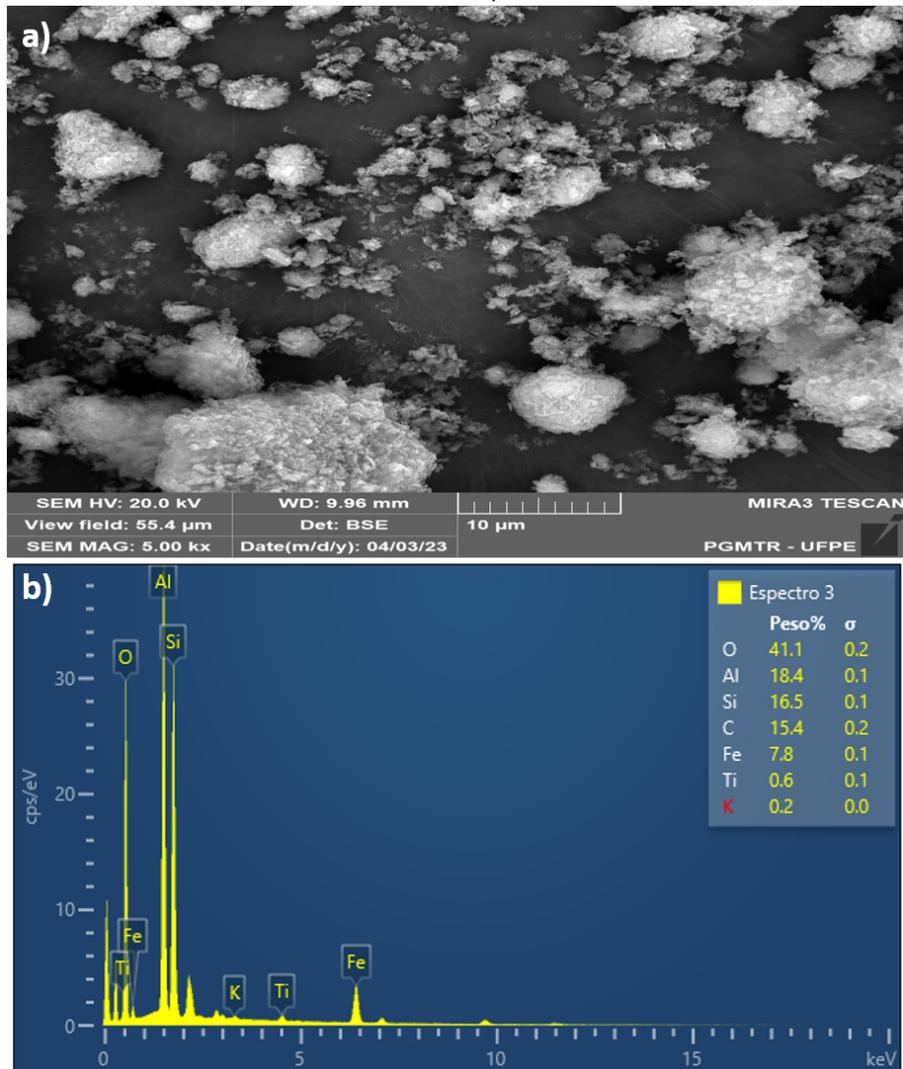
Comparando os resultados das duas propriedades físicas das amostras de LETA analisadas observa-se que a massa específica aumenta à medida que a finura Blaine diminui. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a massa específica é determinada pela relação entre a quantidade de massa e um volume específico, sem considerar os vazios entre as partículas (BAUER, 2019).

À medida que o tamanho das partículas diminui, o empacotamento entre elas se torna mais eficiente, reduzindo os espaços vazios. Esse efeito faz com que as amostras mais finas apresentem menor volume de vazios entre as partículas. Consequentemente, há uma menor quantidade de volume a ser desconsiderada no cálculo da massa específica. Como resultado, a redução dos vazios reflete diretamente na diminuição da massa específica. Esse comportamento está associado à maior densidade de contato entre as partículas, influenciando as propriedades físicas do material.

### 4.1.2 Análises químicas

A Figura 17 apresenta uma imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra de LETA *in natura*. Abaixo da micrografia é exibida a respectiva análise de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), permitindo a correlação entre a morfologia das partículas e sua composição elementar. Essas imagens possibilitam avaliar alguma diferença estrutural em relação as amostras após a calcinação, além de identificar a distribuição dos elementos químicos na superfície do material.

Figura 17 – (a) Imagem da amostra de LETA *in natura* obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.



Fonte: O autor (2025)

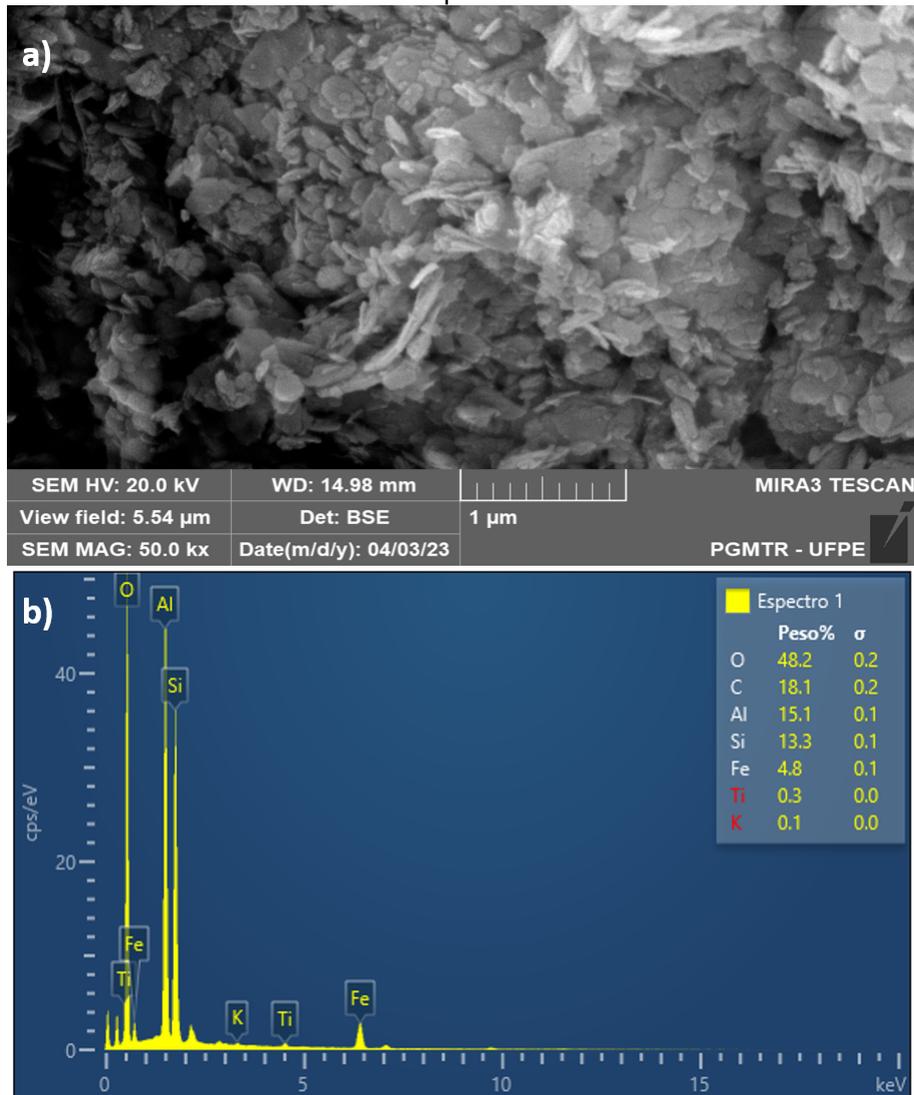
A amostra analisada apresenta uma morfologia irregular e heterogênea, sem formas definidas e com tamanhos variados. A porosidade do material indica a presença de estruturas lamelares e fragmentadas, indicando a natureza predominantemente aglomerada do material, o que também foi observado por De Godoy et al. (2020).

A formação de aglomerados pode estar relacionada à composição mineral do lodo e à presença de partículas finas que se unem devido a interações físico-químicas. A imagem também apresenta uma estrutura porosa, com espaços vazios entre si, influenciando na sua massa específica com uma menor densidade de material em relação às amostras calcinadas.

Os principais elementos identificados foram o oxigênio, indicando a presença de óxidos metálicos; o alumínio possui uma quantidade elevada devido ao sulfato de alumínio utilizado como coagulante no processo de tratamento; o silício indica presença de silicatos que podem ser derivados de minerais presentes na água antes do tratamento; carbono indica a presença de matéria orgânica residual, mostrando que parte dos compostos orgânicos não foram completamente removidos e o ferro está presente na forma de óxidos ou ligados a compostos de aluminossilicatados.

A Figura 18 apresenta a imagem obtida por MEV da amostra de lodo calcinado a 600°C, acompanhada do seu respectivo espectro obtido por EDS.

Figura 18 - a) Imagem da amostra de CLETA600 obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.



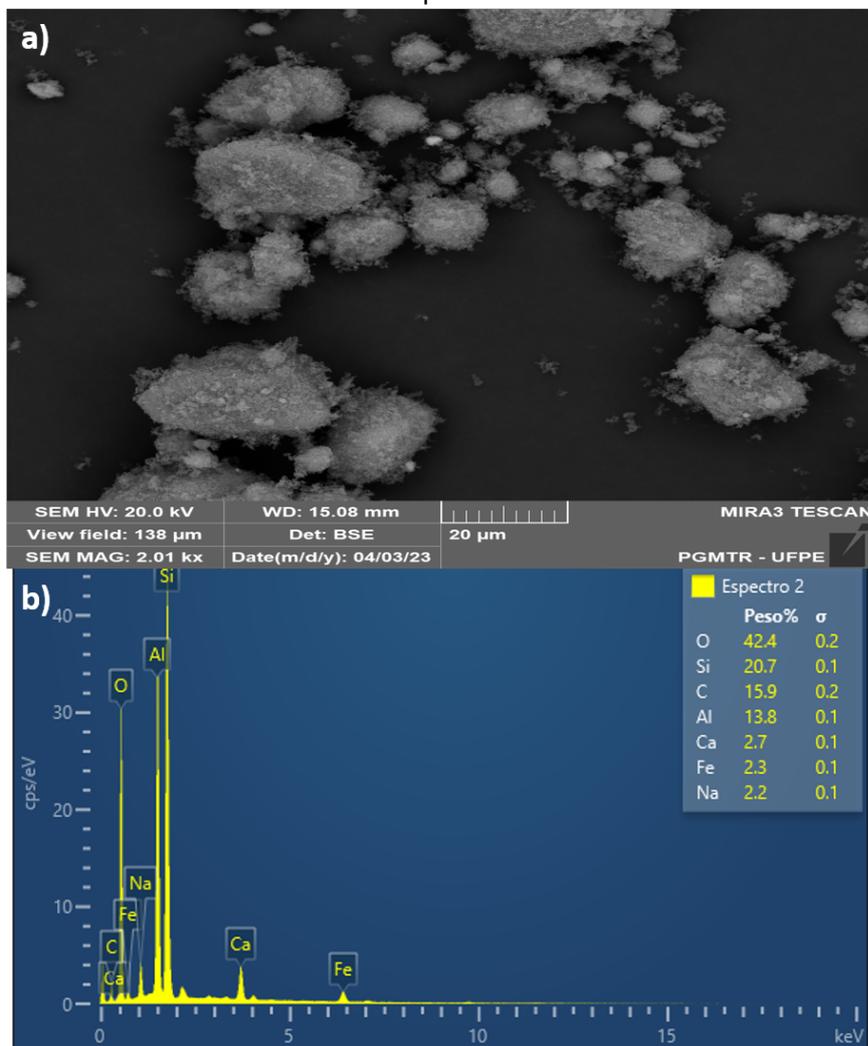
Fonte: O autor (2025)

A amostra analisada apresenta uma morfologia mais agregada e menos porosa em comparação com *in natura*, na qual a calcinação a 600°C reduziu a porosidade e aumentou a coesão da estrutura. Outro ponto a ser discutido é a existência de uma fusão parcial das partículas, onde inicialmente a água livre evapora e compostos orgânicos e alguns gases aprisionados começam a ser liberados, favorecendo o rearranjo estrutural e a formação de pontes entre as partículas. Algumas fases estruturais começam a ficar frágeis e interagem de forma a adquirir uma estabilização no composto.

A análise de composição elementar do lodo calcinado a 600°C revelou a presença em maior escala agora de oxigênio, indicando a formação de mais óxidos metálicos e aluminossilicatos, dada a quantidade presente de alumínio e sílica. A

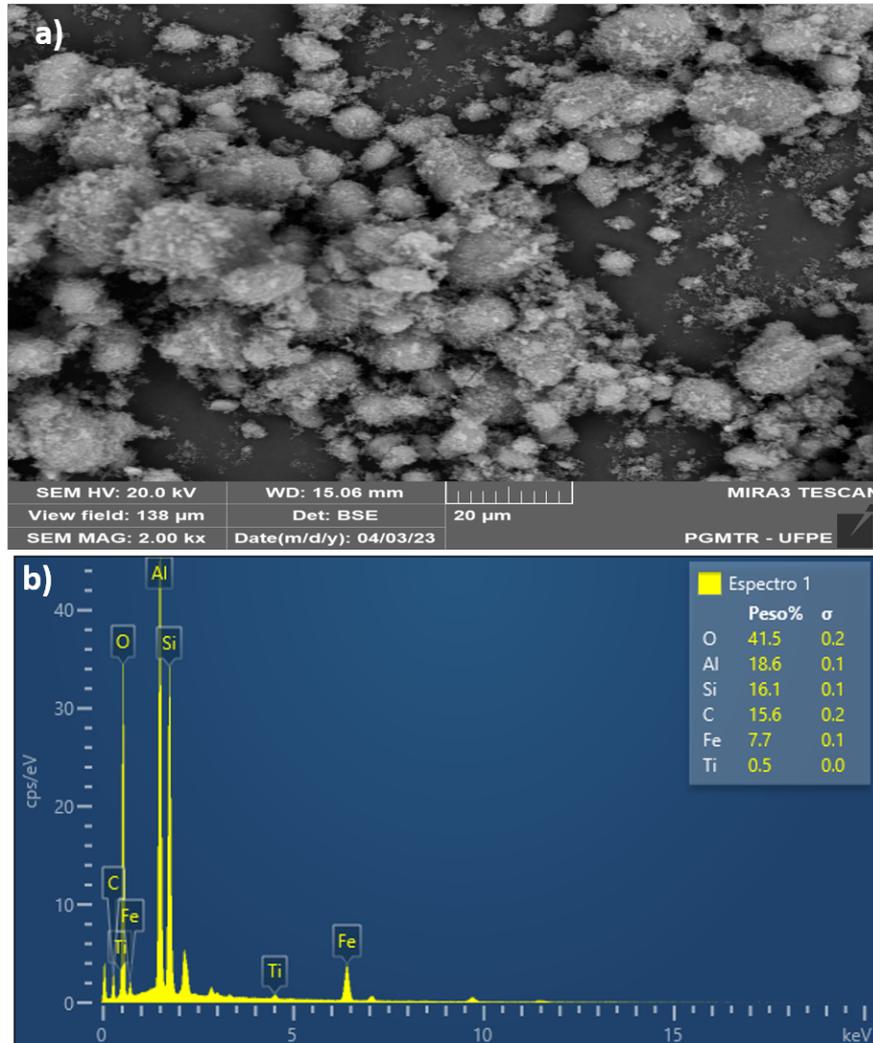
quantidade de carbono remete a discussão da existência de matéria orgânica, cuja temperatura de queima não foi suficiente para a completa eliminação deste material. A presença de enxofre está vinculada aos resíduos de sulfato provenientes do material coagulante, além do ácido sulfúrico usado pela COMPESA para dissolver o coagulante no processo de tratamento do corpo hídrico. As figuras 19 e 20 apresentam as imagens obtidas por MEV e EDS do CLETA700 e CLETA800, respectivamente.

Figura 19 - a) Imagem da amostra de CLETA700 obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.



Fonte: O autor (2025)

Figura 20 - a) Imagem da amostra de CLETA800 obtida por MEV (b) Composição química da amostra obtida por EDS.



Fonte: O autor (2025)

A calcinação a 700°C resultou em uma estrutura mais compacta em comparação às amostras tratadas a temperaturas mais baixas, mas ainda não foi suficiente para eliminar completamente a matéria orgânica. O processo de sinterização parcial já se torna visível, promovendo maior coesão das partículas e consequentemente menor desordem estrutural, gerando a formação de partículas mais definidas.

Seguindo este raciocínio, a micrografia da amostra calcinada a 800°C revela um avanço significativo no processo de sinterização, resultando em uma estrutura ainda mais compacta e menos porosa, o que explica os valores crescentes de massa específica obtidos pelo método de Le Chatelier. A diminuição dos espaços vazios sugere uma progressiva estabilização estrutural dos aluminossilicatos, o que

pode impactar diretamente as propriedades físicas e químicas do material. Essa modificação indica que a temperatura mais elevada promove a reorganização mineralógica, reduzindo a fragmentação observada em temperaturas menores e favorecendo a cristalização dos óxidos presentes na composição do lodo. Isso está diretamente relacionado com os valores de superfície específica obtidos, cujos valores das amostras calcinadas são inversamente proporcionais ao aumento de temperatura de calcinação, ou seja, as amostras calcinadas a temperaturas mais altas são mais resistentes aos processos de moagem.

Em relação a análise dos elementos químicos presentes nas amostras de CLETA700 e CLETA800 tem-se uma composição química semelhante com predominância de oxigênio, alumínio, silício e carbono. A continuação da presença do carbono indica que, mesmo em temperaturas elevadas, ainda há resíduos orgânicos ou compostos carbonáceos adsorvidos na matriz mineral. Dado o exposto, à medida que aumenta a temperatura de calcinação a estrutura é mais compacta, com redução da porosidade, o processo de sinterização é mais intenso e há o surgimento de fases mais cristalinas, indicando uma estabilização do material.

Ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) para lodo de tratamento de água normalmente revelam padrões de fluorescência distintos, representando sua composição elementar. Esses padrões variam conforme os processos específicos de tratamento adotados e a própria natureza do lodo. Os elementos geralmente encontrados incluem óxidos de magnésio, alumínio, sílica, fósforo, potássio, cálcio e ferro ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que são indicativos do conteúdo mineral no lodo. As maiores ou menores concentrações de elementos podem variar sazonalmente, influenciadas por fatores como a precipitação, que afeta a entrada de materiais nas estações de tratamento (OHBUCHI ET AL., 2008). As análises químicas das cinzas de LETA, realizadas por fluorescência de raios-X e apresentadas na Tabela 6, indicam que sua composição é semelhante à do lodo in natura, sendo predominantemente constituídas por óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). No entanto, as cinzas apresentam um percentual significativamente menor de perda ao fogo, uma vez que, após a calcinação, grande parte dos compostos orgânicos e mais voláteis são eliminados.

Tabela 6 - Composição química semiquantitativa em óxidos e perda ao fogo para o LETA *in natura* e para as cinzas de lodo

Óxidos	LETA in nat	CLETA600	CLETA700	CLETA800
SiO <sub>2</sub>	<b>32,61</b>	<b>38,50</b>	<b>40,55</b>	<b>40,78</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>30,33</b>	<b>38,72</b>	<b>40,20</b>	<b>40,29</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>10,47</b>	<b>12,86</b>	<b>12,21</b>	<b>12,69</b>
CaO	0,09	0,29	0,25	0,48
N <sub>2</sub> O	0,05	0,05	0,18	0,07
K <sub>2</sub> O	0,25	0,29	0,33	0,31
MnO	0,04	N.D.	N.D.	N.D.
TiO <sub>2</sub>	1,38	1,73	0,92	0,99
MgO	0,16	0,15	0,25	0,23
Cl	N.D.	N.D.	0,01	0,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,32	0,35	0,29	0,34
SO <sub>3</sub>	0,34	0,48	0,15	0,55
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>73,41</b>	<b>90,08</b>	<b>92,96</b>	<b>93,76</b>
PF	24,52	7,31	4,55	3,15

Fonte: O autor (2025)

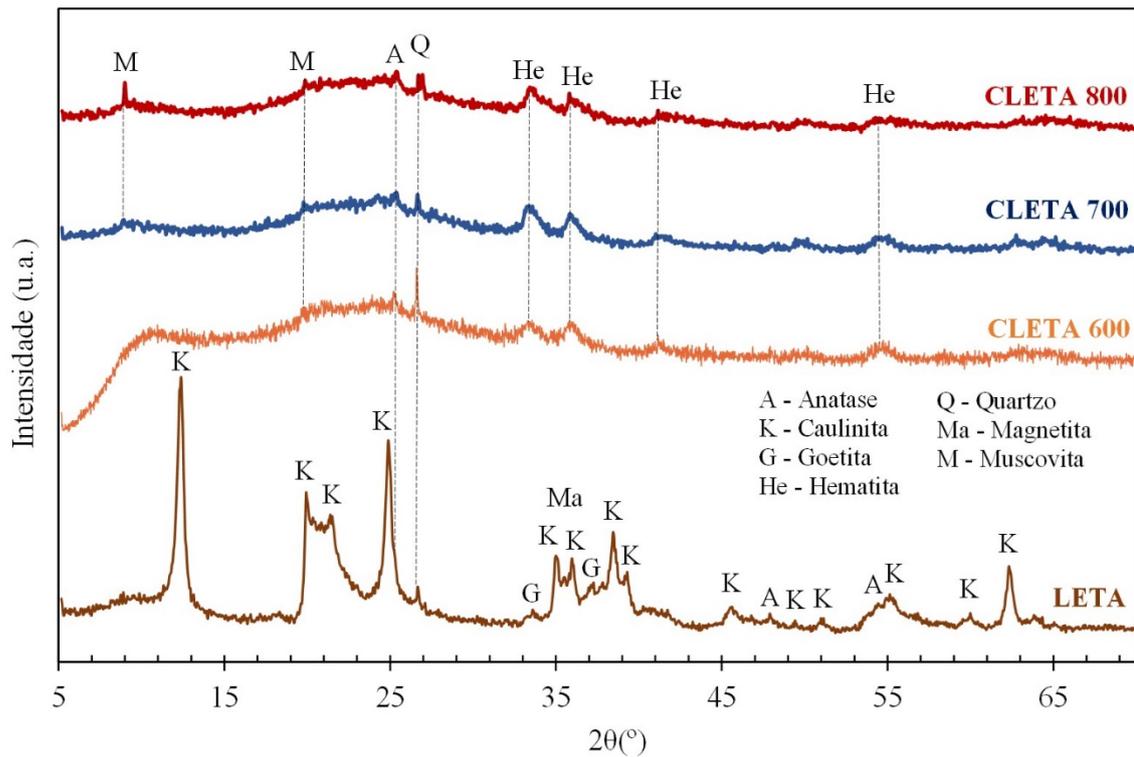
Do ponto de vista químico, o somatório SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> superior a 70% indica fortemente que as cinzas possuem um potencial pozolânico significativo. Em relação à presença de álcalis, o Na<sub>2</sub>O não foi detectado, e os valores de K<sub>2</sub>O apresentam quantidade inferiores a 0,5%. É importante ressaltar que a quantidade desses óxidos é um indicador relevante da qualidade da pozolana (AGRA ET AL, 2023).

Embora a técnica de FRX forneça dados relevantes sobre a composição elementar do lodo de tratamento de água, seu uso pode ser complementado por outras metodologias, assim como foi feito utilizando o MEV/EDS. Essa abordagem adicional permite uma análise mais detalhada da matéria orgânica presente no lodo e sua relação com as variações físico-químicas em meio aquoso (BRIDGEMAN ET AL., 2013).

#### 4.1.3 Análise mineralógica

A Figura 21 apresenta os difratogramas de raios-X do lodo de estação de tratamento de água e de seus derivados calcinados (CLETA) a 600, 700 e 800°C, destacando as transformações mineralógicas ocorridas durante a calcinação.

Figura 21 - Difratogramas das amostras de lodo in natura e calcinadas a 600, 700 e 800°C.



Fonte: O autor (2025)

A caulinita (K), predominante no LETA, desaparece completamente nas amostras calcinadas (CLETA 600, 700 e 800), devido à desidroxilação que leva à formação de uma fase amorfa denominada metacaulinita (Azizi et al., 2024; Xue et al., 2023). Já a goetita (G), também presente no LETA, sofre decomposição térmica direta em hematita com o aumento da temperatura (Song; JIA; Peng, 2014). Também foi identificada a presença de magnetita (Ma), possivelmente formada por processos redutores ocorridos durante o tratamento do lodo ou pela decomposição de minerais de ferro em condições específicas de baixa oxigenação. Com a calcinação, a magnetita não é detectada nas amostras calcinadas, pois é completamente convertida em hematita (He), uma fase mais estável em altas temperaturas, observada nos lodos calcinados (Yu et al., 2022).

A anatase (A) foi detectada em todas as amostras, corroborada pelos teores de  $\text{TiO}_2$  identificados no FRX (1,38% no LETA, 1,73% no CLETA600 e valores menores em CLETA700 e CLETA800). A presença da anatase em todas as amostras, mesmo após calcinação, reflete sua alta estabilidade térmica, pois esta fase do  $\text{TiO}_2$  é capaz de resistir a temperaturas elevadas sem sofrer transformações significativas dentro do intervalo analisado (Acosta et al., 2023).

Além da anatase, minerais como muscovita (M) e quartzo (Q) demonstraram alta estabilidade térmica. A muscovita, um silicato de alumínio e potássio, esteve presente em todas as amostras, mesmo após a calcinação a 800°C. No material *in natura*, seus picos na difração eram pouco evidentes, provavelmente devido à sobreposição de picos de outros minerais, como a caulinita, e à presença de matéria orgânica. Após a calcinação, a desidroxilação da caulinita e a eliminação da matéria orgânica favoreceram uma melhor definição dos picos da muscovita. O quartzo (Q) também manteve sua estrutura inalterada ao longo do processo térmico, evidenciando sua alta resistência ao calor. Essa estabilidade, combinada com a maior nitidez das fases minerais após a calcinação, destaca o potencial desses materiais para aplicações em condições de altas temperaturas.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL DE REFERÊNCIA

Como abordado no capítulo anterior, o concreto permeável foi sendo desenvolvido com base em traços já desenvolvidos na literatura, variando a relação a/c, a fim de otimização e confirmação do comportamento do concreto produzido com os materiais locais coletados e beneficiados na pesquisa. Na sequência da análise foram desenvolvidas algumas variações no método de adensamento. A seguir serão apresentados e discutidos os desempenhos mecânicos dos concretos produzidos com as variações de números de golpes de adensamento que variou entre 3, 5, 7 e 10 golpes. A tabela 7 apresenta os valores de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos produzidos no seu estado endurecido, conforme a ABNT NBR 9778:2009.

Tabela 7 – Valores de algumas propriedades mecânicas de concretos adensados em 3, 5, 7 e 10 golpes (ABNT NBR 9778:2009).

<b>Número de golpes</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Índice de vazios</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
3 golpes	4,86	13,16	2,03
5 golpes	4,91	12,62	2,07
7 golpes	4,93	12,07	2,15
10 golpes	5,05	11,54	2,19

Fonte: O autor (2025)

Os valores de absorção indicam uma leve variação conforme o número de golpes aplicados na compactação do concreto permeável. Observa-se um aumento gradual da absorção de água à medida que a compactação se intensifica, indo de 4,86% (3 golpes) para 5,05% (10 golpes). Esse comportamento pode estar relacionado à redistribuição dos poros dentro da estrutura do concreto, onde uma compactação mais elevada pode levar à formação de poros menores, mas com maior conectividade superficial, facilitando a entrada de água. No entanto, essa variação não é expressiva, indicando que a absorção não é um fator crítico na escolha do número ideal de golpes, pois a diferença entre os valores máximos e mínimos é relativamente pequena.

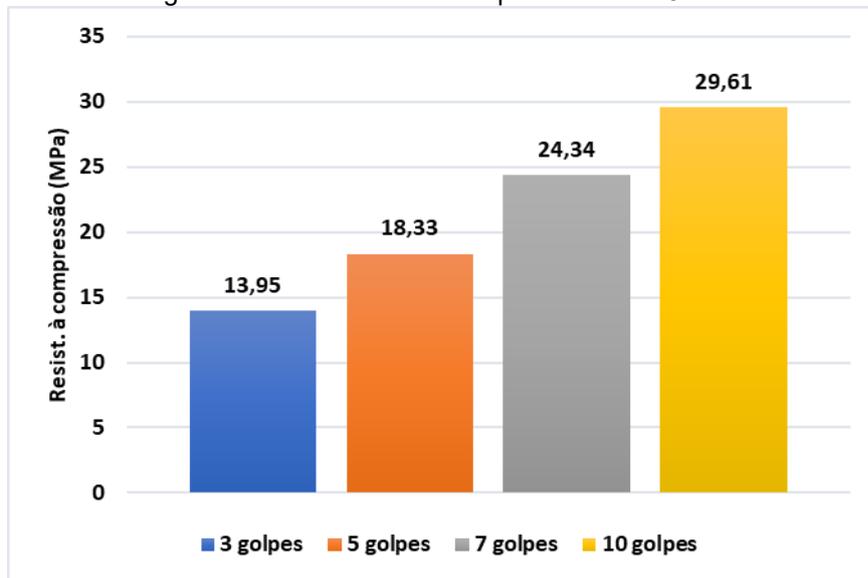
O índice de vazios, por sua vez, apresenta uma tendência de redução com o aumento da compactação, passando de 13,16% (3 golpes) para 11,54% (10 golpes). Esse comportamento confirma que um maior número de golpes resulta em uma matriz mais densa, com menor volume de espaços vazios internos. Essa redução na porosidade pode impactar diretamente na permeabilidade do material, tornando-o menos permeável à passagem de água, conforme observado nos ensaios de permeabilidade. Para um concreto permeável, esse equilíbrio é essencial, pois uma compactação excessiva pode comprometer sua função drenante, enquanto uma compactação insuficiente pode comprometer a resistência mecânica.

A massa específica aumenta proporcionalmente ao número de golpes, variando de 2,03 g/cm<sup>3</sup> (3 golpes) para 2,19 g/cm<sup>3</sup> (10 golpes). Esse aumento ocorre devido à maior densificação do material à medida que a energia de compactação é incrementada, reduzindo os espaços vazios e promovendo um arranjo mais compacto dos agregados. Esse fator está diretamente associado à resistência à compressão, uma vez que um concreto mais denso tende a apresentar maior capacidade de suportar cargas. Assim, a escolha do número ideal de golpes deve levar em consideração a relação entre resistência mecânica e permeabilidade, garantindo um desempenho equilibrado entre essas propriedades.

Segundo Zhang et al. (2024) embora a maior porosidade possa melhorar a drenagem e reduzir o peso, ela pode comprometer a resistência e a durabilidade se não for tratada com cuidado. Assim, alcançar um equilíbrio ideal entre massa específica e índice de vazios é essencial para aplicações eficazes de concreto permeável.

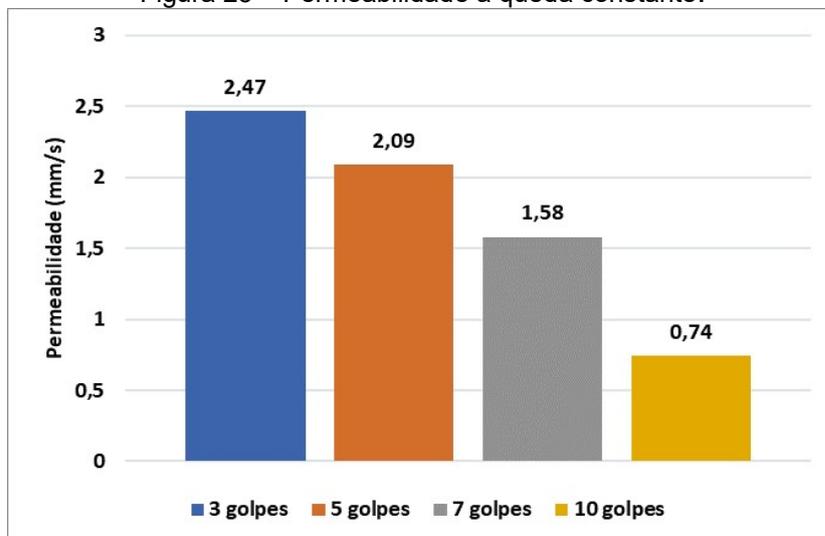
As figuras 22 a 24 ilustram respectivamente, os valores de resistência à compressão, permeabilidade à queda constante e a permeabilidade à queda variável. Essas análises permitem compreender o comportamento dos materiais em diferentes ensaios, além de correlacionar os resultados dessas propriedades obtidas por um método de adensamento e de medição de permeabilidade desenvolvidos neste estudo. De acordo com a ACI (2010) a resistência média à compressão após 28 dias de concretos permeáveis varia de 3,5 a 28,0 MPa, e o coeficiente de permeabilidade apresenta variação entre 0,2 e 5,4 mm/s.

Figura 22 - Resistência à compressão aos 28 dias.



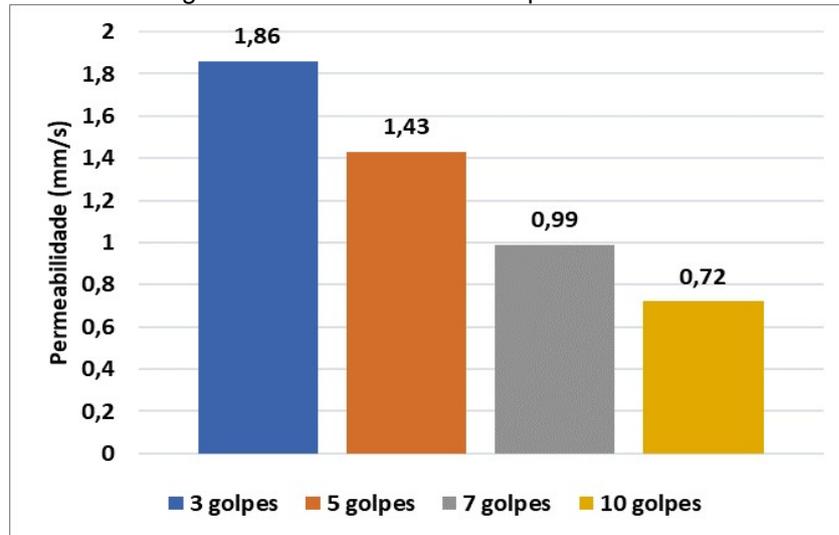
Fonte: O autor (2025)

Figura 23 – Permeabilidade à queda constante.



Fonte: O autor (2025)

Figura 24 – Permeabilidade à queda variável.



Fonte: O autor (2025)

Com base nos gráficos apresentados, observa-se que a resistência à compressão aos 28 dias aumenta conforme o número de golpes aplicados, atingindo seu maior valor com 10 golpes. Esse comportamento indica que uma compactação mais intensa favorece a densificação do material, reduzindo a porosidade e conferindo maior resistência mecânica. A variação entre os valores evidencia a relação direta entre a energia de compactação e a resistência à compressão, um fator crucial para a estabilidade estrutural de solos e concretos compactados.

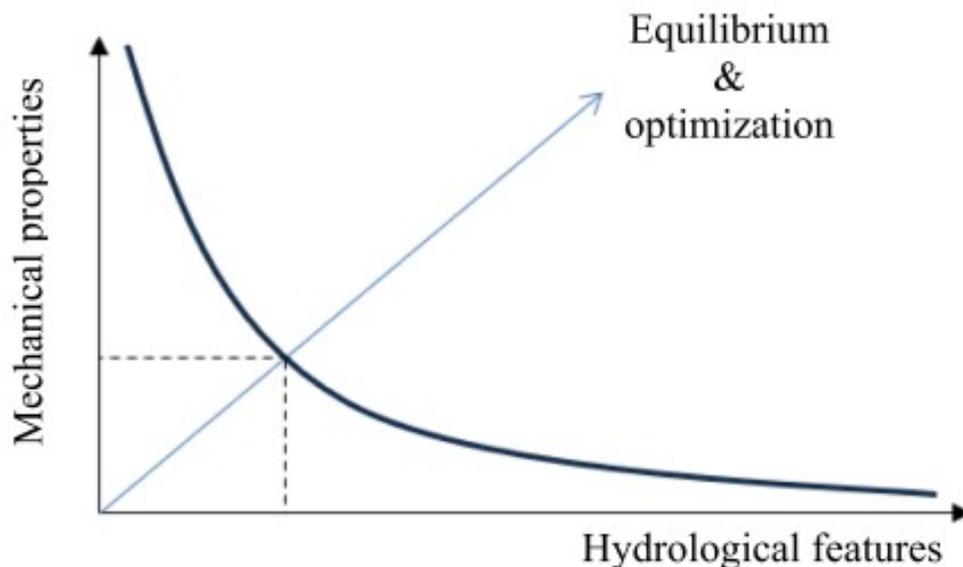
No tocante a permeabilidade à queda constante, nota-se que os valores diminuem conforme o número de golpes aumenta, com uma redução significativa para 10 golpes. Esse resultado sugere que a compactação reduz a interconectividade dos vazios, dificultando a passagem de água pelo material. A redução da permeabilidade em compactações mais elevadas é um aspecto positivo para aplicações que exigem baixa infiltração de água, como camadas de base e sub-base de pavimentos, onde a permeabilidade excessiva pode comprometer a durabilidade da estrutura, porém não é satisfatória para a primeira camada de revestimento de pavimentos permeáveis.

Os valores de permeabilidade à queda variável, mostra uma tendência semelhante à da queda constante, onde o aumento da compactação reduz a permeabilidade. No entanto, a diferença entre os valores é menos acentuada, sugerindo que a influência da compactação é mais expressiva no regime de fluxo

constante do que no regime variável, possivelmente devido à maior pressão exercida sobre os poros, forçando a passagem da água por caminhos mais restritos. No ensaio de carga variável, por outro lado, a redução da carga ao longo do tempo pode fazer com que a permeabilidade seja menos afetada pelas variações na estrutura dos poros causadas pela compactação.

Dado o exposto, como esperado, tem-se a resistência e a permeabilidade como duas grandezas inversamente proporcionais nos concretos produzidos. Embora sejam estabelecidos fatores para otimizar o concreto permeável, também é importante considerar as compensações entre resistência à compressão e permeabilidade, pois o aprimoramento de um pode comprometer o outro em certos cenários (Qu & Hu, 2024). De acordo com Adresi et al. (2023) as propriedades do concreto permeável estão intrinsecamente ligadas e são interdependentes. É somente por meio dessa interdependência que se pode alcançar uma mistura otimizada, que seja ideal tanto do ponto de vista hidráulico quanto mecânico. A figura 25 esquematiza essa análise.

. Figura 25 – A relação entre resistência à compressão e permeabilidade.



Fonte: Adresi et al. (2023)

A escolha do concreto permeável foi baseada na obtenção desse equilíbrio entre as propriedades hidráulicas e mecânicas, garantindo um desempenho adequado para a aplicação desejada. Dado o critério mínimo de permeabilidade no valor de 1 mm/s, assegurando que o material mantivesse a capacidade de drenagem

necessária, além de atentar-se a esse critério, tanto para a permeabilidade a carga constante, quanto a carga variável.

Observa-se que as misturas de 3 e 5 golpes atendem a esses pré-requisitos e a mistura com 7 golpes atendeu somente a permeabilidade a carga constante. Dentre as misturas que atenderam a esse requisito, optou-se por aquela que apresentou a maior resistência à compressão, garantindo maior durabilidade e estabilidade estrutural, optando assim pelo concreto permeável adensado com 5 golpes. Vale lembrar que o concreto produzido com 7 golpes obteve um resultado mecânico superior ao de 5 golpes e não atingiu a permeabilidade mínima a carga variável por 0,01 mm/s, mas dentro do que se explanou sobre valores equilibrados de propriedades mecânicas e hidráulicas, o concreto permeável produzido com 5 golpes atingiu valores de permeabilidade significativamente maiores. Essa abordagem permitiu selecionar uma configuração de um método de adensamento otimizada, que concilia a eficiência no escoamento da água com a resistência mecânica adequada, atendendo às exigências tanto de desempenho hidráulico quanto de integridade estrutural.

Após analisar os resultados das propriedades mecânicas obtidas pelas variações do método de adensamento e a confirmação de normalidade da distribuição dos valores obtidos, foi feita uma correlação de Pearson para verificar a existência de relações lineares entre elas, considerando a eficácia dos procedimentos criados neste estudo (método de medição de permeabilidade e método de adensamento de um concreto permeável). A figura 26 traz a matriz de correlações de Pearson quando aplicado para cada duas propriedades distintas.

Figura 26 – Matriz de correlações de Pearson para as propriedades físicas do concreto permeável.

Matriz de Correlações		M. ESPECÍFICA	ABSORÇÃO	I-VAZIOS	RESIST.	PERM. CTE	PERM. VAR
M. ESPECÍFICA	R de Pearson	—					
	gl	—					
	p-value	—					
ABSORÇÃO	R de Pearson	0.906	—				
	gl	2	—				
	p-value	0.094	—				
I-VAZIOS	R de Pearson	-0.991**	-0.943	—			
	gl	2	2	—			
	p-value	0.009	0.057	—			
RESIST.	R de Pearson	0.995**	0.944	-0.998**	—		
	gl	2	2	2	—		
	p-value	0.005	0.056	0.002	—		
PERM. CTE	R de Pearson	-0.969*	-0.981*	0.983*	-0.987*	—	
	gl	2	2	2	2	—	
	p-value	0.031	0.019	0.017	0.013	—	
PERM. VAR	R de Pearson	-0.991**	-0.908	0.995**	-0.992**	0.960*	—
	gl	2	2	2	2	2	—
	p-value	0.009	0.092	0.005	0.008	0.040	—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Fonte: O autor (2025)

A massa específica apresenta uma forte correlação positiva com a resistência à compressão ( $r = 0,995$ ,  $p < 0,01$ ), indicando que concretos mais densos tendem a ser mais resistentes. Por outro lado, a correlação negativa entre massa específica e índice de vazios ( $r = -0,991$ ,  $p < 0,01$ ) sugere que uma maior densidade resulta em menor porosidade, o que é esperado, pois a compactação reduz os espaços vazios no material. A absorção, apesar de ter uma correlação forte com a massa específica ( $r = 0,906$ ), não foi estatisticamente significativa ( $p = 0,094$ ), o que indica que a relação pode não ser tão determinante no comportamento do material.

O índice de vazios apresentou forte correlação negativa com a resistência à compressão ( $r = -0,998$ ,  $p < 0,01$ ), reforçando que uma menor porosidade favorece o aumento da resistência do concreto. Além disso, houve correlação positiva significativa entre o índice de vazios e a permeabilidade à queda constante ( $r = 0,983$ ,  $p < 0,05$ ), demonstrando que quanto maior a porosidade, maior a capacidade de escoamento de água pelo material. A mesma tendência foi observada para a permeabilidade à queda variável ( $r = 0,995$ ,  $p < 0,01$ ), evidenciando que a estrutura interna do concreto tem papel determinante no controle do fluxo de água.

As permeabilidades à queda constante e variável mostraram forte correlação negativa com a resistência à compressão ( $r = -0,987$  e  $r = -0,992$ , respectivamente, ambas com  $p < 0,01$ ), indicando que concretos mais resistentes tendem a ser menos permeáveis. Esse resultado reforça o desafio de equilibrar resistência e

permeabilidade ao otimizar a compactação do concreto permeável. Além disso, a correlação entre as duas permeabilidades ( $r = 0,960$ ,  $p < 0,05$ ) sugere que ambas as metodologias de ensaio fornecem resultados coerentes e alinhados.

#### 4.3 ANÁLISE MECÂNICA DO CONCRETO PERMEÁVEL COM A COLOCAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Foram produzidos concretos com 5, 10 e 15% de substituição ao cimento usando o LETA *in natura*, CLETA600, CLETA700 e CLETA800. Os resultados referentes aos ensaios de desempenho mecânico e hidráulico serão apresentados e discutidos a seguir.

##### 4.3.1 Absorção, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água, massa específica e índice de vazios auxiliam na caracterização do desempenho mecânico. Esses ensaios são essenciais para avaliar o impacto da adição de lodo na estrutura do concreto, permitindo compreender suas propriedades físicas e sua adequação para aplicações que demandam controle da porosidade e permeabilidade. A tabela 8 apresenta os resultados dos concretos produzidos no seu estado endurecido.

Tabela 8 – Valores de absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos com lodo *in natura* e calcinados (ABNT NBR 9778:2009).

Corpo de prova	Absorção (%)	Índice de vazios	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
IN NAT-5	5,17	12,63	2,14
IN NAT-10	3,68	8,51	2,23
IN NAT-15	5,00	11,26	2,15
CLETA600-5	5,03	11,33	2,14
CLETA600-10	5,44	13,31	2,06
CLETA600-15	6,59	14,30	2,01
CLETA700-5	5,01	11,53	2,19
CLETA700-10	6,47	14,49	2,02
CLETA700-15	6,67	14,88	1,97
CLETA800-5	4,92	11,4	2,26
CLETA800-10	6,65	14,45	1,99
CLETA800-15	7,65	16,71	1,90

Fonte: O autor (2025)

A análise dos valores de absorção, índice de vazios e massa específica revela diferenças significativas entre os concretos com lodo in natura e aqueles calcinados em diferentes temperaturas. A absorção de água apresenta uma tendência de aumento conforme a temperatura de calcinação do lodo se eleva. O IN NAT-5, que contém 5% de lodo in natura, apresentou a maior absorção deste grupo com 5,17%. Já o CLETA600-15, com 15% de lodo calcinado a 600°C, registrou o maior valor de absorção para este grupo com 6,59%. À medida que a temperatura de calcinação aumenta para 700°C e 800°C, observa-se um crescimento ainda maior na absorção, com valores atingindo 6,67% e 7,65%, respectivamente. Esse comportamento sugere que o processo de calcinação gera uma microestrutura mais porosa, aumentando a capacidade de retenção de água no concreto.

O índice de vazios segue uma tendência semelhante à da absorção, refletindo a influência da temperatura na formação de espaços interconectados dentro da matriz cimentícia. O IN NAT-5 apresentou um índice de 12,63%, enquanto o IN NAT-10 teve uma redução significativa para 8,51%, indicando que o aumento da quantidade de lodo in natura pode ter promovido uma melhor compactação da mistura. No entanto, nos concretos com lodo calcinado, os índices de vazios aumentam progressivamente com a elevação da temperatura de calcinação. O CLETA600-15 registrou 14,30%, enquanto o CLETA800-15 alcançou 16,71%, evidenciando que temperaturas mais elevadas podem intensificar a formação de poros na estrutura do concreto, o que pode comprometer sua resistência mecânica a partir de 15% de substituição. Um maior conteúdo de vazios pode levar ao aumento da absorção de água, impactando negativamente a durabilidade e o desempenho mecânico (KINA, 2023).

A massa específica apresenta uma relação inversa com o índice de vazios, diminuindo conforme a absorção e a porosidade aumentam. O IN NAT-5 registrou 2,14 g/cm<sup>3</sup>, enquanto o IN NAT-10 teve um leve aumento para 2,23 g/cm<sup>3</sup>, possivelmente devido a uma melhor compactação. Entretanto, ao aumentar para 15% de substituição, o IN NAT-15 apresenta uma redução na massa específica, o que gera uma compactação e melhor densidade ótima deste composto cimentício aos 10% de substituição, o que aumentará sua resistência à compressão e reduzirá a permeabilidade.

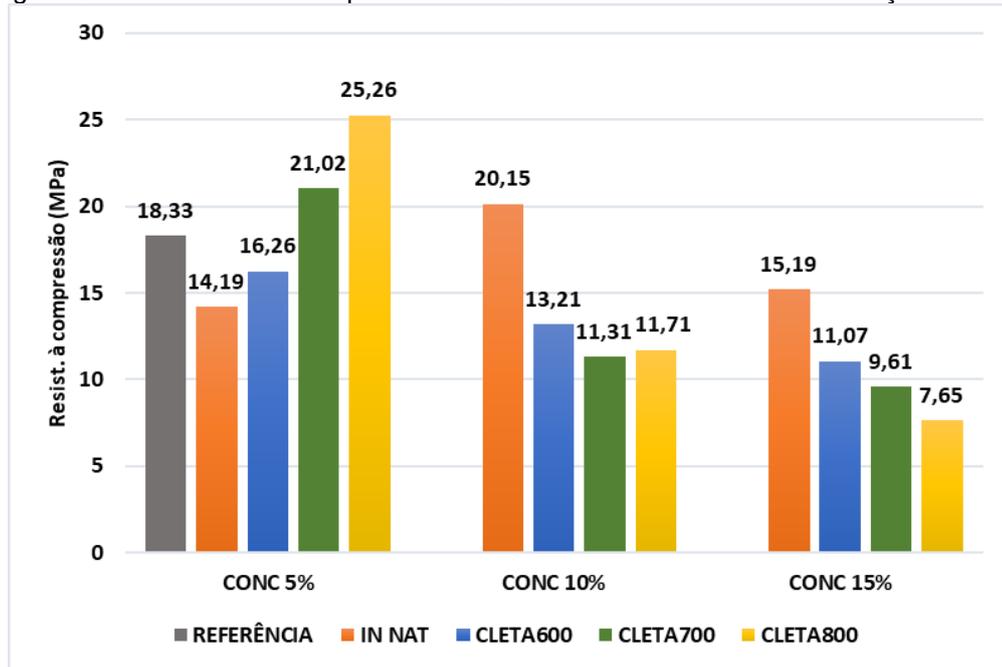
Já nos concretos com lodo calcinado, os valores diminuem progressivamente, com o CLETA600-15 atingindo 2,01 g/cm<sup>3</sup>, o CLETA700-15 reduzindo para 1,97

g/cm<sup>3</sup> e o CLETA800-15 alcançando 1,90 g/cm<sup>3</sup>. Essa queda pode estar relacionada à formação de partículas mais leves e porosas devido ao processo de calcinação, impactando a densidade global da matriz cimentícia. Os resultados indicam que a substituição parcial do cimento por lodo de ETA, especialmente na forma calcinada, modifica significativamente as propriedades físicas do concreto. O aumento da porosidade e da absorção pode comprometer a durabilidade do material. A escolha da temperatura de calcinação deve ser criteriosa, pois temperaturas mais elevadas podem aumentar excessivamente a porosidade, reduzindo a massa específica e, possivelmente, a resistência do concreto, ao mesmo tempo que aumentará o coeficiente hidráulico do material cimentício.

#### **4.3.2 Resistência à compressão, permeabilidade à queda constante e à queda variável**

A resistência à compressão foi determinada conforme a NBR 5739:2018, utilizando corpos de prova cilíndricos submetidos a carregamento axial até a ruptura. A permeabilidade à queda constante foi avaliada por meio da aplicação de um fluxo contínuo de água sob uma carga hidráulica constante, determinando a taxa de escoamento do fluido através da matriz porosa do concreto. Já a permeabilidade à queda variável foi obtida monitorando-se a diminuição progressiva do nível de água ao longo do tempo. Ambos os testes de permeabilidade foram realizados no sistema de medição de permeabilidade desenvolvido neste estudo. A figura 27 apresenta os resultados de resistência à compressão.

Figura 27 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com inserção de lodo.



Fonte: O autor (2025)

Os valores das resistências dos concretos foram subdivididos por porcentagem de substituição de resíduo a fim de analisar o comportamento dos diferentes concretos com a mesma porcentagem de substituição, além de verificar o comportamento com o aumento desta porcentagem. Os resultados de resistência à compressão dos concretos com LETA *in natura* analisados mostram uma variação significativa em função da porcentagem de substituição, pois obteve-se aos 10% a maior resistência neste grupo, nota-se que este patamar de substituição indica um valor ótimo de substituição de cimento pelo resíduo, superando até mesmo a resistência do concreto de referência. Algo semelhante foi observado por Kina (2024) em argamassas com resíduo de LETA, onde foi adicionado 10% do resíduo resultando em uma menor porosidade e uma microestrutura mais densa, aumentando a resistência.

Para os concretos com lodo calcinado, à medida que se aumentou a porcentagem de substituição a resistência decresceu. Para os concretos com 10% de lodo, a resistência à compressão apresentou uma queda mais acentuada, o concreto com lodo calcinado a 600°C reduziu para 13,21 MPa e os concretos a 700°C e 800°C ficaram próximos, com 11,31 MPa e 11,71 MPa, respectivamente. Esse comportamento pode indicar que, apesar do lodo calcinado apresentar propriedades pozolânicas, a substituição de 10% já impacta negativamente a

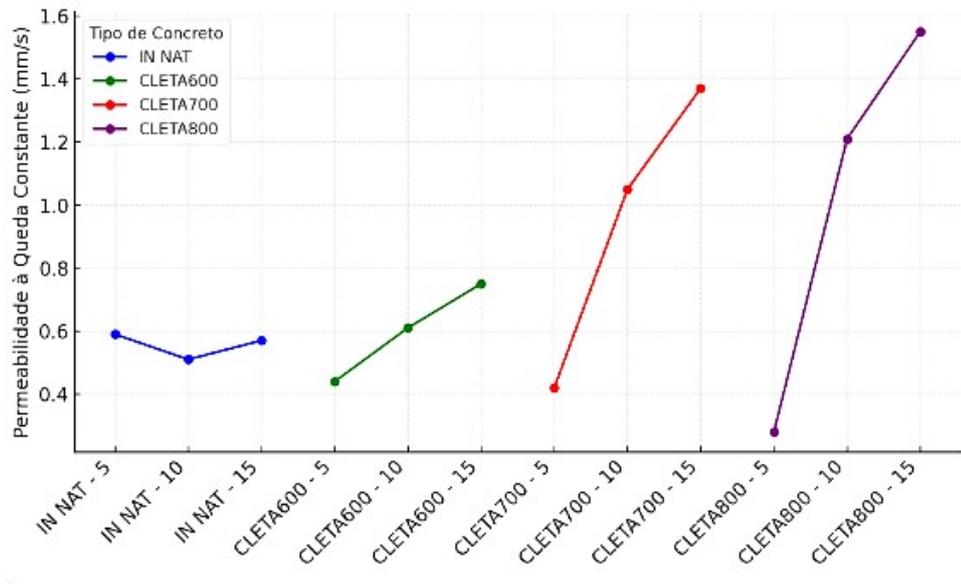
formação da matriz do concreto, reduzindo a coesão e a resistência mecânica. Além disso, maiores índices de vazios dos concretos com lodo calcinado podem ter influenciado essa redução, uma vez que a presença de vazios compromete a resistência à compressão.

Nos concretos com 15% de lodo, a resistência diminuiu ainda mais, reforçando a influência do teor de substituição na perda de desempenho mecânico. O concreto com lodo in natura apresentou 15,19 MPa, enquanto os concretos calcinados apresentaram reduções expressivas: 11,07 MPa (600°C), 9,61 MPa (700°C) e 7,65 MPa (800°C). Esse comportamento sugere que a substituição de 15% de cimento por lodo pode ser excessiva, comprometendo a integridade estrutural do material.

Uma outra abordagem para analisar o desempenho dos concretos com lodo calcinado é considerar a relação água/cimento de 0,30, comum em concretos permeáveis, em conjunto com o fato de que o lodo possui uma elevada área de superfície específica. Esse aspecto influencia diretamente a hidratação do cimento e a dispersão das partículas do lodo dentro da matriz cimentícia, impactando a resistência à compressão e a porosidade do concreto.

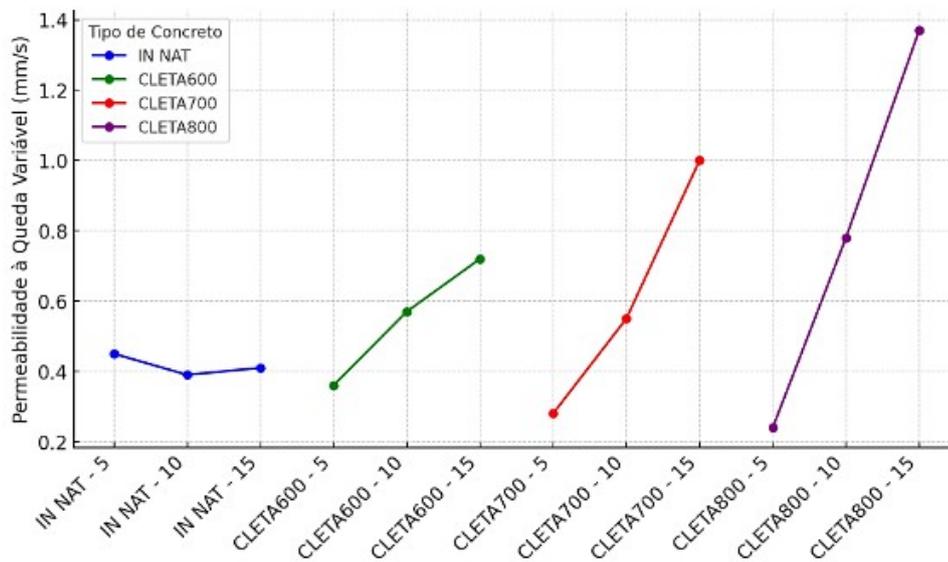
Nos concretos com 5% de lodo calcinado, a resistência à compressão mostrou um desempenho satisfatório, com valores próximos ao concreto de referência e, em alguns casos, até superiores. Isso pode indicar que, para um teor reduzido de substituição, o lodo calcinado consegue atuar como um material pozolânico reativo, promovendo uma boa compactação e contribuindo para a resistência mecânica. Entretanto, à medida que o teor de lodo calcinado aumenta, observa-se uma queda significativa na resistência, especialmente nos concretos com 10% e 15% de lodo calcinado. Essa redução pode ser atribuída ao aumento da demanda de água gerada pela elevada área de superfície específica do lodo, que tende a adsorver parte da água disponível, resultando em um processo de hidratação incompleto, comprometendo a formação da matriz cimentícia e reduzindo a resistência final do concreto. As figuras 28 e 29 ilustram respectivamente, os valores de permeabilidade à queda constante e a permeabilidade à queda variável para os concretos produzidos com a colocação do resíduo em estudo.

Figura 28 – Permeabilidade à queda constante dos concretos com inserção de lodo



Fonte: O autor (2025)

Figura 29 – Permeabilidade à queda variável dos concretos com inserção de lodo



Fonte: O autor (2025)

Os resultados de permeabilidade à queda constante e variável indicam um aumento progressivo da permeabilidade conforme cresce o teor de lodo calcinado e a temperatura de calcinação. O concreto de referência e aqueles com lodo *in natura* apresentaram os menores valores de permeabilidade, sugerindo que a matriz cimentícia manteve uma estrutura mais compacta e menos permeável. À medida que o lodo calcinado foi incorporado, os valores aumentaram, sendo mais expressivos para os concretos com 15% de substituição e para aqueles calcinados a

700°C e 800°C, indicando que a transformação térmica do lodo impacta diretamente na porosidade do material.

A permeabilidade à queda constante mostrou um crescimento acentuado para os concretos com lodo calcinado, especialmente a 700°C e 800°C. O concreto CLETA700-15 atingiu 1,37 mm/s, enquanto o CLETA800-15 apresentou 1,55 mm/s, os maiores valores entre todas as amostras. Esse comportamento sugere que a estrutura interna do concreto sofreu alterações significativas devido à inclusão do lodo calcinado, possivelmente devido à elevada área de superfície do material e à maior dificuldade na dispersão das partículas dentro da matriz cimentícia.

A permeabilidade à queda variável seguiu um comportamento semelhante, porém com valores ligeiramente menores, já que a carga hidráulica aplicada diminuiu progressivamente ao longo do ensaio. O CLETA700-15 registrou 1,00 mm/s e o CLETA800-15 atingiu 1,37 mm/s, confirmando a tendência de aumento da permeabilidade com a elevação da temperatura de calcinação. Esse padrão reforça a hipótese de que temperaturas mais altas podem estar promovendo uma estrutura interna menos densa e com maior conectividade entre os poros, impactando diretamente a capacidade de escoamento da água. O fato de a permeabilidade à queda variável ser menor do que à queda constante também indica que a estrutura do concreto pode apresentar poros com variação na interconectividade, influenciando a taxa de fluxo sob diferentes condições de carga hidráulica.

De maneira geral, os resultados apontam para uma correlação direta entre o teor de lodo calcinado, a temperatura de calcinação e o aumento da permeabilidade do concreto. A alta permeabilidade pode ser benéfica para aplicações específicas, como pavimentos drenantes, mas pode comprometer a durabilidade do concreto em estruturas que exigem baixa permeabilidade e alta resistência mecânica.

Comparando os resultados com a ABNT NBR 16416:2015, que estabelece uma permeabilidade mínima de 1 mm/s para concretos permeáveis, verificou-se que os concretos CLETA700-15 e CLETA800-15 superaram esse limite em ambos os ensaios de permeabilidade. Na permeabilidade à queda constante, o concreto CLETA700-15 atingiu 1,37 mm/s, enquanto o CLETA800-15 alcançou 1,55 mm/s, ambos atendendo ao critério mínimo estabelecido pela norma. Isso indica que esses concretos possuem uma estrutura suficientemente porosa para permitir a drenagem da água, podendo ser considerados adequados para aplicações onde a

permeabilidade elevada seja um requisito, como pavimentos drenantes e sistemas de infiltração de água pluvial.

Da mesma forma, na permeabilidade à queda variável, o concreto CLETA700-15 apresentou 1,00 mm/s, e o CLETA800-15 atingiu 1,37 mm/s, também dentro dos parâmetros exigidos pela norma. Isso reforça que essas misturas possuem porosidade interconectada suficiente para garantir um fluxo adequado de água sob diferentes condições de carga hidráulica.

Portanto, os concretos CLETA700-15 e CLETA800-15 atendem aos requisitos da NBR 16416 para concretos permeáveis, demonstrando que a incorporação de 15% de lodo calcinado a 700°C ou 800°C pode ser uma alternativa viável para aplicações em infraestrutura drenante. No entanto, a elevada permeabilidade pode comprometer a resistência mecânica, exigindo um balanceamento entre permeabilidade, durabilidade e desempenho estrutural para garantir a viabilidade do material em diferentes aplicações.

A tabela 9 apresenta a conversão precisa dos coeficientes de permeabilidade obtidos nos ensaios (expressos em mm/s) para unidades de mm/h, a fim de viabilizar a comparação direta com as intensidades típicas de precipitação pluvial observadas em centros urbanos. Essa conversão é fundamental para a avaliação do desempenho hidráulico das misturas em condições reais de uso.

Tabela 9 – Valores de permeabilidade à queda constante e à queda variável convertidos para mm/h.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Queda constante (mm/s)</b>	<b>Queda constante (mm/h)</b>	<b>Queda variável (mm/s)</b>	<b>Queda variável (mm/h)</b>
IN NAT-5	0,59	2124	0,45	1620
IN NAT-10	0,51	1836	0,39	1404
IN NAT-15	0,57	2052	0,41	1476
CLETA600-5	0,44	1584	0,33	1188
CLETA600-10	0,61	2196	0,57	2052
CLETA600-15	0,78	2808	0,61	2196
CLETA700-5	0,42	1512	0,28	1008
CLETA700-10	1,05	3780	0,55	1980
CLETA700-15	1,37	4932	1,00	3600
CLETA800-5	0,28	1008	0,24	864
CLETA800-10	1,21	4356	0,78	2808
CLETA800-15	1,55	5580	1,37	4932

Fonte: O autor (2025)

Os resultados obtidos para a permeabilidade, expressos em mm/h, evidenciam que todas as misturas de concreto permeável avaliadas apresentam capacidade de infiltração significativamente superior às intensidades de precipitação típicas observadas em áreas urbanas. Mesmo os menores valores registrados, como o da mistura CLETA800-5 com 864 mm/h na condição de permeabilidade à carga variável, superam em mais de 7 vezes eventos extremos de precipitação ( $\geq 120$  mm/h), como os observados em episódios críticos no Brasil e no exterior. Essa margem de segurança hidráulica indica que, do ponto de vista da drenagem superficial, todas as misturas são adequadas ao enfrentamento de eventos pluviométricos severos.

Observa-se, no entanto, uma variação expressiva na magnitude da permeabilidade entre os diferentes traços, refletindo o impacto do teor de substituição de cimento pelo lodo em estudo. Misturas com maiores teores de substituição (CLETA700-15 e CLETA800-15) apresentaram valores máximos de até 5580 mm/h (queda constante), o que representa uma capacidade de infiltração até 93 vezes superior à referência de 60 mm/h adotada em diversos projetos urbanos. Esses valores demonstram que, embora o aumento do índice de vazios contribua positivamente para a permeabilidade, é necessário ponderar o potencial comprometimento das propriedades mecânicas, sobretudo quando a resistência à compressão é um requisito prioritário do projeto.

A partir dessa análise, é possível afirmar que o desempenho hidráulico das misturas testadas é mais do que satisfatório, permitindo a adoção de critérios de seleção baseados não apenas na permeabilidade, mas também em fatores como durabilidade, resistência estrutural e risco de colmatação ao longo do tempo.

Prosseguindo com a análise conjunta dos resultados de resistência à compressão e permeabilidade revela-se uma relação inversa entre essas propriedades, indicando que à medida que a permeabilidade aumenta, a resistência à compressão tende a diminuir. Esse comportamento é esperado, pois concretos com maior conectividade entre os poros apresentam uma estrutura menos densa, reduzindo sua capacidade de resistir a esforços mecânicos. Essa tendência é observada principalmente nos concretos com 15% de lodo calcinado a 700°C e 800°C (CLETA700-15 e CLETA800-15), que registraram os maiores valores de permeabilidade e, ao mesmo tempo, as menores resistências à compressão.

Os concretos CLETA700-15 e CLETA800-15, que atingiram permeabilidades superiores a 1 mm/s, conforme o requisito mínimo da NBR 16416:2015, apresentaram resistências à compressão de 9,61 MPa e 7,65 MPa, respectivamente. Esses valores são significativamente inferiores aos dos concretos com menores teores de lodo ou menores temperaturas de calcinação, como o CLETA600-5, que alcançou 16,26 MPa com uma permeabilidade bem inferior. Isso evidencia que o aumento da porosidade, promovido tanto pelo teor de lodo quanto pelo efeito da calcinação, compromete a integridade estrutural do concreto, tornando-o menos resistente a cargas mecânicas.

Por outro lado, os concretos que apresentaram os melhores desempenhos mecânicos (resistências superiores a 20 MPa) são aqueles com teores menores de lodo calcinado e temperaturas de calcinação mais moderadas. O CLETA700-5 e CLETA800-5, por exemplo, registraram 21,02 MPa e 25,26 MPa, respectivamente, com permeabilidades bem abaixo do limite normativo. Isso sugere que, em teores reduzidos, o lodo calcinado pode contribuir para o desenvolvimento de uma matriz cimentícia compacta e resistente, sem comprometer excessivamente a permeabilidade.

Em linhas gerais, os resultados confirmam que o teor de lodo e a temperatura de calcinação devem ser criteriosamente ajustados para encontrar um equilíbrio entre permeabilidade e resistência mecânica. Para aplicações estruturais, a alta resistência é um fator essencial, o que exige um controle rigoroso da porosidade. Por outro lado, em pavimentos drenantes ou sistemas de infiltração, a permeabilidade elevada pode ser desejável, mesmo com uma resistência reduzida. Assim, a escolha da mistura ideal deve considerar as exigências da aplicação, garantindo um desempenho otimizado de acordo com os critérios normativos e funcionais do concreto permeável.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi desenvolvido um método de adensamento para concretos permeáveis e um sistema de medição de permeabilidade. Também foram realizados diversos ensaios de caracterização do lodo de estação de tratamento de água, resíduo que fora utilizado como material cimentício suplementar. Após a obtenção do concreto permeável de referência, foi realizada a análise do desempenho mecânico das amostras produzidas. Dado o exposto, este capítulo apresentará a seguir tanto as conclusões obtidas com o desenvolvimento da dissertação, como também as sugestões para pesquisas futuras que se vinculam ao que foi estudado.

### 5.1.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos com as variações de golpes no adensamento do concreto permeável, as correlações entre os valores das propriedades físicas foram satisfatórias apresentando fatores de correlação de Pearson elevados, indicando assim a viabilidade prática de uso tanto do novo método de adensamento, como do método adaptado para medição de permeabilidade para concretos.

A resistência à compressão dos concretos reduziu conforme o teor de lodo aumentou, especialmente para os concretos com 15% de substituição, indicando que a adição excessiva de lodo pode comprometer a integridade mecânica do material. Os concretos com 5% de lodo calcinado a 700°C e 800°C (CLETA700-5 e CLETA800-5) apresentaram as maiores resistências à compressão, sugerindo que teores menores de lodo calcinado podem atuar como material pozolânico benéfico.

O aumento da temperatura de calcinação reduziu a resistência à compressão nos teores mais altos de lodo (10% e 15%), indicando que temperaturas elevadas podem modificar a estrutura do lodo, tornando-o menos eficaz na matriz cimentícia. Os concretos com 15% de lodo calcinado a 700°C e 800°C (CLETA700-15 e CLETA800-15) apresentaram as menores resistências (9,61 MPa e 7,65 MPa, respectivamente), confirmando que teores elevados de lodo podem comprometer o desempenho mecânico.

A permeabilidade dos concretos aumentou com a elevação do teor de lodo e da temperatura de calcinação, especialmente nos concretos com 15% de lodo calcinado. Os concretos CLETA700-15 e CLETA800-15 atingiram valores de permeabilidade acima de 1 mm/s, atendendo ao critério mínimo da NBR 16416:2015, o que os torna adequados para aplicações onde a drenagem da água seja um fator essencial.

A permeabilidade à queda variável foi ligeiramente menor do que a permeabilidade à queda constante, sugerindo que a estrutura interna do concreto apresenta poros com variação na interconectividade, influenciando o fluxo de água sob diferentes condições de carga hidráulica.

Existe uma relação inversa entre resistência à compressão e permeabilidade, indicando que concretos mais permeáveis tendem a ser menos resistentes devido ao aumento da porosidade da matriz cimentícia. Os concretos que superaram 20 MPa de resistência apresentaram permeabilidades menores, evidenciando que a compactação da matriz cimentícia favorece a resistência mecânica, mas reduz a capacidade drenante. Os concretos CLETA700-15 e CLETA800-15, que atingiram as maiores permeabilidades, apresentaram as menores resistências, reforçando que um aumento da porosidade compromete a integridade estrutural.

O uso de lodo calcinado influencia significativamente as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto, sendo necessário um equilíbrio entre teor de lodo, temperatura de calcinação e relação água/cimento.

Para aplicações estruturais, a adição de 5% de lodo calcinado a 700°C ou 800°C mostrou-se a mais eficiente, pois resultou em concretos com alta resistência à compressão e permeabilidade controlada. Já para aplicações drenantes ou de infiltração de água, os concretos com 15% de lodo calcinado a 700°C e 800°C são mais indicados, pois atendem ao critério mínimo de permeabilidade exigido pela NBR 16416, apesar da menor resistência mecânica.

A substituição do cimento por lodo de ETA apresenta potencial sustentável, reduzindo o impacto ambiental do descarte de resíduos e promovendo um uso mais eficiente dos materiais na construção civil. O lodo de ETA é um subproduto gerado em grandes volumes pelas estações de tratamento de água, e seu descarte inadequado pode causar impactos ambientais significativos, como assoreamento de rios, contaminação do solo e dificuldades no gerenciamento de aterros sanitários. A incorporação desse resíduo no concreto representa uma solução ambientalmente

responsável, pois reduz a quantidade de material descartado e, ao mesmo tempo, diminui a demanda por cimento Portland. O processo de calcinação do lodo pode potencializar suas propriedades pozolânicas, tornando-o um material reativo capaz de substituir parcialmente o cimento sem comprometer, em certos limites, as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto.

### **5.1.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Algumas direções podem ser exploradas em pesquisas futuras para aprofundar a compreensão sobre o uso do lodo de ETA em materiais cimentícios:

- Investigação de diferentes relações água/cimento para avaliar se um aumento desta propriedade pode melhorar a hidratação do ligante e minimizar os impactos da elevada área de superfície do lodo de ETA;
- Investigação do efeito da moagem do lodo calcinado para verificar se partículas mais finas poderiam melhorar a compactação e reduzir o aumento considerável da permeabilidade;
- Investigação da durabilidade do concreto permeável com adição de lodo de ETA, por meio de ensaios acelerados de degradação, como ciclos de molhagem/secagem, ataque por sulfatos e cloretos, e carbonatação, a fim de avaliar sua estabilidade em ambientes agressivos. Além disso, sugere-se a análise da toxicidade potencial do material, visando verificar a segurança ambiental do concreto em aplicações drenantes e sua conformidade com normas ambientais vigentes;
- Investigação do uso de outros materiais ligantes como sílica ativa, metacaulim ou cinza volante em combinação com o lodo calcinado, visando melhorar a compactação da matriz cimentícia e equilibrar a permeabilidade e resistência mecânica;
- Aplicação de métodos de inteligência artificial, aprendizado de máquina e simulações computacionais para prever o comportamento de concretos com o resíduo e otimizar suas propriedades sem a necessidade de múltiplos ensaios experimentais.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT, NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT, NBR 16416. **Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro [s. n.], 2015.
- ACI. **Pervious concrete** ACI 522R-06. 2006. 25 p.
- ACI 211.3. **Guide for selecting proportions for no-slump concrete**. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2002
- ACOSTA, M. F. ET AL. **Bottom up anatase monodisperse nanoparticles grown on sepiolite showing high thermal stability and optimal optical properties for self-cleaning applications**. Applied Clay Science, [s. l.], v. 246, p. 107189, 2023.
- AGRA, T.; M.; S. ET AL. **Characterizing and processing a kaolinite-rich water treatment sludge for use as high-reactivity pozzolan in cement manufacturing**. Applied Clay Science, [s. l.], v. 236, n. February, p. 106870, 2023.
- AGRA, T.; M.; S. **Avaliação da pozolanicidade da cinza de lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA)**. 2022. 82 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2022.
- ASTM. C1701/C1701M. **Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ADRESI, M; SHIRGIR, B; NAGHERZADEH, A. **Porous concrete pavement**, Road 30 (111) 83–96 (2022).
- ADRESI, M. ET AL. **A comprehensive review on pervious concrete**. Construction and Building Materials 407 (2023) 133308.
- AHMAD, T., AHMAD, K., ALAM, M., 2016. **Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept**. J. Clean. Prod. 124, 1-13.
- AHMAD, T., AHMAD, K., ALAM, M., 2018. **Investigating calcined filter backwash solids as supplementary cementitious material for recycling in construction practices**. Construct. Build. Mater. 175, 664-671.
- ALAICA, A.L. ET AL. **Propriedades mecânicas e permeabilidade de concretos**. 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-06: Pervious Concrete**. Farmington Hills, 2006

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) 522R-10. **Report on pervious concrete**. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2010

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. (2000). "Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial". **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 5(3), 21-28.

ARENAS, JORGE P., AND MALCOLM J. CROCKER. 2010, Recent Trends in Porous Sound-absorbing Materials. *Sound & vibration*, 44, 12-18.

ALVES, F. A. de O.; COSTA, A. R. **Técnicas compensatórias no controle de cheias urbanas**. In: CURSO Básico de Hidrologia Urbana. Núcleo Regional Centro-Oeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. Dep. Eng. Civil da Universidade Federal de Goiás, 2007. Cap. 5, p. 54-66.

AZIZI, K. ET AL. **Thermal Transformation of Kaolinite Clays: Analyzing Dehydroxylation and Amorphization for Improved Pozzolanic Performance**. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, [s. l.], v. 25, n. 19, 2024.

BABATUNDE, A., ZHAO, Y., 2007. **Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses**. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.* 37 (2), 129–164.

BALBO, J. T.; MARTINS, J. R. S.; CARGNIN, A. P.; RIBEIRO, H. L.; ESPOSITO, C. M.; SILVA, E. R. **Concreto colorido e permeável para ciclovias: estudo de dosagem laboratorial**. *Revista Concreto e Construções*, ed. 105, 2022.

BASTO, P.; E.; A. **Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland**. [s. l.], p. 1–100, 2018.

BAUER, L.A. F. **Materiais de construção**. Volume 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BELHAJ, D., ATHMOUNI, K., JERBI, B., KALLEL, M., AYADI, H., ZHOU, J.L., 2016. **Estrogenic compounds in Tunisian urban sewage treatment plant: occurrence, removal and ecotoxicological impact of sewage discharge and sludge disposal**. *Ecotoxicology* 25, 1849–1857.

BENLALLA, A., ELMOUSSAOUITI, M., DAHHOU, M., ASSAFI, M., 2015. **Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks**. *Appl. Clay Sci.* 118, 171-177.

BERENGIER, M. C., M. R. STINSON, G. A. DAIGLE, AND J. F. Hamet. 1997, **Porous Road Pavements: Acoustical Characterization and Propagation Effects**. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 155-162.

BHUTTA, M. A. R. *et al.* **Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate)**. Construction and Building Materials, v. 31, p. 67-73, jan. 2012.

BONTON, A., BOUCHARD, C., BARBEAU, B., JEDRZEJAK, S., 2012. **Comparative life cycle assessment of water treatment plants**. Desalination 284, 42–54.

BRIDGEMAN, J., BAKER, A., CARLIELL-MARQUET, C., & CARSTEAN, E. M. (2013). **Determination of changes in wastewater quality through a treatment works using fluorescence spectroscopy**. Environmental Technology, 34(23), 3069–3077. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.803131>

CARLS, B. **Coeficiente de permeabilidade, resistência mecânica e durabilidade de concreto permeável dosado por três diferentes métodos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, 109 p. Blumenau, 2018.

CHANDRAPPA, A.K.; BILIGIRI, K.P. **Pervious concrete as a sustainable pavement material** – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review, Constr. Build. Mater. 111 (2016) 262–274.

CHU, L., FWA, T. F., & TAN, K. H. (2017). **Laboratory Evaluation of Sound Absorption Characteristics of Pervious Concrete Pavement Materials**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2629), 91-103.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 488 f. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2006

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, C. P. **Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 5, p. 1151–1159, 2018

CROOKES, A. J., DRAKE, J. A., & GREEN, M. (2017). **Hydrologic and Quality Control Performance of Zero-Exfiltration Pervious Concrete Pavement in Ontario**. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 3(3), 06017001.

DINIZ, C.; SILVA, J. K.; MATIAS, A.; ESTOLANO, V.; MELO NETO, A. A. **Avaliação da resistência à compressão de misturas de concreto seco para pavimento intertravado com incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Ed.: 61, 2019.

EL-DIDAMONY, H., KHALIL, K.A., HEIKAL, M., 2014. **Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes**. HBRC J. 10, 73–81.

FERGUSON, B. K., **Porous pavements**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2000. 146 p p.

GASTALDINI, A.L.G., HENGEN, M.F., GASTALDINI, M.C.C., DO AMARAL, F.D., ANTOLINI, M.B., COLETTI, T., 2015. **The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition.** Construct. Build. Mater. 94, 513–520.

GEISSDOERFER, M. ET AL. **The Circular Economy – A new sustainability paradigm?** Journal of Cleaner Production, v. 143, p. 757–768, 2017.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. **Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 7, n. 3, p. 183-191, 1995.

GOMES, R.K., EDNA, P., SANTOS, D.B.G.D., MAURICIO, C., 2017. **Potential uses of waste sludge in concrete production.** Manage. Environ. Qual. 28 (6), 821–838.

HASELBACH L, BOYER M, KEVERN JT, AND SCHAEFER VR, 2011, **Cyclic Heat Island Impacts in Traditional versus Permeable Concrete Pavement Systems.** TRB 2011 Annual Meeting, Washington, D.C.

HASELBACH L., POOR, C., AND TILSON, J., 2014. **Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary Portland cement permeable concrete.** Construction and Building Materials, 53, 652-657.

HE, B. J. ET AL. **Beating the urban heat: Situation, background, impacts and the way forward in China,** Renewable and Sustainable Energy Reviews 161 (Jun. 2022), 112350.

HE, Z.-H. ET AL. **Utilization of manganese-rich sludge in concrete: Mechanical, nanoscale characteristics and leaching behavior.** Journal of Building Engineering, [s.l.], v. 70, 2023.

HERB WR, JANKE B, MOHSENI O, AND STEFAN HG, 2008. **Ground surface temperature simulation for different land covers.** Journal of Hydrology, 356, 327-343.

HOLMES, R. R., HART, M. L., & KEVERN, J. T. (2017). **Heavy metal removal capacity of individual components of permeable reactive concrete.** Journal of contaminant hydrology, 196, 52-61.

HÖLTZ, F. C., **Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR - RS, 2011.

HO H.L. ET AL., **Waste-based pervious concrete for climate-resilient pavements,** Materials 11 (6) (2018) 900, <https://doi.org/10.3390/ma11060900>.

IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A. **Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 115, p. 70–77, 2016.

KEELEY, J.; JARVIS, P.; JUDD, S.J. **Coagulant recovery from water treatment residuals: a review of applicable technologies**, *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.* 44 (24) (2014) 2675–2719.

KINA, C. (2024). **Sustainable binary/ternary blended mortars with recycled water treatment sludge using fly ash or blast slag: Characterization and environmental-economical impacts**. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32175-7>

KINA, C. (2023). **Sustainable cement-based materials blended with recycled water treatment sludge and other various waste products as binder: Characterization and environmental-economical impacts**. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3354159/v1>

KUMAR, K., KOZAK, J., HUNDAL, L., COX, A., ZHANG, H., & Granato, T. (2016). **In-situ infiltration performance of different permeable pavements in an employee used parking lot–A four-year study**. *Journal of environmental management*, 167, 8-14.

LEDERLE, R.; SHEPARD, T.; DE LA VEGA MEZA, V. **Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 244, 2020.

LI H., HARVEY JT, HOLLAND TJ, AND KAYHANIAN M. 2013. **The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management**. *Environmental Research Letters* 8, 015023.

LIU, Y.; ZHUGE, Y.; CHOW, C.W.K.; KEEGAN, A.; LI, D.; PHAM, P.N.; HUANG, J.; SIDDIQUE, R. **Properties and microstructure of concrete blocks incorporating drinking water treatment sludge exposed to early-age carbonation curing**. *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v. 261, 2020.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. **Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation**. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 24, n. 12, p. 2664-2671, 2010.

LING, Y.P., THAM, R.-H., LIM, S.-M., FAHIM, M., OOI, C.-H., KRISHNAN, P., MATSUMOTO, A., YEOH, F.-Y., 2017. **Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent**. *Appl. Clay Sci.* 143, 300-306.

LIU, Y., LI, T., AND PENG, H., 2018, **A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island**. *Science of the Total Environment*, 634, 1119-1125  
MARTINS, W. S. **Portland cement with partial replacement of ash from water treatment plant waste**. Master's Dissertation. Federal University of Pará. 2020.

MATSUO, Y.; MORINO, K.; IWATSUKI, E. **A study of porous concrete using electric arc furnace oxidizing slag aggregate**. Research Report of Aichi Institute of Technology, 2005, p. 8.

MAZZONETTO, C. Concreto Permeável. **Revista Infraestrutura Urbana**. ed.11, fev. 2012. Disponível em:<<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/artigo254488-1.aspx>>. Acesso em: 25 mai.2023

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MENARD, J.; CROVETTI, J. A. **Comparative analysis of field permeability testing of compacted hot-mix asphalt pavements: using air and water permeameters**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1946, n. 1, p. 147–156, jan. 2006.

MULLIGAN, A.N. **Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems**. University Orlando, Florida. 145p. 2005.

NEAMITHA, M.; SUPRAJA, T. **Influence of Water Cement Ratio and the Size of Aggregate on The Properties Of Pervious Concrete**, Int. Ref. J. Eng. Sci 6 (2017) 9–16.

NEITHALATH, N. 2006. **Development and Characterization of Acoustically Efficient Cementitious Materials**. PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN.

NEITHALATH, N; BENTZ, D.P; SUMANASOORIYA, M.S. **Predicting the permeability of pervious concrete**, Concrete International 32 (5) (2010) 35–40

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. **Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance**. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 11, p. 2074-2085, 2006

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEPTUNE, A. & PUTMAN, B. *et al.* Effect of aggregate size and gradation on pervious concrete mixtures. **ACI materials journal**, v. 107, p. 625-631, dez. 2010.

NI, T. ET AL. **Interface reinforcement and a new characterization method for pore structure of pervious concrete**, Construction and Building Materials 267 (Jan. 2021), 121052

OHBUCHI, A., SAKAMOTO, J., KITANO, M., & NAKAMURA, T. (2008). **X-ray fluorescence analysis of sludge ash from sewage disposal plant**. *X-Ray Spectrometry*, 37(5), 544–550. <https://doi.org/10.1002/XRS.1085>

OSPINA, C. M. M, ERAZO, C. H. B. Resistencia mecánica y condiciones de obra del concreto **poroso en los pavimentos según El tipo de granulometría**. Medellín, 2007.

OYEBISI, S., EDE, A., OLUTOGE, F., & OGBIYE, S. (2020). **Avaliação dos índices de reatividade e das propriedades de durabilidade do concreto geopolimérico à base de escória incorporando cinza de sabugo de milho.** *Construction and Building Materials*, 258, 1–15.

QIN, Y., & HILLER, J. E. 2016. **Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete.** *Construction and Building Materials*, 111, 77-84.

QU, Z., & HU, X. (2024). **Experimental Study on Mechanics and Permeability of Fly Ash Permeable Concrete.** *Highlights in Science Engineering and Technology*, 96, 198–203. <https://doi.org/10.54097/ge6fn379>

RAMKRISHNAN, R. ET AL. **Effect of mineral admixtures on pervious concrete,** *Mater. Today: Proc.* 5 (11) (2018) 24014–24023

RAMOS, G. M. **Análise das propriedades do concreto permeável com adição de agregado miúdo e resíduo (cinza de madeira).** Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

Reddy, S.S.M.; Ramakrishna, B. **Fracture and Strength Studies on Concrete With Different Types of Coarse, Aggregates.** (2017).

SALES, A., DE SOUZA, F.R., 2009. **Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble.** *Construct. Build. Mater.* 23 (6), 2362-2370.

SALES, A., DE SOUZA, F.R., ALMEIDA, F. DO C.R., 2011. **Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust.** *Construct. Build. Mater.* 25, 2793–2798

SANDOVAL, G. F. B. ET AL. **Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable pervious concretes.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 7, p. 317–328, 2017.

SHAH, DARSHAN S.; PITRODA, JAYESHKUMAR. **An experimental study on hardened properties of pervious concrete.** *Journal of International Academic Research for Multidisciplinary*, v. 2, n. 3, p. 332-337, 2014

SHELESTYNSKY, EC. **The workability of no-slump concrete.** Master's thesis, University of Western Ontario; February, 1972. p. 94

SILVA, G; C; G. **Estudo experimental do concreto permeável para pavimentação.** Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2019.

SIQUEIRA, L. V. M.; STRAMARI, M. R.; FOLGUERAS, M. V. **Adição de poliuretano expandido para a confecção de blocos de concreto leve.** *Materia (Rio de J.)* v. 9, n. 4, p. 399–410, 2004.

SONG, S.; JIA, F.; PENG, C. **Study on decomposition of goethite/siderite in thermal modification through XRD, SEM and TGA measurements.** Surface Review and Letters, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 1–6, 2014.

SOTERO-SANTOS, R.B., ROCHA, O., POVINELLI, J. **Toxicity of ferric chloride sludge to aquatic organisms.** Chemosphere 2007; 68:628–36.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious Concrete Pavements;** Portland Cement Association: Skokie, IL, USA; National Ready Mixed Concrete Association: Silver Spring, MD, USA, 2004.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. **The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete,** Constr. Build. Mater. 95 (2015) 850–859.

UNITED NATIONS. **Sustainable Development Goals Knowledge Platform.** 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 15 abril 2025.

WANG, Z.Z.; DU, J.Z.; LIU, T.J.; ZHOU, A. **A novel method to predict the mesostructure and performance of pervious concrete,** Constr. Build. Mater. 263 (2020) 120117

XIE, N; AKIN, M; SHI, X; **A review of environmental benefits and durability,** Journal of Cleaner Production. JCLP 14983 (2018).

XUE, H. ET AL. **Study of Structural Transformation and Chemical Reactivity of Kaolinite-Based High Ash Slime during Calcination.** Minerals, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 466, 2023.

YEIH W., FU T.C., CHANG J.J., HUANG R. **Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates.** Constr. Build. Mater. 2015; 93: 737–745.

YEN, C.L., TSENG, D.H., LIN, T.T., 2011. **Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges.** Chemosphere 84, 220–226

YU, C. ET AL. **Review of resource utilization of Fe-rich sludges: purification, upcycling, and application in wastewater treatment.** <https://doi.org/10.1139/er-2021-0038>, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 460–484, 2022.

YU, F.; SUN, D.; WANG, J.; HU, M. **Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete,** Constr. Build. Mater. 209 (2019) 463–475.

ZHANG, R., JIANG, G., & LIANG, J. **The Albedo of Permeable Cement Concrete Linearly Decreases with Porosity.** Advances in Materials Science and Engineering (2015).

ZHANG, Y., SONG, Y., SHEN, P., & ZHANG, J. (2024). **Current research status and application prospects of permeability and mechanical properties of pervious concrete**. *Applied and Computational Engineering*, 89(1), 20–27. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/89/20241060>

ZHONG, R.; LENG, Z.; POON, C.-S. **Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review**, *Constr. Build. Mater.* 183 (2018) 544–553

ZHONG, R.; WILLE, K. **Material design and characterization of high-performance pervious concrete**. *Constr. Build. Mater.* 2015, 98, 51–60.