

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL – PPGE

THUANY CRISTINE RIECK

**DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO DE CONCRETO PARA
PAVIMENTAÇÃO DOSADO COM RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ÁGUA**

JOINVILLE

2024

THUANY CRISTINE RIECK

**DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO DE CONCRETO PARA
PAVIMENTAÇÃO DOSADO COM RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos

JOINVILLE

2024

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Rieck, Thuany Cristine
Desempenho térmico e mecânico de concreto para
pavimentação dosado com resíduo de estação de tratamento de água
/ Thuany Cristine Rieck. -- 2024.
97 p.

Orientadora: Adriana Goulart dos Santos
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2024.

1. Resíduo de ETA. 2. Concreto. 3. Pavimento. 4. Estação de
tratamento de água. I. Goulart dos Santos, Adriana . II. Universidade
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

THUANY CRISTINE RIECK

**DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO DE CONCRETO PARA
PAVIMENTAÇÃO DOSADO COM RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos

BANCA EXAMINADORA

Dr^a Adriana Goulart Dos Santos
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Dr^a Tatiana Cureau Cervo
Universidade Federal de Santa Maria

Dr^a Helena Ravache Samy Pereira
Católica de Santa Catarina

Joinville, 30 de agosto de 2024.

Aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e dedicando todas as suas forças por mim, qualquer gesto de gratidão será sempre insuficiente diante de tudo que fizeram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja graça e sabedoria me guiaram em cada etapa deste percurso, fortalecendo-me nos momentos de dificuldade e iluminando meu caminho.

Às minhas raízes, meus pais, por serem meu alicerce. Mãe e pai, Geisa Cristine de Souza Rieck e Vilson Rieck seu amor incondicional, apoio constante e ensinamentos são a base de todas as minhas conquistas. Vocês me ensinaram a importância da educação e da perseverança.

À minha irmã Thayná Julia Rieck, por ser minha confidente e amiga. Sua presença e palavras de encorajamento foram fundamentais para eu me manter motivada ao longo desta jornada.

À minha orientadora, Professora Doutora Adriana Goulart dos Santos por sua orientação e apoio. Sua dedicação, conhecimento e incentivo foram cruciais para a realização deste trabalho. Agradeço pela paciência e por acreditar no meu potencial, guiando-me com sabedoria e compreensão.

Aos professores e técnicos da Universidade de Santa Catarina de Joinville, dentre eles a professora Doutora Carmeane Effting, Professor Doutor Cesar Edil da Costa e ao Doutor Adilson Schackow.

Às professoras da banca avaliadora, Doutora Tatiana Cervo e Doutora Helena Ravache, por aceitarem o convite de participar da avaliação deste trabalho e contribuir com este estudo e com minha formação.

Aos meus amigos, que me incentivaram jamais desistir em especial a Joslaine Ferreira de Moraes.

À Companhia Águas de Joinville, pelo fornecimento de materiais necessários para a finalização deste mestrado.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo período no qual fui bolsista.

“Se tiver o hábito de fazer as coisas com alegria,
raramente encontrará situações difíceis”

-Robert Baden - Powell

RESUMO

O tratamento de água convencional gera um resíduo conhecido como resíduo de Estação de tratamento de água (RETA). O descarte inadequado desse resíduo pode causar danos ao meio ambiente, principalmente ao curso de água. Este resíduo tratado termicamente tem características químicas e mineralógicas semelhantes ao do cimento Portland, assim podendo ser utilizado na produção de concreto, como o de pavimento simples. Diante desses fatos, o principal objetivo desta pesquisa será analisar o desempenho térmico e mecânico de concreto para pavimentação dosado com resíduo calcinado de estação de tratamento de água em substituição ao cimento Portland. Serão utilizados quatro diferentes traços, sendo eles o de referência sem adição de resíduo, e aqueles com a incorporação de 1%, 5% e 10% de RETA substituindo parcialmente o cimento Portland. Foram analisadas as propriedades térmicas deste tipo do concreto a partir dos ensaios de condutividade térmica e a análise de temperatura, além disso, também foram avaliadas as suas propriedades mecânicas: resistência a compressão axial, resistência a tração na flexão e resistência a tração por compressão diametral, encontrando uma resistência a compressão axial média de 46 MPa, além disso todos os resultados foram superiores aos regulamentados em norma de 30 MPa. Os corpos de prova com 10% de resíduo apresentaram maior eficiência térmica, com uma condutividade térmica mais alta do que os corpos de prova de referência obtendo dessa forma maior estabilidade térmica, tendo uma variação de temperatura menor. Além disso, análises microestruturais utilizando microscopia eletrônica de varredura foram realizadas para compreender a interação entre o resíduo e a matriz cimentícia. A análise estatística indicou que o resíduo influencia certamente as propriedades do concreto, especialmente nas substituições de maior percentual. Os resultados sugerem que o resíduo de ETA calcinado é uma alternativa viável e sustentável para a produção de concreto, proporcionando desempenho adequado para uso em pavimentos.

Palavras-chave: Resíduo de estação de tratamento de água; pavimento de concreto; cimento Portland; Propriedades mecânicas; Propriedades Térmicas.

ABSTRACT

Conventional water treatment generates a waste known as Water Treatment Plant Residue (WTPR). Inadequate disposal of this residue can cause environmental damage, especially to water bodies. When thermally treated, this residue has chemical and mineralogical characteristics similar to Portland cement, making it possible to use it in concrete production, such as for simple pavements. Given these facts, the main objective of this research is to analyze the thermal and mechanical performance of concrete for pavement, mixed with calcined water treatment plant residue, as a partial replacement for Portland cement. Four different mixes will be used: a reference mix without residue addition, and others with the incorporation of 1%, 5%, and 10% of WTPR, partially replacing Portland cement. The thermal properties of this type of concrete were analyzed through thermal conductivity tests and temperature analysis. Additionally, its mechanical properties were evaluated, including axial compressive strength, flexural tensile strength, and diametral compressive strength, with an average axial compressive strength of 46 MPa. All results exceeded the standard requirement of 30 MPa. Test specimens with 10% sludge showed greater thermal efficiency, with higher thermal conductivity than the reference specimens, thus obtaining greater thermal stability with less temperature variation. Moreover, microstructural analyses using scanning electron microscopy were performed to understand the interaction between the residue and the cementitious matrix. Statistical analysis indicated that the sludge certainly influences the concrete's properties, especially in higher percentage substitutions. The results suggest that calcined WTP sludge is a viable and sustainable alternative for concrete production, providing adequate performance for use in pavements.

Keywords: Water treatment plant sludge; concrete pavement; Portland cement; mechanical properties; thermal properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Fluxograma de uma ETA de ciclo completo.....
- Figura 2 – Fluxograma de geração de resíduo em uma estação de tratamento de água.
- Figura 3- Resíduo com concentração de sólidos de 3%, 13% e 28%
- Figura 4- Filtro prensa
- Figura 5- Leito Secagem de resíduo de Estação de Tratamento de Água
- Figura 6- Disposição em camadas do leito de secagem.
- Figura 7- Planejamento experimental
- Figura 8- Análise de resultados
- Figura 9- Caracterização dos agregados e do Resíduo de ETA
- Figura 10- Caracterização dos concretos
- Figura 11- ETA Cubatão da Companhia Águas de Joinville
- Figura 12- RETA “*in Natura*”
- Figura 13- RETA seco
- Figura 14- RETA moído
- Figura 15- RETA calcinado
- Figura 16 - Amassamento
- Figura 17 – Slump Test
- Figura 18 – Tanque de cura
- Figura 19 – Rompimento corpo de prova ensaio compressão axial
- Figura 20 – Rompimento corpo de prova ensaio tração por compressão diametral
- Figura 21 – Rompimento corpo de prova ensaio tração na flexão
- Figura 22 – Ensaio condutividade térmica
- Figura 23- Corpos de prova condutividade térmica
- Figura 24 – Análise de temperatura
- Figura 25- Termômetro a laser industrial
- Figura 26- Termogravimetria do resíduo de estação de tratamento de água
- Figura 27- Comparação dos difratogramas do resíduo calcinado e resíduo seco
- Figura 28- Médias e desvio padrão dos valores de resistência à compressão axial em 7 e 28 dias
- Figura 29- Gráfico Bloxpot resistência a compressão
- Figura 30- Médias e desvio padrão de resistência à tração por compressão diametral em 7 e 28 dias

Figura 31- Gráfico Bloxpot resistência à tração por compressão diametral

Figura 32- Médias e o desvio padrão de resistência tração na flexão em 7 e 28 dias

Figura 33- Gráfico Bloxpot resistência à tração na flexão

Figura 34- Gráfico Bloxpot condutividade térmica

Figura 35- Imagens MEV referência

Figura 36- Imagens MEV 1% RETA

Figura 37- Imagens MEV 5% RETA

Figura 38- Imagens MEV 10% RETA

Figura 39- Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão

Figura 40- Regressão linear entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão

Figura 41- Regressão linear entre resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral

Figura 42- Regressão linear entre resistência à compressão e resistência à tração por compressão não diametral

Figura 43- Regressão linear entre resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral

Figura 44- Regressão linear entre resistência à tração na flexão e resistência à tração na flexão

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Produção de resíduo na Estação de tratamento de água
- Tabela 2 – Característica resíduo sulfato de alumínio
- Tabela 3 - Tipos de cimento e sua classificação
- Tabela 4 - Estudos com resíduos de ETA calcinados incorporados à matriz cimentícia
- Tabela 5 – Influência de resíduos minerais e artificiais
- Tabela 6 - Dosagem de materiais para a produção do concreto
- Tabela 7 – Quantidade de corpos de prova ensaio caracterização mecânica
- Tabela 8 – Quantidade de corpos de prova ensaio caracterização térmica.
- Tabela 9 – Granulometria dos Agregados Naturais
- Tabela 10 – Resultados dos ensaios de pozolanicidade aos 28 dias.
- Tabela 11- Composição Química com FRX
- Tabela 12- Resultados ensaios resistência a compressão axial
- Tabela 13 - Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk
- Tabela 14- Resultados Análise de Variância resistência a compressão
- Tabela 15- Resultados do Teste de Tukey
- Tabela 16 – Resultados ensaios resistência a tração por compressão diametral
- Tabela 17- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk
- Tabela 18- Resultados Análise de Variância resistência a compressão
- Tabela 19 - Resultados do Teste de Tukey
- Tabela 20- Resultados ensaios resistência a tração na flexão
- Tabela 21- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk
- Tabela 22 – Resultados Análise de Variância resistência a compressão por tração na diametral
- Tabela 23- Resultados do Teste de Tukey
- Tabela 24- Resultado Condutividade térmica
- Tabela 25- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk
- Tabela 26- Resultados Análise de Variância resistência tração na flexão
- Tabela 27- Resultados do Teste de Tukey
- Tabela 28 – Análise de temperaturas
- Tabela 29- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk
- Tabela 30- Resultados Análise de Variância resistência tração na flexão
- Tabela 31- Resultados do Teste de Tukey

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASCE | American Society of Civil Engineers |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| AWWA | American Water Works Association |
| BU | Biblioteca Universitária |
| CAR | Concreto de Alta Resistência |
| CC | Concreto Convencional |
| CCP | Concreto de Cimento Portland |
| CCR | Concreto Compactado a Rolo |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| CLETA | Cinza de resíduo de estação de tratamento de água |
| DRX | Difração de Raio X |
| ETE | Estação de Tratamento de Esgoto |
| FRX | Fluorescência de Raio X |
| IN | Instrução Normativa |
| ISO | Organização Internacional de Normalização |
| ETA | Estação de Tratamento de Água |
| ETL | Estação de Tratamento de resíduo |
| MAT | Material Ativado Termicamente |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| NBR | Normas Técnicas Brasileiras |
| PCA | Pavimento de Concreto Armado |
| PCAC | Pavimento de Concreto com Armadura Contínua |
| PCPM | Pavimento de Concreto Pré-moldado |
| PCPRO | Pavimento Concreto Protendido |
| RETA | Resíduo de Estação de Tratamento de Água |
| SST | Sólidos Totais |
| TG | Termogravimetria |
| UDESC | Universidade Estadual de Santa Catarina |
| WT | Whitetopping |
| WTUD | Whitetopping Ultradelgado |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 17 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 17 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 17 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 18 |
| 2.1 | ETAPAS DO TRATAMENTO DE ÁGUA | 18 |
| 2.2 | RESÍDUO DE ETA | 19 |
| 2.2.1 | Geração do resíduo..... | 19 |
| 2.2.2 | Caracterização do resíduo com sulfato de alumínio | 21 |
| 2.2.3 | Desaguamento | 22 |
| 2.2.4 | Destinações de descarte de resíduo de ETA | 25 |
| 2.2.4.1 | <i>Mananciais</i> | 25 |
| 2.2.4.2 | <i>Utilização na cerâmica</i> | 26 |
| 2.2.4.3 | <i>Aterro sanitário</i> | 26 |
| 2.2.4.4 | <i>Utilização na produção de cimento e concreto</i> | 26 |
| 2.3 | TRATAMENTO TÉRMICO..... | 27 |
| 2.4 | CONCRETO PARA PAVIMENTO..... | 28 |
| 2.5 | A INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS MINERAIS E ARTIFICIAIS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO..... | 29 |
| 2.6 | INCORPORAÇÃO DE RETA À MATRIZ CIMENTÍCIA | 31 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 34 |
| 3.1 | MÉTODOS DE PESQUISA | 34 |
| 3.2 | MATERIAIS UTILIZADOS..... | 36 |
| 3.2.1 | Resíduo de estação de tratamento de água | 36 |
| 3.2.2 | Cimento Portland..... | 39 |
| 3.2.3 | Agregados | 39 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 40 |
| 3.3.1 | Caracterização do Resíduo de ETA..... | 40 |
| 3.3.1.1 | <i>Análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX).....</i> | 40 |
| 3.3.1.2 | <i>Composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX)</i> | 40 |
| 3.3.1.3 | <i>Análise Termogravimétrica</i> | 40 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.3.1.4 | <i>Determinação de massa específica</i> | 41 |
| 3.3.1.5 | <i>Atividade pozolânica</i> | 41 |
| 3.3.2 | Caracterização de agregado graúdo e miúdo | 42 |
| 3.3.2.1 | <i>Distribuição granulométrica</i> | 42 |
| 3.3.2.2 | <i>Massa unitária</i> | 42 |
| 3.3.2.3 | <i>Teor de Umidade</i> | 42 |
| 3.3.2.4 | <i>Massa Específica</i> | 42 |
| 3.4 | DOSAGEM DO CONCRETO | 43 |
| 3.5 | MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA..... | 44 |
| 3.6 | ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS | 46 |
| 3.6.1 | Resistência a compressão axial | 46 |
| 3.6.2 | Resistência a tração por compressão diametral | 46 |
| 3.6.3 | Resistência a tração na flexão | 48 |
| 3.7 | ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS | 49 |
| 3.7.1 | Condutividade Térmica | 49 |
| 3.7.2 | Análise de Temperatura | 51 |
| 3.8 | ANÁLISE MICROESTRUTURAL | 52 |
| 3.8.1 | Microestrutura eletrônica por varredura | 52 |
| 3.9 | ANÁLISE ESTATÍSTICA..... | 52 |
| 3.9.1 | Análise de Variância | 52 |
| 3.9.2 | Regressão linear | 53 |
| 4 | RESULTADOS | 54 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 54 |
| 4.1.1 | Quanto as características dos agregado naturais | 54 |
| 4.1.2 | Quanto a caracterização do resíduo de ETA | 55 |
| 4.1.2.1 | <i>Índice de pozolanicidade</i> | 55 |
| 4.1.2.2 | <i>Caracterização química com FRX</i> | 56 |
| 4.1.2.3 | <i>Termogravimetria</i> | 56 |
| 4.1.2.4 | <i>Difração de Raios x</i> | 57 |
| 4.1.3 | Caracterização mecânica | 58 |
| 4.1.3.1 | <i>Resistência à compressão axial</i> | 58 |
| 4.1.3.2 | <i>Resistência tração por compressão diametral</i> | 63 |
| 4.1.3.3 | <i>Resistência tração na flexão</i> | 67 |
| 4.1.4 | Caracterização térmica | 71 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 4.1.4.1 | <i>Condutividade térmica</i> | 71 |
| 4.1.4.2 | <i>Análise de temperatura</i> | 75 |
| 4.1.5 | Microscopia Eletrônica por Varredura | 78 |
| 4.2 | ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES | 79 |
| 4.2.1 | Relação entre resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão 79 | |
| 4.2.2 | Relação entre resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral | 81 |
| 4.2.3 | Relação entre e resistência à tração na flexão e resistência à tração na compressão diametral | 83 |
| 5 | CONCLUSÃO | 86 |
| | REFERÊNCIAS | 88 |

1 INTRODUÇÃO

Quando se realiza o tratamento convencional da água potável, gera-se um volume de resíduo chamado de resíduo de ETA (Estação de Tratamento de Água). Esse tipo de resíduo é classificado, segundo a norma brasileira ABNT 10.004/2004, como resíduo sólido. O destino adequado desse resíduo ainda é um desafio e sua disposição inadequada pode causar danos ao meio ambiente.

O resíduo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA) normalmente é descartado por meio de duas abordagens: aterramento e aplicação em solos na agricultura. No entanto, a disposição no aterro não é considerada uma forma ideal, uma vez que está sujeita a regulamentações específicas e implica em custos. Por outro lado, a aplicação do resíduo no solo requer uma preocupação ainda maior, pois os resíduos provenientes de ETA podem conter níveis significativos de metais pesados, os quais podem causar toxicidade tanto para seres humanos como para os ecossistemas aquáticos e terrestres, dependendo da origem do resíduo (HUANG e WANG, 2013).

Já a inclusão deste tipo de resíduo no ramo da construção civil seria uma melhor alternativa para o seu descarte devido as propriedades químicas deste resíduo que contêm Al_2O_3 (óxido de alumínio), Fe_2O_3 (óxido férrico) e SiO_2 (Dióxido Silício), que são os principais compostos das matérias-primas cimentícias. Desta forma, este resíduo pode ser incorporado em materiais de construção como tijolos, cerâmica, concreto (GOMES *et al.*, 2019).

Para utilizar o resíduo de ETA em substituição ao cimento no concreto, é necessário submetê-lo a um tratamento térmico, por meio de calcinação. Apesar de ser um processo demorado e com alto consumo energético, a importância desse tratamento está relacionada à remoção da matéria orgânica e às alterações mineralógicas deste resíduo que ocorrem durante a ativação térmica. Isso aumenta a atividade pozolânica do material, o que é uma característica importante para melhorar sua compatibilidade com o cimento e a água (CUNHA, 2019).

É importante destacar que os materiais utilizados na produção do cimento Portland são provenientes de recursos naturais não renováveis. Além disso, o cimento Portland é amplamente utilizado como aglomerante na fabricação do concreto em todo o mundo, o que pode levar a uma grande pressão sobre as fontes naturais desses materiais. Como resultado, é crucial explorar e apresentar alternativas de substituição desses materiais a fim de promover a sustentabilidade na construção civil (Scrivener *et al.*, 2018)

Destaca-se que, nos últimos anos, tem havido um crescente interesse em encontrar soluções mais sustentáveis para a construção civil, que é um setor que gera impactos

significativos no meio ambiente. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos em materiais de construção tem sido uma alternativa buscada por pesquisadores e profissionais da área.

Uma alternativa interessante para o reaproveitamento do resíduo da ETA é a sua utilização em concreto. Alguns estudos, como o de Ahmad, Ahmad e Alam (2016) e Gastaldini *et al.* (2015) mostraram que o resíduo de ETA pode ser utilizado como substituto parcial do cimento em concreto, com benefícios em termos de desempenho mecânico e físicos.

Além disso, conforme mencionado por Godoy *et al.* (2019), são escassos os trabalhos que utilizaram resíduo de ETA localizadas no sul do Brasil como matéria-prima para a produção de materiais cimentícios suplementares. Os autores também destacam a importância da caracterização de resíduos de ETA de diferentes locais para garantir que as propriedades do material calcinado possibilitem sua utilização como MCS (material cimentício suplementar), uma vez que a composição e as características químicas e físicas do resíduo gerado variam de acordo com a localização da ETA.

Hegen (2014) fez análises das propriedades mecânicas do concreto, a partir da substituição parcial do cimento por cinza de resíduo de ETA com diferentes temperaturas de calcinação. Este autor verificou o aumento nos valores de resistência à compressão axial quando comparado ao concreto de referência, aquele dosado com 100% cimento Portland, tanto aos 7 como aos 28 dias de idade de cura do concreto, para as substituições de 10% a 25%. Outro estudo que pode ser citado é o de Zhi-hai He *et al.* (2023) que utilizou o resíduo da ETA em substituição parcial ao cimento em 10% e obteve a resistência à compressão em 90 dias aumentada em 7,91% em relação ao traço de referência. Já o estudo de Altheman *et al.* (2023) obteve o resultado de resistência à compressão com a substituição de 25% do cimento por resíduo de estação de tratamento de água de 39,5 MPa, com uma pequena diminuição em relação ao traço de referência, que obteve o resultado de 44,3 MPa.

Diante do contexto apresentado, esta pesquisa de mestrado se propõe a investigar as propriedades térmicas e mecânicas do concreto para pavimento, dosado com a substituição parcial do cimento Portland por cinza de resíduo de estação de tratamento de água (ETA). A relevância deste estudo reside na possibilidade de proporcionar uma solução sustentável e eficiente para o descarte de resíduos de ETA, ao mesmo tempo em que se reduz a dependência de recursos naturais não renováveis utilizados na fabricação do cimento Portland.

Assim, considerando a hipótese de utilização de resíduo de estação de tratamento de água calcinado para pavimento de concreto de simples, empregando-o como substituto parcial do cimento Portland, é esperado que o material consiga se adequar a aplicação para esta finalidade, fornecendo ao material desempenho mecânico e térmico satisfatórios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho térmico e mecânico do concreto para a pavimentação dosado com resíduo calcinado de estação de tratamento de água (ETA) em substituição ao cimento Portland.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral da pesquisa são necessários atender os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a atividade pozolânica do resíduo calcinado de Estação de Tratamento de Água;
- Analisar estatisticamente a influência do resíduo calcinado da ETA nas propriedades mecânicas e térmicas do concreto dosado com diferentes percentuais de substituição de RETA por cimento;
- Avaliar, por meio de análise de regressão linear simples, como as propriedades mecânicas e térmicas do concreto dosado com diferentes percentuais de RETA se relacionam;
- Avaliar, através de microscopia eletrônica de varredura, a interação entre o resíduo e o material cimentício, para analisar seus vazios.

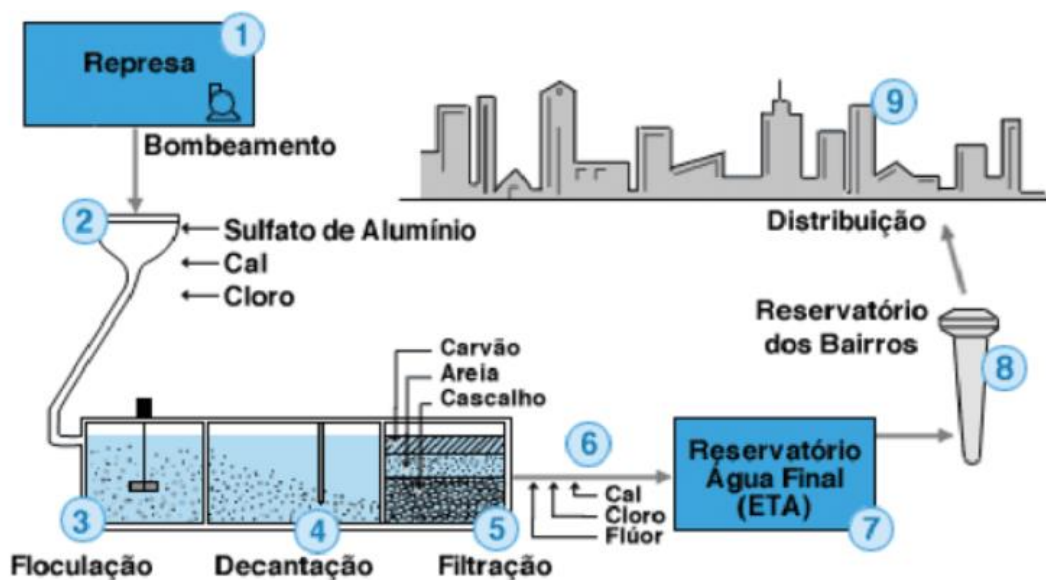
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ETAPAS DO TRATAMENTO DE ÁGUA

Dentre os componentes essenciais do saneamento básico estão a captação, o tratamento e a distribuição de água, conforme descrito por Ahmad et al. (2016). Essas técnicas são empregadas para fornecer água considerada potável, cuja qualidade é determinada por uma série de parâmetros físico-químicos, biológicos e sensoriais, conforme estabelecido por normativas federais e acordos de saúde internacionais (Brasil, 2017).

O processo de tratamento de água consiste em diversas operações unitárias complexas, incluindo coagulação, floculação, decantação e filtração, que compõem o ciclo completo de tratamento, ilustrado na Figura 1, segundo Benlalla et al. (2015) e Godoy et al. (2019). A etapa de coagulação, ou mistura rápida, envolve o tratamento químico por meio do qual se adicionam coagulantes que eficazmente removem partículas coloidais e turbidez da água transformando em RETA (resíduo de estação de tratamento de água) que será encontrado na figura 2. Os coagulantes mais frequentes são à base de alumínio, como sulfato de alumínio e policloreto de alumínio.

Figura 1 – Fluxograma de uma ETA de ciclo completo



Fonte- SABESP

2.2 RESÍDUO DE ETA

2.2.1 Geração do resíduo

A presença de partículas coloidais e em suspensão, tais como argila, areia, silte, pedaços de vegetais, microrganismos e frações de matéria orgânica, é comum em mananciais de água bruta. Esses elementos conferem cor e turbidez à água, tornando-a imprópria para consumo humano. Para garantir a potabilidade, é necessário submeter a água a uma série de processos, como coagulação, floculação, sedimentação, flotação e filtração, a fim de remover essas impurezas (FIGUEIREDO NETO, 2011).

A quantidade e qualidade do resíduo gerado depende muito da qualidade da água bruta, tecnologia do tratamento, do coagulante utilizado em todas as etapas, método de limpeza dos filtros, e também a habilidade de operadores. Dessa forma o resíduo gerado nas ETL (Estação de tratamento de resíduo) e de ETA completas são principalmente da limpeza de decantadores e lavagem de filtros. (DI BERNARDO, 2011).

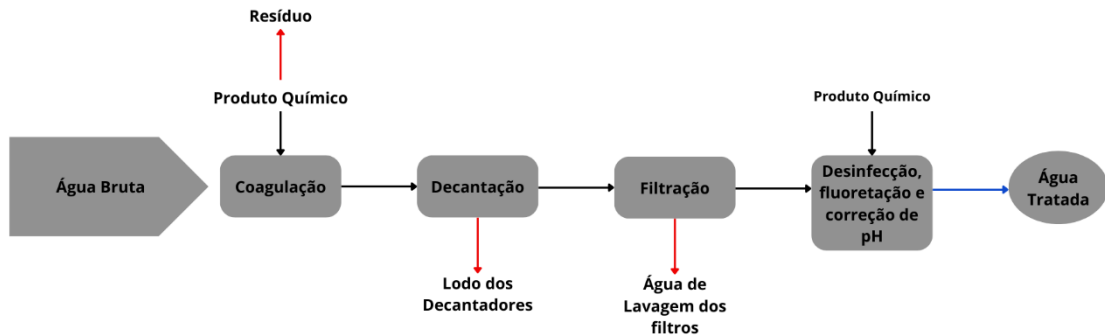
Segundo American Water Works Association (AWWA) e American Society of Civil Engineers (ASCE) (1998), o resíduo de ETA pode ser classificado de 4 formas: resíduo gerado na limpeza dos decantadores (flotadores), na lavagem dos filtros e no abrandamento e remoção de ferro e manganês da água bruta; concentrado salino gerado no tratamento feito por membrana, osmose reversa, eletrodialise e troca iônica; material filtrante utilizado, carvão ativado e resinas devido a trocas iônicas desgastadas; e emissões gasosas geradas em unidades de controle de odor.

De acordo com Silveira (2012), a caracterização dos resíduos de ETA pode ser realizada de acordo com os aspectos ambientais associados à sua disposição, neste caso em função do pH, sólidos, metais, DQO (demanda química de oxigênio), biodegradabilidade, toxicidade, entre outros; ou de acordo com os aspectos geotécnicos relacionados com a remoção de água e, posterior, utilização dos resíduos, em função do tamanho e distribuição das partículas, limite de plasticidade e liquidez, resistência e sedimentabilidade.

Segundo Cordeiro (2001) e Richter (2001), o tempo de permanência no tanque, as técnicas utilizadas e a limpeza, alteram a concentração de sólidos do rejeito, assim como a quantidade de água na limpeza e a descarga também interfere no volume resultante. Em termos de massa, o resíduo acumulado nos decantadores ou flotadores representa entre 60 e 95% do total formado, sendo o restante proveniente da lavagem dos filtros.

O processo da clarificação da água bruta e geração de resíduo são demonstrados de forma sucinta no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de geração de resíduo em uma estação de tratamento de água.



Fonte: FIGUEIREDO (2011)

Na tabela 1 encontra-se as quantidades de resíduo produzido durante 12 meses, de junho de 2022 a maio de 2023. A tabela foi elaborada pela Companhia Águas de Joinville no ano de 2023. Com isso pode-se observar que a quantidade de resíduo média anual produzida pela Estação de tratamento de água do Rio Cubatão é de 331,21 toneladas. Também, é notado que as menores quantidades de resíduo produzidas foram nos meses de junho e julho, quando a quantidade milimétrica da chuva é menor.

Tabela 1 – Produção de resíduo na Estação de tratamento de água

| Mês | Quantidade de resíduo (tol) |
|-----------------------|-----------------------------|
| Junho/2022 | 116,7 |
| Julho/2022 | 178,08 |
| Agosto/2022 | 350,19 |
| Setembro/2022 | 364,28 |
| Outubro/2022 | 329,24 |
| Novembro/2022 | 256,5 |
| Dezembro/2022 | 371,71 |
| Janeiro/2023 | 364,09 |
| Fevereiro/2023 | 373,6 |
| Março/2023 | 435,19 |
| Abril/2023 | 489,23 |
| Mai/2023 | 345,69 |

Fonte: Companhia águas de Joinville (2023)

2.2.2 Caracterização do resíduo com sulfato de alumínio

Durante o processo de tratamento de água, são utilizados coagulantes, que desestabilizam as partículas coloidais, dessa forma formando flocos, que facilitam a retirada desse sedimento. Usualmente, o coagulante mais utilizado é o sulfato de alumínio, assim o Resíduo de Estação de Tratamento de Água (RETA) formado nesse tratamento é chamado de resíduo de sulfato de alumínio (CORDEIRO, 1999). Segundo Richter (2001) esse resíduo de sulfato de alumínio apresenta baixa biogradabilidade, conforme a composição química do resíduo apresentada na tabela 2.

Tabela 2 – Característica resíduo sulfato de alumínio

| Sólidos Totais(%) | Al ₂ O ₃ 5H ₂ O (%) | Inorgânicos (%) | Matéria Orgânica(%) | pH | DBO* (mg/l) | DQO** (mg/l) |
|-------------------|--|-----------------|---------------------|-------|-------------|--------------|
| 0,1 - 4 | 15 - 40 | 35 - 70 | 15 - 25 | 6 - 8 | 30 - 300 | 30 - 5000 |

Fonte: Richter (2001)

*Demanda bioquímica de oxigênio

**Demanda química de oxigênio

Segundo Godoy et al. (2019), as características geotécnicas do resíduo são influenciadas pela qualidade da água bruta, enquanto as propriedades químicas são definidas pelos aditivos empregados no tratamento inicial, como coagulantes e alcalinizantes. A composição química predominante do resíduo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETAs) compreende óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, argilas silicatadas, contaminantes e matéria orgânica (Gomes et al., 2019). Além disso, metais como zinco, chumbo, cobre, cádmio, cromo, manganês e alumínio também estão presentes, podendo conferir características tóxicas ao material, o que interfere na sua disposição final e potencial de reutilização (Ghoddousi et al., 2014).

A alta proporção de água no resíduo resulta em aumento de volume, o que dificulta o manuseio e transporte. Nas ETAs, o tratamento do resíduo visa principalmente a remoção de água, convertendo-o em uma forma sólida ou semissólida, facilitando assim o transporte para a disposição final (González-Corrochano et al., 2014). O resíduo úmido é então removido e submetido à tratamentos e processos de separação de fases na unidade de desidratação, onde procedimentos químicos e físicos são aplicados para separar a água do resíduo residual. O

resíduo tratado é destinado à disposição adequada, enquanto a água recuperada é reciclada e reintegrada ao processo (Machado e Villanova, 2022)

A Figura 3 mostra o processo de secagem do resíduo, evidenciando o aumento gradual da concentração de sólidos ao longo do tempo. Na primeira imagem, o resíduo apresenta uma concentração de 3% de sólidos. À medida que o tempo passa, essa concentração aumenta, sendo que na segunda imagem já se verifica uma concentração de 13% de sólidos. Finalmente, na terceira imagem, a concentração de sólidos no resíduo atinge 28%.

Figura 3- Resíduo com concentração de sólidos de 3%, 13% e 28%



Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012).

O resíduo de sulfato de alumínio sedimenta com relativa facilidade, mas por conta de sua baixa compactabilidade resulta em um grande volume e baixo teor de sólidos. Quando o resíduo resulta de uma água bruta com uma turbidez mais alta é mais fácil compactar com a sedimentação do que os resíduos com a água menos turva (Richter, 2001).

2.2.3 Desaguamento

Segundo Di Bernardo (2010), cita-se que o desaguamento é uma forma de operação para aumentar os sólidos totais (SST) dessa forma ocorrendo a redução do resíduo, e o tratamento do mesmo ocorre sem intercorrências. Pode ser efetuado de diversas formas, como leitos de secagem, bag de geotêxtil, filtro prensa, lagoa, centrífuga e o filtro à vácuo, sendo essa última algo não utilizado com frequência no Brasil.

- Filtro Prensa

Segundo Richter(2001), esta forma de desidratação ganhou espaço no meio sanitário pela sua capacidade de tratar resíduos provenientes da coagulação da água, pois foi o primeiro a produzir um resíduo com elevados sólidos, fazendo deste RETA um resíduo pronto para a disposição do aterro. Em Joinville/SC, a empresa de saneamento utiliza esta forma para a secagem do resíduo. Este processo de desidratação do resíduo, é constituído por várias placas dentro de um cilindro, este faz rotação gerando uma maior força para que a água desloque do resíduo sólido como demonstrado na figura 4. A água é expulsa por pequenos filtros constituídos no cilindro.

Figura 4- Filtro prensa



Fonte: Autor (2020).

- Leitos de Secagem

O mecanismo de desidratação do leito de secagem inclui principalmente decantação, percolação (drenagem) e evaporação para obter a concentração necessária. A operação de um leito de secagem, completa-se em um ciclo de duas fases: enchimento e secagem. O período de enchimento depende da quantidade de unidades, isto é, da propensão de cada leito e, geralmente, dura de 15 a 30 dias, e a fase de secagem três semanas ou mais, dependendo do clima e da concentração final desejada. Os leitos de secagem são dimensionados para um intervalo de armazenamento total de três a quatro meses, ou seja, no mesmo leito pode ocorrer três a quatro aplicações em um ano (Richter, 2001).

Um dos métodos mais antigos de desaguamento, são utilizadas camadas de pedras, areias e tijolos, para o material filtrante. Essa secagem ocorre por causa da evaporação da água existente no resíduo e drenagem pelo material filtrante. Normalmente esses leitos são abertos,

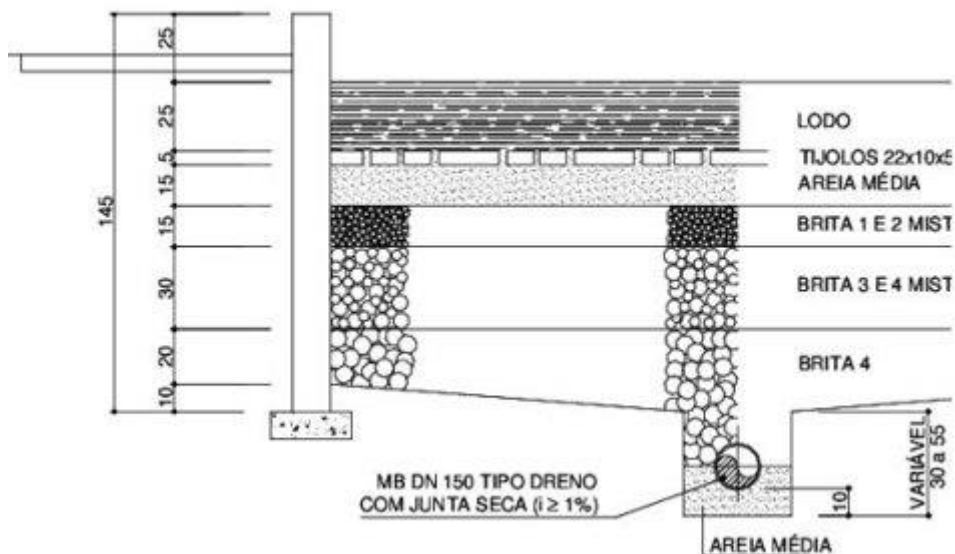
sem cobertura, desta forma é necessário a verificação dos dados pluviométricos (Vanzetto, 2012). Nas figuras 5 e 6 mostram-se as composições e um exemplo de como é a produção deste leito.

Figura 5- Leito Secagem de resíduo de Estação de Tratamento de Água



Fonte: SABESP(2014)

Figura 6- Disposição em camadas do leito de secagem.



Fonte: Adaptado de José Roberto Campos(1999)

- Centrífuga

Segundo Di Bernardo (2010), na centrífuga para desidratação de resíduo, a água é separada do resíduo aplicando forças centrífugas, cerca de 10 mil vezes a força da gravidade. A centrífuga para desidratação de resíduo é composta por um rotor cilíndrico cônico com um parafuso helicoidal em seu interior. Estes dois giram em alta velocidade e na mesma direção, o

rotor gira mais rápido do que o parafuso. O resíduo é alimentado na parte central e é empurrado para a periferia graças a força centrífuga. À medida que a água que é mais leve, passa através do parafuso helicoidal, que é recolhida numa extremidade da centrífuga para desidratação de resíduo, o resíduo que vai se formando nas paredes do rotor, é arrastado para a região cônica, saindo através de uma abertura na parte inferior oposta. O resíduo desidratado tem normalmente uma secura entre 15% e 30%, dependendo do tipo do resíduo e das condições de centrifugação. A centrífuga para desidratação de resíduo é um sistema eficiente que funciona continuamente, é muito compacto e requer muito pouco espaço.

2.2.4 Destinações de descarte de resíduo de ETA

A destinação do RETA em todo o mundo é bastante discutida, por conta do dano que pode causar ao meio ambiente.

2.2.4.1 Mananciais

O descarte do resíduo de ETA em mananciais é uma prática que pode causar danos ambientais significativos, uma vez que o material pode afetar a qualidade da água e comprometer a fauna e flora locais. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), o descarte inadequado desse resíduo em mananciais pode causar a eutrofização desses corpos d'água, um processo no qual a água se torna excessivamente rica em nutrientes, gerando um crescimento exagerado de algas e plantas aquáticas, que consomem todo o oxigênio disponível na água e prejudicam a vida aquática (CETESB, 2013).

Essa forma de descarte é uma prática comum em muitas partes do mundo, embora seja uma fonte potencial de poluição. Segundo estudo realizado por Pires *et al.* (2014), na cidade de São Paulo, Brasil, aproximadamente 50% dos resíduos de ETA são descartados em mananciais.

A Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) determina que o descarte de resíduos em corpos d'água deve obedecer a padrões de qualidade da água para que não haja impactos negativos no meio ambiente. Além disso, a legislação brasileira prevê sanções para empresas que descartam seus resíduos em desacordo com as normas ambientais.

2.2.4.2 *Utilização na cerâmica*

Smiderle (2016) e os autores Tsutiya e Hirata(2001) citam que o resíduo de ETA são compostos de argilas, silte, areia, coagulantes e matéria orgânica e, geralmente, apresentam características físicas e químicas semelhantes às dos materiais usados na fabricação de tijolos – argila natural e xisto. Com isso, torna-se interessante incorporá-los na cerâmica vermelha.

Segundo Smiderle (2016), em Durham, na Inglaterra, 15% do resíduo gerado era reciclado dessa maneira, sem comprometer a qualidade estrutural. Além da Inglaterra, esse método foi aplicado com sucesso nos Estados Unidos, China, Espanha, Índia e Holanda. No Brasil, as cidades de Curitiba e Rio de Janeiro também adotaram essa prática com êxito (Morita, 2016).

2.2.4.3 *Aterro sanitário*

Segundo a NBR 8.419 (ABNT 1992), o aterro sanitário é uma técnica utilizada para a disposição de sólidos urbanos no solo, com o menor risco ambiental, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível. Ainda é um meio muito utilizado, talvez por ser mais prático, porém, os gastos são enormes, pois além dos alugueis de caçambas, e o próprio aterro, ainda é necessária uma pequena secagem, pois não pode ser descartado o resíduo com mais de 70% de água. Esse também é o meio utilizado pela companhia de tratamento de águas de Joinville.

2.2.4.4 *Utilização na produção de cimento e concreto*

Richter (2001) cita que os principais componentes do cimento são CaO (óxido de cálcio), SiO₂ (dióxido de silício), Al₂O₃ (óxido de alumínio) e Fe₂O₃(óxido de ferro), que também estão presentes no resíduo de ETA e podem substituir matérias-primas para a fabricação do cimento. Boulomytis (2007) descreveu a possibilidade de usar esses materiais como matéria-prima no processo de produção de cimento, pois com o uso desse resíduo é possível reduzir o uso de recursos naturais normalmente utilizados no processo de sua produção e também é considerado um descarte adequado.

Segundo John e Gleize (2007), no aspecto de desenvolvimento sustentável a construção civil é fundamental, onde a sociedade atual pode encontrar soluções que visam reduzir a poluição, economizar energia e reduzir a extração de materiais protegendo assim o meio ambiente. Diante dessa afirmação, e considerando que a indústria da construção civil é a maior consumidora individual de recursos naturais, necessitando extrair de 20% a 50% do total de insumos, o impacto ambiental da utilização de resíduo no concreto como alternativa para redução de emissões gases formados pela produção do cimento (HOPPEN et al., 2005).

Sales et al. (2011) realizaram um estudo sobre o uso de resíduo na produção de concreto, porém utilizaram o resíduo juntamente com cavacos de madeira. Estes, por sua vez, são misturados com resíduo, serragem e água para produzir grânulos redondos com diâmetro médio de 14 ± 2 mm para obter um material alternativo ao cascalho. O concreto produzido por esses pesquisadores apresentou uma queda média na resistência à compressão axial de 7 MPa aos 28 dias quando o cascalho foi totalmente substituído.

Lee et al. (2012) investigaram a possibilidade de substituição do cimento por resíduo da ETA na proporção de 10% e testaram o concreto com este resíduo em 1, 3, 7, 28, 56 e 91 dias de cura. Os autores relataram que a sua resistência à compressão aumentou após 3 dias devido a reação pozolânica do resíduo. Além disso, é possível verificar que a relação água/cimento influencia significativamente a resistência à compressão do concreto, com menores relações água/cimento resultando em maior resistência. Assim, este estudo demonstra a viabilidade dessa prática na construção civil, pois o resíduo de ETA, resíduo que normalmente é descartado de forma irregular, pode ser utilizado para aumentar a resistência do concreto, beneficiando o meio ambiente e atendendo mais necessidades de desenvolvimento sustentável.

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Calcinação é um processo térmico que consiste em aquecer um material em altas temperaturas, geralmente acima de 800°C, a fim de modificar suas propriedades químicas e físicas. Durante esse processo, a matéria-prima sofre uma reação química que pode resultar em mudanças na estrutura cristalina, perda de água, decomposição ou formação de novas substâncias. A calcinação é amplamente utilizada na produção de materiais como cimento, cal, alumina, zircônia, entre outros. A temperatura e o tempo de calcinação variam de acordo com o tipo de material e com as propriedades desejadas (FAUSTINO et al., 2011).

A ativação térmica de resíduos de estações de tratamento de água (ETA) é um processo em que o resíduo é submetido a altas temperaturas (geralmente entre 700°C e 900°C) para

produzir um material com propriedades ligantes, conhecido como material ativado termicamente (MAT). O MAT pode ser usado como substituto parcial do cimento Portland na produção de concreto, contribuindo para a redução do impacto ambiental e econômico da indústria da construção civil.

Os resíduos de ETA geralmente possuem alta concentração de compostos orgânicos e inorgânicos, como alumínio, ferro, cálcio e sílica, que são os principais componentes do MAT produzido por ativação térmica. Além disso, a produção de MAT a partir de resíduos de ETA contribui para a redução da quantidade de resíduos gerados e para a mitigação dos impactos ambientais causados pela disposição inadequada desses materiais.

O uso de MAT na produção de concreto pode apresentar algumas vantagens em relação ao cimento Portland convencional, como a redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂), a melhoria da resistência mecânica e da durabilidade do concreto e a redução do custo de produção. No entanto, é importante realizar estudos de viabilidade técnica e econômica para avaliar a possibilidade de aplicação do MAT em larga escala na indústria da construção civil.

2.4 CONCRETO PARA PAVIMENTO

Os pavimentos de concreto de cimento Portland (CCP) são constituídos por uma camada de rolamento composta por concreto, que pode ser produzido com diferentes tipos de agregados e ligantes hidráulicos. Sua fabricação pode ser realizada através de pré-moldagem ou moldagem in loco, mas para garantir todos os benefícios de resistência e durabilidade desse material, é necessário um controle tecnológico rigoroso. Isso ocorre porque o CCP é amplamente utilizado com funções estruturais e deve suportar cargas estáticas e dinâmicas, além de ser resistente à abrasão, desgaste e intempéries. (BALBO, 2009).

O controle tecnológico do CCP envolve a verificação e o controle da qualidade de todos os componentes utilizados na produção do concreto, incluindo o cimento Portland, os agregados, a água e os aditivos. É fundamental controlar a mistura do concreto e o tempo de cura adequado para garantir a resistência e a durabilidade do pavimento. Os pavimentos de concreto de cimento Portland são uma opção durável e eficiente para vias urbanas, rodovias, aeroportos, pátios industriais e áreas de carga e descarga, proporcionando uma superfície uniforme, alta resistência mecânica e baixa permeabilidade.

2.5 A INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS MINERAIS E ARTIFICIAIS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Segundo Santos Silva et al. (2021), a adição de fibras de GA (garrafão de água) ao concreto para pavimentos mostrou um ganho gradativo de resistência à compressão com o aumento da fração volumétrica (0,5%, 1% e 2%) incorporada à massa de concreto nas idades de 28, 56 e 84 dias. Presume-se que essa adição contribuiu para o processo de cura interna, controlando a exsudação ao reter parte da água que poderia evaporar. Nos ensaios de tração por compressão diametral, as amostras com adição de resíduo de GA (0,5%, 1% e 2%) apresentaram uma queda de resistência aos 84 dias. Essa diminuição nos resultados pode ter ocorrido devido à distribuição aleatória das fibras na matriz do concreto.

Mirnezami et al. (2016) investigou o impacto da substituição de agregados naturais por escória de cobre e escória de siderurgia no concreto, focando especialmente na condutividade térmica e nas propriedades mecânicas. Foram realizados testes em cinco diferentes composições de mistura, variando a proporção de agregados alternativos (escória de cobre e escória de aço) em relação ao agregado natural. Os principais resultados indicaram que o concreto com 100% de escória de cobre (100CSA) teve um aumento significativo de 20 MPa na resistência à compressão após 28 dias em comparação com o concreto usando apenas agregado natural. Além disso, as amostras com 100CSA mostraram melhorias na resistência à tração indireta, flexão e resistência ao abatimento em comparação com o concreto convencional. No entanto, o desempenho em termos de resistência à abrasão e condutividade térmica foi superior nas amostras com agregado natural. Notavelmente, a adição de escória de cobre e escória de aço reduziu a condutividade térmica do concreto em 4,5% e 23%, respectivamente, em comparação com o agregado natural. Com base nos resultados, o método estatístico Vikor indicou que a mistura com 50% de agregado de escória de cobre e 50% de agregado natural (50NA + 50CSA) apresentou o melhor desempenho global entre todas as combinações testadas.

Já Panditharadhy (2023) estudou as propriedades mecânicas de concreto de qualidade de pavimento com resíduo da indústria do alumínio como ligante. Foram utilizadas as substituições do cimento nas porcentagens de 5, 10, 15 e 20% pela escória de alumínio. As análises dos ensaios de resistência à compressão, espaços vazios e ciclo de fadiga obtiveram melhores resultados com a substituição em 15% do resíduo no concreto para pavimento.

Anupam (2021) em seu estudo, utilizou vidro-PVC moído, para analisar o desempenho térmico e mecânico de pavimentos de concreto com a substituição parcial do agregado miúdo

do resíduo citado anteriormente. O resíduo foi moído, e parcialmente substituído pelas misturas de PVC-vidro com dosagens de 0, 10, 20, 30 e 40%. Depois, misturou de três formas diferentes: M1 com 25% vidro e 75% PVC, M2 com 50% vidro e 50% PVC e ainda M3 contendo 75% de vidro e 25% de PVC.

Primeiramente o PVC-Vidro foi testado mecanicamente, as porcentagens e misturas que obtiveram melhores resultados foram analisadas também termicamente. As misturas que obtiveram os resultados que satisfizeram os parâmetros das normas indianas, foram 10% de M3 e 20% de M3. Para as análises térmicas o melhor resultado foi 20% de M3 tendo uma redução máxima no gradiente de temperatura de 5,7°C.

Diversas pesquisas foram conduzidas para avaliar o comportamento de resíduos minerais e artificiais em pavimentos de concreto. Alguns estudos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Influência de resíduos minerais e artificiais

| AUTOR/ANO | ESTUDO | TEORES DE SUBSTITUIÇÃO | PRINCIPAIS CONCLUSÕES |
|----------------------------|--|-----------------------------------|--|
| Santos Silva et al. (2021) | Concreto para pavimento rígido com a inserção de resíduo de garrafão de água como agente de reforço da matriz | ✓ 0,5%, 1% e 2% | ✓ Com adição de fibras de GA (Garrafão de água) ao concreto para pavimento foi verificado um ganho de resistência à compressão gradativo com o acréscimo na fração volumétrica ✓ Tração por compressão diametral: as amostras com adição de resíduo de GA aos 84 dias sofreram uma queda de resistência |
| Mirnezami et al. (2016) | O uso da escória do cobre substituindo parcialmente os agregados. | ✓ 50% | ✓ Observou-se que houve uma melhoria do desempenho do concreto em resistências à compressão, tração indireta e flexão |
| Panditharadhya (2023) | Concreto de pavimento com resíduo da indústria do alumínio como ligante | ✓ 15% | ✓ Análises dos ensaios de resistência à compressão, poros e ciclo de fadiga obtiveram melhores resultados com a substituição |
| Anupam (2021) | Para analisar o desempenho térmico e mecânico de pavimentos de concreto com a substituição parcial do agregado | ✓ 10% de M3 e 20% de M3 | ✓ As misturas que obtiveram os resultados que satisfizeram os parâmetros das normas indianas, foram 10% de M3 e 20% de M3. |

| | |
|-----------------------------|---|
| miúdo do resíduo vidro-PVC. | ✓ Para as análises térmicas o melhor resultado foi 20% de M3 tendo uma redução máxima no gradiente de temperatura de 5,7°C. |
|-----------------------------|---|

Fonte: A autora (2024)

2.6 INCORPORAÇÃO DE RETA À MATRIZ CIMENTÍCIA

Ramirez (2015) investigou o uso do resíduo de ETA no concreto, produzindo amostras com resíduo úmido, coletado na unidade de filtração, e resíduo calcinado a 900°C. O autor constatou que o resíduo úmido teve um impacto negativo na resistência à compressão do concreto, com a resistência diminuindo conforme o teor de substituição aumentava. Em contraste, o uso de resíduo calcinado resultou em uma melhoria das propriedades mecânicas do concreto, observada até uma substituição de 20%.

No estudo de Hoppen et al. (2005), foi investigada a possibilidade de utilizar resíduo de ETA como substituto da areia no concreto em diferentes teores, variando de 0% a 10%. O resíduo consistiu principalmente em compostos de Si, Al e Fe, além do argilomineral caulinita, com um teor de umidade em torno de 87%. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão indicaram que as misturas com até 5% de resíduo apresentaram uma resistência de compressão de 28 dias maior que 25 MPa. Já as misturas com teores acima de 5% apresentaram uma resistência mais baixa, especialmente na dosagem de 10%. Concluiu-se que os traços com até 5% de resíduo podem ser utilizados em uma variedade de aplicações, desde a fabricação de artefatos e blocos até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland. No entanto, para misturas com teores acima de 5%, a utilização é mais restrita a aplicações em que a trabalhabilidade não é um parâmetro primordial, como contrapisos, calçadas e pavimentos residenciais.

Hillesheim (2018) pesquisou a utilização de resíduo de estação de tratamento de água, seco em estufa a 105° C, em substituição do cimento Portland no concreto não estrutural com teores de 5, 10 e 15% em relação ao peso do cimento. O autor constatou uma pequena redução nas resistências obtidas, mesmo assim as resistências obtidas foram superiores ao limite mínimo de 20 MPa. A partir dos resultados de trabalhabilidade do concreto, com percentuais de até 10% de substituição de cimento por resíduo, foi verificada a viabilidade de serem empregados na fabricação de artefatos de concreto não estruturais, como blocos de concreto, tampas de

concreto para cobertura de fossas, argamassas de assentamento ou mesmo pavimentos de concreto de cimento Portland (pavimento rígido).

Já Hengen (2014), utilizou em sua pesquisa, a cinza de resíduo de ETA no concreto, para avaliar a sua resistência à compressão axial. Os resultados indicaram que na argamassa houve um bom ganho de resistência tanto aos 7 quanto aos 28 dias, tanto com 10% de substituição quanto com 25%, atendendo à norma ABNT NBR 5752/2014 que trata de novos materiais pozolânicos. Já no concreto, houve um ganho de resistência significativo, entre 1 e 18% aos 7 dias e entre 3 e 30% aos 28 dias, mostrando que a substituição de cimento por CLETA (cinza do lodo de ETA) pode ser uma alternativa viável para melhorar a resistência do concreto.

Inúmeras pesquisas foram desenvolvidas a fim de avaliar o comportamento do resíduo na substituição parcial do cimento Portland. Alguns trabalhos utilizando resíduo de ETA em substituição ao cimento Portland estão dispostos na tabela 4.

Tabela 4 - Estudos com resíduos de ETA calcinados incorporados à matriz cimentícia

| AUTOR/ANO | ESTUDO | TEORES DE SUBSTITUIÇÃO | PRINCIPAIS CONCLUSÕES |
|-------------------------|---|-------------------------------|---|
| Alexandre et al. (2018) | Substituição do cimento CPVARI por RETA | 20 % | <ul style="list-style-type: none"> ✓ A substituição do cimento Portland por resíduo de ETA reduziu a capacidade de resistência mecânica da amostra; ✓ Fissuras e poros na superfície da amostra contendo 20% de resíduo de ETA foram observadas. |
| Hillesheim (2018) | Substituição de cimento por RETA | ✓ 10% | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Pequena redução nas resistências obtidas, as resistências obtidas foram superiores ao limite mínimo de 20 MPa, a partir dos resultados de trabalhabilidade do concreto, com percentuais de até 10% de substituição de cimento por resíduo, podem ser empregados na fabricação de artefatos de concreto não estruturais. |
| Ramirez (2015) | Amostras com resíduo úmido e com resíduo calcinado à 900°C em substituição ao cimento | ✓ 20% | <ul style="list-style-type: none"> ✓ O resíduo úmido possui influência negativa na resistência à compressão do concreto, sendo que quanto maior o teor de substituição menor o valor atingido. ✓ O resíduo calcinado, o autor percebeu que até 20% houve um |

| | | | aumento nas propriedades mecânicas do concreto | | |
|--------------------------|---|---|--|---|---|
| Rocha et al. (2017) | Utilizando o RETA calcinado a 600 °C em substituição ao cimento. | ✓ | 0% a 10% | ✓ | Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, obtiveram resultados satisfatório |
| Gastaldini et al. (2015) | Misturas de concreto onde o RETA foi substituído por cimento Portland | ✓ | 5% a 30% | ✓ | É possível obter a mesma resistência de uma mistura de concreto com 100% de cimento Portland e reduzir o consumo de cimento em 37 a 200 kg de cimento por m ³ de concreto |
| Hengen (2014) | Substituição de cimento por RETA calcinado | ✓ | 3 a 30% | ✓ | Houve um ganho de resistência significativo, entre 1 e 18% aos 7 dias e entre 3 e 30% aos 28 dias, mostrando que a substituição de cimento por CLETA (cinza do resíduo de ETA) pode ser uma alternativa viável para melhorar a resistência do concreto. |
| Andrade et al. (2019) | Agregado reciclado fino na produção de argamassas | ✓ | - | ✓ | Absorção de água pelas argamassas aumentou com a adição de resíduo de ETA. Em relação à resistência mecânica, as amostras com o resíduo apresentaram valores inferiores às de referência. |

Fonte: A autora (2024)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

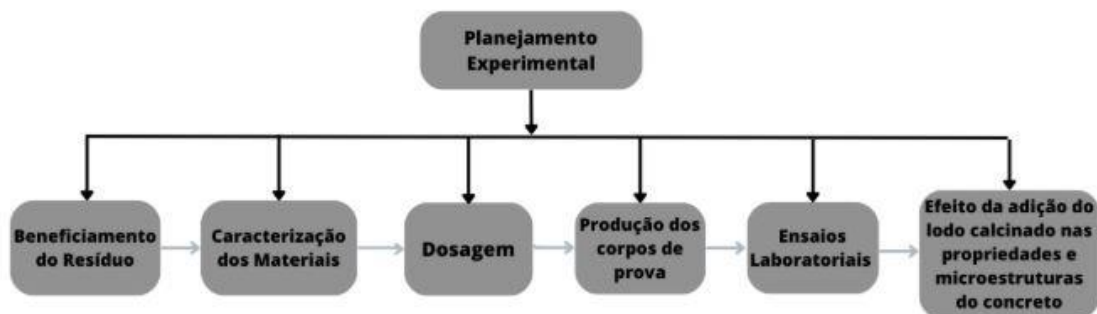
Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa, bem como o procedimento experimental empregado.

3.1 MÉTODOS DE PESQUISA

A pesquisa realizada tem uma abordagem experimental que visará estudar a utilização de resíduo de estação de tratamento de água (RETA) na confecção de concreto para pavimento. O método da pesquisa foi dividido em duas etapas: uma revisão bibliográfica e uma pesquisa experimental. A revisão bibliográfica foi utilizada para estabelecer um referencial teórico, que serviu como base para o conhecimento mais aprofundado da substituição parcial do cimento por RETA no concreto para pavimento. Já a pesquisa experimental envolveu a realização de experimentos em laboratório, com o objetivo de medir as características físicas e as propriedades mecânicas e térmicas das misturas de concreto.

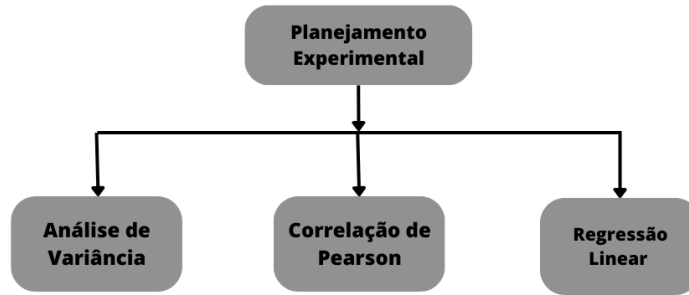
Após a etapa de revisão bibliográfica, foi executada a etapa experimental, a qual foi dividida em cinco partes: caracterização do resíduo e dos agregados naturais, dosagem do concreto, moldagem dos corpos de prova de concreto, ensaios laboratoriais para aferir as propriedades mecânicas e térmicas das misturas de concreto, e o ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Pode-se observar as etapas pertinentes ao planejamento experimental da pesquisa na figura 7 e o planejamento das análises de resultados na figura 8.

Figura 7- Planejamento experimental



Fonte: A autora (2023)

Figura 8- Análise de resultados

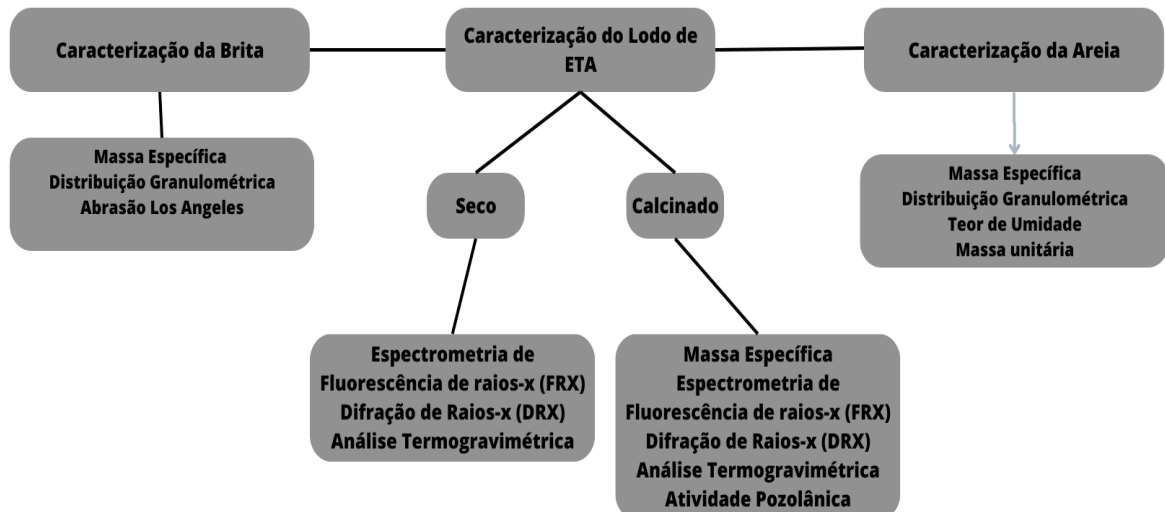


Fonte: A autora (2023)

Em um primeiro momento, de acordo com a figura 7, foi feito o beneficiamento do resíduo e o próximo passo da pesquisa foi realizar a caracterização desse resíduo e, em sequência, também caracterizar o agregado graúdo e miúdo. Em seguida foram feitas as dosagens do concreto e produzidos os corpos de prova para a realização dos ensaios de resistência mecânica e térmica.

A figura 9 apresenta o fluxograma com os ensaios de caracterizações físicas realizados no resíduo da ETA, nos agregados graúdos e miúdos.

Figura 9 – Caracterização dos agregados e do Resíduo de ETA

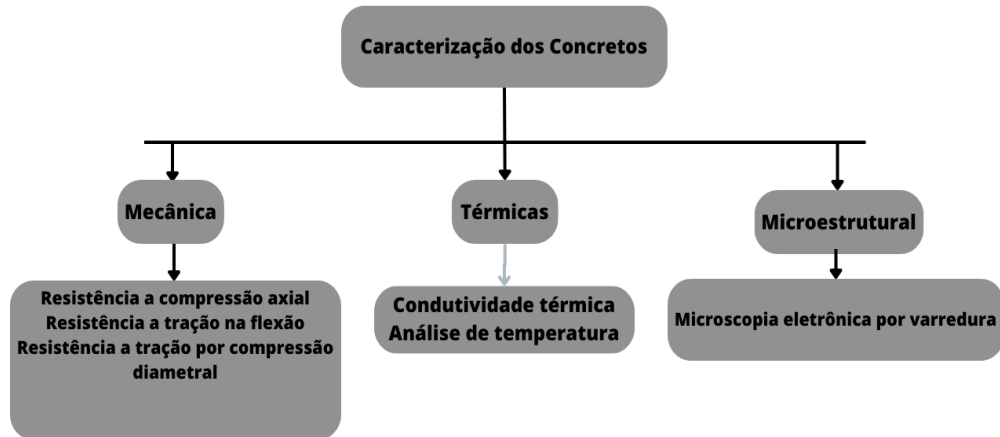


Fonte: A autora (2023)

Para a análise das propriedades térmicas do concreto foram feitos os ensaios de condutividade térmica e análise de temperatura, além dos ensaios para aferir as propriedades mecânicas: resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial e resistência à tração

por compressão diametral e também a análise microestrutural com a microscopia eletrônica varredura, esses passos são descritos na figura 10.

Figura 10- Caracterização dos concretos



Fonte: A autora (2023)

Parte dos ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, e outros nos Laboratórios localizados no departamento da Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc) em Joinville/SC.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Resíduo de estação de tratamento de água

O resíduo proveniente do processo de tratamento de água da Companhia Águas de Joinville, da Estação de Tratamento de Água (ETA) Cubatão, localizada na Rodovia SC 418 Km 3,5 em Joinville, Santa Catarina, Brasil, foi utilizado como objeto de estudo neste trabalho. A figura 11 apresenta a ETA Cubatão.

Figura 11 – ETA Cubatão da Companhia Águas de Joinville



Fonte: Companhia Águas de Joinville (2023)

Segundo Andrioli (2019), a Companhia Águas de Joinville na ETA Cubatão produz, em média, 4.003.216 m³ de água tratada por mês, com base nos dados de 2018. O manancial utilizado para abastecimento é a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão, com o objetivo de fornecer água tratada e de qualidade para a cidade de Joinville, por meio dos processos realizados na ETA.

Na estação de tratamento de resíduo, os resíduos gerados no processo de tratamento da ETA, incluindo as descargas dos decantadores e a lavagem dos filtros, são coletados e armazenados em um tanque de equalização. Posteriormente, o resíduo é bombeado para um clarificador, similar a um floco decantador de alta taxa. A água resultante do processo de clarificação é descartada no Rio Cubatão, enquanto o resíduo adensado é direcionado para um tanque de armazenamento. Esse resíduo é então submetido ao processo de desaguamento por meio de prensas de parafuso (contipress) para a desidratação mecânica, de onde foram coletadas as amostras para o estudo. São dois equipamentos compostos por uma rosca sem-fim, que realizam a separação líquido-sólido. Segundo informações da Companhia Águas de Joinville, o teor de sólidos obtido no processo de desaguamento apresentou valores na faixa de 22 a 25%.

Como citado no capítulo de revisão bibliográfica, o resíduo foi coletado logo após a saída do contipress, não chegando a ser colocado em caçambas por meio da gravidade. O

resíduo utilizado nesta pesquisa foi calcinado e peneirado para que houvesse a desestruturação e colapso do argilomineral, onde os óxidos de silício, alumínio e ferro se tornassem altamente reativos e distribuídos em um material de elevada área específica. Primeiramente, o resíduo passou por uma secagem em forno a 105°C por 24 horas, após esse processo, passou pela calcinação em um forno Mufla a 800°C por 3 horas, sendo depois moído pelo moinho de bolas e peneirado pelas peneiras 45 µm, 75 µm e 125 µm. As figuras 12, 13, 14 e 15 mostram o RETA “*in natura*”, RETA seco, RETA moído e o RETA calcinado, respectivamente.

Figura 12- RETA “*in Natura*”



Fonte: A autora (2023)

Figura 13- RETA seco



Fonte: A autora (2023)

Figura 14- RETA moído



Fonte: A autora (2023)

Figura 15- RETA calcinado



Fonte: A autora (2023)

3.2.2 Cimento Portland

O cimento utilizado no experimento foi o CPV ARI, normatizado pela NBR 16697(ABNT,2018). Suas principais características técnicas são a alta resistência inicial e regularidade nas propriedades físico-químicas. O motivo pela escolha deste tipo de cimento foi o baixo percentual de adições de outros componentes químicos, promovendo uma influência mínima nos resultados de desempenho térmico e mecânico.

3.2.3 Agregados

Os agregados graúdos e miúdos utilizados foram a brita tamanho 1 e 2 e a areia média, ambos extraídos de jazidas da região nordeste do estado de Santa Catarina.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Durante esta fase do planejamento experimental, foram realizados testes para a caracterização dos agregados utilizados nas misturas de concreto, bem como do resíduo da ETA como agregado para substituir parcialmente o cimento Portland nessas misturas.

3.3.1 Caracterização do Resíduo de ETA

3.3.1.1 *Análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)*

Foi realizada a análise de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, com o objetivo de identificar os elementos químicos presentes na amostra do resíduo de ETA e estabelecer a concentração de cada um desses elementos. É importante destacar que esta é uma análise qualitativa, realizada por meio de uma técnica não destrutiva. As amostras foram preparadas previamente, com o resíduo seco e resíduo calcinado, preparadas em um moinho de bolas, e passadas pelas peneiras de 45 μm , 75 μm e 125 μm .

3.3.1.2 *Composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX)*

Foi utilizado o DRX para obter a composição mineralógica do resíduo seco e calcinado. Para a execução do ensaio foi utilizado o mesmo material preparado no item 3.3.1.1, e seguindo o mesmo procedimento de Andrioli (2019). Foi aplicada a radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$) com uma geometria de filmes finos e com ângulo de incidência de 10°. A velocidade aplicada foi 1°/min de forma a realizar uma varredura contínua de 10 a 80°, com um step scan de 0,02° e intervalo de varredura de 2 θ (ângulo de varredura).

3.3.1.3 *Análise Termogravimétrica*

As análises termogravimétricas (TGA) são métodos utilizados para investigar as mudanças de massa que ocorrem em uma amostra quando submetida à diferentes temperaturas. Essas mudanças de massa podem ocorrer devido à formação de subprodutos resultantes da reatividade potencial do material ou pelo processo de queima quando exposto a altas temperaturas.

Além de TGA, durante a análise também é feita uma Análise Térmica Diferencial (DTA) que mede a diferença de temperatura entre uma amostra e um material de referência inerte, ambos sujeitos ao mesmo programa de temperatura. A DTA identifica transições térmicas como fusão, cristalização e reações químicas. Suas principais aplicações são identificação de transições de fase (ex.: fusão, cristalização), estudo de reações exotérmicas e endotérmicas e caracterização de materiais.

Para a realização da análise termogravimétrica do resíduo seco e calcinado foi utilizada a mesma amostra preparada no item 3.3.1.1, além disso foram utilizados parâmetros de temperatura entre 25°C e 1000°C, taxa de aquecimento de 10°C/min e atmosfera em ar.

3.3.1.4 Determinação de massa específica

Para a determinação da massa específica do resíduo foi seguida a norma NBR16605 de 06/2017, que determina a massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó.

3.3.1.5 Atividade pozolânica

De acordo com a norma NBR 5752, é especificado um método para a determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos em conjunto com cimento Portland, após 28 dias, não sendo aplicável à sílica ativa e nem ao metacaulim.

Para a realização dos ensaios, é necessário utilizar um cimento Portland do tipo CP II F classe 32, que apresente uma resistência aos sete dias de 33 ± 3 MPa, areia normal, conforme a ABNT NBR 7214, e um aditivo superplastificante, conforme a ABNT NBR 11768.

Conforme a norma, para a prospecção de novos materiais pozolânicos, a amostra deve ser moída até que o resíduo na peneira com abertura de malha de 45µm seja inferior a 20%, preferencialmente entre 10% e 15%, e deve ser seca em estufa a (105 ± 5) °C durante 24h.

O método consiste em moldar corpos de prova de argamassa, traço 1:3, relação água/cimento $(a/c) = 0,48$. A Argamassa "A" deve ser produzida utilizando o cimento CP II F e a argamassa "B" substituindo 25% do cimento por material pozolânico. Ambas as argamassas devem apresentar o mesmo nível de consistência e, se necessário, deve-se fazer uso de um aditivo superplastificante. O índice de desempenho com cimento é obtido a partir da relação entre os valores de resistência da argamassa B aos 28 dias divididos pelo valor obtido pela argamassa A (referência), na mesma idade, vezes 100.

3.3.2 Caracterização de agregado graúdo e miúdo

3.3.2.1 Distribuição granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica da amostra de areia foi realizada conforme a norma NBR 17054 (ABNT, 2022), utilizando o método de peneiramento manual com uma série de peneiras com aberturas de malha crescentes: 19 mm, 12,5 mm, 6,3 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm e fundo. Esse procedimento experimental permitiu a determinação do diâmetro máximo do agregado miúdo e o módulo de finura.

3.3.2.2 Massa unitária

A norma NBR NM 16972/2021 estabelece as diretrizes para a determinação da massa específica de materiais sólidos, em especial do agregado miúdo. A massa específica é uma medida fundamental da densidade de um material e é definida como a massa por unidade de volume, incluindo poros internos das partículas, sem considerar os poros permeáveis.

3.3.2.3 Teor de Umidade

Para determinar o teor de umidade superficial de agregados miúdos utilizando frascos de Chapman, foi utilizada a norma NBR 9775 (ABNT, 2011).

3.3.2.4 Massa Específica

Esse ensaio é determinado pela NBR NM 53 – ABNT – “Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. A amostra é coletada seguindo o procedimento estabelecido na NM 26 e reduzida de acordo com a NM 27. Para o agregado miúdo é utilizada a norma NBR NM 52:2009: Agregados - Determinação da massa específica e massa específica aparente.

3.4 DOSAGEM DO CONCRETO

Nesta pesquisa, foi necessário empregar um cimento sem adição de pozolana, a fim de evitar influências nos resultados que avaliam o desempenho térmico e mecânico do concreto. Assim, optou-se pelo uso do cimento CPV ARI. O CPV ARI é conhecido por apresentar o maior teor de clínquer entre os tipos de cimento disponíveis no mercado (95% de clínquer), não sendo adicionada pozolana durante seu processo de fabricação. Além disso, ele contém uma adição máxima de 5% de fíler calcário, conforme descrito por Votorantim (2016).

Esta dosagem de concreto foi utilizada para a fabricação de pavimento de concreto Simples e seguirá as normas do Manual de pavimentos Rígidos (DNIT,2005) e também da DNIT 054/2004 – PRO.

Para a dosagem do concreto foi tomado como ponto de partida o traço definido na pesquisa de Zanella (2014), o qual seguiu as normas do Manual de pavimentos Rígidos (DNIT, 2005). O traço é definido por 1:2,11:1,84:1,84, cimento, areia média e brita 1 e brita 2, também foram usados o plastificante SikaPalast 901 e a relação a/c de 0,483. Além disso, o resíduo de estação de tratamento de água substituirá o cimento, em massa, nas porcentagens de 1%, 5% e 10% nesta dosagem conforme mencionado na tabela 6, tendo dessa forma 4 traços diferentes, para compara-los, e verificar qual o melhor percentual do RETA nas misturas que beneficiará as propriedades mecânicas e térmicas do concreto. O traço foi escolhido utilizando como referências as pesquisas de Hillesheim (2018), Hengen (2014) e Vu et al. (2001).

Tabela 6 – Dosagem de materiais para a produção do concreto

| Material | Referência | 1% de RETA | 5% de RETA | 10% de RETA |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| CimentoCP-V | 1 | 0,99 | 0,95 | 0,9 |
| Areia Média | 2,11 | 2,11 | 2,11 | 2,11 |
| Brita 2 | 1,84 | 1,84 | 1,84 | 1,84 |
| Brita 1 | 1,84 | 1,84 | 1,84 | 1,84 |
| Aditivo (%) | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Relação a/c | 0,483 | 0,483 | 0,483 | 0,483 |
| Resíduo ETA | - | 0,01 | 0,05 | 0,1 |

Fonte: A autora (2023)

3.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade máxima de 120 litros, o processo de moldagem foi padronizado. Em um primeiro momento foi umidificada a betoneira para evitar a absorção de água de amassamento. Em seguida, os agregados miúdos e graúdos foram adicionados e homogeneizados. Posteriormente, o cimento, e o resíduo em suas devidas porcentagens foram acrescentados além da água e o aditivo super plastificante (figura 16). Após três minutos a homogeneidade do material foi verificada, o teste slump (figura 17) foi realizado e o processo de moldagem dos corpos de prova foi iniciado. Após 24 horas nas formas, os corpos de prova foram desmoldados e levados para um processo de cura úmida em tanque de água não corrente (figura 18), com água saturado em hidróxido de cálcio com temperatura constante de 23° até o momento para a realização de ensaios mecânicos. A quantidade corpos de provas para a caracterização mecânica está discriminada na tabela 7 e na tabela 8 para a caracterização térmica.

Tabela 7 – Quantidade de corpos de prova ensaio caracterização mecânica

| Ensaio de Caracterização Mecânica | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|-------|
| Ensaio | Tamanho | Quantidade por traço | Total |
| Compressão Axial | Cilíndrico 15x30 cm | 6 | 24 |
| Tração na Flexão | Prismático 10x10x40cm | 6 | 24 |
| Tração por compressão na diametral | Cilíndrico 15x30 cm | 6 | 24 |

Fonte: A autora (2024)

Tabela 8 – Quantidade de corpos de prova ensaio caracterização térmica

| Ensaio de Caracterização Térmica | | | |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|-------|
| Ensaio | Tamanho | Quantidade por traço | Total |
| Condutividade térmica | Placa 10x10x2,5cm | 3 | 12 |
| Análise de Temperatura | Placa 50x50x10cm | 1 | 4 |

Fonte: A autora (2024)

Figura 16 – Amassamento



Fonte: A autora (2024)

Figura 17 – Slump Test



Fonte: A autora (2024)

Figura 18 – Tanque de cura



Fonte: A autora (2024)

3.6 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.6.1 Resistência a compressão axial

Para obter o valor da resistência à compressão do concreto, é necessário seguir a norma ABNT NBR 5739:2018, que estabelece o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Nesse ensaio, o corpo de prova é submetido a uma prensa hidráulica, que exerce gradualmente uma força de compressão até o seu rompimento (figura 19). O valor da força exercida é então dividido pela área da circunferência superior do corpo de prova, permitindo a inferência da resistência do material. Para o manual do DNIT de Pavimentos Rígidos (2005) o concreto para pavimento deve ter a resistência mínima de 30 MPa.

Figura 19 – Ensaio compressão axial



Fonte: A autora (2024)

3.6.2 Resistência a tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados conforme a ABNT NBR7222 (2011). Para conduzir o experimento de acordo com as instruções da norma, um corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 15 cm e altura de 30 cm é posicionado horizontalmente entre os pratos da prensa (figura 20). Em seguida, a carga é aplicada

gradualmente até que ocorra a ruptura por tração indireta ou fendilhamento. Ainda de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011), a resistência à tração por compressão diametral é calculada pela equação 1.

Figura 20 – Rompimento corpo de prova ensaio tração por compressão diametral



Fonte: A autora (2024)

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (1)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F é a força máxima aplicada no ensaio, em N;

d é o diâmetro do corpo de prova, em mm e;

l é o comprimento do corpo de prova em mm.

3.6.3 Resistência a tração na flexão

Seguindo as diretrizes da NBR 12142 (ABNT, 2010), o cálculo para o resultado da sua resistência à tração na flexão se dá pela Equação 2. Segundo o manual do DNIT de Pavimentos Rígidos (2005) o concreto para pavimento deve ter a resistência mínima de 4,5 MPa. Na figura 21 é demonstrado o rompimento do corpo de prova durante a execução do ensaio.

Figura 21 – Rompimento corpo de prova ensaio tração na flexão



Fonte: A autora (2024)

$$f_{ct,f} = \frac{Fl}{bd^2} \quad (2)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão (MPa)

F - força máxima registrada na máquina de ensaio (N)

l - dimensão do vão entre apoios (mm)

b - largura média do corpo de prova (mm)

d - altura média do corpo de prova (mm)

3.7 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS

3.7.1 Condutividade Térmica

O condutímetro (figura 22) foi construído seguindo os procedimentos descritos na Norma Técnica ISO 8301 (1991): “Standart Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus”. Para determinação da condutividade térmica foram moldadas 3 amostras para cada traço de concreto, com dimensões de 20x20x6 cm (figuras 23). A resistência térmica em regime permanente é determinada a partir da equação Fourier, dada pela equação 3:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\frac{q_1 + q_2}{2}} \quad (3)$$

Onde:

R: é a resistência térmica (m²K/W) em regime permanente;

q₁ e q₂: são as densidades de fluxo de calor medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W/m²); T₁ e T₂: as temperaturas superficiais da amostra.

A condutividade térmica do material (λ) pode ser determinada pela equação 4.

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (4)$$

Onde:

λ: é a condutividade térmica (W/mK);

L: é a espessura do material (m);

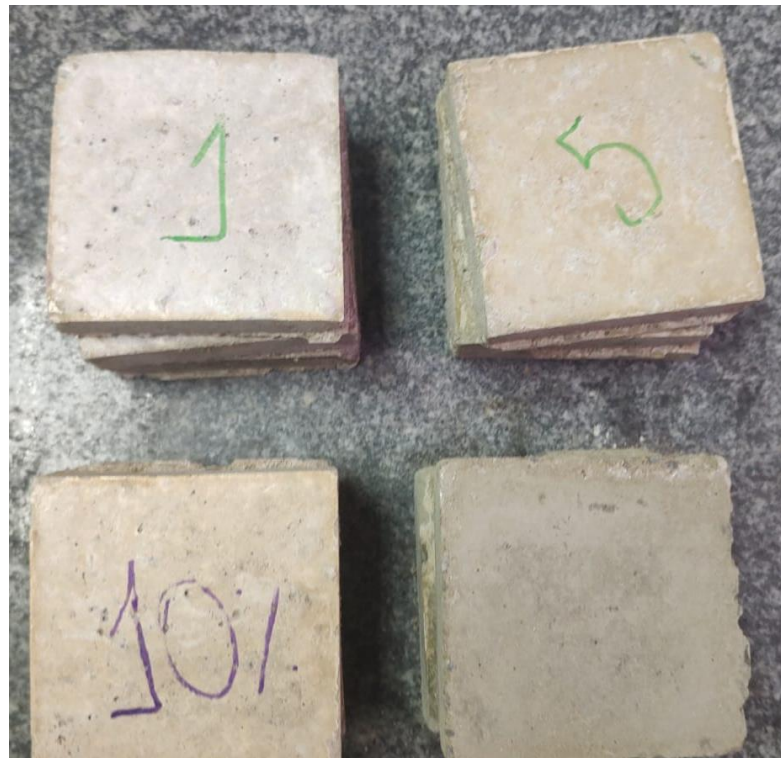
R: é a resistência térmica medida (m²K/W)

Figura 22 – Ensaio condutividade térmica



Fonte: A autora (2024)

Figura 23 – Corpos de prova condutividade térmica



Fonte: A autora (2024)

3.7.2 Análise de Temperatura

Utilizando como base o estudo de Anupam, Balam e Sharma(2021), ensaio utiliza a placas de concreto de 50 x 50 x 15 cm (figura 24). É feita a medição de temperatura de hora em hora por um período de 12 horas, essa medição de temperatura é efetuada na parte de cima da placa, para determinar o fluxo de temperatura dos blocos de concreto, com um termômetro a laser digital indústria, medindo temperaturas de -50°C a 400°C (figura 25).

Figura 24- Análise de temperatura



Fonte: A autora (2024)

Figura 25- Termômetro a laser industrial



Fonte: A autora (2024)

3.8 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

3.8.1 Microestrutura eletrônica por varredura

Segundo Sachet (2012), o microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um instrumento extremamente versátil para a análise e observação de microestruturas de materiais. Além de permitir a visualização detalhada das superfícies, o MEV possibilita a análise pontual da composição dos elementos sólidos presentes nos materiais durante os ensaios.

Para a realização do ensaio, foram retiradas amostras dos corpos de prova após 28 dias de cura. As amostras foram imersas em resina, lixadas e polidas. O ensaio foi conduzido no Centro Multiusuário (CMU/CCT/UDESC), onde as amostras foram identificadas, recobertas com uma fina camada de ouro e inseridas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Field Emission JSM6701F.

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

3.9.1 Análise de Variância

Com o objetivo de investigar o efeito do RETA nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto para pavimentação, os dados coletados no planejamento experimental foram analisados estatisticamente. Para isso, foi utilizado o software R Studio e realizado testes de hipóteses e Análise de Variância (ANOVA), desde que as premissas da ANOVA sejam cumpridas: normalidade dos dados, igualdade de variância entre as amostras e independência das amostras. Portanto, essas análises estatísticas serão aplicadas para todas as variáveis de resposta, que são as propriedades mecânicas e térmicas dos traços de concreto avaliados.

No teste de hipóteses, a hipótese nula (H_0) será estabelecida como a média para cada propriedade do concreto de pavimento calculada e a hipótese alternativa (H_1) será definida como diferente da média, tornando o teste bilateral. Um nível de significância (α) será definido para determinar a probabilidade de se cometer um erro do tipo I, ou seja, rejeitar H_0 quando esta é verdadeira (BUSSAB; MORETTIN, 2010). Geralmente, se a probabilidade de significância (p) for maior do que o nível de significância, $p > \alpha$, a H_0 será aceita e será concluído que a incorporação do RETA não teve influência significativa no concreto para pavimento. Por outro lado, se $p \leq \alpha$, a H_0 será rejeitada e será admitido que a adição de RETA

ao concreto de pavimentação tem influência significativa em determinada propriedade do concreto.

Antes de realizar a ANOVA nos resultados das análises térmicas e mecânicas, será verificado se os dados possuem uma distribuição normal ou se pelo menos se aproximam dela. Para verificar a normalidade, será construído um histograma e aplicado o teste de Shapiro-Wilk, em que a hipótese nula (H_0) é de que os dados seguem uma distribuição normal e a hipótese alternativa (H_1) é de que não seguem. Se o valor de p for maior que o nível de significância (α), H_0 será aceita, caso contrário, será rejeitada. Se for encontrada uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos ensaios de propriedades mecânicas e térmicas do Resíduo de ETA por meio da ANOVA, será aplicado o teste de Tukey para identificar quais médias são diferentes entre si.

3.9.2 Regressão linear

A análise de regressão linear é um método estatístico que se baseia na relação entre duas ou mais variáveis, permitindo que uma delas seja estimada em função da outra (ou outras) a partir de um modelo empírico. Para ajustar modelos de regressão linear simples, é necessário dispor de uma variável preditora (x) e outra dependente, também conhecida como variável resposta (y), segundo Montgomery e Runger (2018).

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos durante a fase experimental da pesquisa.

4.1.1 Quanto as características dos agregado naturais

Quanto à distribuição granulométrica da areia e das britas, a Tabela 9 apresenta as porcentagens passantes dos agregados ensaiados segundo a NBR 17054/2022. Com módulo de finura igual a 2,68 e diâmetro máximo de 2,36 mm, a massa específica da areia média a partir do ensaio efetuado método de Chapman obteve um resultado de 2,56 g/cm³.

A curva granulométrica da brita é uniforme. A brita 1 apresentou módulo de finura igual a 6,89 e diâmetro máximo de 19 mm, já a sua massa específica foi de 2,74 g/cm³.

Tabela 9 -Granulometria dos Agregados Naturais

| Peneira (mm) | Porcentagem Passante Areia Média | Porcentagem Passante Brita 2 | Porcentagem Passante Brita 1 |
|-------------------------|---|---|---|
| 19 | 100 | 41,3 | 100 |
| 12,5 | 100 | 24,8 | 49,41 |
| 9,5 | 100 | 1,25 | 10,28 |
| 6,3 | 100 | 0,36 | 1,36 |
| 4,75 | 99,1 | 0 | 0,2 |
| 2,36 | 98,78 | 0 | 0 |
| 1,18 | 87,38 | 0 | 0 |
| 0,6 | 63,72 | 0 | 0 |
| 0,3 | 8,61 | 0 | 0 |
| 0,15 | 0,92 | 0 | 0 |
| Fundo | 0 | 0 | 0 |

Fonte: A autora (2023)

4.1.2 Quanto a caracterização do resíduo de ETA

4.1.2.1 Índice de pozolanicidade

No ensaio, o resíduo foi primeiramente seco em estufa a 105 °C durante 24 horas, depois homogeneizado e calcinado em forno Mufla, com durações de 1 e 2 horas. As cinzas resultantes foram então moídas a seco por 20 minutos. A tabela 10 mostra os dados e resultados dos ensaios de pozolanicidade com cimento Portland.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de pozolanicidade aos 28 dias.

| Corpo de Prova | Finura (%) | Ind. de cons.1 | ADT 2 | Fc28 dias (MPa) | IAP (%) 3 |
|----------------|------------|----------------|-------|-----------------|-----------|
| Ref. | 15,5 | 132 | - | 44 | - |
| Resíduo | 14,3 | 135 | 0,2 | 49,6 | 112,73 |

1-Índice de consistência 2-Aditivo 3- Índice de atividade Pozolanica

Fonte: A autora (2023)

A resistência à compressão obtida com a queima de temperatura de 800°C por 2 horas, com teor de resíduo na peneira 45µm de 14,3% é de 49,6 MPa, gerando assim um índice de atividade pozolânica de 112,73%, superior ao de referência, sem a adição de resíduo, que obteve o resultado de 44 MPa. Desse modo, o índice de atividade pozolânica (IAP) obtido está acima do requerido em norma, cujo valor é de 90%. Ruviaro *et al.* (2020) também obtiveram resultados potenciais para o índice de pozolanicidade de resíduo calcinado em 114%, como citado anteriormente sendo maior que o IAP de norma. Já Hengen (2014) calculou a IAP do resíduo calcinado em temperaturas de 400°C a 700°C, o resíduo calcinado por uma hora e duas horas a 400°C e obteve um resultado de IAP 98% e 101%, respectivamente. O resíduo calcinado por uma hora e duas horas, teve a IAP de 125% e 113%, respectivamente. Agra *et al.* (2023) caracterizou o resíduo de estação de tratamento de água calcinado entre 600°C e 800°C e do Metalcaulim, este último obteve o maior valor de resistência à compressão, apresentando um IAP de 134%, já os resíduos calcinados a 600°C, 700°C e 800°C apresentaram os valores de IAP iguais a 89,63, 112,94 e 108,35%, respectivamente.

4.1.2.2 Caracterização química com FRX

A tabela 11 representa a caracterização química com FRX do resíduo de estação de tratamento de água utilizada na pesquisa.

Tabela 11 – Composição Química com FRX

| Composição(%) | Resíduo Seco | Resíduo Calcinado | CPV ARI |
|------------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------|
| Al₂O₃ | 22,24 | 38,65 | 6,45 |
| SiO₂ | 18,77 | 31,86 | 22,38 |
| Fe₂O₃ | 16,57 | 21,68 | 3,41 |
| K₂O | 1,06 | 1,63 | - |
| TiO₂ | 1,05 | 1,41 | - |
| CaO | 0,93 | 1,52 | 54,75 |
| P₂O₅ | 0,79 | 0,87 | - |
| SO₃ | 0,72 | 0,73 | 2,68 |
| MnO | 0,35 | 0,25 | - |
| Na₂o | 0,22 | 0,23 | - |
| Perda de fogo | 37,3 | 1,17 | - |

Fonte: A autora (2023)

Na composição química, percebe-se que sua maior porcentagem está entre os componentes Sílica (SiO₂), Hematita (Fe₂O₃) e Alumina (Al₂O₃), são características bastante parecidas com o cimento Portland e Metacaulim, o que se deve, provavelmente, pela adição de sulfato de alumínio durante o tratamento da água na estação. Já a perda de fogo deve-se a presença de compostos voláteis do resíduo seco.

Além disso, a massa específica do resíduo foi medida utilizando o LE Chatelier, conforme NBR 16605 (ABNT,2017), obtendo um resultado de 2,25 g/cm³.

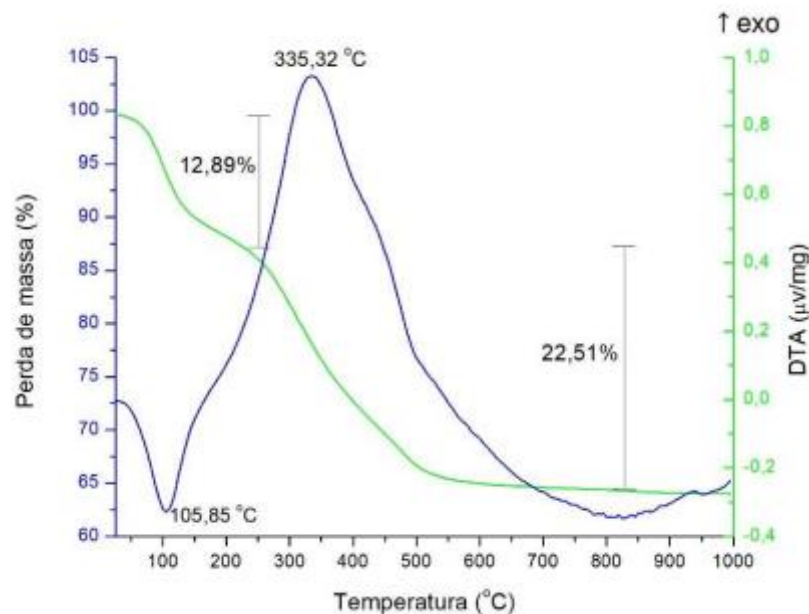
4.1.2.3 Termogravimetria

A termogravimetria foi empregada para analisar o comportamento térmico do resíduo, os resultados da análise estão descritos na figura 26, utilizando como referência Andrioli (2019) a qual revela duas etapas de perda de massa ao ser aquecido. Na primeira etapa, entre 0°C e 105,85°C, houve uma perda de 12,89% devido à liberação de umidade, caracterizada por um

pico endotérmico a 105,85°C. Já na segunda etapa, entre 105,89°C e 828,49°C, a perda de 22,51% foi observada devido à liberação de compostos voláteis e degradação de compostos orgânicos, com um pico exotérmico a 335,32°C indicando tais reações.

Os resultados da análise mostram que, ao ser aquecido, o resíduo passa por duas fases de perda de massa. Na primeira fase, até cerca de 105°C, ocorre principalmente a evaporação da água presente no material, sem que haja uma decomposição significativa dos seus componentes orgânicos. Na segunda fase, a partir de 105°C até aproximadamente 828°C, observa-se uma redução mais na massa do resíduo, causada pela decomposição dos compostos orgânicos e pela liberação de compostos voláteis. Esses dados são importantes para compreender a composição do resíduo e suas propriedades térmicas, o que pode ser útil em processos de tratamento ou aproveitamento energético.

Figura 26 – Termogravimetria do resíduo de estação de tratamento de água



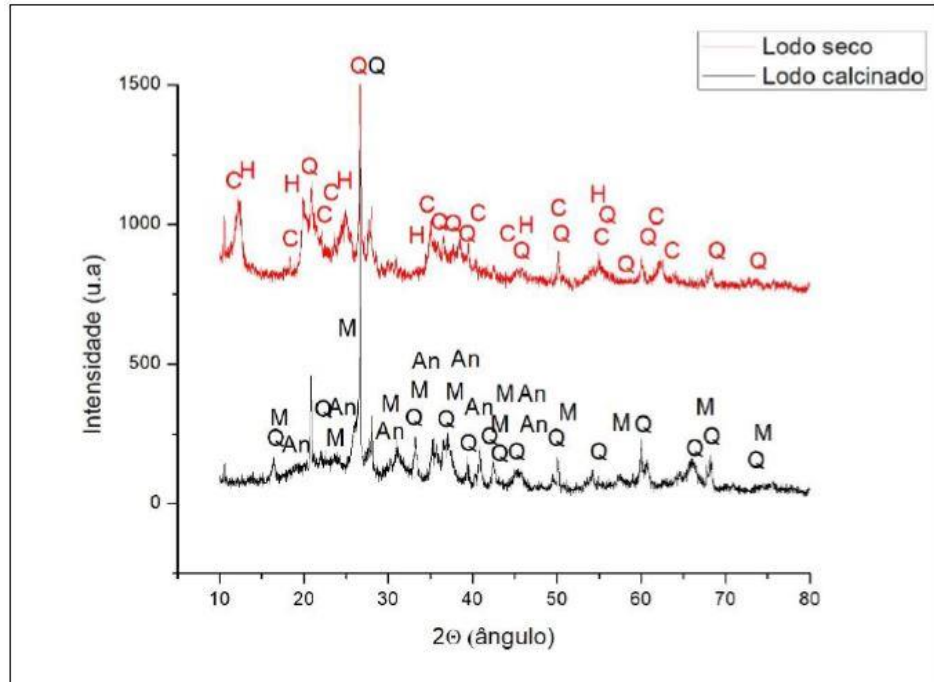
Fonte: A autora (2023)

4.1.2.4 Difração de Raios x

Para caracterizar as fases cristalinas do resíduo de ETA foi realizada uma difração de raios-X no resíduo seco e no resíduo calcinado a 800°C como apresentado por Andrioli (2019) na figura 27. O resíduo seco é composto pelos minerais: quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e haloisita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Por outro lado, o resíduo calcinado contém quartzo, mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e anortita ($\text{Ca} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$).

Dessa forma, percebe-se que existe uma provável variabilidade na composição mineralógica do resíduo. Além disso, pode-se afirmar que as fases cristalinas encontradas corroboram com sua presença na composição química do resíduo mostrada na Tabela 11.

Figura 27- Comparação dos difratogramas do resíduo calcinado e resíduo seco



Fonte: A autora (2023)

4.1.3 Caracterização mecânica

4.1.3.1 Resistência à compressão axial

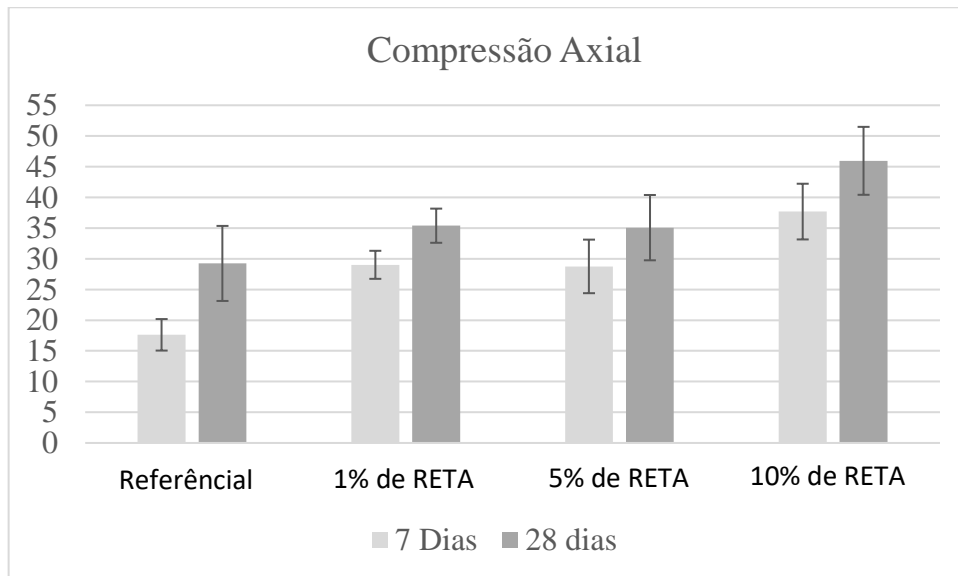
A tabela 12 identifica os resultados obtidos pelo ensaio de compressão axial em 7 dias e 28 dias de cura. Na figura 28, o gráfico demonstra as resistências médias de compressão axial de 7 dias e 28 dias de cura, das misturas de referência, 1% de RETA, 5% de RETA e 10% RETA

Tabela 12 – Resultados do ensaios de resistência a compressão axial

| TRAÇO | 7 DIAS | 28 DIAS |
|--------------------|---------------|----------------|
| REFERÊNCIA | 16,30 | 23,48 |
| REFERÊNCIA | 15,97 | 28,59 |
| REFERÊNCIA | 20,57 | 35,65 |
| 1% de RETA | 28,08 | 34,24 |
| 1% de RETA | 27,35 | 33,36 |
| 1% de RETA | 31,62 | 38,56 |
| 5% de RETA | 26,83 | 32,72 |
| 5% de RETA | 33,75 | 41,16 |
| 5% de RETA | 25,69 | 31,33 |
| 10% de RETA | 42,39 | 51,69 |
| 10% de RETA | 33,34 | 40,65 |
| 10% de RETA | 37,33 | 45,52 |

Fonte: A autora (2024)

Figura 28- Médias e desvio padrão dos valores de resistência à compressão axial em 7 e 28 dias



Fonte: A autora (2023)

Quanto maior a porcentagem de substituição de resíduo calcinado, maior foram os resultados encontrados. Os corpos de prova de referência tiveram uma média de 17 MPa para os 7 dias e 30 MPa para os 28 dias, já a mistura com substituição de 1% de RETA calcinado,

em 7 dias, obteve em média 30 MPa e, em 28 dias, a média foi de 35 MPa. Pode-se observar que o resultado médio de 28 dias da referência e de 7 dias da mistura de 1% RETA foram os mesmos. O traço com 5% 28 Mpa aos 7 dias e 35MPa aos 28 dias. O traço de 10% obteve em 7 dias a resistência de 37 MPa, e em 28 dias 46 MPa.

Dessa forma, todas as misturas apresentadas na Tabela 12 e na Figura 28 mostraram resultados superiores aos exigidos pela norma. De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), o concreto utilizado em pavimentos deve ter uma resistência mínima de 30 Mpa na resistência a compressão axial.

He et al. (2023) citou que a resistência à compressão do concreto é melhorada pela incorporação de RETA calcinado com taxa de substituição de 10% do cimento Portland. Com a taxa de água/cimento de 0,30, aos 28 dias, chegando a uma média de 52 MPa, 0,4 com a média de 47 MPa e 0,5 a média é de 35 MPa e a referência tem a média de 42 MPa. Com as informações citadas, pode-se observar que a substituição de 10%, com a taxa de água cimento em 0,3, obtém melhor resultado, sendo maior que que o traço de referência. Além disso, é possível verificar que a relação água/cimento influencia significativamente a resistência à compressão do concreto, com menores relações água/cimento resultando em maiores resistências.

Castro (2014) observa que o uso de RETA na fabricação de pavimentos pré-moldados de concreto apresenta resultados variados. Com a adição de 5% de RETA, há uma diminuição na resistência à compressão axial. No entanto, quando a porcentagem de resíduo é aumentada para 10% e 15%, as resistências à compressão melhora.

Para verificar se os dados de resistência à compressão axial seguem uma distribuição normal em cada nível de substituição de cimento no concreto, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk. Os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

| TRAÇO (%) | Valor p |
|--------------------|----------------|
| REFERÊNCIA | 0,824 |
| 1% de RETA | 0,303 |
| 5% de RETA | 0,250 |
| 10% de RETA | 0,870 |

Fonte: A autora (2023)

Os valores de p para todos os níveis de substituição são maiores que 0,05, indicando que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de normalidade. Portanto, assume-se que os dados seguem uma distribuição normal para cada percentual de substituição.

A Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada para comparar as médias de resistência à compressão axial entre os diferentes níveis de substituição do resíduo nos traços de concreto. O valor p (0,0231) é menor que 0,05, indicando que há uma diferença significativa entre as médias de resistência dos percentuais de substituição. Isso sugere que pelo menos um dos percentuais de substituição tem uma média de resistência à compressão axial diferente dos outros. O teste de Levene foi realizado para verificar a homogeneidade das variâncias entre os diferentes percentuais de substituição. O valor p (0,8579) é maior que 0,05, indicando que não há evidências para rejeitar a hipótese nula de homogeneidade das variâncias, assim como demonstra tabela 14. Portanto, as variâncias entre os diferentes percentuais são consideradas homogêneas.

Tabela 14- Resultados Análise de Variância resistência à compressão

| Fonte de variação | Soma dos quadrados | GL | Médias dos quadrados | F | Valor-p |
|--------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------|----------|----------------|
| Entre grupos | 436 | 3 | 145,3 | 5,589 | 0,0231* |
| Dentro dos grupos | 208 | 8 | 26 | | |
| Total | 644 | 11 | | | |

Fonte: A autora (2024)

Para identificar quais percentuais de substituição diferem significativamente entre si, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey. Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15- Resultados do Teste de Tukey

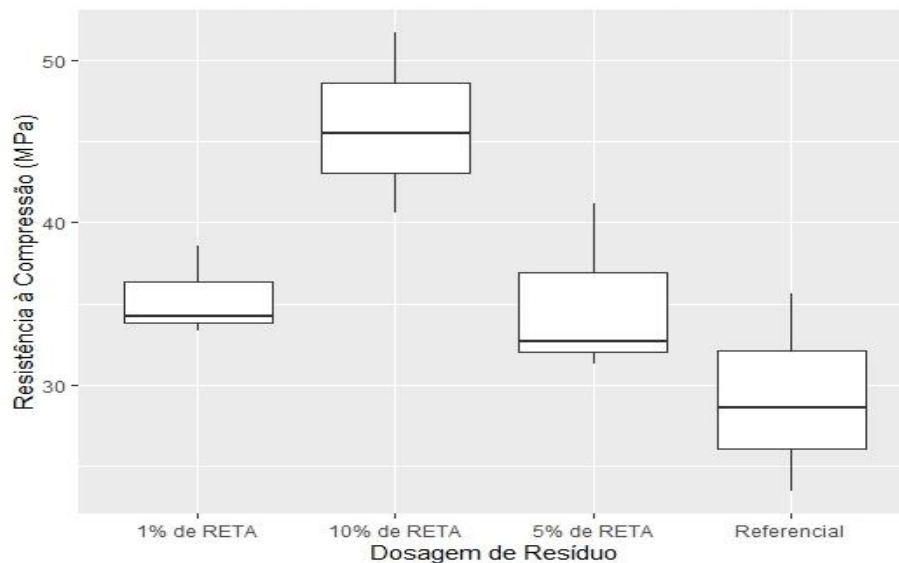
| Comparação | Valor p Ajustado |
|---------------------------------|------------------|
| 1% de RETA - REFERÊNCIA | 0,4923 |
| 5% de RETA - REFERÊNCIA | 0,5327 |
| 10% de RETA - REFERÊNCIA | 0,0163* |
| 5% de RETA - 1% de RETA | 0,9998 |
| 10% de RETA - 1% de RETA | 0,1275 |
| 10% de RETA - 5% de RETA | 0,1146 |

* Significativo a 0,05

Fonte: A autora (2024)

A comparação 10% de RETA com o traço de referência é significativa ($p \text{ adj} = 0,0163$), indicando que o grupo com 10% de substituição tem uma média de resistência à compressão axial significativamente maior do que o grupo sem substituição. As outras comparações não são significativas ($p \text{ adj} > 0,05$), indicando que não há diferenças significativas nas médias de resistência entre esses grupos. A visualização com o gráfico boxplot e o teste de Tukey corroboram que as substituições de 1%, 5% e 10% se destacam significativamente em termos de aumento de resistência à compressão.

Figura 29- Gráfico Bloxpot resistência à compressão



Fonte: A autora (2024)

4.1.3.2 Resistência tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) foram realizados aos 7 e 28 dias de cura dos corpos de prova. A Tabela 16 apresenta os resultados do ensaio.

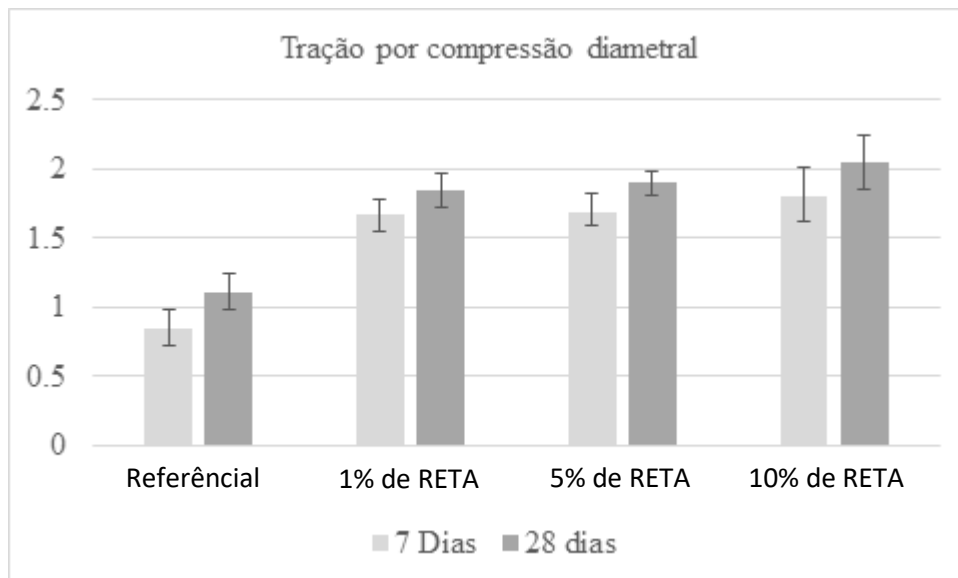
Tabela 16 – Resultados ensaios resistência a tração por compressão diametral

| TRAÇO (%) | 7 DIAS | 28 DIAS |
|--------------------|---------------|----------------|
| REFERÊNCIA | 0,98 | 1,01 |
| REFERÊNCIA | 0,71 | 1,26 |
| REFERÊNCIA | 0,87 | 1,07 |
| 1% de RETA | 1,76 | 1,94 |
| 1% de RETA | 1,7 | 1,89 |
| 1% de RETA | 1,56 | 1,7 |
| 5% de RETA | 1,62 | 1,9 |
| 5% de RETA | 1,57 | 1,81 |
| 5% de RETA | 1,85 | 1,99 |
| 10% de RETA | 1,63 | 1,87 |
| 10% de RETA | 2,02 | 2,25 |
| 10% de RETA | 1,78 | 2,03 |

Fonte: A autora (2024)

A Figura 30 apresenta o gráfico com os valores médios e o desvio padrão de resistência aos 7 e 28 dias de ensaio, para a mistura de referência e demais substituições.

Figura 30- Médias e desvio padrão de resistência à tração por compressão diametral em 7 e 28 dias



Fonte: A autora (2024)

Como pode-se observar na Figura 30, os valores de RTCD obtidos aos 7 dias estão entre 0,85 MPa e 1,81 MPa, já aos 28 dias a média é de 1,11 MPa e 2,05 MPa. Nota-se que os valores de Resistência à tração na compressão diametral aumentam ao substituir o cimento por RETA calcinado. Os valores de Resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias das misturas 1% de RETA, 5% de RETA e 10% de RETA aumentaram 65%, 71% e 85%, respectivamente, quando comparados com a resistência da mistura de referência. As normas rodoviárias brasileiras não especificam um limite mínimo de Resistência a tração na compressão diametral aos 7 ou aos 28 dias, de forma que é recomendável a execução do ensaio de resistência à tração na flexão para a avaliação do concreto.

Para verificar se os dados de resistência à tração por compressão diametral seguem uma distribuição normal em cada teor de substituição de cimento, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk. Os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

| TRAÇO (%) | Valor p |
|--------------------|----------------|
| REFERÊNCIA | 0,443 |
| 1% de RETA | 0,380 |
| 5% de RETA | 1,000 |
| 10% de RETA | 0,826 |

Fonte: A autora (2024)

Os valores de p para todos os níveis de substituição são maiores que 0,05, indicando que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de normalidade. Portanto, assume-se que os dados seguem uma distribuição normal para cada grupo de substituição.

A Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada para comparar as médias de resistência à tração por compressão diametral entre os diferentes percentuais de substituição. O valor p (0,000154), como indicado na tabela 18, é menor que 0,05, indicando que há uma diferença significativa entre as médias de resistência dos grupos de substituição. Isso sugere que pelo menos um dos grupos de substituição tem uma média de resistência à tração por compressão diametral diferente dos outros.

Tabela 18- Resultados Análise de Variância resistência a compressão

| Fonte de variação | Soma dos quadrados | GL | Médias dos quadrados | F | Valor-p |
|--------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------|----------|----------------|
| Entre grupos | 1,5731 | 3 | 0,5244 | 27,04 | 0,000154*** |
| Dentro dos grupos | 0,1551 | 8 | 0,0194 | | |
| Total | 644 | 11 | | | |

Fonte: A autora (2024)

O teste de Levene foi realizado para verificar a homogeneidade das variâncias entre os grupos. O valor p (0,844) é maior que 0,05, indicando que não há evidências para rejeitar a hipótese nula de homogeneidade das variâncias. Portanto, as variâncias entre os grupos são consideradas homogêneas.

Para identificar quais grupos diferem significativamente entre si, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey, e os resultados estão demonstrados na tabela 19.

Tabela 19- Resultados do Teste de Tukey

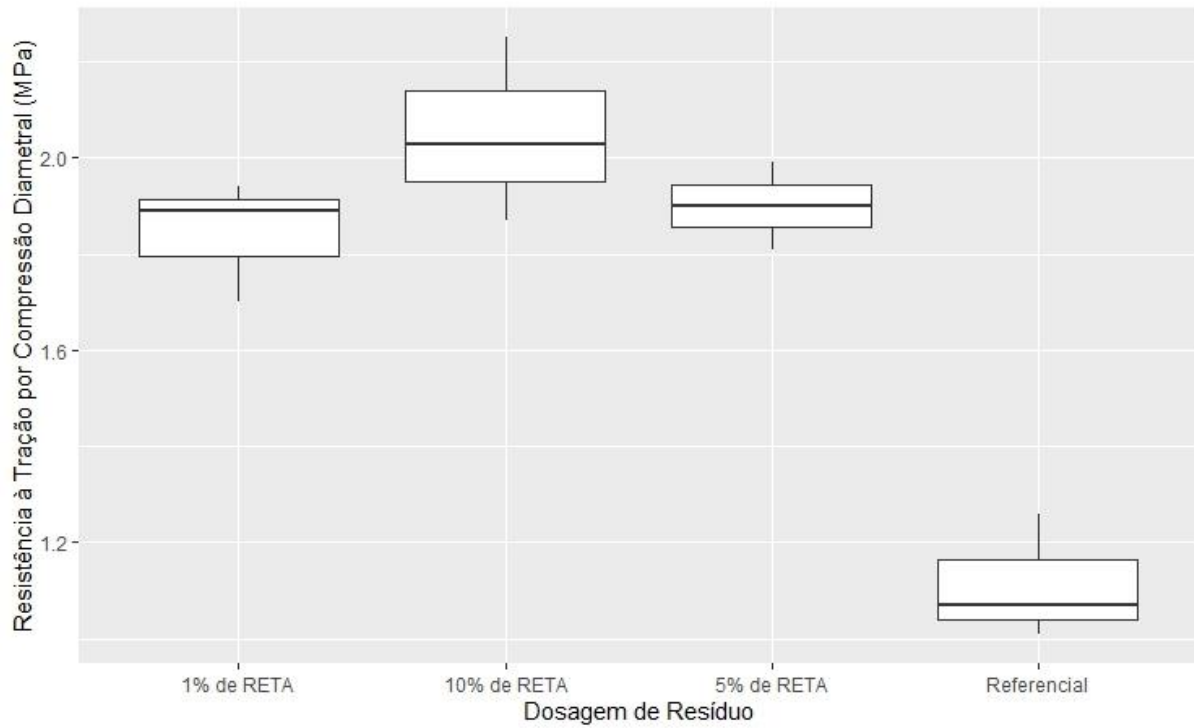
| Comparação | Valor p Ajustado |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1% RETA - REFERÊNCIA | 0,0009267 |
| 5% RETA - REFERÊNCIA | 0,0005571 |
| 10% RETA- REFERÊNCIA | 0,0001631 |
| 5% RETA - 1% RETA | 0,9571947 |
| 10% RETA - 1% RETA | 0,3324192 |
| 10% RETA - 5% RETA | 0,57705869 |

Fonte: A autora (2024)

A comparação entre os percentuais 1% de RETA com a referência, 5% de RETA com a referência e 10% de RETA com a referência, é significativa, indicando que os grupos com 1%, 5% e 10% de substituição têm médias de resistência à tração por compressão diametral significativamente maiores do que o grupo sem substituição. As outras comparações, não são significativas, indicando que não há diferenças significativas nas médias de resistência entre esses grupos.

Os resultados da análise estatística indicam que as substituições de 1%, 5% e 10% de cimento por cinza de RETA resultam em uma resistência à tração por compressão diametral significativamente maior comparada ao concreto sem substituição. Não foram observadas diferenças significativas nas médias de resistência para as comparações entre os grupos de 1%, 5% e 10%. A homogeneidade das variâncias foi confirmada, e os dados seguiram uma distribuição normal em cada grupo. A visualização com o gráfico boxplot da figura 31 e o teste de Tukey corroboram que as substituições de 1%, 5% e 10% se destacam significativamente em termos de aumento de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 31- Gráfico Bloxpot resistência à tração por compressão diametral



Fonte: A autora (2024)

4.1.3.3 Resistência tração na flexão

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão (RTF), o ensaio foi realizado aos 7 e 28 dias.

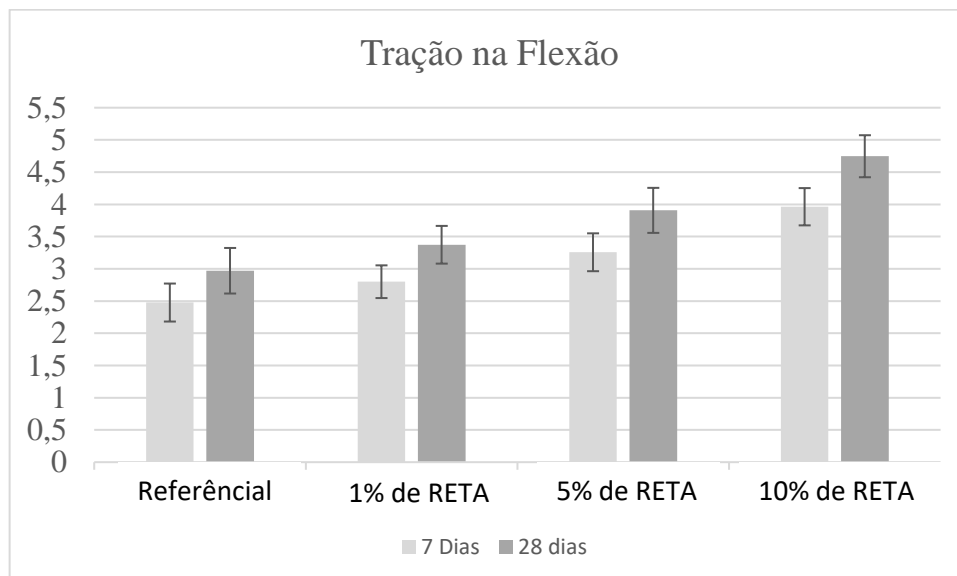
Tabela 20 – Resultados ensaios resistência a tração na flexão

| TRAÇO(%) | 7 DIAS | 28 DIAS |
|--------------------|---------------|----------------|
| REFERÊNCIA | 2,25 | 2,7 |
| REFERÊNCIA | 2,37 | 2,84 |
| REFERÊNCIA | 2,81 | 3,37 |
| 1% de RETA | 2,62 | 3,18 |
| 1% de RETA | 2,69 | 3,23 |
| 1% de RETA | 3,09 | 3,71 |
| 5% de RETA | 2,94 | 3,53 |
| 5% de RETA | 3,31 | 3,97 |
| 5% de RETA | 3,52 | 4,22 |
| 10% de RETA | 3,74 | 4,48 |
| 10% de RETA | 3,86 | 4,65 |
| 10% de RETA | 4,29 | 5,11 |

Fonte: A autora (2024)

A Figura 32 apresenta os valores médios e o desvio padrão da resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias, para as misturas com substituição e referência.

Figura 32- Médias e o desvio padrão de resistência tração na flexão em 7 e 28 dias



Fonte: A autora (2024)

Os resultados de Resistência a tração na flexão aos 7 dias estão entre 2,25 MPa e 4,29 MPa. Todos os traços apresentaram ganho de resistência aos 28 dias. Os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias estão entre 2,70 MPa e 5,11 MPa. O aumento de resistência à tração na flexão aos 28 dias em relação aos 7 dias de cura, para as misturas referência, 1% de RETA, 5% de RETA e 10% de RETA foi de 19%, 20%, 19% e 14%, respectivamente.

O estudo de Pham, P.N. *et al.* (2020) investigou a resistência à flexão de argamassas contendo diferentes proporções de resíduo de estação de tratamento de água calcinado. Os autores obtiveram o resultado de resistência à flexão das amostras com 10% de substituição de cimento por RETA calcinado significativamente melhorada, atingindo um valor aproximado de 5,5 MPa. As amostras com 20% de substituição apresentam uma resistência à flexão comparável ao grupo de referência, mantendo-se em torno de 5,3 MPa, o que indica que a adição de RETA calcinado não compromete na integridade estrutural da argamassa.

Para verificar se os dados de resistência à tração na flexão seguem uma distribuição normal em cada nível de substituição de cimento, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, com os resultados na tabela 21.

Tabela 21- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

| TRAÇO (%) | Valor p |
|--------------------|----------------|
| REFERÊNCIA | 0,381 |
| 1% de RETA | 0,163 |
| 5% de RETA | 0,699 |
| 10% de RETA | 0,504 |

Fonte: A autora (2024)

Os valores de p para todos os níveis de substituição são maiores que 0,05, indicando que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de normalidade. Portanto, assume-se que os dados seguem uma distribuição normal para cada grupo de substituição.

A Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada para comparar as médias de resistência à tração na flexão entre os diferentes níveis de substituição. O valor p (0,000941), como mostra a tabela 22, é menor que 0,05, indicando que há uma diferença significativa entre as médias de resistência dos grupos de substituição. Isso sugere que pelo menos um dos grupos de substituição tem uma média de resistência à tração na flexão diferente dos outros.

Tabela 22- Resultados Análise de Variância resistência a tração na flexão

| Fonte de variação | Soma dos quadrados | GL | Médias dos quadrados | F | Valor-p |
|--------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------|----------|----------------|
| Entre grupos | 5,304 | 3 | 1,7682 | 16,12 | 0,000941 |
| Dentro dos grupos | 0,0878 | 8 | 0,1097 | | |
| Total | 5,3918 | 11 | | | |

Fonte: A autora (2024)

O teste de Levene foi realizado para verificar a homogeneidade das variâncias entre os grupos. O valor p (0,9934) é maior que 0,05, indicando que não há evidências para rejeitar a hipótese nula de homogeneidade das variâncias. Portanto, as variâncias entre os grupos são consideradas homogêneas.

Para identificar quais grupos diferem significativamente entre si, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey, os resultados estão na tabela 23.

Tabela 23- Resultados do Teste de Tukey

| Comparação | Valor p Ajustado |
|---------------------------------|-------------------------|
| 1% de RETA - REFERÊNCIA | 0,4845 |
| 5% de RETA - REFERÊNCIA | 0,0347 |
| 10% de RETA - REFERÊNCIA | 0,00079 |
| 5% de RETA -1% de RETA | 0,2737 |
| 10% de RETA-1% de RETA | 0,0042 |
| 10% de RETA- 5% de RETA | 0,0572 |

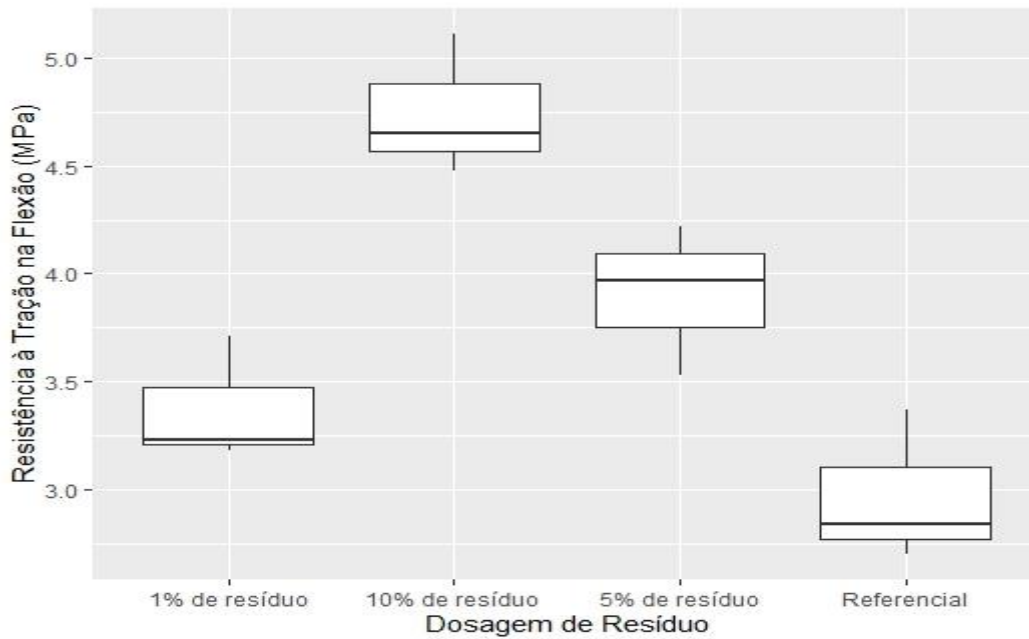
Fonte: A autora (2024)

A comparação entre os grupos 5% de RETA com a referência, 10% de RETA com 1 % de RETA e 10% de RETA com a referência é significativa, indicando que o grupo com 10% de substituição tem médias de resistência à tração na flexão significativamente maiores do que os grupos sem substituição, com 1% de substituição e com 5% de substituição. As outras comparações, não são significativas, indicando que não há diferenças significativas nas médias de resistência entre esses grupos.

Os resultados desta análise indicam que a substituição do cimento por RETA afeta significativamente a resistência à tração na flexão do concreto, especificamente a substituição de 5% e 10% ocorreu em aumentos significativos na resistência à tração na flexão em

comparação com a substituição de 0%. O teste de Tukey revelou que essas melhorias são estatisticamente significativas, especialmente para os níveis de substituição de 5% e 10%. A homogeneidade das variâncias foi confirmada, e os dados seguiram uma distribuição normal em cada grupo. A visualização com o gráfico boxplot na figura 33 e o teste de Tukey corroboram que a substituição de 10% se destaca significativamente em termos de aumento de resistência à tração na flexão.

Figura 33- Gráfico Bloxpot resistência à tração na flexão



Fonte: A autora (2024)

4.1.4 Caracterização térmica

4.1.4.1 Condutividade térmica

Na tabela 24 são encontrado os valores de condutividade térmica das misturas de concreto de Referência, com substituição de cimento por 10% de Resíduo, 5% de Resíduo e 1% de Resíduo.

Tabela 24 – Condutividade térmica

| Condutividade (W/mk) | Referência | 1% RETA | 5% RETA | 10% RETA |
|---------------------------------|-------------------|----------------|----------------|-----------------|
| CP1 | 1,32 | 0,68 | 0,89 | 1,32 |
| CP2 | 1,02 | 0,85 | 1,09 | 1,22 |
| Média | 1,17 | 0,76 | 0,99 | 1,27 |

Fonte: A autora (2024)

Observa-se que o concreto com 10% de Resíduo, valor muito próximo ao encontrado do concreto de Referência, apresenta uma condutividade térmica superior a todas as outras misturas. Especificamente, a maior condutividade térmica da mistura com 10% de resíduo permite uma dissipação mais eficiente do calor gerado durante a hidratação do cimento Portland, diminuindo o gradiente de temperatura. Já as misturas com 1% e 5% de Resíduo obtiveram os menores valores com 0,76 e 0,99 W/mK, respectivamente.

Daza-Badilla et al. (2024) explorou a condutividade térmica de amostras de concreto que incorporam fibras naturais, como o cânhamo e fibras sintéticas. Este estudo é relevante, pois avalia o impacto de diferentes tipos de fibras nas propriedades térmicas do concreto, uma característica essencial para aplicações que requerem um controle eficiente da temperatura, como fundações termoativas e pilhas de energia geotérmica. Os resultados indicaram que a incorporação de fibras de cânhamo aumentou a condutividade térmica do concreto em cerca de 48% após 28 dias de cura. Em contraste, as fibras sintéticas mostraram um efeito mínimo sobre a condutividade térmica.

Silva J. et al. (2024) investigou o impacto de materiais cimentícios suplementares na condutividade térmica do concreto de cimento Portland utilizado em pavimentos. A pesquisa utilizou misturas de concreto ternárias, que combinam cimento Portland com materiais cimentícios suplementares como cinzas volantes e escória de alto forno, que aumentaram de 7 a 10% a condutividade térmica dos concretos.

Para verificar se os dados de condutividade térmica seguem uma distribuição normal em cada nível de substituição de cimento, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk. Os resultados estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

| TRAÇO (%) | Valor p |
|--------------------|----------------|
| REFERÊNCIA | 1,000 |
| 1% de RETA | 0,935 |
| 5% de RETA | 0,298 |
| 10% de RETA | 1,000 |

Fonte: A autora (2024)

Os valores de p para todos os níveis de substituição são maiores que 0,05, indicando que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de normalidade. Portanto, assume-se que os dados seguem uma distribuição normal para cada grupo de substituição.

A Análise de Variância (ANOVA), como indicado na tabela 26, foi utilizada para comparar as médias de condutividade térmica entre os diferentes níveis de substituição. O valor p (0,00083) é menor que 0,05, indicando que há uma diferença significativa entre as médias de condutividade térmica dos grupos de substituição. Isso sugere que pelo menos um dos grupos de substituição tem uma média de condutividade térmica diferente dos outros.

Tabela 26- Resultados Análise de Variância resistência tração na flexão

| Fonte de variação | Soma dos quadrados | GL | Médias dos quadrados | F | Valor-p |
|--------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------|----------|----------------|
| Entre grupos | 0,4566 | 3 | 0,1522 | 16,74 | 0,00083 |
| Dentro dos grupos | 0,0727 | 8 | 0,0091 | | |
| Total | 0,5293 | 11 | | | |

Fonte: A autora (2024)

O teste de Levene foi realizado para verificar a homogeneidade das variâncias entre os grupos. O valor p (0,5301) é maior que 0,05, indicando que não há evidências para rejeitar a hipótese nula de homogeneidade das variâncias. Portanto, as variâncias entre os grupos são consideradas homogêneas.

Em seguida, o teste de Shapiro-Wilk foi realizado para avaliar a normalidade dos dados dentro de cada grupo de resíduo. Os resultados mostraram que os dados não seguem uma distribuição normal em nenhum dos grupos, com todos os valores-p sendo inferiores a 0,05. Embora a normalidade não tenha sido verificada, a ANOVA é conhecida por ser robusta a

pequenas violações dessa suposição, especialmente em amostras de tamanho moderado a grande, o que justifica a continuidade da análise.

Para identificar quais grupos diferem significativamente entre si, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey, localizado na tabela 27.

Tabela 27- Resultados do Teste de Tukey

| Comparação | Valor p Ajustado |
|---------------------------------|-------------------------|
| 1% de RETA – REFERÊNCIA | 0,003533 |
| 5% de RETA - REFERÊNCIA | 0,1083 |
| 10% de RETA - REFERÊNCIA | 0,5964 |
| 5% de RETA - 1% de RETA | 0,1221 |
| 10% de RETA - 1% de RETA | 0,000846 |
| 10% de RETA - 5% de RETA | 0,0181 |

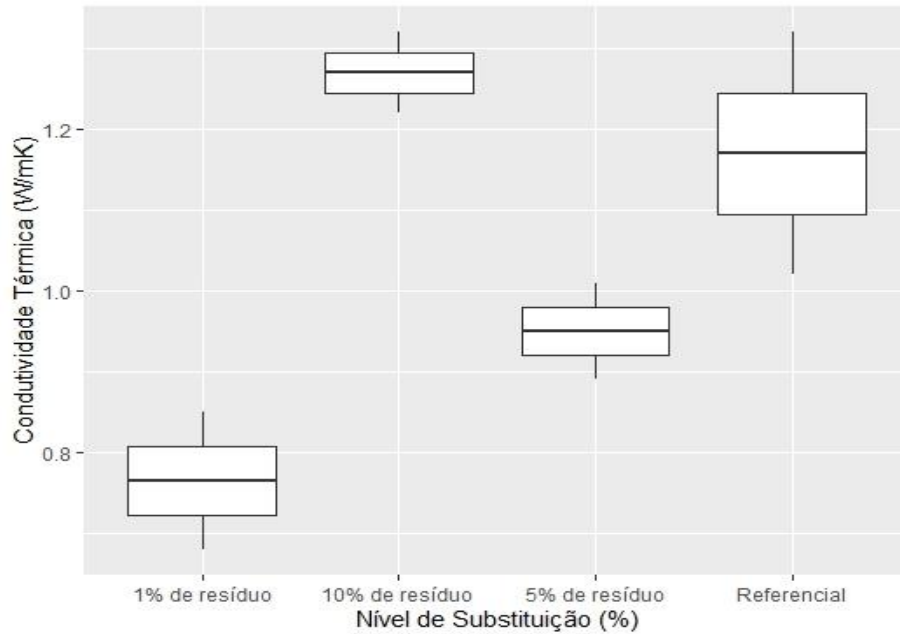
* Significativo a 0,05

Fonte: A autora (2024)

As comparações entre os percentuais de substituição 1% de RETA e referência, 10% de RETA e 1% de RETA e também nas porcentagens 10% de RETA e 5% de RETA são significativas, indicando que os percentuais de substituição com 1% de substituição têm médias de condutividade térmica significativamente diferentes em relação ao grupo sem substituição e ao grupo com 10% de substituição, e também as substituições de 10% e 5% também são significativamente diferentes. As outras comparações não são significativas, indicando que não há diferenças significativas nas médias de condutividade térmica entre esses grupos.

A homogeneidade das variâncias foi confirmada pelo teste de Levene, e os dados seguiram uma distribuição normal em cada grupo, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk. A visualização com o gráfico boxplot na figura 34 e o teste de Tukey corroboram que as substituições de 1% e 10% se destacam significativamente em termos de alteração na condutividade térmica. Esses resultados sugerem que a substituição de cimento por RETA pode influenciar a condutividade térmica do material, dependendo do nível de substituição.

Figura 34-Gráfico Bloxpot condutividade térmica



Fonte: A autora (2024)

4.1.4.2 Análise de temperatura

Observa-se na tabela 28 as análises de temperatura de Referência, 1% de Resíduo, 5% de Resíduo e 10% de Resíduo, hora a hora das 8 horas as 18 horas quando o sol se põe.

Tabela 28 – Análise de temperaturas

| Horário | Temperatura | | | |
|-----------------|-------------|---------------|---------------|----------------|
| | Referência | 1% de Resíduo | 5% de Resíduo | 10% de Resíduo |
| 8 Horas | 17,7° | 17,4° | 16,4° | 17,7° |
| 9 horas | 18,1° | 18,6° | 19,6° | 18,3° |
| 10 horas | 26,9° | 27,7° | 27,4° | 26,2° |
| 11 horas | 36,4° | 38,1° | 36,5° | 31,3° |
| 12 horas | 35,5° | 39,4° | 38,9° | 33,8° |
| 13 horas | 36,4° | 44,1° | 43,2° | 36,1° |
| 14 horas | 37° | 45,2° | 43,9° | 37,1° |
| 15 horas | 37,7° | 45,5° | 44,3° | 37,9° |
| 16 horas | 37,2° | 44,9° | 44° | 37,1° |
| 17 horas | 36,1° | 42,7° | 42,6° | 36,3° |
| 18 horas | 34,5° | 38,2° | 38,4° | 33,9° |

Fonte: A autora (2023)

Com as análises de temperatura juntamente com a condutividade térmica pode-se analisar que os resultados condizem, pois materiais com alta condutividade térmica conduzem calor de maneira eficiente, o que significa que eles podem dissipar o calor mais rapidamente. Segundo kim et al.(2023)Como resultado, eles tendem a reter menos calor porque o calor se move através deles e é liberado rapidamente para o ambiente. Este valor de condutividade térmica é equilibrado, pois permite uma dissipação suficiente do calor gerado durante a hidratação do cimento, ajudando a evitar a formação de fissuras térmicas, enquanto ainda proporciona alguma capacidade de isolamento, contribuindo para a eficiência térmica . Em resumo, 1,27 W/m·K é um bom valor para concreto em termos de condutividade térmica. Em pavimentos, a capacidade de conduzir calor é importante para garantir a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto. Um valor de 1,27 W/m·K sugere que o concreto pode dissipar o calor de maneira eficaz (Kim et al., 2003).

O teste de Levene foi aplicado inicialmente para verificar se as variâncias das temperaturas entre os diferentes grupos de resíduo eram homogêneas. O resultado mostrou que as variâncias eram homogêneas, com um valor-p de 0,7227, o que indica que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese de homogeneidade das variâncias. Esse resultado permitiu a continuidade da análise com a ANOVA, uma vez que a suposição de variâncias iguais foi atendida.

Em seguida, o teste de Shapiro-Wilk foi realizado para avaliar a normalidade dos dados dentro de cada grupo de resíduo. Os resultados na tabela 29 mostraram que os dados não seguem uma distribuição normal em nenhum dos grupos, com todos os valores-p sendo inferiores a 0,05.

Tabela 29- Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

| TRAÇO(%) | Valor p |
|--------------------|----------------|
| REFERÊNCIAL | 0,000435 |
| 1% de RETA | 0,00869 |
| 5% de RETA | 0,0088 |
| 10% de RETA | 0,00709 |

Fonte: A autora (2024)

A ANOVA foi então aplicada para identificar se existiam diferenças significativas nas temperaturas médias entre os grupos de resíduo e ao longo dos diferentes horários do dia. Os resultados na tabela 30 indicaram que tanto a dosagem de resíduo quanto o horário do dia influenciam significativamente as temperaturas. O fator referente à dosagem de resíduo

apresentou um valor-p de $1,54 \times 10^{-7}$, apontando diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Da mesma forma, o fator "horário" também mostrou um efeito significativo sobre as temperaturas, com um valor-p menor que 2×10^{-16} .

Tabela 30- Resultados Análise de Variância resistência tração na flexão

| Fonte de variação | Soma dos quadrados | GL | Médias dos quadrados | F | Valor-p |
|--------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------|----------|-----------------------|
| Resíduo | 222,1 | 3 | 74,04 | 21,07 | $1,54 \times 10^{-7}$ |
| Horário | 3160,4 | 10 | 316,04 | 89,92 | 2×10^{-16} |
| Total | 105,4 | 30 | | | |

Fonte: A autora (2024)

Para detalhar as diferenças observadas, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey na tabela 31. Este teste revelou que o percentual de 1% de RETA apresentou temperaturas significativamente mais altas em comparação ao percentual de referência, com uma diferença média de $4,39^\circ\text{C}$. O grupo com 5% de RETA também mostrou um aumento significativo na temperatura em relação ao percentual de referência, com uma diferença média de $3,79^\circ\text{C}$. Por outro lado, o percentual de 10% de RETA apresentou uma temperatura média significativamente menor em comparação ao grupo com 1% de RETA, sugerindo que uma maior dosagem de resíduo pode levar a uma maior dissipação de calor.

Tabela 31- Resultados do Teste de Tukey

| Comparação | Valor p Ajustado |
|---------------------------------|-------------------------|
| 1% de RETA - REF | $3,3 \times 10^{-5}$ |
| 5% de RETA - REF | 0,00027 |
| 10% de RETA -REF | 0,8115 |
| 5% de RETA - 1% de RETA | 0,8757 |
| 10% de RETA - 1% de RETA | $2,8 \times 10^{-6}$ |
| 10% de RETA - 5% de RETA | $2,26 \times 10^{-5}$ |

* Significativo a 0,05

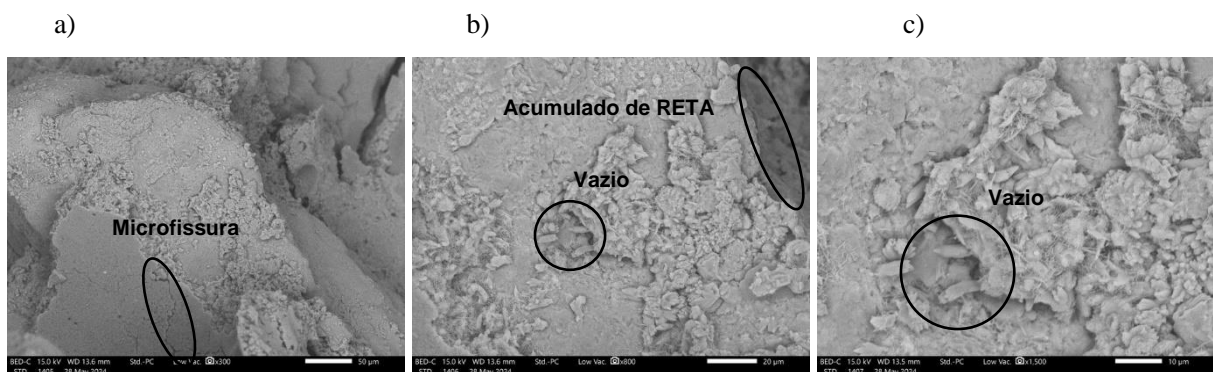
Fonte: A autora (2024)

Também foi efetuado o teste do Tukey para aos horários do dia, que indicou que as temperaturas aumentaram significativamente após as 10 horas, atingindo picos entre 11 e 15 horas, antes de começarem a diminuir. Comparando as temperaturas às 10 horas com as registradas às 11 horas, houve um aumento médio de 8,525°C, enquanto o pico de temperatura às 15 horas mostrou uma diferença de 14,30°C em relação às 10 horas. Dessa forma, percebe-se que tanto o horário do dia como a porcentagem de resíduo são fatores importantes e que afetam as variações de temperatura.

4.1.5 Microscopia Eletrônica por Varredura

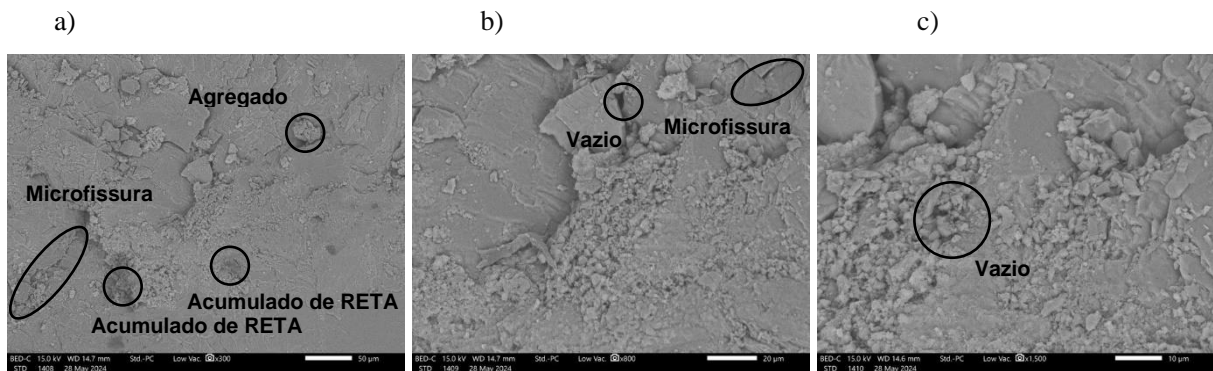
Nas figuras 35, 36, 37 e 38 é observado imagens de Microscopia por varredura (MEV), nas misturas de referência, RETA 1%, RETA 5% e RETA 10% respectivamente, nas ampliações de 300 vezes, 800 vezes e 1500 vezes.

Figura 35- a) Imagem de Referência ampliada em 300x no MEV b) Imagem de Referência ampliada em 800x no MEV c) Imagem de Referência ampliada em 1500x no MEV



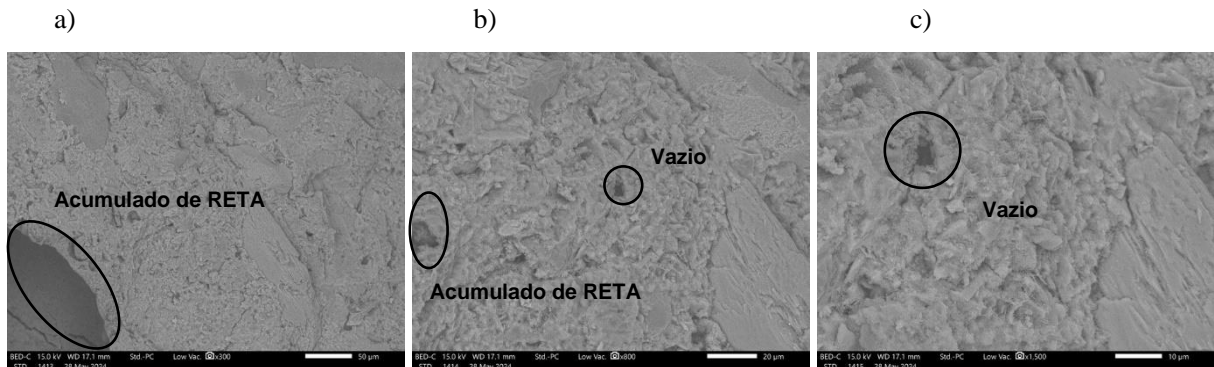
Fonte: A autora (2024)

Figura 36- a) Imagem de 1% de RETA ampliada em 300x no MEV b) Imagem de 1% de RETA ampliada em 800x no MEV c) Imagem de 1% de RETA ampliada em 1500x no MEV



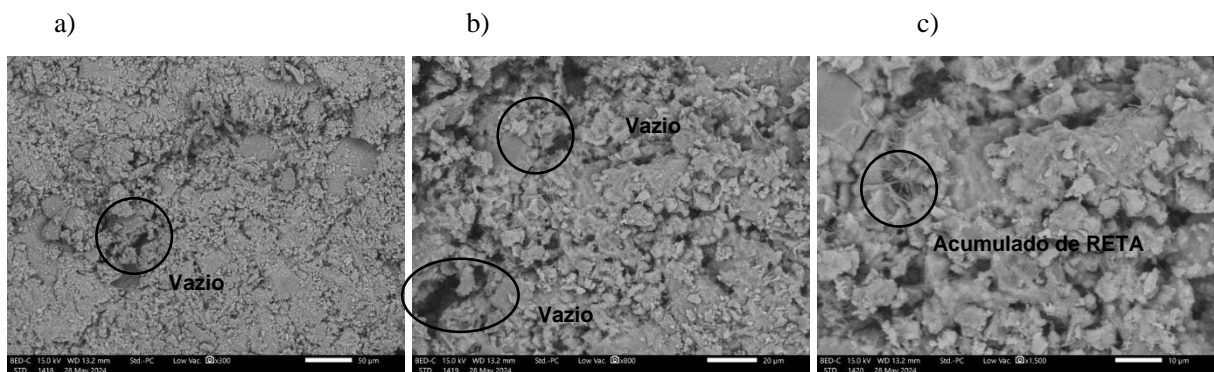
Fonte: A autora (2024)

Figura 37- a) Imagem de 5% de RETA ampliada em 300x no MEV b) Imagem de 5% de RETA ampliada em 800x no MEV c) Imagem de 5% de RETA ampliada em 1500x no MEV.



Fonte: A autora (2024)

Figura 38- a) Imagem de 10% de RETA ampliada em 300x no MEV b) Imagem de 10% de RETA ampliada em 800x no MEV c) Imagem de 10% de RETA ampliada em 1500x no MEV



Fonte: A autora (2024)

Com as imagens observa-se, que a incorporação do RETA não alterou a estrutura e também não foram encontradas microestruturas diferentes em todas as misturas do concreto.

Observa-se que nas misturas de 10% de resíduo houve um aumento de poros com relação as demais microestruturas. Porém a distribuição de poros em todas as misturas de referência, 1%, 5% e 10% estão uniformes e bem distribuídas

4.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

4.2.1 Relação entre resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão

Para investigar a relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão de concretos com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo calcinado,

foi realizada uma análise de regressão linear simples. Os dados experimentais incluem amostras com 0%, 1%, 5% e 10% de substituição de cimento, conforme detalhado nas tabelas 12 e 20.

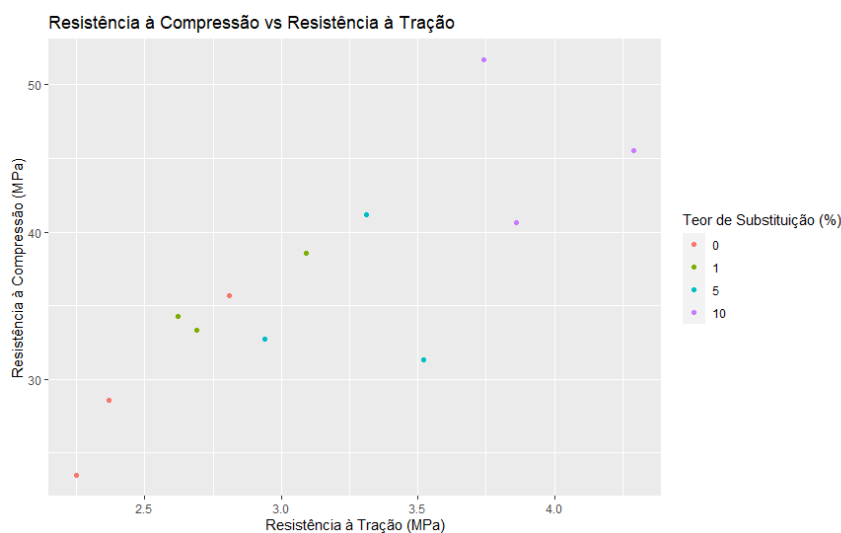
A correlação entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão do concreto permeável substituído por RETA pode ser observada na Figura 39. Foi identificada uma forte correlação linear entre esses dois parâmetros, com um coeficiente de correlação de Pearson (r) de 0,7999, indicando uma correlação linear positiva. Em outras palavras, isso significa que quando a resistência à tração na flexão aumenta, a resistência à compressão axial também tende a aumentar.

Na Figura 40, está apresentada a regressão linear calculada para expressar a relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão por meio de uma equação (5). O R^2 , que é uma medida estatística da proximidade dos dados em relação à linha de regressão ajustada, foi de 63,99%. Esse valor sugere que 63,99% da variabilidade nos dados pode ser explicada pelo modelo de regressão. Um R^2 de 0% indicaria que o modelo não explica nenhuma variação dos dados em torno de sua média, enquanto 100% significaria que o modelo explica toda a variabilidade dos dados.

$$RCA = 6,111 + 9,699 \cdot RTF \quad (5)$$

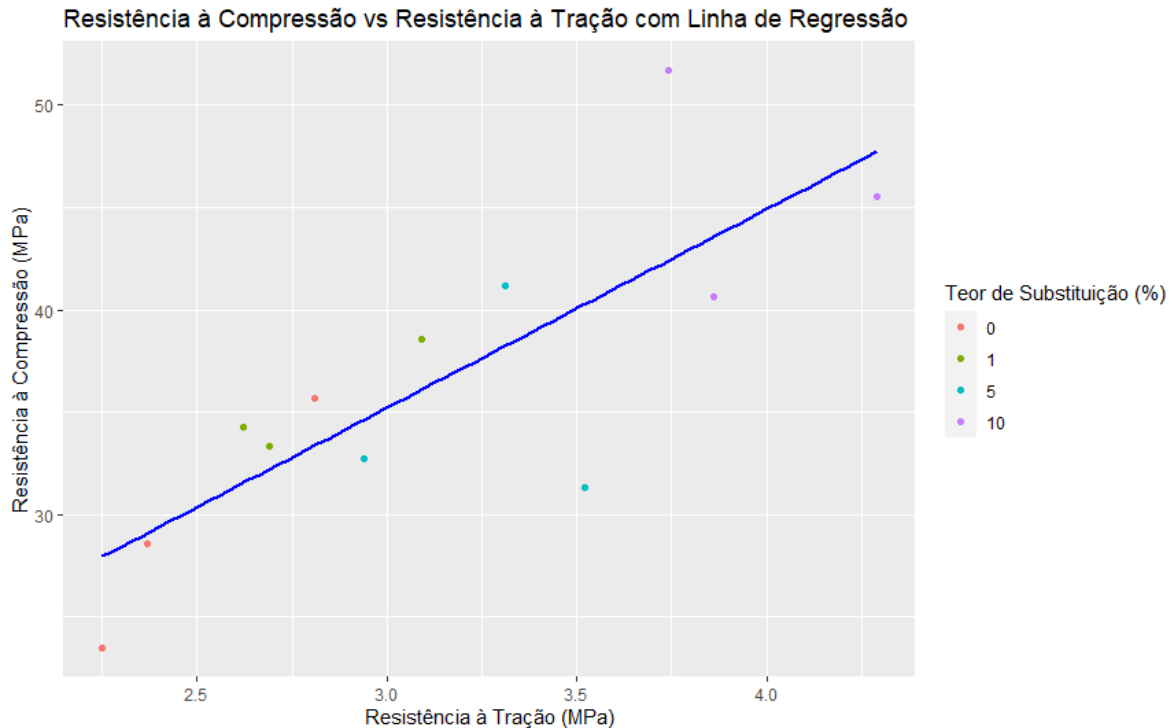
Além disso, o valor p para a resistência à tração foi de 0,00178, que é menor que 0,05. Isso indica que a resistência à tração é um preditor estatisticamente significativo da resistência à compressão no modelo, sugerindo que a relação observada entre essas duas variáveis não é devida ao acaso.

Figura 39- Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão



Fonte: A autora (2024)

Figura 40- Regressão linear entre resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão



Fonte: A autora (2024)

4.2.2 Relação entre resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral

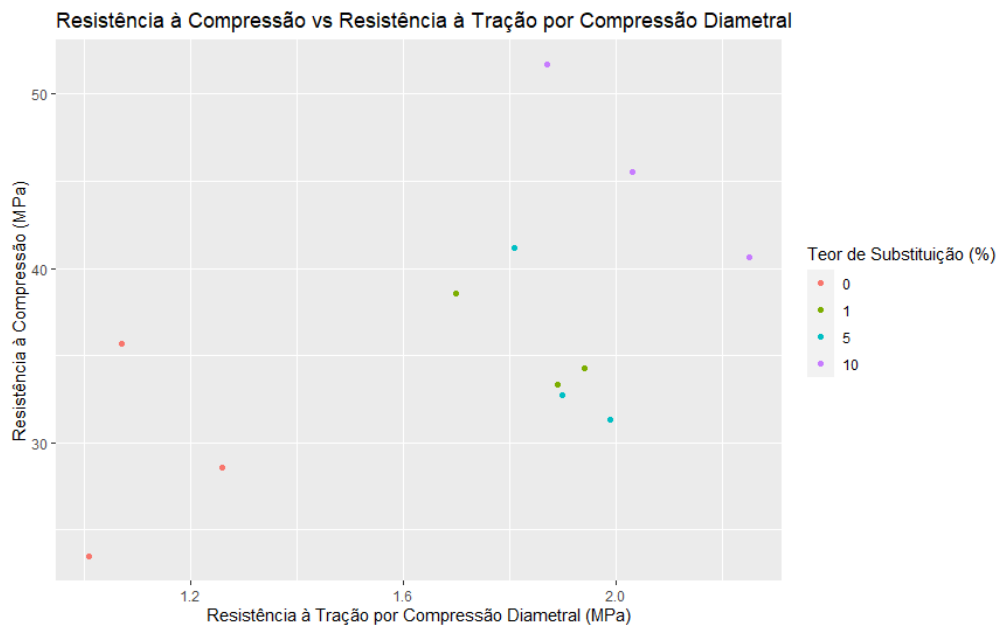
Os dados experimentais foram coletados conforme detalhado nas tabelas 12 e 16. Utilizou-se a correlação de Pearson para medir a força e a direção da relação linear entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão axial. A correlação entre resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral do concreto permeável substituído por RETA pode ser observada na Figura 41.

A correlação de Pearson entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial foi calculada como 0,5392. Este valor indica uma correlação positiva moderada, sugerindo que, à medida que a resistência à tração por compressão diametral aumenta, a resistência à compressão também tende a aumentar. O coeficiente de inclinação positivo e moderadamente significativo (10,408) confirma que a resistência à tração por compressão diametral é um preditor moderadamente significativo da resistência à compressão. Na Figura 42, está apresentada a regressão linear calculada para expressar a relação entre a

resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral por meio de uma equação (6). Para o R^2 o valor de 0,2907 sugere que uma parte substancial da variação na resistência à compressão axial pode ser explicada pela resistência à tração por compressão diametral, embora outros fatores também possam influenciar essa relação.

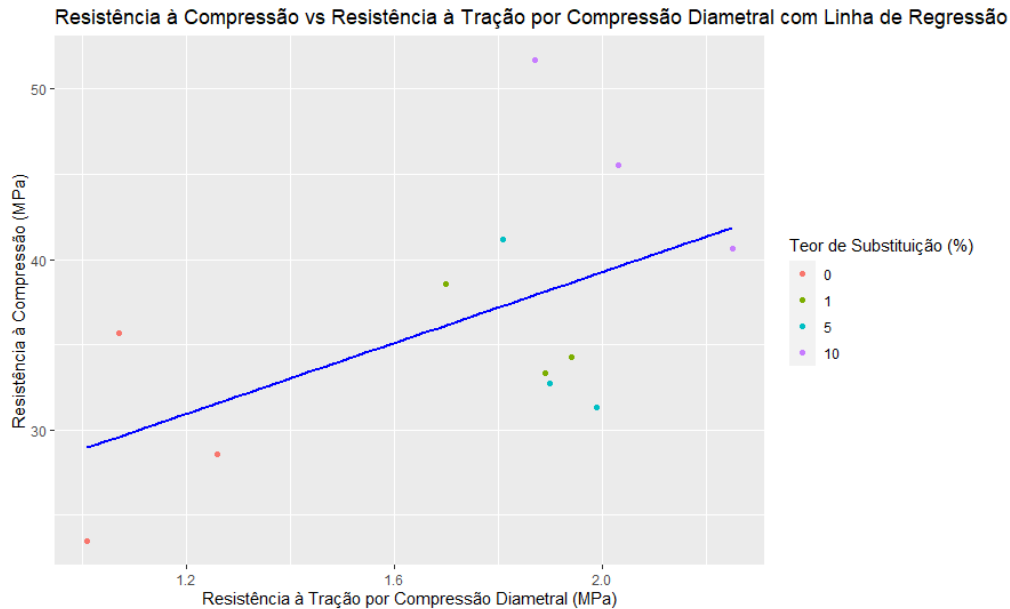
$$RCA=18,442+10,408.RTCD \quad (6)$$

Figura 41- Regressão linear entre resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral



Fonte: A autora (2024)

Figura 42- Regressão linear entre resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão não diametral



Fonte: A autora (2024)

4.2.3 Relação entre e resistência à tração na flexão e resistência à tração na compressão diametral

Os dados utilizados nesta análise incluem valores de resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão para diferentes teores de substituição de cimento (0%, 1%, 5%, e 10%). Nas tabelas 16 e 20 são apresentados os dados utilizados para as análises.

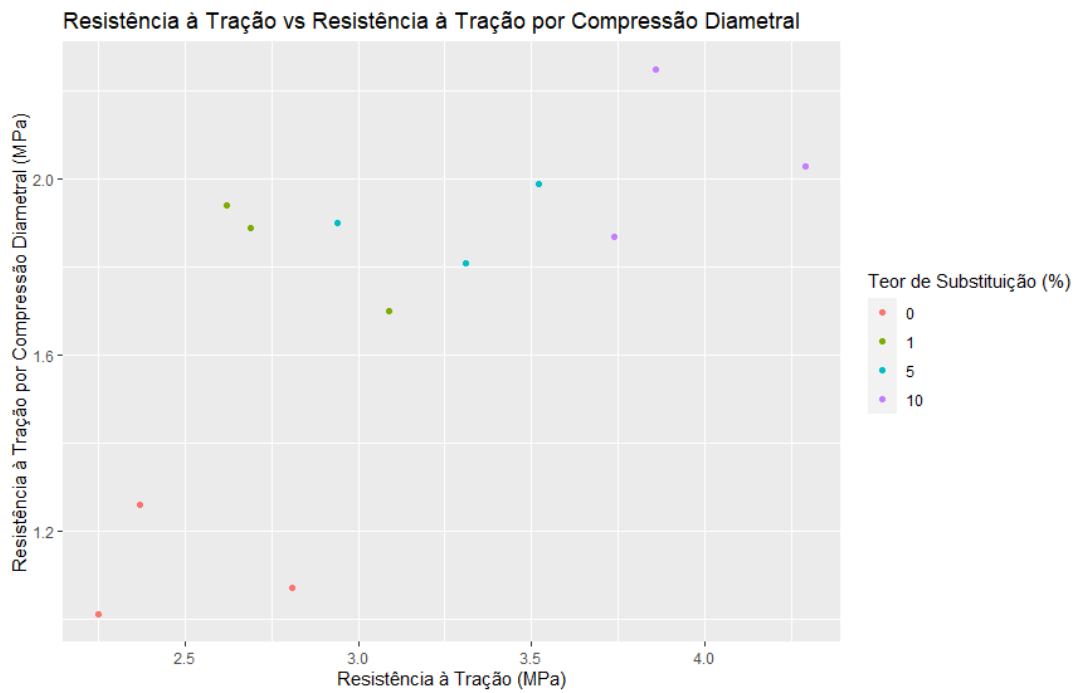
A correlação entre resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral do concreto permeável substituído por RETA pode ser observada na Figura 43.

A correlação de Pearson entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão foi calculada como 0,698. Este valor indica uma correlação positiva moderada, sugerindo que, à medida que a resistência à tração por compressão diametral aumenta, a resistência à tração na flexão também tende a aumentar. O coeficiente de inclinação é 0,4388 MPa. Isso significa que, para cada aumento de 1 MPa na resistência à tração na flexão, espera-se um aumento de aproximadamente 0,4388 MPa na resistência à tração por compressão diametral (equação 7). O valor do R-quadrado é 0,4879, indicando que cerca de 48,79% da variação na resistência à compressão pode ser explicada pela resistência à tração por compressão diametral. O valor p para a resistência à tração na flexão é 0,0115 que é menor que

0,05, indicando que a resistência à tração na flexão é um preditor significativo da resistência à tração por compressão diametral no modelo (figura 44).

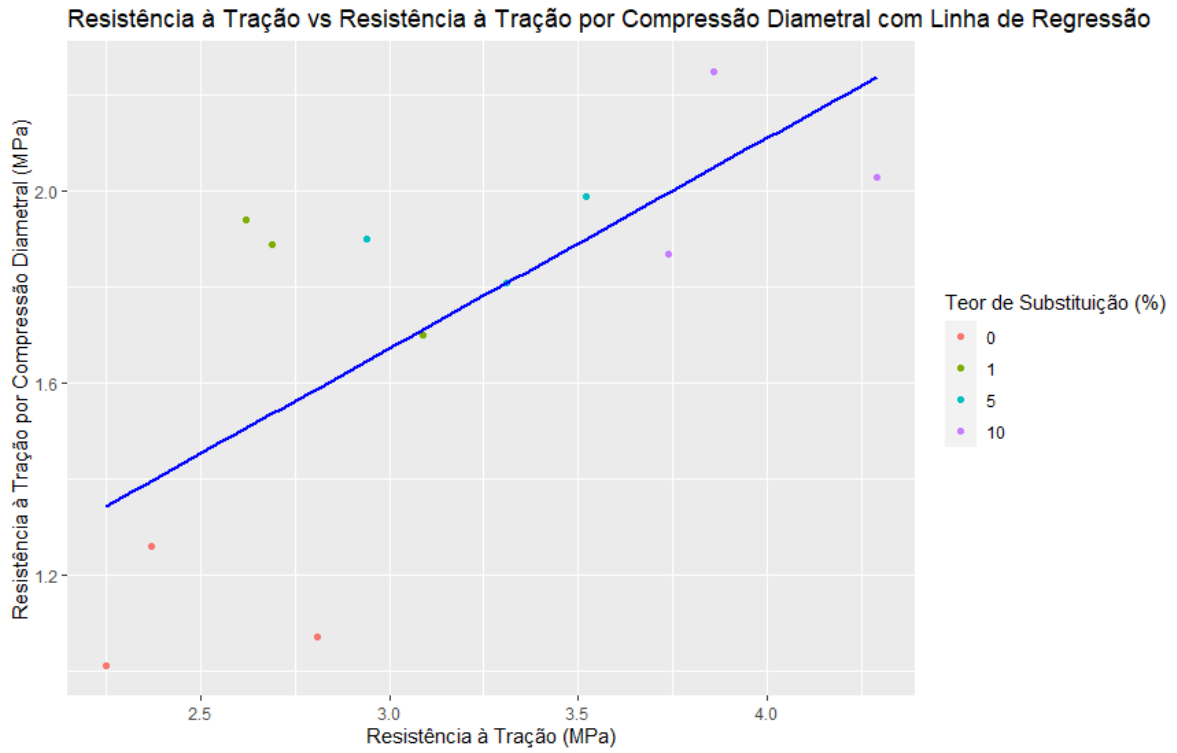
$$RTF=0,3559+0,4388.RTCD \quad (7)$$

Figura 43- Regressão linear entre resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral



Fonte: A autora (2024)

Figura 44- Regressão linear entre resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral



Fonte: A autora (2024)

5 CONCLUSÃO

O presente estudo confirma que as cinzas do resíduo da Estação de Tratamento de Água (ETA) possuem um potencial pozolânico significativo, sendo viáveis para utilização como substituição parcial do cimento Portland em concretos para pavimentação. A composição química predominante do resíduo, tanto in natura quanto calcinada, é formada por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . No entanto, apenas as cinzas termicamente ativadas apresentam teores superiores a 70% desses compostos e uma perda ao fogo igual ou inferior a 3%.

Os ensaios realizados, incluindo Difração de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (FRX), Índice de Atividade Pozolânica (IAP) e Termogravimetria (TG/DTG), indicam que o RETA, após ativadas por 2 horas a 800 °C em uma taxa de 10°C/min, possuem grande potencial para serem utilizadas como pozolana em matrizes cimentícias. Este potencial é refletido nos resultados mecânicos e térmicos dos concretos produzidos com a RETA

Os concretos contendo 10% de RETA em substituição ao cimento Portland revelam menores quantidades de hidróxido de cálcio aos 28 dias, em comparação com todas as outras amostras mostradas, tanto nas análises mineralógicas quanto nas termogravimétricas. Esse resultado é indicativo de uma maior reatividade pozolânica, que contribui para a durabilidade e resistência do concreto.

O índice ótimo de atividade pozolânica foi obtido com a calcinação do RETA a 800°C por 2 horas, comprovando a eficácia desse tratamento térmico para a ativação do resíduo. Todos os concretos com adição de RETA apresentam resistências à compressão, tração na flexão e tração por compressão diametral superiores ao concreto de referência.

A análise estatística revelou que os concretos com 5% e 10% de substituição do cimento Portland por RETA mostram diferenças significativas no desempenho, que a adição de 10% de RETA ao concreto resulta em uma condutividade térmica superior a todas as outras misturas testadas, incluindo a mistura de referência. Especificamente, a elevada condutividade térmica da mistura com 10% de resíduo permite uma dissipação de calor mais eficiente durante o processo de hidratação do cimento Portland, o que, por sua vez, reduz o gradiente de temperatura. Esta característica é vantajosa para a durabilidade e desempenho do concreto em condições de variação térmica. Na análise de temperatura observou-se que tanto traço como a temperatura são fatores importantes que afetam a variação de temperatura.

A análise estatística também revelou resultados significativos nas caracterizações mecânicas. Na compressão axial, observou-se um desempenho notável com a adição de 10% de RETA. Na tração por compressão diametral, todos os traços com 1%, 5% e 10% de RETA

apresentaram resultados expressivos. Já na tração na flexão, o traço com 10% de RETA foi o que mostrou um desempenho significativo. Além disso, a análise de regressão linear simples e a correlação de Pearson, demonstrou que existe uma forte correlação entre a resistência a compressão e a resistência a tração na flexão, isso significa que quando a resistência à tração na flexão aumenta, a resistência à compressão também tende a aumentar, isso também demonstra que a tração na flexão é um fator significativo na resistência compressão; A correlação de Pearson entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão indica ser positiva moderada, e que, à medida que a resistência à tração por compressão diametral aumenta, a resistência à compressão também tende a aumentar; A correlação de Pearson entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão indica ser positiva moderada, sugerindo que, à medida que a resistência à tração por compressão diametral aumenta, a resistência à compressão também tende a aumentar.

A análise de superfície por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) demonstrou que a microestrutura do concreto com 10% de RETA não sofreu alterações significativas, indicando que a adição do resíduo não compromete a integridade estrutural do material. Esse achado é crucial para garantir a viabilidade do uso do resíduo de ETA calcinado

A substituição do cimento Portland pelo resíduo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) constitui um avanço significativo na busca por práticas mais sustentáveis na construção civil. Esta abordagem inovadora oferece uma série de benefícios, que abrangem desde a redução dos impactos ambientais até o aprimoramento das propriedades do concreto. A redução do uso de cimento não só favorece as melhores reações de redução de CO₂, mas também reduz a quantidade de lixo encaminhado para aterros sanitários. Dessa forma, essa prática contribui amplamente para a construção de um futuro mais verde e eficiente.

REFERÊNCIAS

- AZA-BADILLA, L.; GÓMEZ, R.; DÍAZ-NORIEGA, R.; AVUDAIAPPAN, S.; SKRZYPKOWSKI, K.; SAAVEDRA-FLORES, E. I.; KORZENIOWSKI, W. Thermal Conductivity in Concrete Samples with Natural and Synthetic Fibers. **Materials**, v. 17, n. 4, p. 817, 2024.
- ALTHEMAN, Dener et al. Water treatment waste as supplementary cementitious material. **Materials Today: Proceedings**, 2023.
- AGRA, Thiago M. da Silva. **Avaliação da pozolanicidade da cinza do lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 1-13, 2016.
- ZANELLA, Andriago Kemel et al. **Análise das propriedades mecânicas de concretos para pavimentação empregando diferentes processos de cura**. 2014.
- ANUPAM, B. R.; BALAN, L. Anjali; SHARMA, Sunil. Thermal and mechanical performance of cement concrete pavements containing PVC-glass mix. **Road Materials and Pavement Design**, 2021. DOI: <10.1080/14680629.2020.1868328>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo de elasticidade estático - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004: Resíduo Sólido - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:2009: Agregados - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248:2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:2011 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935:1995 - Agregados - Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142:2010 - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2015 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento.** São Paulo: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52:2009 - Agregados - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 248:2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222:2011.**
Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:2018.**
Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935:1995.**
Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142:2010.**
Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655:2015.**
Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. São Paulo: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52:2009.**
Agregados - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222:2011.**
Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:2018.**
Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935:1995.**
Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655:2015. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605:2017. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5752:2014. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:2018. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AWWA; ASCE. **Water treatment plant design.** 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1998. 806 p.
- BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 ago. 2010.
- BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, v. 135, p. 211-219, 2016.
- BUCKNER, C. D. **Concrete Design: for the civil PE and structural SE exams.** 2. ed. Belmont, California: Professional Publications, 2014.
- CALAES, G. D. **Bases para a conciliação da produção de agregados com o desenvolvimento urbano sustentável.** In: **Programa de capacitação de gestores de empresas mineradoras de agregados para a construção civil. Gestão de Negócios.** Rio de Janeiro, 2005.

CASTRO, Cesar Eduardo Carvalho. **Uso de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) para Fabricação de Pavimentos Pré-moldados de Concreto**. 2014.

CETESB. **Resíduos e Soluções Sustentáveis**. Disponível em:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/multimidia/publicacoes/ResiduosSolucoesSustentaveis.pdf>.

Acesso em: 28 abr. 2023.

CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em:

<https://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2023.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB 2, 2001. 282 p.

CUNHA, Bruna Baia da. **Resíduo do lodo da estação de tratamento de água da região metropolitana de Belém em substituição parcial ao cimento Portland em argamassa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

DAZA-BADILLA, L. et al. Thermal Conductivity in Concrete Samples with Natural and Synthetic Fibers. **Materials**, v. 17, n. 4, p. 817–817, 8 fev. 2024.

DE SOUZA, F. R. **Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto**. 2009. 209 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: Rima Editora, 2005. v. 2, 1584 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: Editora LDiBe, 2011. 454 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: Editora LDiBe, 2012. 540 p.

FAUSTINO, Patrícia B. L.; SANTOS, Célia M. A.; BORGHETTI, Juliano L.; SOUZA, Marina C. R. de. Caracterização de resíduos de calcinação para produção de cimento Portland. **Cerâmica**, v. 57, n. 341, p. 43-52, 2011.

FERNANDEZ, Lucas Plattner; MIKOWSKI, Paula Cristina Buss. **Avaliação da viabilidade da utilização de lodo de estação de tratamento de água em peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2016. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FIGUEIREDO NETO, Abner. **Use of sludge treatment plant water in the production of tree seedlings to occurrence in the savanna**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; VALDEHÍTA, J. M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; SÁNCHEZ DE ROJAS, A. M. Influence of the activation time on the properties of alkali-activated slag pastes. **Journal of Materials Science**, v. 41, n. 1, p. 195-204, 2006.

GAO, X.; YAN, P.; WANG, Z.; CHEN, G. Preparation of alkali-activated cement from waterworks sludge and its performances. **Journal of Environmental Management**, v. 204, p. 256-261, 2017.

GASTALDINI, A. L. G. et al. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 513-520, 2015.

GODOY, L. G. G. et al. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 939-950, 2019.

GOMES, S. C. et al. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 148-159, 2019.

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.l.], v. 145, p. 148-159, jun. 2019.

GONG, K.; TAN, H.; ZHOU, Y.; HUANG, X.; XU, F. Mechanical properties and microstructural analysis of green cement-based material using waterworks sludge. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 426-431, 2013.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, Beatriz; ALONSO-AZCÁRATE, Jacinto; RODAS, Magdalena. Effect of prefiring and firing dwell times on the properties of artificial lightweight aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 54, p. 59-72, 2013.

HE, Zhi-Hai et al. Recycling of water treatment sludge in concrete: The role of water-binder ratio from a nanoscale perspective. **Science of The Total Environment**, v. 873, p. 162456, 2023.

HENGGEN, Mirdes Fabiana. **Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto – (Resistência à compressão axial)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

HOPPEN, C. et al. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006.

HUANG, C.; WANG, S. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 174-183, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8301:1991. Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus**. Geneva, 1991.

KIM, Y. et al. Environmental benefits from the use of CO₂ in the thermal disposal of cigarette butts. **Environmental Research**, v. 220, p. 115217, mar. 2023.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. **Design and control of concrete mixtures**. Portland Cement Association, 2016.

LIU, Y. et al. Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. **Journal of Environmental Management**, v. 262, p. 110352, maio 2020.

MACHADO, V. F.; VILLANOVA, D. P. Lodo de Estação de Tratamento de Água: destinação e reciclagem. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 23, n. 40, p. 113-222, jul./dez. 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIRNEZAMI, SeyedMohsen; HASSANI, Abolfazl; BAYAT, Arash. Evaluation of the effect of metallurgical aggregates (steel and copper slag) on the thermal conductivity and mechanical properties of concrete in jointed plain concrete pavements (JPCP). **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 129532, 2023.

MONTGOMERY, Douglas; RUNGER, George. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. ISBN 9788521637332.

MORETTIN, Pedro Alberto; BUSSAB, Wilton O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010. ISBN 978-85-02-08177-2.

MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C. Incorporação de Lodos de Estações de Tratamento de Água em Blocos Cerâmicos. **Revista SANEAS**, v. 14, p. 7-12, São Paulo, 2002.

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K.; FORTINI, O. M.; CATAI, R. E.; NAGALLI, A.; RISSARDI, J. L.; MOLINETTI, A.; PEDROSO, D. E.; IZZO, R. L. S. Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 145, p. 367-373, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: PINI, 2012.

PANDITHARADHYA, B. J.; MULANGI, Raviraj H.; SHANKAR, A. U. Ravi. Mechanical properties of pavement quality concrete with aluminium industry waste as a binder. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

PIRES, M. F. C. et al. Characterization of sludge from water treatment plants: potential use as adsorbent material. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, n. 6, p. 4475-4482, 2014.

RAMIREZ, K. G.; POSSAN, E.; DEZEN, B. G. dos S.; COLOMBO, M. Potential uses of waste sludge in concrete production. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 28, n. 6, p. 821–838, 2017.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgar Blucher LTDA, 2001.

RUVIARO, A. S.; SILVESTRO, L.; SCOLARO, T. P.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar. **Ambiente Construído**, [S.l.], v. 20, n. 4, p. 243-260, dez. 2020.

SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; SÁNCHEZ DE ROJAS, A. M. Use of drinking water treatment residue for making sustainable cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1659-1665, 2004.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 2018

SILVA, J.; OLIVEIRA, M.; PEREIRA, R. Estudo sobre a Condutividade Térmica de Misturas Ternárias para Pavimentos de Concreto. **Journal of Building Materials**, v. 34, n. 2, p. 123-130, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822019377>. Acesso em: 18 maio 2024.

SILVEIRA, Ana Christina Horner. **Caracterização dos resíduos gerados em estação de tratamento de água de dupla filtração com o uso de polímeros**. 2014. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas, Palmas, 2014.

SMIDERLE, J. J. **Estudo de viabilidade para destinação final do lodo da ETA Laranjal/RJ**. 2016. 99 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ - Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016.

SHI, C.; ZHUANG, Y.; ZHANG, S.; QIAN, J.; KONG, X. Effect of different curing conditions on properties of alkali-activated fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 1-7, 2015.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki; HIRATA, Angélica Yumi. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2001, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABES, 2001. Acesso em: 22 maio 2023.

VANZETTO, A. S. **Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgoto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185 p.

ZANELLA, Andriago Kemel. **Análise das propriedades mecânicas de concretos para pavimentação empregando diferentes processos de cura**. 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa