

INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

SAMANTHA FERREIRA MENDONÇA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO PLÁSTICO
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO E LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS POROSAS**

Marechal Deodoro – AL

2024

SAMANTHA FERREIRA MENDONÇA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO PLÁSTICO
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO E LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS POROSAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sheyla Karolina Justino Marques

Marechal Deodoro – AL

2024



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Marechal Deodoro
Biblioteca Dorival Apratto

O48a

Oliveira, Samantha Ferreira Mendonça de.

Análise das características e propriedades do plástico reforçado com fibra de vidro e lodo de estação de tratamento de água na produção de cerâmicas porosas / Samantha Ferreira Mendonça de Oliveira. – 2024.
124 f. : il., col.

Inclui bibliografia e figuras.

Apêndices: p. 124-171

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Marechal Deodoro, Marechal Deodoro, 2024.

Orientadora: Profa. Dra. Sheyla Karolina Justino Marques.

1. Economia circular. 2. Resíduos. 3. Agente parogênico. 4. Membrana porosa. I. Título.

CDD: 628.4458

Andreia Gomes de Azevedo
Bibliotecária – CRB-4/2164

SAMANTHA FERREIRA MENDONÇA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO PLÁSTICO
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO E LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS POROSAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Aprovado em: 12/04/2024

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Sheyla Karolina Justino Marques, IFAL / *campus* Palmeira dos Índios.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Rapôso, IFAL / *campus* Maceió.

Prof^a. Dr^a. Ana Paula da Silva Peres, IFPB / *campus* Monteiro.

Marechal Deodoro – AL

2024

Dedico este trabalho à Deus, aos meus pais, Adenilton e Josefa, e ao meu esposo Daniel, por serem a minha força e exemplo de superação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo discernimento, força e coragem que me foram concedidas durante minha trajetória como filha, esposa, estudante e agora, mãe.

Aos meus pais, Itan e Josefa, por sempre apoiarem os meus estudos e acreditarem que somente através da educação é possível haver transformação.

Ao meu esposo, Daniel, por todo incentivo e torcida, por acreditar no meu potencial e me permitir ver as coisas sempre pelo lado otimista.

A minha amiga e parceira, Taísa, que esteve comigo desde o início da minha jornada no IFAL. Obrigada por compartilhar de tantos momentos significativos na minha vida.

A minha professora, Dra. Sheyla Marques, por ser fonte inesgotável de sabedoria, inspiração e amor pela docência. Grata pela sua amizade e orientação neste trabalho.

Sou grata ao PPGTEC e a todo corpo docente, por contribuir com a minha formação acadêmica e profissional. Todo carinho e respeito por este programa e pelas pessoas que o tornam possível de acontecer.

Aos meus colegas de turma por todo companheirismo, troca de experiência e momentos de descontração.

Aos meus amigos dos diferentes laboratórios do IFAL Campus Maceió, Sheldon, Rinaldo, Clara e professor Johnnatan, da Maurício de Nassau, Taís e Kellyane, e do IFAL Campus Palmeira dos Índios, na pessoa do professor Diôgo, pela cooperação e ajuda na realização dos ensaios pertinentes à continuação deste trabalho.

Em geral, a todos que me ajudaram de forma direta ou indireta com o encerramento deste ciclo.

A todos, muito obrigada!

“Bem conheço os desígnios que mantenho para convosco, desígnios de prosperidade e não de calamidade, de vos garantir um futuro e uma esperança.”

Jeremias 29,11.

OLIVEIRA, Samantha Ferreira Mendonça de. **Análise das características e propriedades do plástico reforçado com fibra de vidro e lodo de estação de tratamento de água na produção de cerâmicas porosas.** 171 f. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Campus Marechal Deodoro, Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, 2024.

RESUMO

A geração de resíduos na indústria de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) e nas Estações de Tratamento de Água (ETA) constitui sérios problemas ambientais e sociais, em decorrência da falta de áreas de destinação dos passivos, que se configuram como matéria-prima secundária para outros processos industriais. A partir deste contexto, esta pesquisa teve por objetivo analisar as características e propriedades do particulado de PRFV (PPRFV) e lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) na produção de cerâmicas porosas, de modo a obter produto mais eficiente à luz da economia circular. Os resíduos foram caracterizados através das técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial (TG/DTG/DSC) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram utilizados os traços experimentais com níveis de PPRFV (0%, 4%, 6% e 8%) e de LETA (5%, 10%, 15% e 20%), em substituição parcial à argila, nos quais foram moldados 10 corpos de prova por composição. Os dados obtidos através das variáveis respostas foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e regressão polinomial. O PPRFV apresentou, de forma majoritária, o CaO (47,79%) e SiO₂ (36,38%), enquanto o LETA apresentou o SiO₂ (52,06%) e Al₂O₃ (29,83%). A difração de Raios X detectou a presença de halo amorfo e a fase cristalina quartzo no PPRFV e LETA, nesta ordem. O infravermelho do PPRFV permitiu determinar grupos funcionais que ocorrem na estrutura química da resina epóxi, enquanto o lodo apresentou bandas de absorção características de minerais argilosos. A análise térmica do particulado revelou evento exotérmico na temperatura em torno de 450°C e perda mássica de 40,33%. Em relação ao lodo, este sofreu perda de massa total de 14,83%. As micrografias de MEV do particulado revelaram a existência de filamentos fibrosos aderidos às partículas de textura rugosa, ao passo que o lodo apresentou formato de lascas, característico de materiais com carga orgânica e inorgânica. No que diz respeito aos ensaios tecnológicos, o traço experimental com 8% de PPRFV e 20% de LETA despontou como o mais promissor, demonstrando aumento, em relação ao traço de referência, de 83,84%, 47,36% e 26,67% nos índices de Retração Linear, Absorção de Água e Porosidade Aparente, respectivamente. Os dados de Fluxo Permeado comprovaram o aumento

observado nos ensaios físicos, alcançando valor de 5.222,27 L/m².h, para o traço experimental com maior porcentagem de resíduos. Baseado nos dados obtidos, este estudo demonstrou-se importante no desenvolvimento de produto técnico com vista à reintrodução do particulado de PRFV e lodo de ETA no sistema de tratamento de água na etapa de filtração.

Palavras-chave Economia circular; Resíduos; Agente parogênico; Membrana porosa:.

OLIVEIRA, Samantha Ferreira Mendonça de. **Analysis of the characteristics and properties of glass fiber reinforced plastic and water treatment plant sludge in the production of porous ceramics.** 171 f. 2024. Final Paper (Master's Degree in Environmental Technologies) - Campus Marechal Deodoro, Federal Institute of Alagoas, Marechal Deodoro, 2024.

ABSTRACT

The generation of waste in the Fiberglass Reinforced Plastics (FRP) industry and in Water Treatment Plants (WTP) is a serious environmental and social problem, due to the lack of areas to dispose of these liabilities, which become secondary raw materials for other industrial processes. In this context, the aim of this research was to analyze the characteristics and properties of GRP particulate (PPRFV) and water treatment plant sludge (LETA) in the production of porous ceramics, in order to obtain a more efficient product in the light of the circular economy. The waste was characterized using X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), derivative and differential thermogravimetric analysis (TG/DTG/DSC) and scanning electron microscopy (SEM). Experimental traces were used with levels of PPRFV (0%, 4%, 6% and 8%) and LETA (5%, 10%, 15% and 20%), as a partial substitute for clay, in which 10 specimens were molded per composition. The data obtained from the response variables was submitted to analysis of variance (ANOVA) and polynomial regression. PPRFV showed a majority of CaO (47.79%) and SiO₂ (36.38%), while LETA showed SiO₂ (52.06%) and Al₂O₃ (29.83%). X-ray diffraction detected the presence of an amorphous halo and the quartz crystalline phase in PPRFV and LETA, in that order. The infrared of the PPRFV allowed functional groups that occur in the chemical structure of epoxy resin to be determined, while the sludge showed absorption bands characteristic of clay minerals. Thermal analysis of the particulate revealed an exothermic event at a temperature of around 450°C and a mass loss of 40.33%. The sludge suffered a total mass loss of 14.83%. SEM micrographs of the particulate revealed the existence of fibrous filaments adhered to the particles with a rough texture, while the sludge showed a chip-like shape, characteristic of materials with an organic and inorganic load. With regard to the technological tests, the experimental mix with 8% PPRFV and 20% LETA emerged as the most promising, showing an increase of 83.84%, 47.36% and 26.67% in the Linear Shrinkage, Water Absorption and Apparent Porosity indices, respectively, compared to the reference mix. The Permeate Flow data confirmed the increase observed in the physical tests, reaching a value of 5,222.27 L/m².h for the experimental mix with the highest percentage of waste. Based on the data obtained, this study proved to be important in the development of a technical product with a view to

reintroducing GRP particulates and WTP sludge into the water treatment system at the filtration stage.

Keywords: Circular economy; Waste; Parogenic agent; Porous membrane.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA - Absorção de Água
ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica
ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASTM - Sociedade Americana de Testes e Materiais
BPO - Peróxido de Benzoíla
DIC - Delineamento Inteiramente Casualizado
DRX - Difração de Raios X
DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG - Termogravimetria Derivada
EPS - Poliestireno expandido
ESG - Ambiental, Social e Governança
ETA - Estações de Tratamento de Água
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
FP - Fluxo Permeado
FRX - Fluorescência de Raios X
FTIR - Fourier Transform Infrared Spectroscopy
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISWA - Associação Internacional de Resíduos Sólidos
KPI - Indicadores-Chave de Desempenho
LAPFIMC - Laboratório de Análise das Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos
LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água
MEK-P - Peróxido Metil Etil Cetona
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
MS - Ministério da Saúde
NBR - Norma Técnica Brasileira
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU - Organização das Nações Unidas
PA - Porosidade Aparente
PAC - Policloreto de Alumínio

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPGTEC - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais

PPRFV – Particulado de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

PRFV - Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

RL - Retração Linear

RSL - Revisão Sistemática da Literatura

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SERR - Plano Estratégico de Sustentabilidade

TCC - Trabalhos de Conclusão de Curso

TE - Traços Experimentais

TG - Análise Termogravimétrica

TR - Traço de Referência

UV - Ultravioleta

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Particulado de PRFV e lodo de ETA em ciclo técnico para Economia Circular..... | 23 |
| Figura 2 - Sistema produtivo da indústria de PRFV | 34 |
| Figura 3 - Instalações das duas ETA do complexo Morro do Gaia em São Brás-AL..... | 36 |
| Figura 4 - Fluxograma das etapas do processo de tratamento de água do Complexo Morro do Gaia..... | 37 |
| Figura 5 - Floculadores da ETA do Complexo Morro do Gaia..... | 38 |
| Figura 6 - Decantadores da ETA do Complexo Morro do Gaia..... | 39 |
| Figura 7 - Sistema de filtração do Complexo Morro do Gaia | 40 |
| Figura 8 - Local de fabricação do hipoclorito de sódio | 41 |
| Figura 9 - Fluxograma do processo produtivo da indústria local de PRFV | 43 |
| Figura 10 - Diagrama de bloco com fluxos de materiais e energia da indústria alagoana de PRFV | 45 |
| Figura 11 - ODS ligados aos temas materiais da companhia de saneamento..... | 47 |
| Figura 12 - Temas Norteadores SERR | 48 |
| Figura 13 - Fluxograma do sistema de tratamento da ETA do Complexo Morro do Gaia | 50 |
| Figura 14 - Diagrama de bloco com fluxo de materiais e energia da ETA do Complexo Morro do Gaia..... | 52 |
| Figura 15 - Seção transversal esquemática de um sólido poroso | 55 |
| Figura 16 - Esquema do método sacrificial utilizado na fabricação de cerâmicas porosas..... | 57 |
| Figura 17 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa | 62 |
| Figura 18 - Fluxograma dos critérios de qualidade dos estudos..... | 66 |
| Figura 19 - Argila in natura de Olaria local na Cidade de Palmeira dos Índios-AL | 69 |
| Figura 20 - Lodo em bag de desidratação da ETA da cidade de São Brás-AL..... | 70 |
| Figura 21 - PPRFV gerado do processo de lixamento de peças e equipamentos | 71 |
| Figura 22 - Fluxograma de obtenção dos corpos de prova..... | 77 |
| Figura 23 - (a) Homogeneização dos constituintes secos e (b) úmidos da massa a verde | 78 |
| Figura 24 - Corpos de prova a verde após a moldagem | 79 |
| Figura 25 - Tratamento térmico dos corpos de prova a verde em forno mufla | 79 |
| Figura 26 - Corpos de prova sinterizados prontos para a realização dos ensaios tecnológicos | 80 |
| Figura 27 - Utilização de paquímetro para medição dos diâmetros dos corpos de prova | 81 |
| Figura 28 - Equipamento de Associação de Bombas para realização do teste de fluxo permeado | 83 |

| | |
|---|-----|
| Figura 29 - Esquema do processo de realização do ensaio de fluxo permeado..... | 84 |
| Figura 30 - Difração de Raios X do PPRFV | 89 |
| Figura 31 - Difração de Raios X do LETA | 90 |
| Figura 32 - Espectros de FTIR do PPRFV | 91 |
| Figura 33 - Espectros de FTIR do LETA | 92 |
| Figura 34 - Curva Termogravimétrica e Derivada (TG/DTG) do PPRFV | 93 |
| Figura 35 - Curva de Calorimetria Exploratória Diferencial do PPRFV | 94 |
| Figura 36 - Curva Termogravimétrica e Derivada (TG/DTG) do LETA..... | 96 |
| Figura 37 - Curva de calorimetria exploratória diferencial do LETA..... | 97 |
| Figura 38 - Micrografias obtidas por MEV do PPRFV com magnificações de (a) 108x e (b) 550x | 98 |
| Figura 39 - Micrografias obtidas por MEV do PPRFV com magnificações de (a) 1000x e (b) 15000x | 99 |
| Figura 40 - Micrografias obtidas por MEV do LETA com magnificações de (a) 100x e (b) 497x | 100 |
| Figura 41 - Micrografias obtidas por MEV do LETA com magnificações de (a) 2000x e (b) 8000x | 101 |
| Figura 42 - Retração linear em relação ao traço de referência | 102 |
| Figura 43 - Absorção de água em relação ao traço de referência..... | 103 |
| Figura 44 - Porosidade aparente em relação ao traço de referência | 104 |
| Figura 45 - Fluxo permeado em relação ao traço de referência | 105 |
| Figura 46 - Modelo esquemático da aplicação da Membrana de Filtração Cerâmica..... | 109 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Especificações do leito filtrante | 40 |
| Tabela 2 - Indicadores KPIs acompanhados pelo SEER..... | 49 |
| Tabela 3 - Toneladas de resíduos classe I (perigosos) e II (não perigosos) gerados pela companhia de saneamento e locais de destinação | 51 |
| Tabela 4 - Propriedades de cerâmicas porosas coletadas na literatura | 58 |
| Tabela 5 - Percentuais de referência para este trabalho..... | 75 |
| Tabela 6 - Traços experimentais e de referência | 76 |
| Tabela 7 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra de PPRFV | 87 |
| Tabela 8 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra LETA | 88 |
| Tabela 9 - Correlações de Pearson entre as variáveis respostas e equações de regressão..... | 107 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 - Nomes Comerciais, Características e Aplicações Típicas para Polímeros Termorrígidos | 30 |
| Quadro 2 - Tipos e características de resinas poliésteres insaturados | 31 |
| Quadro 3 - Strings para cada base de dados | 64 |
| Quadro 4 - Critérios de Inclusão (I) e Critérios de Exclusão (E) | 65 |
| Quadro 5 - Avaliação final dos estudos..... | 67 |
| Quadro 6 - Critérios de extração dos estudos | 67 |
| Quadro 7 - Ficha Técnica da Membrana de Filtração Cerâmica..... | 108 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 21 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 21 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 24 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral..... | 24 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 24 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA, MOTIVAÇÃO E ADERÊNCIA AO PROGRAMA..... | 25 |
| 1.4 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 27 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 29 |
| 2.1 | INDÚSTRIA DE COMPÓSITO DE PRFV | 29 |
| 2.2 | ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA - ETA | 35 |
| 2.2.1 | Coagulação e Floculação | 38 |
| 2.2.2 | Decantação..... | 38 |
| 2.2.3 | Filtração..... | 39 |
| 2.2.4 | Desinfecção e Fluoretação..... | 41 |
| 2.3 | ASPECTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS A INDÚSTRIA DE PRFV E ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA..... | 42 |
| 2.3.1 | Aspectos ambientais relacionados a Indústria de PRFV | 43 |
| 2.3.2 | Aspectos ambientais relacionados a Estação de Tratamento de Água | 47 |
| 2.4 | CERÂMICAS | 53 |
| 2.4.1 | Características Gerais das Cerâmicas Porosas | 54 |
| 2.4.2 | Propriedades das cerâmicas porosas | 57 |
| 2.4.3 | Principais Estudos de Reprocessamento de Subprodutos para Produção de Cerâmicas Porosas..... | 59 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 62 |
| 3.1 | REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA..... | 63 |
| 3.2 | MATÉRIAS-PRIMAS..... | 68 |

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 3.2.1 | Argila | 69 |
| 3.2.2 | Lodo de ETA (LETA) | 70 |
| 3.2.3 | Particulado de PRFV (PPRFV) | 71 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS | 72 |
| 3.3.1 | Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX) | 72 |
| 3.3.2 | Análise por Difração de Raios X (DRX) | 72 |
| 3.3.3 | Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) | 73 |
| 3.3.4 | Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial (TG/DTG/DSC) | 73 |
| 3.3.5 | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 74 |
| 3.4 | COMPOSIÇÕES PARA A FABRICAÇÃO DAS CERÂMICAS POROSAS | 75 |
| 3.5 | MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA | 76 |
| 3.6 | ENSAIOS TECNOLÓGICOS | 80 |
| 3.6.1 | Retração Linear (RL) | 81 |
| 3.6.2 | Absorção de Água (AA) | 82 |
| 3.6.3 | Porosidade Aparente (PA) | 82 |
| 3.6.4 | Fluxo Permeado (FP) | 83 |
| 3.7 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 85 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 87 |
| 4.1 | ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS | 87 |
| 4.1.1 | Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX) | 87 |
| <i>4.1.1.1</i> | <i>Análise Química por FRX do PPRFV</i> | <i>87</i> |
| <i>4.1.1.2</i> | <i>Análise Química por FRX do LETA</i> | <i>88</i> |
| 4.1.2 | Análise por Difração de Raios X (DRX) | 88 |
| <i>4.1.2.1</i> | <i>Análise por DRX do PPRFV</i> | <i>88</i> |
| <i>4.1.2.2</i> | <i>Análise por DRX do LETA</i> | <i>90</i> |
| 4.1.3 | Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) | 91 |
| <i>4.1.3.1</i> | <i>Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) do PPRFV</i> | <i>91</i> |

| | |
|--|------------|
| 4.1.3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) do LETA.... | 92 |
| 4.1.4 Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial (TG/DTG/DSC) | 93 |
| 4.1.4.1 Análise TG/DTG/DSC do PPRFV | 93 |
| 4.1.4.2 Análise TG/DTG/DSC do LETA | 95 |
| 4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 97 |
| 4.1.5.1 MEV do PPRFV | 97 |
| 4.1.5.2 MEV do LETA | 99 |
| 4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS | 102 |
| 4.2.1 Retração Linear (RL) | 102 |
| 4.2.2 Absorção de Água (AA)..... | 103 |
| 4.2.3 Porosidade Aparente (PA) | 104 |
| 4.2.4 Fluxo Permeado (FP)..... | 105 |
| 4.2.5 Tratamento Estatístico | 106 |
| 4.2.6 Ficha Técnica | 108 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 111 |
| 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS..... | 113 |
| REFERÊNCIAS | 114 |
| APÊNDICE 1 – PRODUTO TÉCNICO/TECNOLÓGICO – DEPÓSITO DE PATENTE | 125 |
| APÊNDICE 2 - ARTIGO..... | 126 |
| APÊNDICE 3 – PRODUTO TÉCNICO/TECNOLÓGICO – CARTILHA | 170 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A versatilidade do plástico na produção industrial permitiu o desenvolvimento de materiais com características de leveza e durabilidade. Entretanto, a disposição destes produtos, principalmente, pós-consumo, têm acarretado a contaminação de rios, lagos, aquíferos e lençóis subterrâneos, com impactos negativos potenciais na vida marinha. Cerca de 100.000 mamíferos aquáticos morrem pelo lançamento de plásticos nos oceanos, problemática a qual promove descontinuidade da cadeia alimentar (ABIPLAST, 2022; Guern, 2019).

Em decorrência da origem fóssil dos plásticos, sobretudo, dos polímeros termorrígidos combinados com materiais de reforço, como as fibras de vidro, a baixa degradabilidade no meio ambiente prejudica a reintegração do compósito nos ciclos naturais da terra. Materiais com características enrijecedoras e de difícil separação dos componentes no processo de reciclagem colocam a indústria de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) em cenário de dificuldade de compartilhamento das perdas de processo para as indústrias de transformação de plásticos no Brasil (ABIPLAST, 2022; Sampaio *et al.*, 2018).

Além do segmento de plástico reforçado, outra empresa que possui responsabilidade de gerenciar os seus resíduos são as Estações de Tratamento de Água (ETA), que procuram garantir à sociedade acesso à água tratada e de qualidade, dentro dos padrões de potabilidade. A tendência de crescimento da população ocasionará maior consumo de água potável e conseqüentemente, a necessidade de exploração de novas fontes de água bruta para o abastecimento dos usuários (Ahmad, Ahmad e Alam, 2016).

Concomitantemente com o ganho de produção, haverá aumento no montante de resíduos gerados pelas ETA, que, na maioria das vezes, são responsáveis pelo lançamento indevido de lodo nos corpos hídricos, sem o devido tratamento e autorização dos órgãos competentes, causando efeitos nocivos ao meio ambiente como elevação dos níveis de alumínio e assoreamento dos cursos d'água (Carvalho *et al.*, 2021).

Convém esclarecer que o termo subprodutos é compreendido como os insumos derivados da ineficiência das operações e processos dos sistemas industriais, considerando o ciclo de vida do produto-serviço, que se encontram em estado de perdas e podem entrar em estado de fluxo de materiais e se reintegrar ao sistema produtivo de origem ou a novo sistema industrial (Rapôso, 2014).

Tendo em vista o panorama apresentado da necessidade de destinação dos subprodutos por parte da indústria de PRFV e das empresas de tratamento de água, surge o setor da

construção civil, mais especificamente a indústria cerâmica, receptível a adoção de novas tecnologias capazes de melhorar a operacionalização dos seus sistemas e agregar valor comercial aos seus produtos. No contexto das cerâmicas porosas com composições e processos de fabricação similares às cerâmicas tradicionais, o interesse por essas tecnologias tem aumentado, visto o desempenho e economia obtidos com a incorporação de materiais alternativos (Mestre *et al.*, 2019).

Desse modo, a possibilidade de atuação de fatores preponderantes ao reprocessamento de perdas industriais pode promover maior circularidade dos passivos ambientais, através da incorporação na cadeia produtiva de origem ou em outros processos, contribuindo assim, para mitigação dos impactos ambientais e manutenção dos recursos naturais (Silva, Marques e EL-Deir, 2020).

Diante desse contexto, surge o conceito de Economia Circular, modelo econômico que substitui o conceito de fim de vida da Economia Linear, baseada em processos de extração, produção, consumo e descarte de subprodutos, por novos fluxos cíclicos que promovam a valorização dos subprodutos, através da recuperação, reutilização ou reciclagem, deixando de ser passivo para tornar-se ativo como matéria-prima secundária em novos sistemas industriais. É nesse cenário que se projeta o conceito de ciclo técnico para Economia Circular, nas quais as perdas de processos de uma indústria possibilitam a obtenção de insumos que alimentam a geração de novos produtos em outros ciclos industriais (Pereira, 2020).

Logo, visando a Economia Circular, a Figura 1 mostra o processo de reintrodução do particulado de PRFV (PPRFV) e lodo de ETA (LETA) no ciclo técnico do sistema de tratamento de água na etapa de filtração, através do reprocessamento das matérias-primas e aplicação do Ecodesign para produção de cerâmicas porosas. O desenvolvimento de materiais voltado às questões ambientais pode ser definido como Ecodesign e possui como objetivo a mitigação dos impactos ambientais, por meio de processos e produtos mais limpos (Schäfer e Lower, 2020).

Figura 1 - Particulado de PRFV e lodo de ETA em ciclo técnico para Economia Circular



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A primeira etapa do ciclo conta com o processo de reciclagem externa dos passivos ambientais, particulado de PRFV e lodo, advindos das atividades de lixamento de peças em plástico reforçado e tratamento de água, respectivamente. A segunda etapa trata da incorporação de materiais convencionais como a argila no fabrico de cerâmicas porosas. A terceira etapa mostra o reprocessamento das matérias-primas necessárias para a produção de novo produto, que correspondem às etapas de secagem, cominuição, peneiramento, moldagem e sinterização.

A quarta etapa traz o conceito e aplicação do Ecodesign, por meio da fabricação de produto intrinsecamente sustentável, promovendo a reintegração dos passivos ambientais no ciclo produtivo como oportunidade de design ecoeficiente (Schäfer e Lower, 2020). A última e quinta etapa mostram a importância da valorização dos subprodutos e o potencial de melhoramento de processo, através da reintegração ao ciclo técnico do sistema de tratamento de água na etapa de filtração. A água subterrânea ou proveniente de rios, lagos ou represas passam por processos de tratamento aberto (gravidade) ou fechado (vaso de pressão), sendo este último o sistema adotado nesta pesquisa para fins de aplicação da cerâmica porosa em sistemas de filtração de água potável em Estações Compactas de Tratamento de Água (ECTA).

Nesse tipo de estação, as células de tratamento são pré-fabricadas e possuem processo de funcionamento similar ao sistema de uma ETA convencional, com exceção do baixo teor de

matéria orgânica da água bruta, necessário para alcançar maior eficiência. Ademais, a água é mantida sob pressão constante durante a etapa de filtração, sendo esse sistema indicado para uso industrial, abastecimento de residências, loteamentos, hotéis, entre outros empreendimentos que tenham demanda de água potável (Tega, 2024).

Nesse sentido, este trabalho teve como foco a análise da incorporação do PPRFV e LETA na produção de cerâmicas porosas, tendo como material precursor a argila, matéria-prima típica da indústria cerâmica tradicional. Caso comprovada a viabilidade técnica do produto tecnológico, este poderá ser direcionado para sistemas de filtração de água, possibilitando o fechamento do ciclo produtivo do PPRFV e LETA.

Baseado nesse contexto de produção de novos materiais a partir da incorporação de subprodutos industriais, surge o seguinte questionamento, como problema de investigação da presente pesquisa: **Quais as contribuições e os desafios da aplicação do particulado de PRFV e do lodo de ETA para a produção de cerâmicas porosas, voltadas a sistemas de filtração de água?**

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as características e propriedades de plástico reforçado com fibra de vidro e lodo de estação de tratamento de água na produção de cerâmicas porosas para uso em sistemas de filtração de água.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão sistemática da literatura sobre a produção de cerâmicas porosas incorporadas com subprodutos para embasamento do percurso da pesquisa;
- Caracterizar o PPRFV e LETA através das análises físico-químicas e mineralógicas: Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X, Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier; Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial e Microscopia Eletrônica de Varredura, para compreensão das especificidades dos subprodutos incorporados em cerâmicas porosas;
- Formular composições de massa cerâmica porosa com (0%, 4%, 6% e 8% de PPRFV) e (5%, 10%, 15% e 20% de LETA), em substituição parcial à argila, para realização de ensaios que determinem as propriedades do produto final;
- Submeter os corpos de prova aos ensaios físicos de retração linear, absorção de água

e porosidade aparente conforme normas regulamentadoras, para determinação da viabilidade técnica das cerâmicas porosas;

- Realizar ensaio de fluxo permeado, com base em metodologia proposta por Ferreira (2019), para obtenção de membrana de filtração cerâmica em sistemas de tratamento de água;
- Analisar os resultados das variáveis respostas retração linear, absorção de água, porosidade aparente e fluxo permeado através da ANOVA ($P < 0,01$), regressão polinomial e correlação, para verificação da confiabilidade dos dados.

1.3 JUSTIFICATIVA, MOTIVAÇÃO E ADERÊNCIA AO PROGRAMA

Com o crescimento das metrópoles e do consumo de vários produtos, intensificou-se a geração de subprodutos, tornando-se um dos maiores problemas atuais da sociedade. Esse problema é agravado pela ausência de áreas de destinação ambientalmente adequadas, que acabam por causar diversos problemas e impactos significativos ao meio ambiente, piorando as condições de saúde do planeta. No Brasil a disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, alcançou a marca em 2022, de 29,7 milhões de toneladas, valor esse que corresponde a 39% do total de resíduos dispostos de forma indiscriminada no meio ambiente (ABRELPE, 2022; Silva, Marques, EL-Deir, 2020).

A partir desta perspectiva de geração de subprodutos e da necessidade de áreas de destinação, estudos que viabilizem o reprocessamento de matérias-primas secundárias, quando estas não podem ser evitadas em seus sistemas de origem, podem promover a integração dos passivos no fabrico de novos materiais. Logo, pesquisas estão sendo amplamente discutidas na literatura, especialmente, na fabricação de cerâmicas porosas, que normalmente são constituídas por óxidos de alta pureza e processos que exigem alta temperatura de sinterização, tornando as cerâmicas com preços mais elevados (Carvalho, 2022; Mestre *et al.*, 2019).

Trabalhos recentes demonstraram a viabilidade de aplicação de subprodutos na fabricação de cerâmicas porosas como o de Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020) que utilizaram lama de papel na produção de suportes cerâmicos porosos; Manni *et al.* (2019) que analisaram a incorporação da borra de café na fabricação de revestimento poroso; Mouiya *et al.* (2019) que investigaram a utilização do particulado da casca de banana em membranas cerâmicas; e Kayalar *et al.* (2022) que avaliaram o uso de casca de ovo na confecção de cerâmicas porosas.

Portanto, a partir dos estudos já realizados, evidencia-se o potencial de utilização de matérias-primas alternativas na produção de cerâmicas porosas, fortalecendo o

desenvolvimento de novas investigações acerca do assunto, sobretudo, no sentido de buscar resultados sobre o desempenho técnico da incorporação do PPRFV e LETA na fabricação de cerâmicas porosas. Além disso, esta pesquisa apresenta oportunidades de desenvolvimento intrinsecamente sustentável para as indústrias cerâmicas reduzirem a utilização de matérias-primas não renováveis e diminuírem os custos inerentes ao processo de fabricação, principalmente na etapa de sinterização (Mestre *et al.*, 2019).

Desse modo, o presente trabalho justifica-se tanto pela relevância de ampliar trabalhos sobre a problemática de geração do PPRFV e LETA no estado de Alagoas, quanto por apresentar alternativa de aplicação dos subprodutos em cerâmicas porosas, com vistas à utilização de materiais e processos de fabricação característicos da indústria da cerâmica tradicional.

Relacionando, ainda, a proposta com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS, também conhecidos como desenvolvimentos globais, entende-se que o objeto de estudo desta pesquisa envolve e possibilita contribuição com ações investigativas, associadas ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Visando a Economia Circular no âmbito da Cadeia produtiva do plástico reforçado e das empresas de tratamento de água e saneamento, a primeira articulação dessa pesquisa com os ODS ocorre pelo Objetivo 12, que busca assegurar padrões de produção e de consumo responsáveis.

Do ODS 12, observa-se que a produção de cerâmicas porosas com subprodutos atende às seguintes metas da Agenda 2030: meta 12.5 - Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso; meta 12.8 - Até 2030, garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o Desenvolvimento Sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza; e, a meta 12.a Apoiar países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo (ONU, 2015).

Com relação ao ODS 9, “Indústria, Inovação e Infraestrutura”, que visa construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação, a partir da Economia Circular e da Produção mais Limpa (P+L) (ONU, 2015), o estudo poderá possibilitar a inovação e impactos positivos significativos nas indústrias de PRFV e empresas de tratamento de águas, e ainda fomentar a inovação na indústria ceramista.

Ao se voltar para os impactos socioambientais, a pesquisa também acrescenta reflexões e oportunidades de melhoria no âmbito do ODS 6, “Água Potável e Saneamento”, tendo em

vista que poderá contribuir com redução dos subprodutos gerados e melhorar a qualidade da água tratada. Ao contribuir diretamente para os ODSs 9 e 12 e ao considerar a comunidade de São Brás-AL como lócus da pesquisa, o estudo também se integra ao ODS 11, que busca tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, levando em consideração a aplicação para uso em processos de filtração de água da região.

Portanto, este trabalho encontra-se aderente com a linha de pesquisa Tecnologias e Inovações Ambientais do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais - PPGTEC, ao que tange o desenvolvimento de produto intrinsecamente sustentável e relativamente competitivo para a indústria de tratamento de água.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi organizado em cinco seções mais as referências, com o intuito de reunir as etapas realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa. Para isso, foi utilizada a seguinte estrutura:

A seção um introduz o tema abordado ao longo deste trabalho, contextualizando a problemática relacionada à geração de particulado de PRFV e lodo de ETA, bem como os aspectos associados à sua incorporação em cerâmicas porosas. Além disso, discrimina-se de maneira sucinta os objetivos do estudo, bem como a justificativa.

A seção dois traz o referencial teórico sobre a cadeia produtiva da indústria de PRFV e ETA, aspectos ambientais referentes às duas indústrias e geração de subprodutos. Além disso, esta mesma seção apresenta aspectos relacionados às características gerais das cerâmicas, propriedades e estudos encontrados na literatura quanto ao reprocessamento de subprodutos para produção de cerâmicas porosas.

A seção três engloba os processos metodológicos utilizados durante a pesquisa, desde as etapas de elaboração da revisão sistemática da literatura, coleta e preparação das matérias-primas, caracterização dos subprodutos, definição dos traços experimentais e referência, moldagem dos corpos de prova, realização dos ensaios tecnológicos e análise dos resultados.

A seção quatro discute os resultados experimentais tanto de caracterização dos subprodutos, quanto dos ensaios tecnológicos de retração linear, absorção de água, porosidade aparente e fluxo permeado realizados nos corpos de prova. Os ensaios foram apresentados através de gráficos, tabelas e figuras, utilizando-se de análise estatística e literatura para a realização das discussões.

A seção cinco, considerações finais, destaca os principais resultados obtidos, fazendo-se o fechamento do trabalho e expondo a visão da pesquisadora acerca do que foi produzido. A seção seis propõe sugestões para trabalhos futuros.

Ao final são expostas todas as referências utilizadas durante o desenvolvimento do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA DE COMPÓSITO DE PRFV

Compósito pode ser definido como a combinação de dois ou mais materiais que apresentam características distintas, cujas propriedades dependem dos constituintes, quantidades relativas e geometria da fase dispersa. Logo, a ação combinada das fases constituintes potencializa as propriedades mecânicas do produto final, de modo a obter materiais resistentes, duráveis e mais leves (Callister, 2016).

Os materiais compósitos são geralmente formados por fase dispersa (reforço) envolta por matriz contínua e possui dentro do seu sistema de classificação os compósitos reforçados com fibras, com grande razão entre diâmetro e comprimento. A impregnação de fibras em matrizes poliméricas confere aos materiais maiores resistências à tração e baixo peso específico, atuando como reforço e agente receptor das cargas transmitidas pela fase matricial (Askeland e Wright, 2016; Santos, 2022).

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro consistem em resinas (fase matriz) do tipo termorrígidas e substâncias catalisadoras de polimerização. Polímeros que apresentam características termorrígidas, ou seja, não amolecem sob aquecimento, são mais resistentes do que os termoplásticos e apresentam melhor estabilidade dimensional (Callister, 2016).

Os compósitos de PRFV possuem diversas aplicabilidades na indústria de plástico reforçado, com produção de peças com geometrias complexas, tanques, estruturas para estações de tratamento de esgoto e água, tubos, conexões, entre outros produtos. Com isso, a indústria torna-se atrativa e competitiva no mercado, tendo em vista as características de leveza, flexibilidade, resistência química e mecânica (Barros, 2019).

A versatilidade das peças em PRFV advém da combinação das propriedades das resinas, fibras de vidro e sistemas de cura utilizados no processo de obtenção das peças. As resinas poliméricas são subclassificadas em termorrígidas e possuem aplicações típicas para diversos produtos disponíveis no mercado. O Quadro 1 mostra os nomes comerciais, as características e aplicações deste tipo de polímero empregado na indústria de referência para este estudo.

Quadro 1 - Nomes Comerciais, Características e Aplicações Típicas para Polímeros Termorrígidos

| Tipo de Material | Nomes Comerciais | Principais Características de Aplicação | Aplicações Típicas |
|-------------------------|---|---|---|
| Epóxis | Araldite Epikote Lytex Maxive Sumilite Vipel | Excelente combinação de propriedades mecânicas e resistência à corrosão; dimensionalmente estáveis; boa adesão; relativamente baratos; boas propriedades elétricas | Espelhos para tomadas elétricas, ralos, adesivos, revestimentos protetores, usados em laminados de fibra de vidro |
| Fenólicos | Bakelite Duralite Milex Novolac Resole | Excelente estabilidade térmica até 150°C (300°F); podem ser combinados com um grande número de resinas, cargas etc.; baratos e libera água durante a cura | Carcaças de motores, adesivos, placas de circuitos, peças internas de aeronaves e trens, tomadas elétricas |
| Poliésteres | Aropol Baygal Derakane Luytex Vitel | Excelentes propriedades elétricas e baixo custo; podem ser formulados para uso à temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas; geralmente reforçados com fibras; mais sensíveis a danos devido à osmose (água que é absorvida no polímero e pode causar bolhas) | Capacetes, barcos em fibra de vidro, componentes de carrocerias de automóveis, cadeiras, ventiladores, tanques e tubulações e em pedra artificial |

Fonte: Elaborado pela autora com base em Callister, 2016 e Nijssen, 2015.

Os polímeros termorrígidos listados no Quadro 1 possuem características específicas a depender do campo de aplicação, tendo as resinas epóxis excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, destacando seu uso em laminados de fibra de vidro. Os polímeros fenólicos, por sua vez, apresentam estabilidade térmica até 150 °C, o que os tornam propícios para aplicações que necessitem de resistência ao calor, como em fabricados automotivos e no mercado elétrico e eletrônico. Quanto às resinas poliésteres, estas são as mais utilizadas em materiais de matriz polimérica, devido ao baixo custo e por apresentar características térmicas e dimensionais estáveis, alinhadas à capacidade de cura à temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas. Isso ocorre, por meio do uso de catalisadores e aditivos que aceleram a reação de transformação do estado líquido para o estado sólido (Callister, 2016; Nijssen, 2015; Sercel, 2018). O Quadro 2 apresenta os tipos e características das resinas poliésteres, encontradas no mercado.

Quadro 2 - Tipos e características de resinas poliésteres insaturados

| Tipos de Resinas Poliésteres | Características |
|-------------------------------------|---|
| Ortoftálica | Mais comum e barata, apresenta baixa resistência térmica, química e à hidrólise e é utilizada em aplicações gerais |
| Tereftálica | Resistência física pouco superior à da ortoftálica. Porém, apresenta baixa resistência a raios UV (ultravioleta) e amarela com facilidade |
| Isoftálica | Apresenta características térmicas, químicas e mecânicas melhores do que as resinas ortoftálica e tereftálica e confere maior resistência mecânica à peça |
| Bisfenólica | Resistências térmicas e químicas elevadas sendo utilizada, principalmente, em revestimentos anticorrosivos, em peças como tanques, tubos, conexões, etc |
| Éster-Vinílicas | Maior resistência aos meios alcalinos e é utilizada na fabricação de peças que ficarão expostas a ambientes agressivos. Menos sensíveis à umidade. |

Fonte: Elaborado pela autora com base em Nijssen, 2015 e Sercel, 2023.

As resinas poliésteres, indicadas no Quadro 2, do tipo isoftálica, apresentam características térmicas, químicas e mecânicas superiores a ortoftálica e tereftálica e intermediárias em relação a bisfenólica e éster-vinílicas, que possuem combinação de propriedades térmicas e químicas ideais para peças submetidas a ambientes corrosivos (Nijssen, 2015; Sercel, 2018).

A escolha da resina durante o processo de fabricação do compósito em plástico reforçado depende das propriedades exigidas para as peças, da facilidade de impregnação com as fibras de vidro e da capacidade de tixotropia, ou seja, de não redução da viscosidade a ponto de escorrer nas superfícies dos moldes (Sercel, 2017). Para alcançar essas características vários aditivos são utilizados com objetivos específicos, a saber:

- **Monômero:** Já inserido na formulação das resinas poliésteres na forma do hidrocarboneto estireno, possui como função reduzir a viscosidade e permitir a polimerização da resina à temperatura ambiente. Apresenta como desvantagem a redução da qualidade das peças quando utilizado em excesso (Nijssen, 2015).
- **Catalisador:** Os catalisadores geralmente utilizados na etapa de cura da resina e do *Gel Coat* são o “MEK-P (Peróxido Metil Etil Cetona), em estado líquido, e o BPO (Peróxido de Benzoíla), em estado sólido ou de pasta” (Sercel, 2017).
- **Acelerador:** Possui como objetivo acelerar a reação de cura da resina, juntamente com o catalisador. Para as resinas catalisadas com MEK-P são utilizados os de sais de cobalto como o Naftenato e Octoato de Cobalto e para os catalisadores com BPO, os de aminas terciárias Dimetil Anilina (Sercel, 2017).
- **Carga:** As cargas minerais adicionadas a resina oferecem vantagens durante o processamento das peças, tais quais, redução do calor na etapa de endurecimento da resina, conhecido como exotermia, minimização de defeitos e dilatação térmica, melhorias no acabamento e aumento da rigidez. Os principais minerais utilizados são o “talco industrial, o carbonato de cálcio (calcita), a fibra moída, o quartzo, o caulim, as sílicas e a barita” (Sercel, 2017).
- **Inibidor:** Presente na formulação da maioria das resinas, atua impedindo a geleificação precoce, de modo a permitir maior trabalhabilidade por parte da equipe (Sercel, 2017).
- **Pigmentos em Pasta:** Possui como finalidade dar cor a resina e, conseqüentemente, nas superfícies das peças acabadas. São encontrados no mercado na forma de pó, por esse motivo são moídas para facilitar a dispersão na resina não reativa (Sercel, 2017).

O fabricado em fibra, expressão utilizada para identificar compósitos que utilizam a fibra de vidro como reforço em resina polimérica, confere versatilidade para as indústrias de PRFV, visto a disponibilidade e facilidade de estiramento das fibras de alta resistência, inércia

química em ambientes corrosivos e menores custos associados a fabricação do compósito (Askeland e Wright, 2016; Rodrigues, 2018).

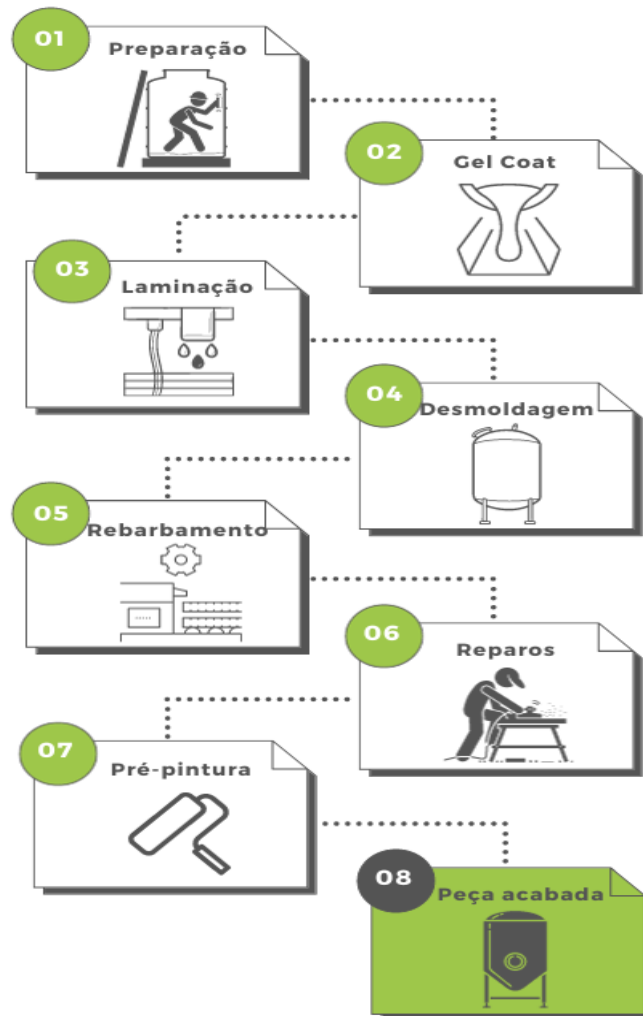
As fibras de vidro representam aplicações típicas dos vidros e possuem na sua composição óxidos de cálcio, sódio, potássio e alumínio, sendo material de estrutura não cristalina. Em matrizes poliméricas o vidro tipo E (elétrico) contém como constituinte principal o óxido de silício SiO_2 (55%), óxidos modificadores como o de cálcio CaO (16%), o de alumínio Al_2O_3 (15%) e o agente fluidizante como o óxido bórico B_2O_3 (10%) (Callister, 2016).

Matéria-prima principal na produção dos compósitos em PRFV, as fibras de vidro apresentam-se na forma de várias mechas de microfibras (*roving*) - picotadas e lançadas sobre a superfícies dos moldes -, cortadas e agregadas com ligantes (manta) e na forma de tecelagem de fios (tecidos) (Leite Filho, 2021). Na indústria de referência são utilizadas as fibras de vidro no formato *roving* e/ou véu de superfície, manta e tecido.

O sistema produtivo mais utilizado na indústria de compósitos em PRFV, *locus* da pesquisa, é a moldagem aberta *spray-up* (laminação manual mecanizada com uso de pulverizador) e *hand lay-up* (laminação manual). Diferente da moldagem fechada, empregada em projetos específicos, todo processo de cura da resina encontra-se confinado em moldes tipo macho e fêmea. A moldagem aberta ocorre em moldes em contato direto com o ar, estando, apenas, uma das faces ligadas à superfície (Leite Filho, 2021).

O processo de moldagem e acabamentos do compósito de PRFV requer as operações de preparação do molde, aplicação do *gel coat*, catalisador, laminação, rebarbamento, reparos e pintura. As fases sequenciais do sistema produtivo da indústria de referência para este estudo podem ser evidenciadas na Figura 2.

Figura 2 - Sistema produtivo da indústria de PRFV



Fonte: Elaborada pela autora com base em Leite Filho, 2021.

O processo inicia-se pela preparação do molde que irá dar forma e tamanho a peça acabada. Esta preparação acontece por meio da aplicação de desmoldantes na região na qual será realizada a laminação. Sequencialmente a essa etapa, ocorre a aplicação da solução *gel coat* e catalisador sob a superfície de impregnação da resina com a fibra. O *gel coat* é um tipo de resina que confere proteção e acabamento à face não exposta do processo de laminação (Leite Filho, 2021).

Passado o processo de cura, inicia-se a fase da laminação estrutural, que consiste na aplicação manual das mantas e tecidos de fibras de vidro umedecidas com resinas, que podem ser do tipo epóxi, vinil éster ou poliéster, e soluções catalíticas polimerizadoras. Dado o período de cura, a peça recém-fabricada é desmoldada e levada para a fase de acabamento. As etapas seguintes consistem no processo de remoção das rebarbas laterais, lixamento e correções com

uso de massa plástica. Caso o material não apresente imperfeições, esse segue para o processo de lixamento final e pintura (Leite Filho, 2021).

Essa seção apresentou de forma sucinta a versatilidade de produção da indústria de PRFV, tipos de resinas e as características das fibras de vidro utilizadas como reforço em matriz polimérica. Além disso, a planta de funcionamento da indústria de referência para esse estudo foi esquematizada, permitindo conhecer as etapas de processo adotadas pela empresa.

O tópico seguinte traz de forma detalhada aspectos relacionados às características das ETA, que, assim como o setor de plástico reforçado, faz parte do objeto de estudo dessa pesquisa.

2.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA - ETA

As ETA surgem como um dos principais mecanismos para obtenção de acesso contínuo e seguro à água potável, assumindo importante papel na mitigação de doenças por veiculação hídrica. O fornecimento de água, portanto, transcende sua função técnica, visto que a carência ou distribuição inadequada podem acarretar riscos substanciais para a saúde pública (IBGE, 2020).

O processo global de distribuição de água perpassa pelas etapas de captação, tratamento, armazenamento e subsequente distribuição. Os mananciais constituem fonte primordial para o abastecimento das ETA que, por sua vez, encarregam-se da distribuição de volume diário de água estimado em 43.645.542 m³, conforme dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no ano de 2017.

A observância de procedimentos de vigilância, uso racional e pleno aproveitamento dos corpos hídricos, bem como a prevenção e defesa do uso inadequado dos recursos naturais, são atribuições compartilhadas, entre União, Estados, Municípios e gestores dos sistemas de tratamento de água. Esta tratativa, promulgada pela Lei 9.433/1997, visa promover ações conjuntas mais assertivas para a gestão sustentável dos recursos hídricos, garantindo acesso à água de qualidade e dentro dos padrões de potabilidade (Brasil, 1997).

A água deve ser apropriada para o consumo humano e isenta de patógenos para adequar-se aos parâmetros de potabilidade requeridos pela Portaria do Ministério da Saúde (MS) N° 888, de 4 de maio de 2021. Como forma de atender a esses critérios, a água bruta passa por uma série de processos físico-químicos, muitas vezes combinados, visando torná-la apta para o abastecimento doméstico (Brasil, 2011). Para tanto, as etapas empregadas nas ETA de ciclo completo englobam os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção

e fluoretação, sendo essas fases observadas na ETA de referência para este estudo (Oliveira, Tenório e Marques, 2023).

O complexo Morro do Gaia, localizado na cidade de São Brás-AL e *locus* dessa pesquisa, atende mais de 377 mil habitantes em 10 municípios do agreste alagoano, sendo eles: Arapiraca, Campo Grande, Coité do Nóia, Craíbas, Feira Grande, Girau do Ponciano, Igaci, Olho d'água Grande, Lagoa da Canoa e São Brás. Responsável pela captação e tratamento das águas do Rio São Francisco, as duas ETA asseguram melhorias no sistema de abastecimento dos referidos municípios, tratando cerca de 565 L/s por ano de água (Empresa de Referência, 2023a).

A Figura 3 mostra as instalações das duas unidades de tratamento de água do complexo Morro do Gaia, as quais contam com os processos de captação, adução, tratamento e reservação da água, sendo esta última fase responsável por direcionar a água para duas estações elevatórias que possuem, dentre outras funções, recalcar a água já tratada para pontos de distribuição (Empresa de Referência, 2023a).

Figura 3 - Instalações das duas ETA do complexo Morro do Gaia em São Brás-AL

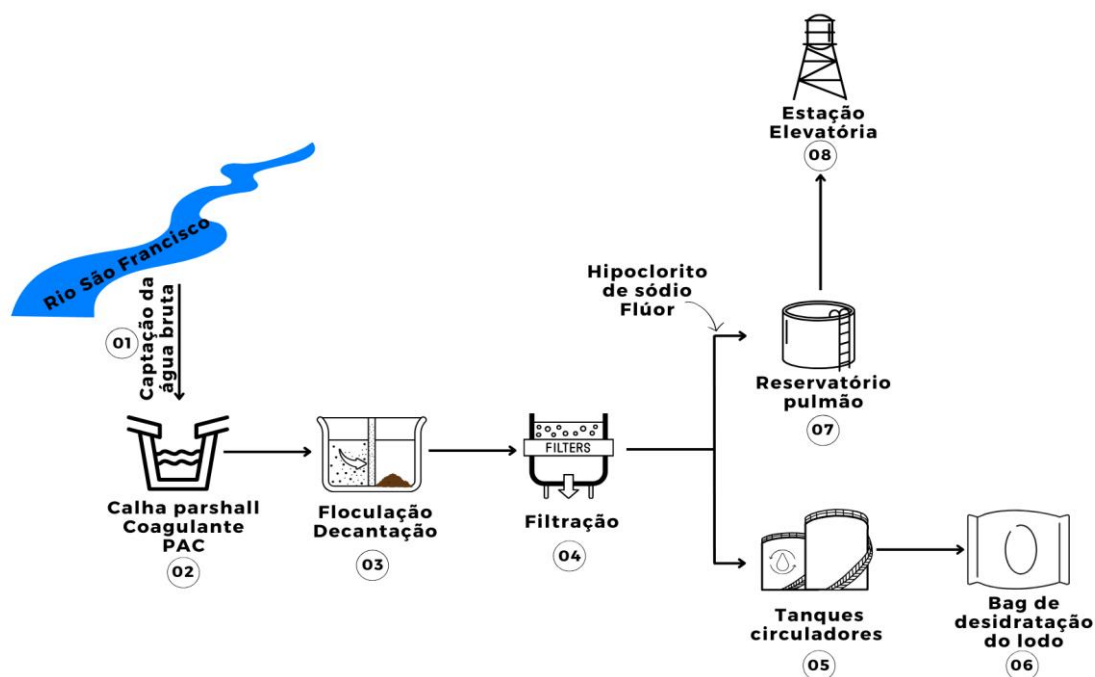


Fonte: Elaborada pela autora com base na ETA de referência, 2023.

As condições de tratamento são comuns para as duas estações do complexo. O processo inicia-se pela captação da água bruta, medição de vazão por meio de calhas parshall,

colocação de coagulante a base de Policloreto de Alumínio (PAC), floculação, decantação, filtração em camadas de areias e antracito, bombeamento de lodo para tanques de recirculação e reservação da água tratada (Empresa de Referência, 2023a). As etapas do processo de tratamento podem ser observadas no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma das etapas do processo de tratamento de água do Complexo Morro do Gaia



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A primeira etapa do fluxograma consiste na captação e direcionamento da água bruta para as ETA. Na segunda, o processo de coagulação inicia-se na calha parshall com a adição do PAC e segue para os tanques flocladores para posterior decantação dos flóculos formados, compondo à terceira etapa. As partículas de dimensões pequenas que não conseguem se aglomerar e, conseqüentemente, decantar são retidas em filtros, constituindo a quarta fase do tratamento.

As etapas seguintes correspondem a descarga de água para tanques de recirculação, proveniente da retrolavagem dos filtros e decantadores. Estes reservatórios possuem a função de armazenamento temporário, recuperando água limpa e recalando a parte mais densa (lodo mais água) para quatro bags. Todo esse processo sintetiza as etapas cinco e seis do fluxograma apresentado na Figura 4.

As fases subseqüentes representam o processo de adequação da água aos padrões de potabilidade, por meio da adição de hipoclorito de sódio e flúor, que por gravidade acaba sendo

armazenada no reservatório pulmão, para posterior bombeamento para as Estações Elevatórias de Água Tratada, constituindo a sétima e oitava etapa da Figura 4.

2.2.1 Coagulação e Floculação

A coagulação consiste no processo de agregação de partículas coloidais, por meio da adição de produtos químicos a água bruta, como o PAC ou sulfato de alumínio. No complexo Morro do Gaia, o uso do PAC no sistema de tratamento se justifica devido à sua rápida sedimentação de precipitados, baixo impacto no pH e baixa geração de alumínio na água tratada (Ferreira Filho e Waelkens, 2009; Howe *et al.*, 2016). O local de ocorrência das etapas de coagulação e floculação estão apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Floculadores da ETA do Complexo Morro do Gaia



Fonte: Elaborada pela autora com base na ETA de referência, 2023.

O processo de agregação de partículas suspensas através da aplicação de agentes poliméricos caracteriza a etapa de floculação, a qual desempenha papel importante para a fase subsequente do tratamento de água, a sedimentação (Andrade, 2017). Segundo Lopes *et al.* (2020), a eficiência desta fase é fundamental para o desempenho subsequente, exigindo a análise das características dos flocos para a remoção eficaz de partículas durante o processo de sedimentação.

2.2.2 Decantação

No processo de decantação ou flotação as partículas de maiores densidades são precipitadas, por meio da influência da gravidade. A velocidade da sedimentação é afetada pela

forma, massa e tamanho das partículas em suspensão, bem como pelas características físicas da própria água (Martins, 2014). A Figura 6 mostra os decantadores empregados na ETA de referência.

Figura 6 - Decantadores da ETA do Complexo Morro do Gaia



Fonte: Elaborada pela autora com base na ETA de referência, 2023.

A eficácia do processo de coagulação/floculação resulta em melhorias substanciais na etapa da sedimentação, culminando na redução da quantidade de sólidos suspensos e, por conseguinte, na diminuição de partículas retidas nos leitos filtrantes (Franco, 2015; Lopes, 2020; Gomes, 2010).

2.2.3 Filtração

A filtração constitui-se de processo físico-químico responsável pela remoção de partículas coloidais presentes na água, fazendo uso de meios granulares, como areia, de diferentes granulometrias, e carvão mineral do tipo antracito, no qual é composto, principalmente, por carbono e em menores quantidades dos elementos como enxofre, nitrogênio e oxigênio, cuja função é eliminar as impurezas que, porventura, continuam presentes na água (Ferreira Filho, 2017). As especificações dos leitos filtrantes de referência da ETA podem ser verificadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações do leito filtrante

| Material | Granulometria (mm) | Altura (mm) |
|-----------|--------------------|-------------|
| Areia | 2 a 4 | 150 |
| Areia | 1 a 2 | 100 |
| Areia | 0,5 a 1 | 100 |
| Areia | 0,45 a 0,55 | 250 |
| Antracito | 0,88 a 1,1 | 500 |

Fonte: Elaborada pela autora com base na ETA de referência, 2023.

As camadas filtrantes da ETA são compostas por material arenoso de classificação média e grossa, conforme NBR 7181 - Análise granulométrica (ABNT, 2018). Além disso, pode-se observar, com base na Tabela 1, que a camada mais espessa dos meios filtrantes, de altura 500 mm, é essencialmente composta por carvão antracito. Os filtros empregados na ETA estão evidenciados na Figura 7.

Figura 7 - Sistema de filtração do Complexo Morro do Gaia



Fonte: Elaborada pela autora com base na ETA de referência, 2023.

As estações de tratamento de água enfrentam grande problemática, referente ao uso de grandes volumes de água para a lavagem dos filtros, na maioria das vezes, este processo é executado utilizando-se métodos empíricos que comprometem o bom funcionamento dos filtros, reduzindo a taxa de filtração e permitindo o acúmulo de lodo nos vazios do meio filtrante (Albuquerque e Barreto, 2019).

2.2.4 Desinfecção e Fluoretação

A etapa de desinfecção possui como objetivo eliminar microrganismos patogênicos da água, através da aplicação de agentes químicos, sendo os principais hipoclorito de sódio, cloro gasoso e ozônio (Silva, 2018). A ETA, objeto de estudo da presente pesquisa, fabrica o seu próprio agente desinfetante, neste caso o hipoclorito de sódio, por meio de produção eletrolítica a base de cloreto de sódio. A Figura 8 demonstra esta importante etapa que garante a segurança microbiológica da água tratada.

Figura 8 - Local de fabricação do hipoclorito de sódio



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Nos últimos tempos, vem-se utilizando desinfetantes alternativos como o hipoclorito de sódio nas estações de tratamento de água. Ele pode ser obtido *in loco* através de produção eletrolítica, transformando-se em opção segura e barata para substituição do cloro gasoso que atende às determinações da portaria n.º 888 do Ministério da Saúde.

A fluoretação corresponde ao processo de adição de fluoreto à água tratada como forma de melhorar a saúde bucal. O fluoreto se enquadra em um dos parâmetros para adequação da água aos padrões de potabilidade, assim como, turbidez, cloro residual, pH e colimetria. A quantidade de fluoreto possui influência direta na proteção da saúde da dentição (Roncalli, 2019).

Desde que foram implementadas normas que asseguram a fluoretação da água, como a portaria 635 de 26 de dezembro de 1975, houve aumento significativo da prática nos sistemas de abastecimento público; no entanto, notáveis desigualdades ainda são observadas em todo

território nacional. Nos locais que foram adotadas as medidas, a cárie pode ser controlada e prevenida com maior eficácia (Zilbovicius, Ferreira e Narvai, 2018).

2.3 ASPECTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS A INDÚSTRIA DE PRFV E ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Com base no art. 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), as ações de não geração e redução devem ser consideradas prioritárias pelos setores que desenvolvem atividades geradoras de resíduos sólidos (Brasil, 2010). No entanto, a aplicação de padrões de sustentabilidade no sistema de produção de bens e serviços constituem práticas incipientes por parte das indústrias brasileiras (Brasil, 2022).

Isso resulta em volumes maiores de resíduos sólidos, que atingiram a marca de 82,5 milhões de toneladas em 2020, representando 225 mil toneladas diárias, em comparação com 79 milhões de toneladas, ou 217 mil toneladas diárias, em 2019. Esse aumento reflete um cenário de mudanças no país afetado pela pandemia da COVID-19, evidenciando como as dinâmicas sociais durante o período de isolamento influenciaram a geração de resíduos (ABRELPE, 2019, 2021).

De maneira positiva, no ano de 2022 foi relatado panorama de regressão no montante de resíduos sólidos gerados em relação ao ano base de 2021, em mais de 852 mil toneladas. Isso mostra a adoção da ordem de prioridade de ações de não geração pautada no art. 9 da Lei 12.305/2010. Essa minimização deve-se mais a retomada das atividades presenciais, pós-pandemia, do que melhoramento das ferramentas de gestão e conscientização (ABRELPE, 2022; Brasil, 2010).

Com isso, torna-se imprescindível repensar modelos econômicos para a redução, reutilização e reintrodução dos subprodutos na cadeia produtiva de origem ou em outro sistema industrial, valendo-se de suas características para se tornar matéria-prima secundária na concepção de produtos que promovam a circularidade. Desta forma, o modelo linear, de extrair, transformar e descartar dará espaço para modelo econômico baseado na recuperação de bens, energia e produtos com *designs* direcionados para usos futuros (ISWA, 2023; Brasil, 2022).

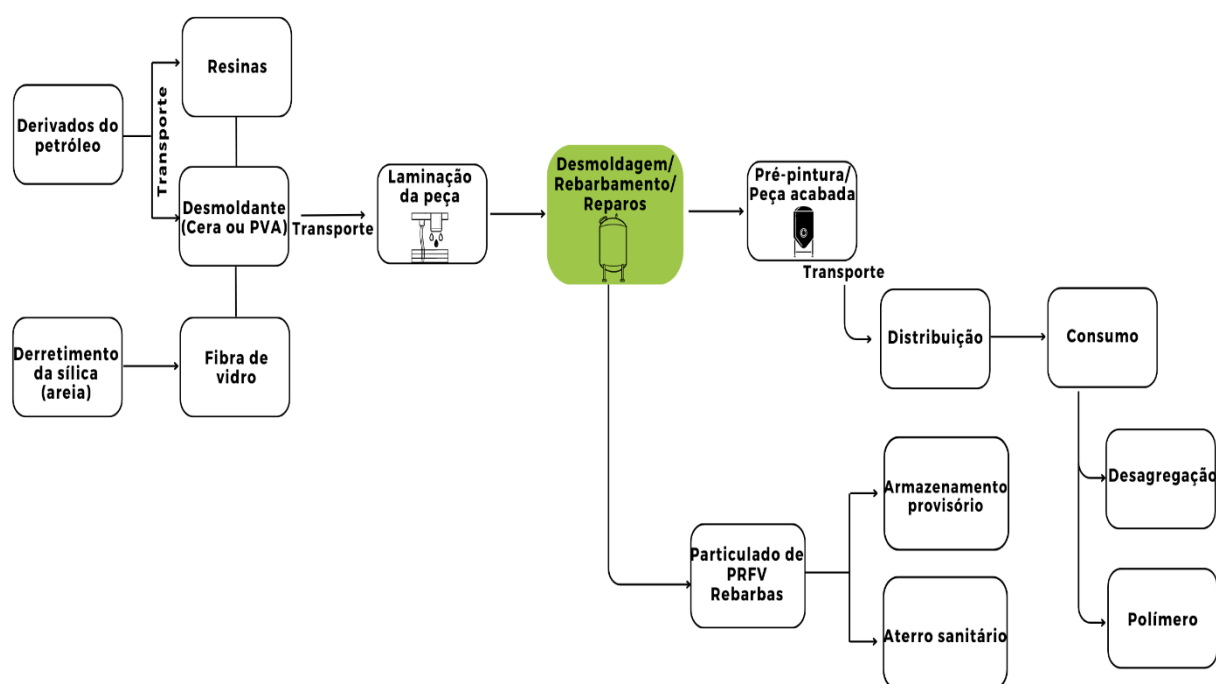
Baseado nesse contexto de transformações e possibilidades de reprocessamento de subprodutos que podem levar a redução da pressão sobre os recursos naturais, surge dois setores industriais geradores de passivos ambientais, com potencial de destinação intrinsecamente sustentável, sendo eles: a indústria de compósitos em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro,

situada na cidade de Marechal Deodoro-AL, e a Estação de Tratamento de Água, localizada no município de São Brás-AL.

2.3.1 Aspectos ambientais relacionados a Indústria de PRFV

Na indústria de referência, a geração de particulado de PRFV foi observada na etapa de Desmoldagem e Rebarbamento como indicado no fluxograma do seu sistema produtivo, esquematizado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma do processo produtivo da indústria local de PRFV



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O mapeamento inicia-se pelas etapas de extração do petróleo e sílica para a produção das resinas e fibras de vidro, respectivamente. Em seguida, ocorre todo processo de fabricação das peças em PRFV, que contempla as etapas de laminação, desmoldagem, rebarbamento, reparos e pintura. Após a obtenção das peças acabadas, estas são distribuídas ao consumidor com potencial impacto negativo ao meio ambiente, devido à vida útil prolongada dos polímeros. Na fase de desmoldagem, rebarbamento e reparo, os subprodutos, particulado de PRFV e rebarbas, são transportados para locais de armazenamento provisório na área circunscrita da fábrica, antes da disposição final em aterro sanitário.

O processo produtivo dos produtos fabricados pela indústria de PRFV, localizada na cidade de Marechal Deodoro-AL, permite verificar todas as etapas da cadeia de valor, que vão

desde a extração e beneficiamento das matérias-primas virgens, até a produção, distribuição, uso e descarte dos subprodutos ou reprocessamento dos materiais com fluxo de entrada no ciclo técnico de origem, ou em outros ciclos industriais, incluindo impactos positivos ou negativos (Sebrae, 2017).

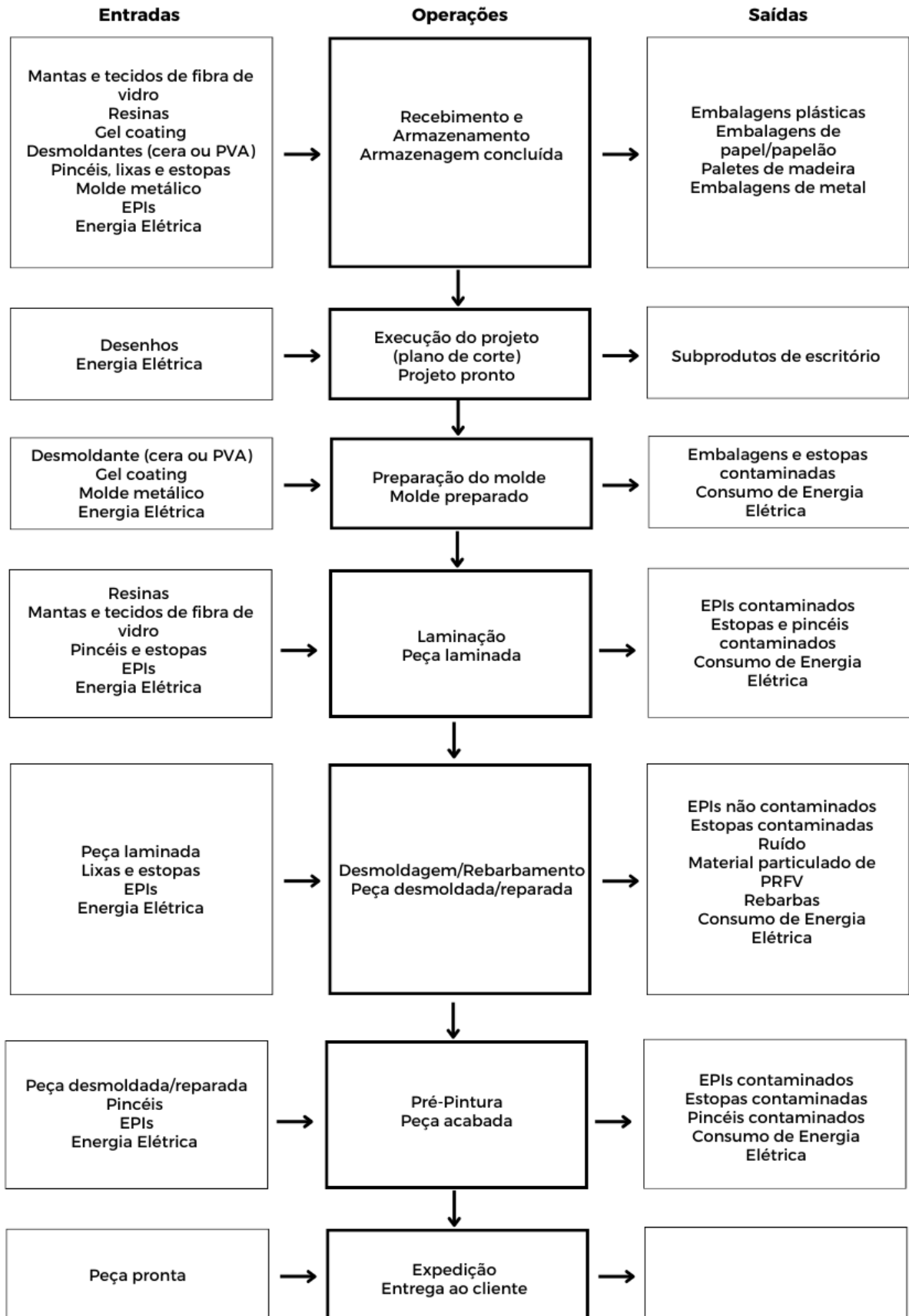
A partir do fluxograma da Figura 9, observa-se que no processo de fabricação das peças em PRFV, a indústria utiliza-se da disposição final como uma das ferramentas de gestão dos subprodutos gerados. Essa prática, apesar de prevista na Lei 12305/2010, só deverá ser adotada quando esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação, sendo, portanto, a última opção na escala prioritária das formas de destinação (Brasil, 2022).

Dados comparativos de 2021 e 2022 mostram a redução de 0,5% na disposição inadequada de resíduos e rejeitos em lixões e aterros controlados. No entanto, apesar do cenário otimista, é possível observar que a prática de disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), continua sendo direcionada para aterros sanitários (61%) (ABRELPE, 2022). Nesse montante, incluem-se as perdas de processo, que configuram desafios e, ao mesmo tempo, oportunidades para a década 2021-2030 (ISWA, 2023).

Segundo a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (*International Solid Waste Association - ISWA*) o uso consciente dos recursos naturais e a gestão dos resíduos sólidos ditará a forma de proteger toda e qualquer forma de vida no planeta. Para isso, os desafios serão grandes para os próximos anos com foco na eficiência e qualidade das tecnologias, sem que haja danos prejudiciais ao meio ambiente, durante o processo de produção, e riscos potenciais no final da vida útil dos produtos (ISWA, 2023).

Para isso, torna-se imprescindível conhecer os aspectos relacionados às etapas produtivas da indústria de PRFV, como forma de caracterizar qualitativamente o conjunto de atividades de cada etapa de produção, que transformam elementos de entradas em elementos de saídas com geração de subprodutos e possíveis impactos negativos ao meio ambiente. A Figura 10, mostra o diagrama de bloco com fluxos de materiais e energia do processo produtivo da unidade fabril de referência para este estudo.

Figura 10 - Diagrama de bloco com fluxos de materiais e energia da indústria alagoana de PRFV



Fonte: Elaborada pela autora com base em Leite Filho, 2021.

Através das etapas e operações observadas no fluxo de produção das peças em PRFV, apresentadas na Figura 10, foi possível identificar a geração de embalagens plásticas, estopas, EPIs e pincéis contaminados, proveniente, principalmente, do contato desses materiais com as resinas utilizadas no processo de preparação do molde e laminação das peças. A disposição inadequada destes passivos ambientais pode acarretar a contaminação do solo, poluição da água e problemas para a saúde humana (Bfm Ambiental, 2023).

Como forma de mitigar os impactos negativos inerentes à gestão dos subprodutos no meio ambiente, a Lei nº 12.305/10 no seu art. 7º, capítulo XIV, propõe o aproveitamento energético como alternativa de conversão dos materiais, antes considerados rejeitos, em combustível secundário (Brasil, 2010). A prática de tratar termicamente os passivos ambientais em ambientes controlados podem levar a redução das áreas de depósitos e tornar inerte quimicamente estes materiais (Brasil, 2022).

A diversidade de resinas e fibras de vidro empregada na fabricação das peças em PRFV mostra a complexidade da indústria em reprocessar as perdas de processo advindas, sobretudo, da etapa de desmoldagem e rebarbamento, visto que isoladamente os materiais apresentam características bem específicas e quando combinadas podem impactar negativamente o meio ambiente. Diante disso, componentes sintéticos como o particulado de PRFV devem receber destinação ambientalmente adequada, visto a dificuldade de decomposição desse subproduto na natureza (Barros, 2019).

A geração de particulado na indústria de plástico reforçado pode resultar no transporte de substâncias tóxicas para os trabalhadores, causando dermatoses e problemas no aparelho respiratório. A exposição prolongada e a manipulação destes subprodutos podem acarretar sérios danos à saúde humana, tais como, problemas no sistema nervoso, fígado, rins, fadiga, tosse, irritações e, até câncer (Leite Filho, 2021; Sampaio *et al.*, 2018).

O PPRFV, segundo estudo de Leite Filho (2021) pode ser classificado como resíduo Classe II A - Não inerte (ABNT, 2004), tendo impacto restritivo ou não à empresa, no entanto, reversível com ações mitigadoras. Apesar das técnicas de reciclagem disponíveis no mercado, o controle operacional deve existir com vistas à eficiência do processo e minimização dos impactos ambientais (Barros, 2019).

2.3.2 Aspectos ambientais relacionados a Estação de Tratamento de Água

A Companhia analisada neste estudo é considerada uma das principais operadoras privadas do setor de saneamento no Brasil com atuação em seis estados brasileiros: Alagoas, Mato Grosso, Paraná, Rio de Janeiro, Santa Catarina e São Paulo, abrangendo 39 municípios através de 18 operações. Em 2022 a referida empresa trouxe em seu Relatório Integrado questões ambientais, sociais e de governança (ESG) aplicados a gestão de risco da Companhia, bem como temas materiais, voltados a priorização de ações e práticas de sustentabilidade. A matriz de materialidade relaciona os principais temas da organização com os ODS, indicando a conexão da empresa com os esforços globais em busca do desenvolvimento intrinsecamente sustentável (Ferolla *et al.*, 2022). A Figura 11 apresenta o alinhamento estratégico da companhia com os sete ODS ligados aos temas materiais.

Figura 11 - ODS ligados aos temas materiais da companhia de saneamento



Fonte: Elaborada pela autora com base em Ferolla *et al.*, 2022.

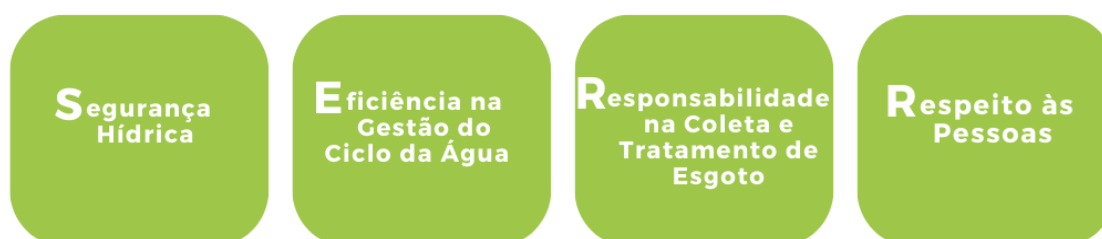
Relacionando os temas materiais da Figura 11 com os ODS, entende-se a possibilidade de contribuição da organização com os ODS 5 (Igualdade de Gênero), ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 10 (Redução das Desigualdades), ODS 13 (Ação Contra Mudança Global do Clima) e ODS 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes).

Ao se voltar para a esfera Ambiental, no âmbito do ODS 6, “Água Potável e Saneamento”, a referida empresa acrescenta oportunidades de melhorias no acesso à água para a população, gestão e combate a perdas, metas de redução de consumo, assim como, tratamento, redução e reutilização do lodo de ETA. Quanto ao ODS 13, “Ação Contra Mudança Global do Clima”, a empresa inclui ações de redução do consumo energético em todos os processos de operação, por meio da inclusão de matriz renovável (Ferolla *et al.*, 2022).

A sigla ESG (*Environmental, Social and Governance*) - do inglês ambiental, social e governança, corresponde a aplicação de práticas sustentáveis ao modelo de negócio das empresas. O termo, cunhado em publicação do Pacto Global no ano de 2004, surgiu da provocação do secretário-geral da Organização das Nações Unidas (ONU) e de outras instituições de como integrar as ações estratégicas do mercado de capital com a mitigação dos impactos socioambientais inerentes ao desempenho das organizações (Brasil, 2023).

A ferramenta pela qual as abordagens ESG da organização são monitoradas advém da gestão do Plano Estratégico de Sustentabilidade (SERR), lançado pela empresa no ano de 2018 com reestruturação do modelo em 2021. O plano possui como objetivo alinhar as ações e projetos da Companhia com aspectos do ESG, pautados em quatro eixos temáticos de atuação da empresa no processo de universalização do saneamento básico (Empresa de referência, 2023a). A Figura 12 apresenta os temas norteadores do SERR.

Figura 12 - Temas Norteadores SERR



Fonte: Elaborada pela autora com base na empresa de referência, 2023.

A abordagem ESG, acompanhada pelo instrumento de controle do SERR, divulga desde 2020 (ver Tabela 2), Indicadores-Chave de Desempenho do inglês *Key Performance Indicators*

- KPIs¹. As métricas mensuráveis dos KPIs: Gases de Efeito Estufa, Energia Renovável e Gestão do Lodo mostram os esforços da Companhia nos últimos anos em mitigar os impactos negativos inerentes às atividades de operação (Empresa de referência, 2023b).

Tabela 2 - Indicadores KPIs acompanhados pelo SEER

| KPI | ESG | SERR | 2020 | 3T 2021 | 4T 2021 | 1T 2022 | 2T 2022 | 3T 2022 | 4T 2022 | 1T 2023 | 2T 2023 |
|--|-----|------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Gases de Efeito Estufa (Kg CO ² eq/m ³) | E | E, R | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| % Utilização de energia renovável | E | E, R | 53,4 | 53,4 | 53,4 | 88,0 | 88,0 | 88,0 | 87,0 | 86,3 | 91,2 |
| % Gestão do lodo | E | R | 0,0 | 12,6 | 18,2 | 33,8 | 26,1 | 27,0 | 29,0 | 74,9 | 65,9 |

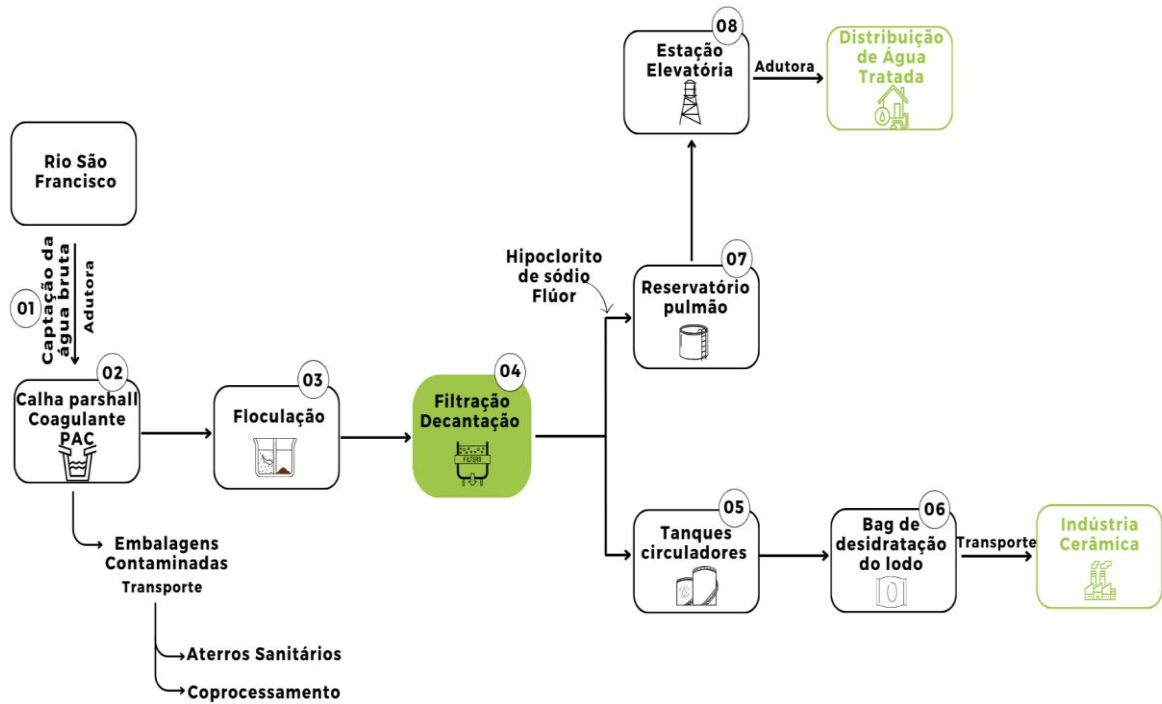
Fonte: Elaborada pela autora com base em empresa de referência, 2023.

Em termos ambientais, a emissão de dióxido de carbono equivalente por metro cúbico foi reduzida de 0,31 em 2020 para 0,20, no primeiro trimestre de 2023, já a porcentagem de utilização de energia renovável aumentou significativamente entre os anos de 2021 e 2022, de 53,4% para 88,0%, chegando a 86,3% no ano de 2023. Quanto ao indicador de gerenciamento do lodo, os resultados apontaram crescimento de cerca de 75% na adoção de tratamento adequado dado ao subproduto (Empresa de referência, 2023b).

O lodo de ETA constitui o principal subproduto gerado nas Companhias de tratamento de água, podendo ser observado, sobretudo, nas etapas de retrolavagem dos filtros e tanques de recirculação. A Figura 13 evidencia o fluxograma do sistema de tratamento da ETA de referência para esse estudo, contemplando as fases de geração de passivos ambientais e formas de destinação.

¹ Ferramenta de gestão para avaliar o desempenho da empresa, mediante métricas.

Figura 13 - Fluxograma do sistema de tratamento da ETA do Complexo Morro do Gaia



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A partir do fluxograma do sistema de tratamento da ETA do Complexo Morro do Gaia foi possível identificar a geração de materiais contaminados provenientes dos reagentes e produtos químicos utilizados no tratamento da água. Aproximadamente 62% dos subprodutos, classificados como perigosos (classe I), são dispostos de forma geral pela companhia em aterros sanitários, seguido da destinação para indústrias de coprocessamento 34% (Ferolla *et al.*, 2022).

Outro passivo ambiental advindo do sistema de tratamento de referência, o lodo de ETA, configura-se como matéria-prima secundária para a indústria cerâmica da cidade de Arapiraca-AL. A promoção da circularidade do subproduto traduz as formas de destinação intrinsecamente sustentáveis que as Companhias de saneamento no Brasil vêm adotando. Em 2022 foi possível identificar que 3.308,60 t de resíduos da classe II (não perigosos) foram destinados para outras formas de tratamento adequadas, enquanto 22.270,58 t de resíduos, ver Tabela 3, foram dispostos em aterros sanitários (Ferolla *et al.*, 2022).

Tabela 3 - Toneladas de resíduos classe I (perigosos) e II (não perigosos) gerados pela companhia de saneamento e locais de destinação

| 2022 (t) | | |
|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | I Perigoso | II Não perigoso |
| Aterro sanitário | 52,06 | 22.270,58 |
| Reutilização | 0 | 62,56 |
| Compostagem | 0 | 921,57 |
| Reciclagem | 0 | 854,21 |
| Coprocessamento | 28,25 | 353,74 |
| Logística reversa | 0,02 | 0,23 |
| Descontaminação | 1,93 | 0 |
| Incineração | 0,42 | 0 |
| Refino | 0,65 | 0 |
| Tijolos ecológicos | 0 | 1.070,00 |
| Tratamento de efluentes | 0 | 46,29 |
| Total geral | 83,33 | 25.579,18 |

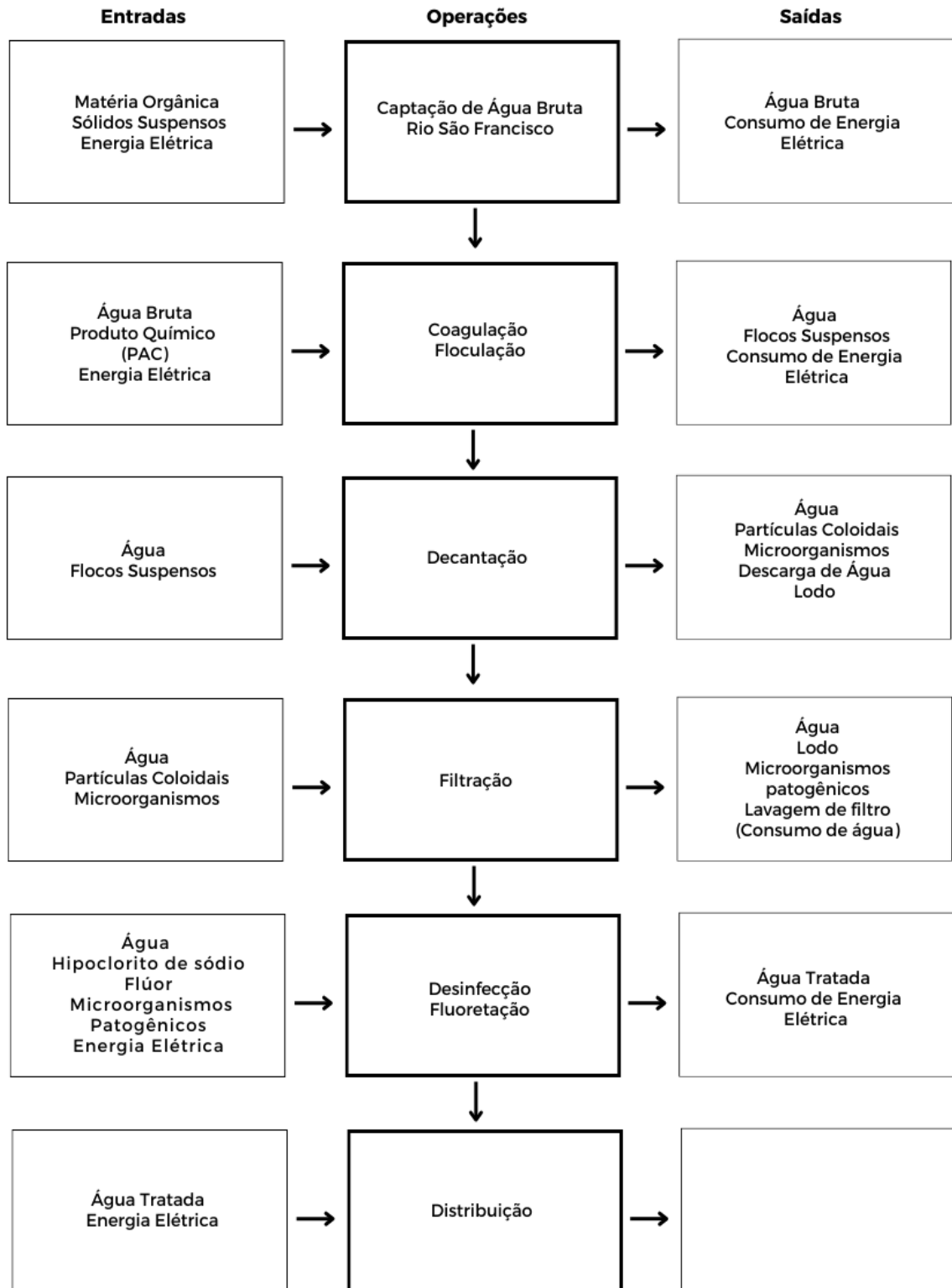
Fonte: Elaborada pela autora com base em Ferolla *et al.*, 2022.

Os resíduos perigosos gerados pela companhia, Tabela 3, advém dos reagentes e produtos químicos utilizados nos processos de tratamento. Do montante de 83,33 t de resíduos classificados como perigosos, 62% possuem como forma de destinação final o aterro sanitário, seguido por processos de coprocessamento (34%) e descontaminação (2%). Quando se trata de resíduos não perigosos, a empresa apresenta valores mais expressivos nas formas de destinação, tendo o aterro sanitário absorvido 87% dos resíduos gerados, seguido pelas indústrias cerâmicas, com participação de 4% e os métodos de compostagem e reciclagem, com representação de aproximadamente 3% do total gerado (Ferolla *et al.*, 2022).

A partir da identificação das formas de destinação dos resíduos evidenciadas na Tabela 3, fez-se necessário a construção do fluxo de materiais e energia representado pelo diagrama de

blocos, Figura 14, a fim de identificar os impactos potenciais, positivos e negativos do processo de operação da ETA do Complexo Morro do Gaia.

Figura 14 - Diagrama de bloco com fluxo de materiais e energia da ETA do Complexo Morro do Gaia



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A partir das etapas de operações da ETA do Complexo Morro do Gaia, apresentadas na Figura 14, foi possível identificar impactos positivos, no que diz respeito, ao acesso à água tratada por parte da população e geração de insumo secundário (lodo) para outros ciclos técnicos com potencial de utilização na indústria cerâmica. Quanto aos impactos negativos pode-se destacar: supressão vegetal e afugentamento das espécies de fauna presentes nas áreas de construção da ETA; lançamento indevido de lodo em corpos receptores, quando não recuperado ou reprocessado pelos ciclos tecnológicos e desperdício de água proveniente da retrolavagem das células de decantação e filtração.

2.4 CERÂMICAS

O uso da cerâmica em território brasileiro é anterior ao processo de colonização realizado pelos portugueses. Alguns estudiosos relatam que na ilha de Marajó, localizada no estado do Pará, os indígenas Marajoaras que residiam no arquipélago (400 a 1300 d.C) foram responsáveis pelo uso e desenvolvimento de técnicas especializadas para aplicação em materiais cerâmicos, conhecidos até à atualidade (Henrique e Linhares, 2019; ABCERAM, 2017).

A indústria ceramista é apontada como uma das pioneiras no segmento indústria de transformação, encarregada por transformar matéria-prima em produto final ou intermediário. No decorrer do tempo as técnicas de fabricação foram aprimoradas, acarretando ampla diversidade de produtos, que foram posteriormente classificados pela Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM, seguindo critérios técnicos e de aplicação (Junior *et al.*, 2019).

Dentre as subdivisões mais usuais utilizadas pela ABCERAM para o setor cerâmico estão: cerâmica vermelha ou estrutural, revestimentos, cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos e cerâmica avançada. É notório a heterogeneidade do setor, sobretudo, da cerâmica vermelha e avançada, que reúne os materiais inorgânicos, não metálicos e cristalinos, submetidos, geralmente, a tratamento térmico em altas temperaturas (ABCERAM, 2023).

A cerâmica vermelha ou tradicional possui ampla aplicação no mercado da construção civil na forma de revestimentos, vidros, porcelanas, telhas, blocos e tijolos, e possui em sua composição materiais inorgânicos não metálicos como a argila, quartzo e feldspato. Estes minerais quando combinados contribuem para a obtenção de peças com propriedades de dureza, ductilidade, resistência mecânica e estabilidade dimensional em elevado ponto de fusão e temperatura (Otitoju *et al.*, 2020).

Com o aprofundamento da ciência dos materiais e o surgimento de novas tecnologias, o desenvolvimento da classe das cerâmicas avançadas emergiu como segmento promissor para a produção de materiais leves e resistentes. As cerâmicas avançadas podem ser definidas como materiais inorgânicos, não metálicos, cujas propriedades permitem aplicações que envolvam tecnologias modernas. De origem sintética e de alta qualidade, as matérias-primas selecionadas possuem alto grau de pureza e são a base de óxidos, carbonetos, nitretos, silicatos, boretos, entre outros, submetidos a altas temperaturas. Diferente das cerâmicas tradicionais, as cerâmicas de alta tecnologia, como também podem ser chamadas, possuem processo rigoroso de fabricação, a fim de desempenhar propriedades mecânicas, físicas e químicas que as cerâmicas tradicionais não possuem (ABCERAM, 2023; Callister, 2016; Otitoju *et al.*, 2020).

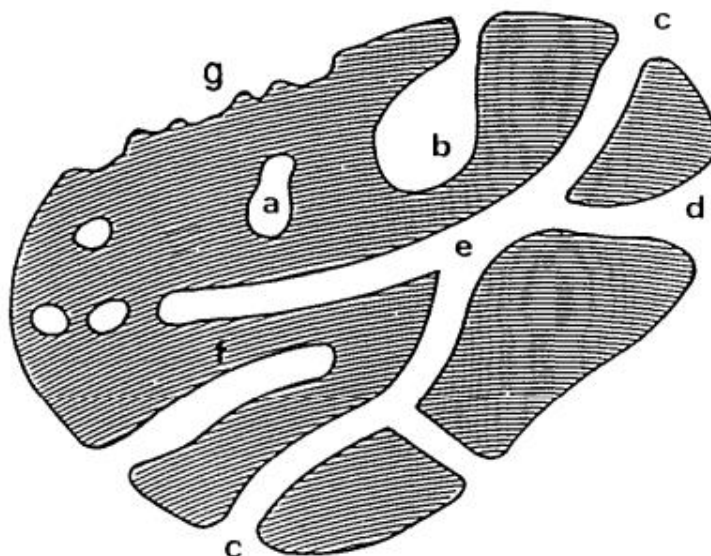
Embora, a maioria das aplicações das cerâmicas avançadas sejam voltadas para componentes navais, aeroespacial e aparelhos eletrônicos, o segmento de produção de cerâmicas porosas estão surgindo com largo campo de aplicação, especialmente como filtros, revestimentos, biomateriais, suporte de membranas, refratários e isolantes. Diversas propriedades contribuem para seu vasto emprego que inclui elevada permeabilidade e alto ponto de fusão, baixa densidade, estabilidade química e alta resistência mecânica (ABCERAM, 2023; Souza, 2018).

Dentro deste contexto, os subtópicos seguintes tratam das características gerais das cerâmicas porosas no que diz respeito a geometria e tamanho dos poros, classificação, propriedades e métodos de fabricação. Além disso, item específico aborda os principais achados da literatura quanto ao reprocessamento de subprodutos para produção de cerâmicas porosas.

2.4.1 Características Gerais das Cerâmicas Porosas

O processamento das cerâmicas porosas, a depender do campo de aplicação, necessita de parâmetros estruturais relacionados à geometria e tamanho dos poros. Em casos que envolvem transporte de fluido por membranas de filtração, por exemplo, a comunicação dos poros com o meio externo pode promover propriedades de permeabilidade importantes para o produto final (Al-Naib, 2018; Souza, 2018). A Figura 15 mostra a classificação dos poros quanto a sua disponibilidade a um fluido externo.

Figura 15 - Seção transversal esquemática de um sólido poroso



Fonte: Rouquerol *et al.*, 1994.

A região (a), na qual, observa-se o isolamento dos poros da superfície externa, são descritas como poros fechados e influenciam nas propriedades de densidade aparente, resistência mecânica e condutividade térmica dos materiais, no entanto, são ineficientes nos processos de obtenção do permeado. Em contrapartida, os poros que possuem canal aberto, como (b), (c), (d), (e), (f) e (g), apresentam maior facilidade de passagem dos fluidos, entretanto, características de resistência mecânica podem ser comprometidas (Rouquerol *et al.*, 1994).

A classificação dos poros está relacionada à morfologia e interconectividade com a superfície externa. Poros como (b) e (f) são denominados de cegos, por apresentarem uma única saída, em contrapartida, poros conectados entre si e com comunicação externa apresentam comportamento como mostrado em (e). Outras formas de classificação, tais como, gargalo de garrafa (b), cilíndricos abertos (c), fendas (d) e a rugosidade da superfície (g) são características apresentadas por sólidos porosos (Rouquerol *et al.*, 1994).

O processo de separação do fluido é classificado com base no tamanho dos poros e dividido em filtração (poros menores que 10 μm), microfiltração (poros situados na faixa entre 0,1 μm e 10 μm e com pressões abaixo de 5 bar, não ultrapassando pressões de 3 bar), ultrafiltração (1 nm e 100 nm e pressões de até 8 bar), nanofiltração (1 nm e 2 nm e pressões moderadas entre 5 bar e 15 bar) e osmose reversa (< 1 nm e pressões variando de 15 bar até 100 bar) (Ohji e Fukushima, 2012).

Na filtração e microfiltração a operação de separação ocorre por meio do mecanismo de peneiramento, no qual, as partículas de maiores dimensões ficam retidas na superfície da membrana. O inverso dá-se nos demais processos, visto a maior afinidade do meio filtrante com o solvente e as partículas (Ohji e Fukushima, 2012). O material poroso com características de maior seletividade de soluto limita-se a membranas cerâmicas, enquanto, as membranas poliméricas possuem aplicações que se estendem da microfiltração até a osmose reversa (Padaki *et al.*, 2015).

A eficiência e capacidade de retenção de impurezas cerâmicas porosas são analisadas através da permeabilidade e resistência mecânica, sendo esses dois fatores relacionados principalmente ao tamanho dos poros. Poros grandes favorecem a permeabilidade, mas reduzem a coleta das partículas e a resistência mecânica, por outro lado, poros pequenos aumentam a eficiência de coleta, contribuem para o aumento da resistência mecânica, no entanto, promovem aumento da queda de pressão durante a filtração (Salvani *et al.*, 2001).

Nesse sentido, técnicas de processamento para a produção de cerâmicas porosas, com estrutura de poros controlada, são relatadas na literatura, das quais podem ser citadas: método da réplica ou esponja polimérica, formação direta de espumas cerâmicas, sinterização incompleta e método de sacrifício pela queima de partículas orgânicas (Prado, 2014). O método da réplica se dá por meio da eliminação térmica da estrutura (esponja polimérica) que origina os poros da cerâmica. Este método permite a produção de cerâmicas macroporosas tendo como desvantagem a baixa resistência mecânica (Ohji e Fukushima, 2012).

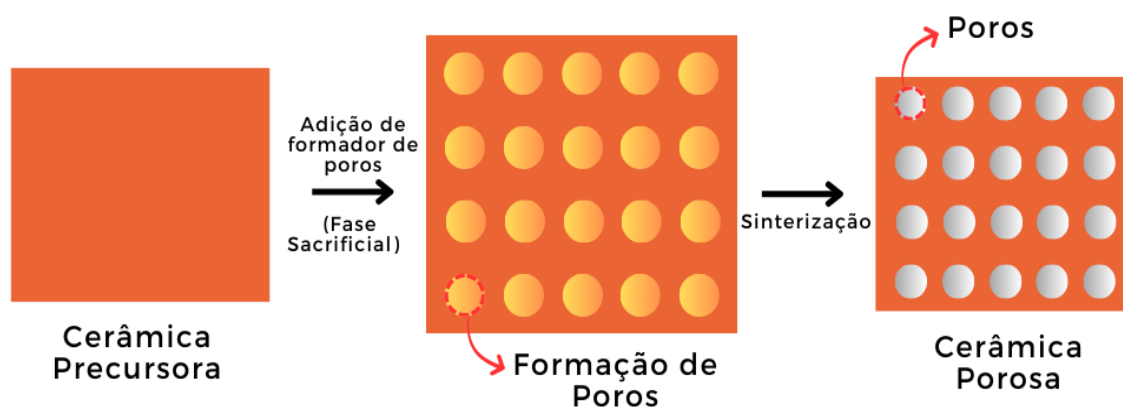
As cerâmicas porosas produzidas a partir do método da espuma permitem obter porosidade elevada de até 97% e alta resistência mecânica, tendo como princípio de funcionamento a injeção de ar em meio líquido, responsável pela formação da estrutura porosa, que posteriormente é submetida a altas temperaturas.

O método mais convencional no processo de produção das cerâmicas porosas ocorre através da sinterização parcial ou incompleta do corpo cerâmico. Neste processo a temperatura aplicada corresponde a aproximadamente 60% a 80% da temperatura de fusão do material e apresenta características de baixa densificação e porosidade (< 50%) (Nishihora *et al.*, 2018; Ohji e Fukushima, 2012).

O método da fase sacrificial utiliza precursores cerâmicos seguido de agentes parogênicos formadores de poros (polímeros, fibras orgânicas, amido, celulose, carbono, cinzas volantes, partículas de vidro, entre outros), que geram espaços antes ocupados pelo material sacrificial tratado termicamente. A maior vantagem do método, se comparada aos

outros métodos, é a possibilidade de controlar a porosidade, distribuição de tamanhos e a forma dos poros (Ohji e Fukushima, 2012; Porto, 2016). As microestruturas obtidas podem alcançar ordem de grandeza de poros de 1 mm a 700 µm e porosidade de 20% a 90% (Barg *et al.*, 2008). A Figura 16 ilustra o esquema de obtenção de cerâmicas porosas pelo método sacrificial, sendo esta a técnica que foi utilizada no presente trabalho.

Figura 16 - Esquema do método sacrificial utilizado na fabricação de cerâmicas porosas



Fonte: Elaborada pela autora com base em Nishihora *et al.*, 2018.

O desenvolvimento de cerâmicas porosas utilizando materiais naturais como argilas e minerais como agentes formadores de poros, aparecem como solução eficaz na obtenção de materiais de menor custo. Devido à compatibilidade química de alguns subprodutos com matérias-primas naturais, há a possibilidade de inseri-los na matriz cerâmica, diminuindo o consumo de recursos naturais e o impacto ambiental (Albuquerque *et al.*, 2019).

2.4.2 Propriedades das cerâmicas porosas

Para garantir que as cerâmicas porosas apresentem propriedades específicas a depender da aplicabilidade, achados na literatura apontam ensaios comumente realizados nas cerâmicas porosas, a saber: porosidade aparente, absorção de água, densidade aparente, retração linear, permeabilidade, resistência à compressão, resistência à flexão e condutividade térmica.

Dentre as normas utilizadas em estudos (Kayalar *et al.*, 2022) voltados para avaliação da qualidade de cerâmicas porosas, pode-se destacar o Método de Teste Padrão para Porosidade Aparente, Absorção de Água, Massa Específica Aparente e Densidade Aparente de Tijolos Refratários ASTM C:20-00 (ASTM, 2022). A referida norma preconiza todo procedimento de realização dos ensaios necessários para a obtenção das propriedades físicas do material cerâmico.

O comportamento das cerâmicas porosas em presença da água torna-se importante atributo físico que contribui para a avaliação do processo de formação dos poros, que está diretamente ligada a maior ou menor capacidade de transporte de fluidos e, conseqüentemente, a resistência do material. A Tabela 4 relaciona os resultados dos ensaios, em diferentes temperaturas de sinterização, de porosidade aparente, absorção de água, fluxo permeado e resistência à flexão, utilizados pelos autores em seus estudos sobre cerâmicas porosas com incorporação de subprodutos.

Tabela 4 - Propriedades de cerâmicas porosas coletadas na literatura

| Material | Temperatura (°C) | Porosidade Aparente (%) | Absorção de Água (%) | Fluxo Permeado (L.h⁻¹.m⁻²) | Resistência à Flexão (MPa) | Referência |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Lama de papel | 1000-1200 | 14,6-46,7 | ~5-42 | - | 15,4-39,9 | Bou-Issa, Loiola e Holanda, (2020)* |
| Café | 1150 | 17,43-42,81 | ~14-30 | - | 20,76-10,75 | Manni <i>et al.</i> (2019)* |
| Particulado de casca de banana | 1100 | 15,9-40,3 | - | 550-1150 | 29-19,2 | Mouiya <i>et al.</i> (2019)* |
| Subproduto de alumina | 900-1400 | 46-6 | 32-2 | 4-4500 | ~2,5-72,94 | Gonçalves (2018) |
| Lodo de ETE | 1250-1400 | 15,69-34,74 | - | - | 16-53 | Zhang <i>et al.</i> (2022)* |
| Dolomita e cinzas volantes | 800-1000 | ~27-51 | - | - | ~27-55 | Malik, Bulasara e Basu (2020)** |
| Escória de aciaria | 950-1150 | ~53-35 | - | - | ~2,7-18 | Xavier <i>et al.</i> (2022)** |

* Não apresentaram valores de fluxo permeado e/ou absorção de água.

** Apresentaram dados de fluxo permeado a partir de outras métricas.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Em estudos similares ao proposto nesse trabalho, no qual, os autores Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020), Manni *et al.* (2019), Mouiya *et al.* (2019), Salman *et al.* (2020), Serewane

Deramne *et al.* (2020) fizeram uso de matérias-primas a base de argila e subprodutos formadores de poros, a partir da detecção de óxidos de cálcio e agentes de vitrificação como a sílica e o alumínio, foi possível observar faixas específicas de valores de porosidade aparente de 14,6% a 46,7%. Quanto à tensão de ruptura à flexão, apresentaram resultados de 10,75 MPa a 39,9 MPa em relação ao traço de referência.

Pesquisas voltadas para a produção de cerâmicas porosas evidenciam a relação das propriedades físicas com a temperatura de sinterização e a quantidade de subprodutos incorporados em massas cerâmicas. No que diz respeito à retração linear, absorção de água e porosidade aparente, observou-se o aumento nos valores com o incremento de subprodutos. Por outro lado, foi notada relação oposta com o aumento da temperatura de sinterização. Esses resultados podem ser atribuídos à maior sinterabilidade dos suportes cerâmicos, ao grau de cristalização e à decomposição de compostos voláteis presentes nos passivos ambientais (Bou-Issa, Loiola e Holanda, 2020; Gonçalves, 2018; khater *et al.*, 2022; Manni *et al.*, 2019; Serewane Deramne *et al.*, 2020).

Quanto ao comportamento mecânico das cerâmicas porosas, boa correlação pode ser detectada com as propriedades físicas, mesmo com a diminuição da resistência mecânica, atribuída, sobretudo, ao aumento da porosidade em decorrência da maior quantidade de subproduto (Bou-Issa, Loiola e Holanda, 2020, Kayalar *et al.*, 2022; Manni *et al.*, 2019; Mouiya *et al.*, 2019; Salman *et al.*, 2020; Sverguzova *et al.*, 2021).

2.4.3 Principais Estudos de Reprocessamento de Subprodutos para Produção de Cerâmicas Porosas

Na literatura, diversos estudos relacionam as características e propriedades das cerâmicas porosas com a incorporação de materiais alternativos em substituição a matérias-primas de alto valor agregado. Nesse sentido, após revisão de literatura, foi possível consolidar e destacar os principais resultados no âmbito da produção de cerâmicas porosas utilizando subprodutos provenientes de diversos sistemas produtivos.

Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020) avaliaram a viabilidade da produção de suporte cerâmico poroso com a incorporação de subproduto de lama proveniente da indústria de papel. Os pesquisadores sugeriram a substituição de até 30% de argila caulim pelo subproduto da indústria do papel. As misturas foram umedecidas com 7% de água em relação à massa e posteriormente prensadas uniaxialmente em matrizes cilíndricas com diâmetro de 25 mm. Os

suportes resultantes foram submetidos a testes abrangendo absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente, retração linear, perda de massa e resistência mecânica.

Os resultados apontados pelos autores detectaram na lama de papel a presença de CaO (25,17%) na forma de calcita e perda de massa de 67,70%. Essas características podem se tornar positivas, do ponto de vista de processamento de cerâmicas porosas, devido à possibilidade de formação de poros, por meio da decomposição da calcita (CaCO_3) (Bou-Issa, Loiola e Holanda, 2020).

Milak (2018) investigou a substituição de matérias-primas comerciais por subprodutos da indústria de papel e celulose na produção de cerâmicas porosas, associadas à adição de fibras poliméricas para interconectar os poros. A lama de cal foi selecionada com função de agente parogênico e a areia como elemento estrutural, substituindo o carbonato de cálcio e quartzo, respectivamente. Os resultados relatados pelos autores despontaram como promissores com resistência à compressão entre 15 MPa e 52 MPa, porosidade superior a 39,7% e faixa de tamanho de poros variando entre 2,0 μm e 7,5 μm . Todas essas características contribuem para a aplicação da cerâmica porosa em sistemas de filtração.

Mouiya *et al.* (2019) analisaram a utilização de cascas de banana como agente parogênico na produção de membranas cerâmicas. As matérias-primas (argila vermelha e cascas de banana) foram peneiradas a 150 μm e submetidas a pressão uniaxial em suportes cilíndricos de 40 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. Os corpos verdes foram sinterizados por 2h a 1100°C e apresentaram porosidade aparente (40% em volume), similar às cerâmicas comerciais de zircônia. Correlação positiva entre o aumento da porosidade de 15,93% para 40,33% e adição de cascas de banana de 5% para 20% em peso foi detectada pelos autores, tendo como principal causa a decomposição do subproduto nas temperaturas de 250 °C - 600 °C.

Kayalar *et al.* (2022) propuseram analisar a potencialidade da produção de cerâmicas porosas de anortita a partir da utilização da casca de ovo, como fonte alternativa de cálcio, argila refratária e poliestireno expandido (EPS). As matérias-primas foram previamente caracterizadas e processadas, a fim de obter material com propriedades de isolamento térmico. As condições ótimas para a formação da composição de anortita foram observadas na temperatura de 1300 °C e com 35% de casca de ovo.

As propriedades físicas, mecânicas e de condutividade térmica foram investigadas através da adição de porcentagens de EPS (0%, 10%, 20% e 30%), que resultaram em porosidade aparente (entre 61% e 68,1%), absorção de água (entre 57,6% e 79,7%),

condutividade térmica (entre 0,39 W/m·K e 0,11 W/m·K), com redução de 71,8% em relação ao traço de referência e resistência à compressão (entre 6,4 MPa e 2,9 MPa). A formação de micro e macroporos foram atribuídas a decomposição da calcita e remoção do poliestireno presente no EPS, justificando, o aumento da porosidade e a diminuição da resistência à compressão, que se encontram em níveis aceitáveis, segundo os autores (Kayalar *et al.*, 2022).

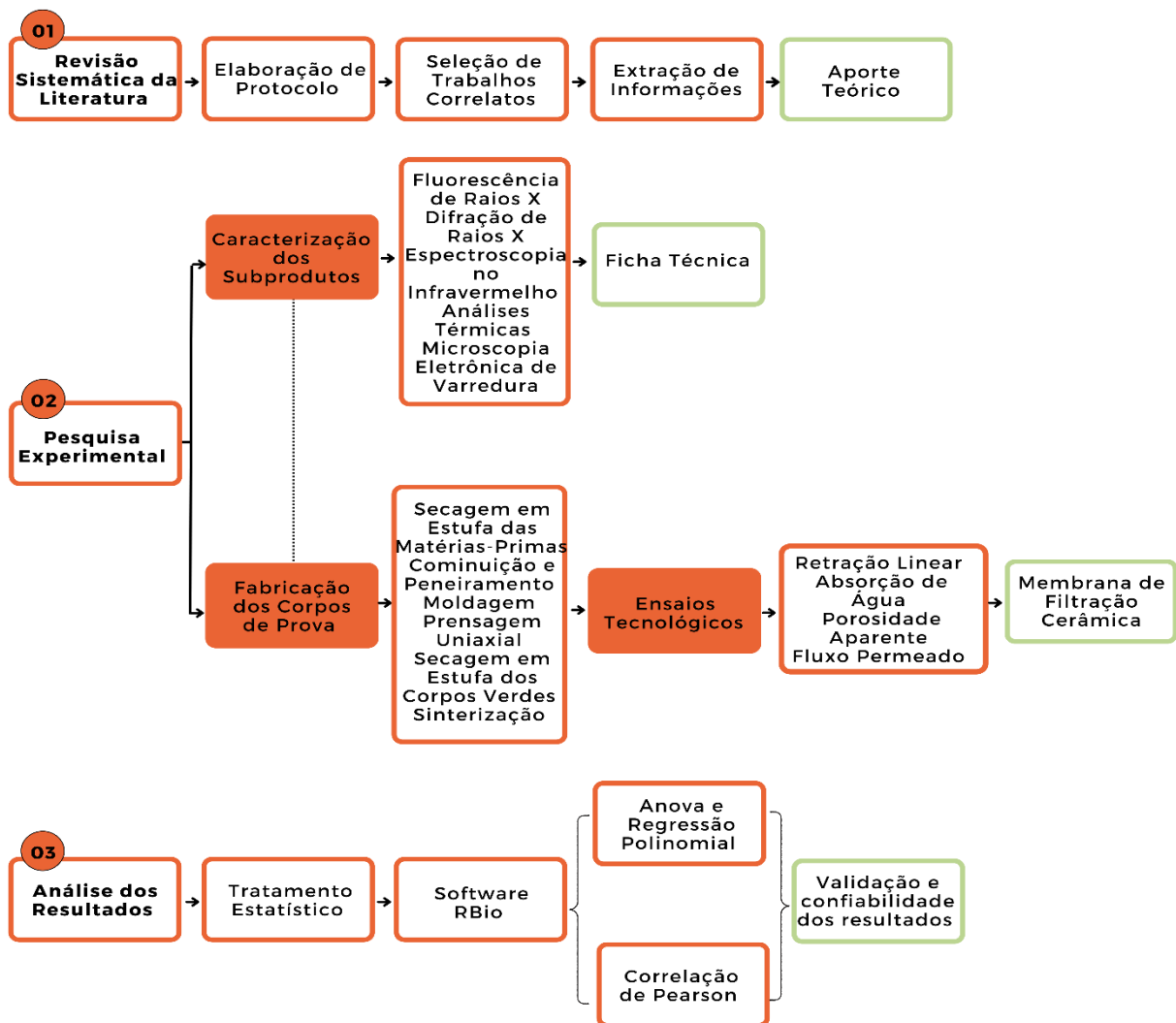
Manni *et al.* (2019) estudaram como a substituição de argila vermelha por diferentes proporções de borra de café (10%, 20% e 30%) afetariam as propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas porosas. Os autores afirmaram que a taxa de 30% de subproduto permitiu obter cerâmicas com alta porosidade (42,81%), absorção de água (~31%) e redução de até 53,42% nos valores de condutividade térmica. Mesmo com a diminuição progressiva da resistência à flexão de 20,76 MPa para 10,75 MPa, os autores confirmaram a viabilidade de produção das cerâmicas leves porosas (classe BIII) com até 30% de subprodutos de café.

A partir dos estudos aqui apresentados foi possível determinar o procedimento metodológico adotado para a obtenção das cerâmicas porosas, assim como as características que foram observadas com a incorporação dos subprodutos na matriz cerâmica, no que concerne a capacidade de formação de poros e a influência nas propriedades mecânicas do produto final.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As abordagens de pesquisas seguiram pressupostos baseados em procedimentos e métodos específicos de coleta, análise, interpretação e validação dos dados (Creswell, David Creswell, 2021). Logo, o desenho de pesquisa adotado foi baseado na abordagem quantitativa, com base na experimentação e natureza tecnológica, com instrumento de coleta de dados para a realização de ensaios, sendo executada, predominantemente, *in vitro* (Almeida, 2022).

Figura 17 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A primeira etapa da pesquisa tratou da realização da revisão sistemática da literatura sobre a produção de cerâmicas porosas a partir da incorporação de diferentes subprodutos. A segunda etapa foi composta pelos ensaios de caracterização dos subprodutos, fabricação dos corpos de prova e realização dos ensaios tecnológicos. E, por fim, a terceira etapa consistiu na

análise dos resultados com aplicação de tratamento estatístico (ANOVA), regressão polinomial e correlação de Pearson.

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) teve como objetivo analisar e sintetizar a literatura existente sobre a produção de cerâmicas porosas a partir da incorporação de diferentes resíduos, compreendidos aqui como subprodutos, com a finalidade de contribuir no estudo voltado para a análise das propriedades de filtros cerâmicos produzidos com particulado de PRFV e lodo de ETA. Vale destacar que para fins desta revisão foi utilizado o termo resíduo ao invés de subproduto, tendo em vista a maior quantidade de trabalhos retornados nas bases de dados.

A realização do protocolo da RSL, justifica-se pela necessidade de conhecer as características e propriedades das cerâmicas porosas com resíduos provenientes dos diferentes processos industriais. Desta forma, a partir dessa revisão, trabalhos foram selecionados de forma a contribuir tanto para o levantamento das características intrínsecas dos resíduos quanto para a definição da metodologia adotada na conformação e análise das cerâmicas porosas.

No planejamento da RSL as questões de pesquisa para serem respondidas foram Q1 - Quais as principais características físico-químicas e mineralógicas dos resíduos utilizados em cerâmicas porosas?; Q2 - Qual o procedimento experimental utilizado na obtenção de cerâmicas porosas incorporadas com resíduos?; Q3 - Quais são os indicadores de viabilidade técnica de cerâmicas porosas com incorporação de resíduos?

As *strings* de busca foram geradas a partir da combinação das palavras-chave e seus respectivos sinônimos, usando os operadores booleanos OR (ou) e AND (e). As *strings* utilizadas para as questões estão apresentadas no Quadro 3, adaptadas conforme as bases de dados selecionadas, de acordo com a relevância de periódicos, dissertações e teses.

Quadro 3 - Strings para cada base de dados

| Base de Dados | Strings Adaptadas |
|---|--|
| Google Scholar | <ol style="list-style-type: none"> 1. (“cerâmica porosa” OR “placa cerâmica porosa” OR “filtro cerâmico”) AND (incorporação) AND (resíduo OR “agente parogênico” OR "agente sacrificial") AND (caracterização) 2. (“porous ceramics” OR “porous ceramic plate” OR “ceramic filter”) AND (incorporation) AND (waste OR “parogenic agent” OR “sacrificial agent”) AND (characterization) |
| Google Scholar | <ol style="list-style-type: none"> 1. (“cerâmica porosa” OR “placa cerâmica porosa” OR “filtro cerâmico”) AND (incorporação) AND (resíduo OR “agente parogênico” OR "agente sacrificial") AND (experimento OR “procedimento experimental”) 2. (“porous ceramics” OR “porous ceramic plate” OR “ceramic filter”) AND (incorporation) AND (waste OR “parogenic agent” OR “sacrificial agent”) AND (experiment OR “experiment procedure”) |
| Google Scholar | <ol style="list-style-type: none"> 1. (“cerâmica porosa” OR “placa cerâmica porosa” OR “filtro cerâmico”) AND (incorporação) AND (resíduo OR “agente parogênico” OR "agente sacrificial") AND (“viabilidade técnica”) 2. (“porous ceramics” OR “porous ceramic plate” OR “ceramic filter”) AND (incorporation) AND (waste OR “parogenic agent” OR “sacrificial agent”) AND (technical feasibility) |
| Science Direct e Periódico Capes (Inglês) | <ol style="list-style-type: none"> 1. (“porous ceramics” AND waste AND characterization) 2. (“porous ceramics” AND waste AND experiment) 3. (“porous ceramics” AND waste AND feasibility) |
| Scopus (Inglês) | <ol style="list-style-type: none"> 1. (“porous ceramics” AND waste) 2. (“porous ceramics” AND waste AND experiment) 3. (“porous ceramics” AND waste AND feasibility) |

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os critérios de seleção dos estudos seguiram a metodologia de análise do título, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, disponibilidade para download, análise do resumo e palavras-chave, leitura diagonal de artigo, tese ou dissertação (introdução, metodologia e conclusão) e, por fim, leitura completa de artigo, tese ou dissertação. O Quadro 4 apresenta os critérios de inclusão e exclusão.

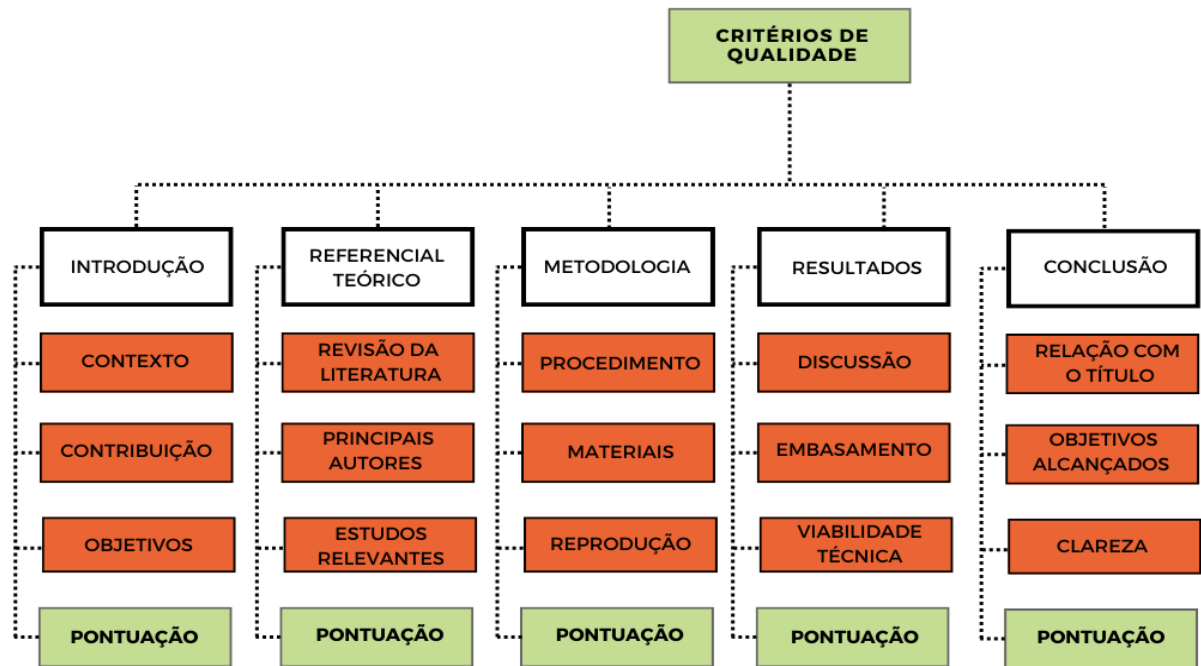
Quadro 4 - Critérios de Inclusão (I) e Critérios de Exclusão (E)

| | |
|---|---|
| Inclusão (I) | Os estudos podem fazer parte de artigos, teses ou dissertações publicadas e disponíveis integralmente em bases de dados científicas digitais. |
| | Livros de autores considerados referência para a área de materiais. |
| | O estudo deve ser considerado relevante para o tema cerâmica porosa incorporada com resíduo. |
| | Os trabalhos devem apresentar metodologias embasadas em procedimentos experimentais e com resultados acerca da temática cerâmica porosa com incorporação de resíduos. |
| Exclusão (E) | Trabalhos de Conclusão de Curso - TCC (nível de graduação). |
| | Estudos que não tiverem relação direta com o tema cerâmica porosa incorporada com resíduo como agente formador de poros. |
| | Estudos que não respondam as perguntas de pesquisa. |
| | Estudos em andamento ou pouco detalhados sobre o tema cerâmica porosa incorporada com resíduo. |
| | Estudos que aparecerem em duplicata. |
| | Estudos anteriores a 2018. |
| | Estudos secundários ou terciários. |
| | Se a pesquisa não tratar de resíduos ou se o tópico do estudo abordar apenas cerâmica porosa com materiais de alta pureza. |
| | Serão desconsiderados trabalhos que não estejam disponíveis integralmente nas bases de dados selecionadas. |
| Estudos publicados em outros idiomas que não sejam o inglês ou português. | |

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O processo de seleção dos trabalhos aceitos seguiu metodologia de pontuação (0 - 7) para os tópicos: (1) INTRODUÇÃO; (2) REFERENCIAL TEÓRICO; (3) METODOLOGIA; (4) RESULTADOS; (5) CONCLUSÃO, conforme critérios de qualidade esquematizado na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma dos critérios de qualidade dos estudos



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

- 1) Para o tópico **INTRODUÇÃO**: Contexto adequado sobre a temática de produção de cerâmica porosa com incorporação de resíduo? Mostra a importância da realização do estudo? Quais as contribuições? Objetivos em conformidade com o título do trabalho?
- 2) Para o tópico **REFERENCIAL TEÓRICO**: A revisão da literatura traz os autores e estudos mais relevantes sobre a produção de cerâmica porosa com incorporação de resíduo?
- 3) Para o tópico **METODOLOGIA**: Há indicação dos procedimentos, materiais, equipamentos e métodos necessários para alcançar seus objetivos? Há caráter de reprodutibilidade na pesquisa?
- 4) Para o tópico **RESULTADOS**: Os resultados apresentam discussões relevantes, com base na literatura, acerca do indicativo de viabilidade técnica da produção de cerâmica porosa com incorporação de resíduo?
- 5) Para o tópico **CONCLUSÃO**: As conclusões têm relação com o título do artigo e com seus objetivos? Sintetiza os principais resultados de forma clara?

Foram considerados reprovados os trabalhos que obtiveram soma de 0 a 19 e aprovados de 19 a 35, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Avaliação final dos estudos

| Pontuação | Situação |
|------------------|-----------------|
| 0-19 | Reprovado |
| 19-35 | Aprovado |

Fonte: Elaborada pela autora com base em Carvalho, 2022.

Após processo de avaliação dos critérios de qualidade com aplicação das pontuações exemplificadas no Quadro 5, foram extraídas as informações dos estudos voltados à produção de cerâmicas porosas incorporadas com resíduos, conforme os seguintes campos de investigação apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Critérios de extração dos estudos

| Campo | Conteúdo |
|--|---|
| A cerâmica porosa poderá ser utilizada como filtro cerâmico? | { Sim, Não } |
| Resíduo incorporado à cerâmica porosa | Inserir o resíduo utilizado |
| O resíduo foi utilizado em substituição a algum material na cerâmica porosa? | { Sim, Não } |
| Características do material utilizado na cerâmica porosa | Inserir o material e características |
| Características dos resíduos utilizados em cerâmicas porosas | Inserir as características dos resíduos |
| Procedimento experimental realizado na cerâmica porosa | Inserir o procedimento utilizado na obtenção de cerâmicas porosas |
| Indicadores de viabilidade técnica | Inserir os Indicadores de Viabilidade Técnica |
| Como o estudo comprovou a viabilidade técnica da cerâmica porosa | { Comparação, Apresentação dos Dados, Normas/Referências } |

Fonte: Elaborado pela autora com base em Carvalho, 2022.

Para cada campo de investigação apresentado no Quadro 6, as seguintes análises foram realizadas nos estudos selecionados:

- 1) A Cerâmica porosa poderá ser utilizada como filtro cerâmico? Este campo indicou se a cerâmica porosa poderia ser utilizada como filtro cerâmico. As opções foram Sim ou Não.
- 2) Resíduo incorporado à cerâmica porosa: Neste campo foi inserido o tipo de resíduo incorporado à cerâmica porosa.
- 3) O resíduo foi utilizado em substituição a algum material na cerâmica porosa? Este campo indicou se o resíduo foi utilizado para substituir algum material na cerâmica porosa. As opções foram Sim ou Não.
- 4) Características do material utilizado na cerâmica porosa: Neste campo foram inseridas as características físico-químicas, térmicas e morfológicas do material utilizado na cerâmica porosa.
- 5) Características dos resíduos utilizados em cerâmicas porosas: Neste campo foram inseridas as características físico-químicas, térmicas e morfológicas dos resíduos utilizados na cerâmica porosa.
- 6) Procedimentos experimentais realizados na cerâmica porosa: Neste campo foi inserido o processo de obtenção da cerâmica porosa.
- 7) Indicadores de viabilidade técnica: Neste campo foram inseridos os ensaios, que demonstraram a viabilidade técnica da cerâmica porosa.
- 8) Como o estudo comprovou a viabilidade técnica da cerâmica porosa? Este campo indicou como o estudo comprovou a viabilidade técnica dos resultados obtidos na cerâmica porosa. As opções foram: Comparação, Apresentação dos Dados, ou Normas/Referências.

Ademais, como forma de extração e síntese dos dados obtidos no protocolo de revisão sistemática foi utilizada a ferramenta Parsifal, gerenciador online, que ajudou nas etapas de condução e extração dos dados da RSL.

Por fim, a partir dos objetivos propostos na RSL, foi possível obter as respostas das perguntas de pesquisa investigadas sobre as características dos resíduos incorporados em cerâmicas porosas, métodos normativos de obtenção e teste, bem como indicativo de viabilidade técnica do produto final, servindo como subsídio para a construção do aporte teórico e prático dessa pesquisa.

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas utilizadas nesta pesquisa foram argila, lodo de ETA e particulado de PRFV. A argila foi coletada em Olaria, situada no Sítio Uruçu, localizada a 2,7 km da Zona Urbana de Palmeira dos Índios-AL. O lodo de ETA foi obtido dos leitos de secagem da Estação

de Tratamento de Água do Município de São Brás-AL. E, por fim, o particulado de PRFV foi proveniente da indústria alagoana de tubos, conexões e equipamentos diversos, localizada na cidade de Marechal Deodoro-AL. A escolha e preparação das matérias-primas foram detalhadas nas seções seguintes.

3.2.1 Argila

A argila pode ser definida como sedimento natural de granulometria fina e comportamento plástico, quando em contato com a água. Apresenta características diversas a depender do local de extração, composição e concentração de argilominerais (Ramos *et al.*, 2019). Neste trabalho a argila foi utilizada como ligante na massa a verde, tendo em vista as características plásticas necessárias para conformação e desempenho das peças cerâmicas após o processo de queima (Milak *et al.*, 2019).

A argila foi coletada na Olaria situada no Município de Palmeira dos Índios-AL e conduzida para o Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*. A Figura 19 mostra a argila *in natura*, coletada e acondicionada em saco plástico de 20 Kg para posterior processo de secagem, cominuição dos grãos e peneiramento.

Figura 19 - Argila in natura de Olaria local na Cidade de Palmeira dos Índios-AL



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A preparação da argila para a realização da moldagem dos corpos de prova seguiu metodologia baseada nos autores Mouiya *et al.* (2019), Manni *et al.* (2019) e Yu *et al.* (2023). A primeira etapa contou com processo de secagem em estufa, a temperatura de 110 °C, por

período de 24 h. A segunda e terceira trataram dos processos de cominuição dos grãos e peneiramento, através do uso de almofariz com mão de gral e peneira de malha 150 μm , respectivamente. Estas etapas foram importantes para a padronização do tamanho dos grãos necessária para a homogeneização das matérias-primas e posterior formação de poros na fase de sinterização dos corpos verdes.

3.2.2 Lodo de ETA (LETA)

O lodo utilizado foi proveniente da ETA do Complexo Morro do Gaia, localizado no Município de São Brás-AL. A água, que abastece algumas das cidades do agreste alagoano em regime contínuo, é captada do Rio São Francisco e tratada por duas ETA convencionais com células de floculação, decantação e filtração.

O lodo coletado dos bags de desidratação da ETA Morro do Gaia, apresentado na Figura 20, foi encaminhado para o Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, o qual passou por processo de secagem em estufa a temperatura de 110 °C durante 24 h, seguido pela cominuição das partículas e peneiramento com abertura de malha 150 μm (Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020); Mouiya *et al.*, 2019; Manni *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2023).

Figura 20 - Lodo em bag de desidratação da ETA da cidade de São Brás-AL



Fonte: Elaborada pela autora com base na ETA do Complexo Morro do Gaia, 2023.

O procedimento de preparação do subproduto foi similar ao da argila, visto que estes materiais apresentam características semelhantes em termos de estrutura e composição. Nesta

pesquisa, tanto a argila quanto o lodo, foram utilizados como materiais precursores na fabricação das cerâmicas porosas, tendo o lodo objetivo de conferir a massa verde elementos fundentes importantes para a redução do tempo e temperatura de sinterização, além de contribuir com a diminuição de distorções no produto final (Milak *et al.*, 2019).

3.2.3 Particulado de PRFV (PPRFV)

O PPRFV foi obtido da indústria alagoana especializada em produtos com plástico reforçado, localizada na cidade de Marechal Deodoro-AL. O subproduto, advindo do processo final de lixamento das peças e equipamentos em PRFV, evidenciado na Figura 21, foi coletado e conduzido ao Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, para posterior separação e obtenção do material de interesse.

A preparação do subproduto para o processo de moldagem deu-se através da passagem do material particulado na peneira de 150 μm , com a finalidade de padronização do tamanho e remoção das fibras oriundas do processo de desmoldagem e rebarbamento.

Figura 21 - PPRFV gerado do processo de lixamento de peças e equipamentos



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O PPRFV resultante dessa etapa entrou na massa verde com a função de agente formador de poros, agente parogênico sacrificial, devido a pirólise de matéria orgânica e liberação de gás carbônico (Bou-Issa; Loiola; Holanda, 2020; Milak *et al.*, 2019; Mouiya *et al.*, 2019; Manni *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2023).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS

Essa seção sintetiza os principais aspectos relacionados à caracterização das matérias-primas, tomando como base os métodos relatados na literatura para produção de cerâmicas porosas com incorporação de subprodutos (Bou-Issa, Loiola e Holanda, 2020; Hao *et al.*, 2019; Manni *et al.*, 2019; Mouiya *et al.*, 2019; Malik, Bulasara e Basu, 2020; Zhang *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2023).

Desse modo, o lodo de ETA e o particulado de PRFV foram submetidos às técnicas de Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X, Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier; Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial e Microscopia Eletrônica de Varredura, para compreensão das especificidades dos subprodutos incorporados em cerâmicas porosas.

3.3.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

A partir da técnica não destrutiva de Fluorescência de Raios X (FRX), a identificação da composição química dos materiais foi determinada, visando a análise qualitativa dos óxidos presentes na amostra, assim como estabelecer a proporção de cada elemento (Oliveira, 2011).

A espectrometria de FRX possui, como princípio de funcionamento, a radiação de feixes nos átomos da substância que se deseja instabilizar e deixar os elétrons carregados energeticamente. A busca pela estabilização e por conseguinte, a retomada dos elementos ao seu estado fundamental dar-se por meio da emissão da energia absorvida que caracteriza os diferentes elementos químicos da amostragem (Beckhoff, 2006; Oliveira, 2011).

O ensaio mostrou-se importante na identificação de componentes nocivos ao meio ambiente, bem como na influência destes elementos em tratamentos térmicos que alguns materiais são submetidos (Oliveira, Tenório e Marques, 2023).

A execução do ensaio se deu no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, localizado na cidade de Natal-RN, no qual foi utilizado o espectrômetro por fluorescência de Raios X (EDX-720, Shimadzu) em atmosfera a vácuo, empregando o método semiquantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras.

3.3.2 Análise por Difração de Raios X (DRX)

Através da análise por difração de Raios X, os minerais presentes nas amostras foram identificados e caracterizados cristalograficamente. O fenômeno acontece pela incidência de

feixes de Raios X em cristal que interage com os átomos da amostra, de modo a produzir padrão de difração específico para cada sólido (Lima e Padilha, 2022; Silva, 2019).

A técnica não destrutiva de Difração de Raios X é a mais indicada na determinação das fases cristalinas em materiais cerâmicos, tendo em vista a forma como os átomos presentes nos cristais organizam-se e distam na mesma ordem dos comprimentos de onda dos Raios X. Trata-se, portanto, de importante técnica de caracterização, que corroborou com os resultados de fluorescência de Raios X (Lima e Padilha, 2022).

As amostras estudadas foram analisadas em difratômetro de Raios X (XRD-6000, Shimadzu), localizado no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, localizado na cidade de Natal-RN, sendo utilizadas as seguintes condições: radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056$ Å, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de (10° a 80°).

3.3.3 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia na região do infravermelho é uma técnica que analisa a interação entre a luz infravermelha e a matéria, sendo possível identificar estruturas químicas e grupos funcionais característicos de amostras conhecidas ou que se pretende conhecer. Desta forma, a técnica tornou-se relevante para o presente estudo na identificação de compostos orgânicos e inorgânicos que influenciaram nas propriedades das cerâmicas porosas, confirmando os resultados obtidos da análise química por FRX.

Para tanto, o espectro de infravermelho do particulado de PRFV e lodo de ETA foi determinado no Laboratório de Química Analítica Instrumental do Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Maceió, usando o modo de transmitância na faixa de 4000 cm^{-1} - 400 cm^{-1} com espectrômetro SHIMADZU IRAffinity-1.

3.3.4 Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial (TG/DTG/DSC)

De acordo o Instituto de Química da USP, a Análise Termogravimétrica ou TG (*Thermogravimetric analysis*) pode ser dita como a técnica “que acompanha perda e/ou ganho de massa da amostra em função do tempo ou temperatura” (Denari e Cavalheiro, 2012, p. 4). Portanto, a massa de agregação ou perda do material constitui a propriedade física medida a partir da TG, que encontra aplicação em materiais de construção, cerâmicas, solos, argilas, materiais orgânicos e polímeros (Denari e Cavalheiro, 2012).

As técnicas termoanalíticas têm como objetivo obter informações da amostra quanto à sua variação de massa, estabilidade térmica, água livre, pureza, água ligada, ponto de fusão,

ponto de ebulição, valores de calores específicos, diagramas de fase, cinética da reação, estudos de catalisadores, transições vítreas dentre outras informações do material (Ionashiro, 2004).

Logo, a realização da análise térmica tornou-se importante para a pesquisa, pois foi possível determinar a temperatura na qual ocorre estabilização da perda de massa dos subprodutos, corroborando com a escolha da temperatura de sinterização das cerâmicas porosas. Além disso, foi possível realizar a correlação dos resultados da variabilidade dimensional dos corpos de prova com a maior ou menor capacidade de combustão dos subprodutos (Hossain e Roy, 2018).

A análise das matérias-primas foi realizada no Laboratório de Química Analítica Instrumental do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, usando o equipamento de marca Shimadzu TG-51, temperatura máxima de 1200 °C, fluxo de gás de 50 mL/min, taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de gás nitrogênio.

Quanto à técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), esta foi realizada no Laboratório de Química Analítica Instrumental do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, usando o equipamento de marca Shimadzu DSC-60, faixa de temperatura 30 °C a 600 °C, taxa de aquecimento de 10 °C/min, vazão de gás de 50 mL/min e gás nitrogênio.

3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As características microestruturais do particulado de PRFV e lodo de ETA foram obtidas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que possui como princípio de funcionamento a emissão de feixes de elétrons que se dispersam na superfície das amostras, de modo a gerar diferentes sinais, que se apresentam na forma de micrografias tridimensionais (Colling, 2022).

Através do MEV, superfícies de materiais diversos podem ser analisadas, detectando possíveis falhas microestruturais, tamanho de partículas, arranjos estruturais e formas. O ensaio foi necessário para entender a morfologia e dimensões dos subprodutos (Oliveira, Tenório e Marques, 2023).

As amostras estudadas foram submetidas ao Microscópio Eletrônico de Varredura de modelo INCAx-act, resolução de 5,9 keV – *Oxford Instruments*, no Laboratório de Química Analítica Instrumental do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, com ampliações de 108x, 505x, 1000x e 15000x para o particulado de PRFV e 100x, 497x, 2000x e 8000x para o lodo de ETA.

3.4 COMPOSIÇÕES PARA A FABRICAÇÃO DAS CERÂMICAS POROSAS

A adoção dos percentuais de particulado de PRFV e lodo de ETA, descritos na Tabela 5, seguiram estudos realizados por Dele-Afolabi *et al.* (2018), Sousa (2018), Milak *et al.* (2019), Salman *et al.* (2020) e Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020), que relacionaram a boa combinação das propriedades mecânicas, físicas e de permeabilidade das cerâmicas porosas a faixa de valores estabelecidos na presente pesquisa.

Tabela 5 - Percentuais de referência para este trabalho

| Agente formador de poros | Material Precursor | Percentual agente formador de poros | Percentual material precursor | Referência |
|---|--|--|--|--|
| Casca do arroz e bagaço da cana-de-açúcar | Pó de alumina | (5%, 10%, 15% e 20%) | (95%, 90%, 85% e 70%) | Dele-Afolabi <i>et al.</i> (2018) |
| Gesso e telha | Caulim | 20% | 40% | Sousa (2018) |
| Lama de cal | Caulim, areia, feldspato (albita), feldspato (potássico) e areia | 21,6% | (51,2%; 6,8%; 10% e 10,4%) | Milak (2018) |
| Papel, amido de milho e serragem | Caulim | 20% | 25% | Salman <i>et al.</i> (2020) |
| Lama de papel | Caulim | (10%, 20% e 30%) | (90%, 80% e 70%) | Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020) |
| PPRFV | LETA e argila | (0%, 4%, 6% e 8%) | Lodo (5%, 10%, 15% e 20%) Argila (95%, 86%, 79%, 72%) | Este trabalho |

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Através da Tabela 5 foi possível relacionar os tipos de subprodutos utilizados como agente formador de poros em cerâmicas porosas, material precursor e os percentuais de incorporação reportados na literatura, servindo como referência para definição dos traços da pesquisa.

Os estudos revelaram que a adoção de até 20% de agentes formadores de poros, advindos dos mais diversos processos industriais, confere aos corpos de prova propriedades aceitáveis quanto ao seu enquadramento como cerâmica porosa, justificando a importância da

adoção dos Traços Experimentais (TE) utilizados neste trabalho, com percentuais de PPRFV de 4%, 6% e 8% em substituição à argila.

A Tabela 6 apresenta os percentuais utilizados no processo de quantificação das massas de cada material, cujas composições foram denominadas de Traço de Referência (TR), Traço Experimental com 4% de PPRFV (TE04), Traço Experimental com 6% de PPRFV (TE06) e Traço Experimental com 8% de PPRFV (TE08).

Tabela 6 - Traços experimentais e de referência

| Traço | Argila | LETA | PPRFV |
|--------------|---------------|-------------|--------------|
| TR | 95% | 5% | 0% |
| TE04 | 86% | 10% | 4% |
| TE06 | 79% | 15% | 6% |
| TE08 | 72% | 20% | 8% |

Nota: TR: Traço Referência. TE: Traço Experimental. LETA: Lodo de Estação de Tratamento de Água. PPRFV: Particulado de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A adoção de até 10% de PPRFV deu-se pelo possível comportamento do subproduto quando submetido a altas temperaturas. Materiais de natureza polimérica termorrígida apresentam ligações cruzadas em rede entre as cadeias moleculares, de modo que sob aquecimento excessivo causará rompimento das ligações e degradação do polímero (Callister, 2016).

3.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O procedimento de conformação das placas cerâmicas porosas com incorporação do PPRFV e do LETA seguiu metodologia similar aos estudos de Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020), Manni *et al.* (2019), Mouiya *et al.* (2019), Salman *et al.* (2020) e Serewane Deramne *et al.* (2020). As etapas do processo de fabricação dos corpos de prova estão apresentadas na Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma de obtenção dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A primeira etapa tratou do processo de secagem em estufa do LETA e argila, a temperatura de 110 °C por período de 24 h. A segunda contou com o processo de cominuição dos grãos *in natura*, seguido do processo de peneiramento para obtenção de partículas de granulometria de 150 µm (100 mesh) (Dele-Afolabi *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2022; Mouiya *et al.*, 2019; Manni *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2023).

A terceira etapa foi composta pelo processo de moldagem das massas a verde realizada imediatamente após a homogeneização manual das matérias-primas, com umedecimento em torno de 8% em relação ao Traço de Referência e acréscimo de 1,6% de água nos traços seguintes. O aumento do percentual de água foi necessário para a aglutinação das matérias-primas, justificado pela possível hidrofobicidade do particulado de PRFV (Huang *et al.*, 2022; Milak *et al.*, 2019; Vakalova e Revva, 2022; Zhu *et al.*, 2022). A Figura 23 apresenta a homogeneização dos constituintes secos (Figura 23a) e úmidos (Figura 23b).

Figura 23 - (a) Homogeneização dos constituintes secos e (b) úmidos da massa a verde



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Para as composições com incorporação do material particulado a massa a verde foi deixada em repouso para melhor absorção da água de amassamento. Logo após a moldagem, os corpos de prova foram conformados, através de prensagem uniaxial com pressão de 25 MPa em moldes metálicos de 50 mm de diâmetro e 8 mm de espessura, integrando a quarta etapa do fluxograma (Huang *et al.*, 2022; Milak *et al.*, 2019; Serewane Deramne *et al.*, 2020; Vakalova e Revva, 2022; Zhu *et al.*, 2022). Todo processo de preparação das matérias-primas e moldagem dos corpos cerâmicos foi realizado no Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*. A Figura 24 mostra os corpos verdes após a moldagem.

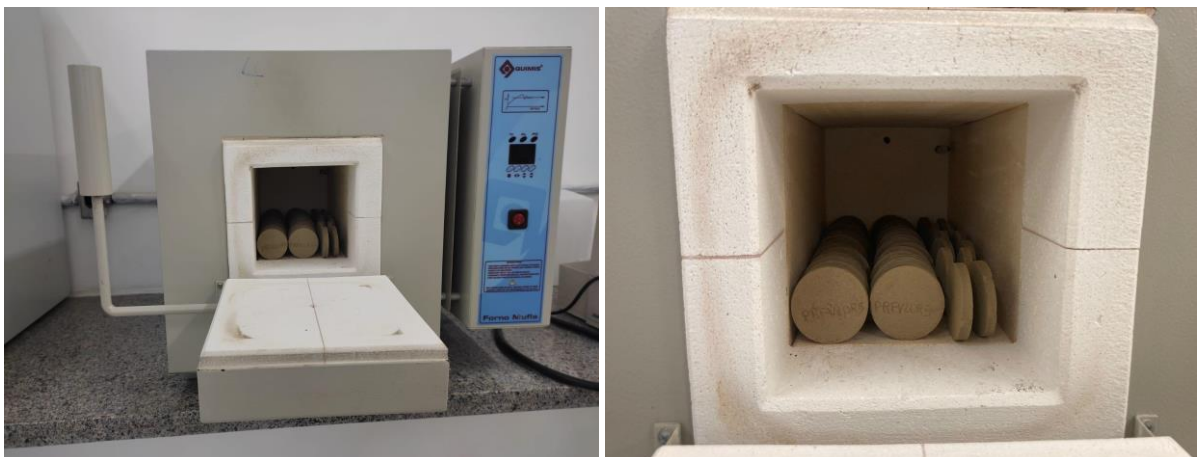
Figura 24 - Corpos de prova a verde após a moldagem



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quanto à quinta e sexta etapas, versaram sobre o tratamento térmico que as cerâmicas porosas foram submetidas, iniciando pela secagem em estufa a 110 °C por 24 h, a fim de eliminar a água adsorvida pelas partículas sólidas, seguido do processo de sinterização dos corpos verdes em forno mufla com taxa de aquecimento 5 °C/min, a temperatura de 950 °C por 2h40 min (Hao *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2022; Milak *et al.*, 2019; Sousa, 2018; Salman *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2022). O tratamento térmico pelo qual os corpos de prova foram submetidos foi realizado no Laboratório de Química do Centro Universitário Maurício de Nassau. A Figura 25 traz os corpos de prova verde antes do processo de sinterização em forno mufla.

Figura 25 - Tratamento térmico dos corpos de prova a verde em forno mufla



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Vale salientar que o número de corpos de prova foi determinado com base nos princípios da casualização, repetição e ordenação dos tratamentos dentro das parcelas, que deve ser constituída de 20 ou mais para redução do efeito da variação acidental (Carvalho, 2022; Ferreira, 2018). Portanto, o experimento foi instalado no Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com quatro tratamentos (0%, 4%, 6% e 8% de PPRFV) e cinco repetições, totalizando 20 unidades experimentais, cada uma constituída por dois corpos de prova. Ressalva para a quantidade de repetições adotada para a variável resposta fluxo permeado, que devido às adaptações realizadas no equipamento de Associação de Bombas, houve a necessidade de redução de cinco repetições para três, totalizando 12 parcelas.

3.6 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Os ensaios de retração linear, absorção de água, porosidade aparente e fluxo permeado seguiram as normas: ASTM C210-95 - Método de teste padrão para troca de reaquecimento de tijolo isolante (ASTM, 2019); ASTM C20-00 - Métodos de teste padrão para porosidade aparente, absorção de água, gravidade específica aparente e densidade aparente de tijolos refratários queimados e formas por água fervente (ASTM, 2022) e literaturas existentes sobre a temática de produção de cerâmicas porosas (Bou-Issa, Loiola e Holanda, 2020; Ferreira, 2019; Gonçalves, 2018; Manni *et al.*, 2019; Mouiya *et al.*, 2019; Malik, Bulasara e Basu, 2020; Zhang *et al.*, 2022; Xavier *et al.*, 2022). A Figura 26 apresenta a imagem dos corpos de prova sinterizados, prontos para a realização dos ensaios tecnológicos.

Figura 26 - Corpos de prova sinterizados prontos para a realização dos ensaios tecnológicos



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Os ensaios físicos foram realizados no Laboratório de Química do Centro Universitário Maurício de Nassau e o de fluxo permeado no Laboratório de Hidráulica do Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Palmeira dos Índios.

3.6.1 Retração Linear (RL)

A realização do ensaio de Retração Linear seguiu as recomendações da Sociedade Americana de Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials-ASTM*) C210-95 (ASTM, 2019). A partir da referida norma, a capacidade de contração ou expansão dos corpos de prova foi determinada com objetivo de observar o comportamento das peças cerâmicas na temperatura de queima adotada. Correlações puderam ser estabelecidas entre a decomposição dos subprodutos, porosidade e variação dimensional das cerâmicas porosas (Jiang *et al.*, 2018). A Figura 27 mostra o uso do paquímetro para a medição dos diâmetros dos corpos de prova antes e após a sinterização.

Figura 27 - Utilização de paquímetro para medição dos diâmetros dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A variação de tamanho dos corpos de prova, antes e após o processo de queima, foi mensurada através do uso de paquímetro e calculada a partir da Equação (1) (ASTM, 2019).

$$RL = \frac{(L_s - L_q)}{L_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

RL = retração linear, em porcentagem;

Ls = comprimento do corpo cerâmico após secagem na estufa (g);

Lq = comprimento do corpo cerâmico após processo de queima (g).

3.6.2 Absorção de Água (AA)

O ensaio de absorção de água foi realizado com base na ASTM C20-00 - Métodos de teste padrão para porosidade aparente, absorção de água, gravidade específica aparente e densidade aparente de tijolos refratários queimados e formas por água fervente (ASTM, 2022), a qual determina o procedimento de obtenção do percentual de água absorvida pelos corpos de prova cerâmicos.

O ensaio foi importante para a pesquisa, tendo em vista o enquadramento do compósito como material cerâmico poroso. Para isso, foi preciso observar a influência do tamanho e número dos poros para o aumento ou diminuição da absorção de água (Zhu *et al.*, 2022). A partir da Equação (2), foi possível analisar essa influência por meio das sucessivas pesagens dos corpos cerâmicos secos e saturados (ASTM, 2022).

$$AA = \frac{(Mu - Mq)}{Mq} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

AA= absorção de água, em porcentagem;

Mu= massa do corpo de prova saturado (g);

Mq= massa do corpo após queima (g).

3.6.3 Porosidade Aparente (PA)

O ensaio de porosidade aparente seguiu o princípio de Arquimedes e foi realizado conforme a ASTM C20-00 - Métodos de teste padrão para porosidade aparente, absorção de água, gravidade específica aparente e densidade aparente de tijolos refratários queimados e formas por água fervente (ASTM, 2022). Por meio da execução deste ensaio foi possível analisar a forma e distribuição dos poros formados pela decomposição dos subprodutos de particulado de PRFV e lodo de ETA incorporados na mistura cerâmica (Zhu *et al.*, 2022).

Através do ensaio realizado, foi possível estabelecer correlações entre os resultados de absorção de água e o comportamento de contração ou expansão dos corpos de prova, levando

em consideração a temperatura adotada, além de identificar a relação direta entre o aumento da porosidade e a presença de elementos químicos responsáveis pela formação de poros no material cerâmico (Jiang *et al.*, 2018; Hossain e Roy, 2018; Zhu *et al.*, 2022). A realização dos cálculos para a determinação da porosidade aparente seguiu a Equação (3) (ASTM, 2022):

$$PA = \frac{(Mu - Mq)}{(Mu - Mi)} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

PA= porosidade aparente, em porcentagem;

Mu= massa do corpo de prova saturado (g);

Mq= massa do corpo após queima (g);

Mi= massa do corpo imerso em água (g).

3.6.4 Fluxo Permeado (FP)

O Fluxo Permeado foi determinado a partir de metodologia proposta por Ferreira (2019), de modo a avaliar a viabilidade da utilização da cerâmica porosa em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração. A Figura 28 mostra o equipamento utilizado para a realização do ensaio de fluxo permeado.

Figura 28 - Equipamento de Associação de Bombas para realização do teste de fluxo permeado



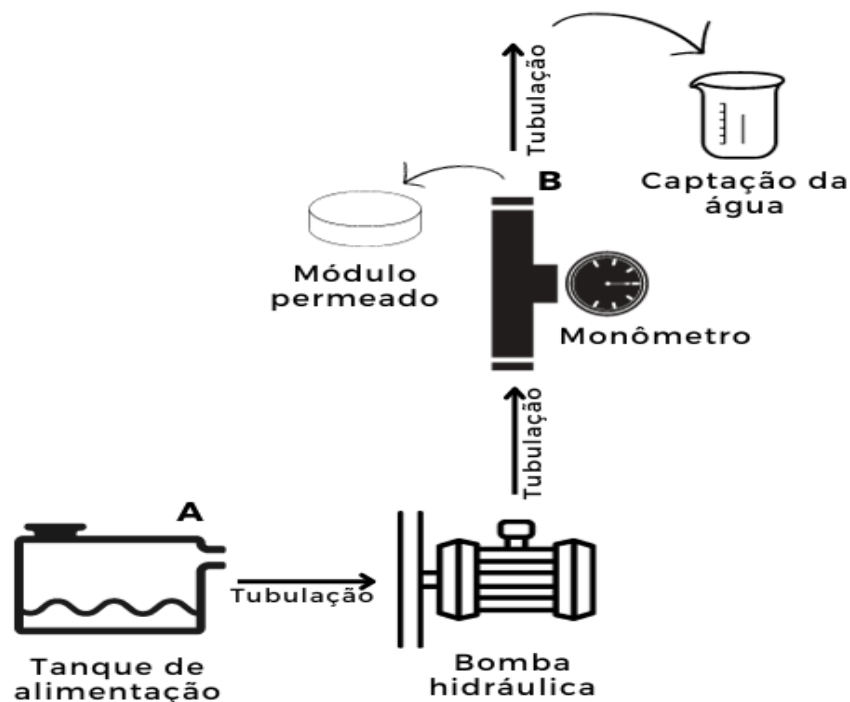
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Palmeira dos Índios, em equipamento para testes de Associação de Bombas HD36, a fim de determinar a capacidade de transporte de água pela cerâmica porosa contribuindo, desta forma, para a aplicação do produto técnico em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração.

A planta de funcionamento do equipamento foi adaptada em escala laboratorial para que o fluxo de água ocorresse de forma perpendicular à área efetiva da membrana de 8,04 cm². A filtração foi realizada utilizando tanque de alimentação de 342 L, bomba hidráulica, válvula de controle de pressão, manômetro, módulo permeado e béquer para captação da água.

O princípio de funcionamento da planta piloto se deu através do bombeamento da água do tanque de alimentação (A) para o módulo permeado (B), no qual serviu como suporte para a cerâmica porosa. Todo procedimento de transporte do fluido pode ser observado no esquema da Figura 29.

Figura 29 - Esquema do processo de realização do ensaio de fluxo permeado



Fonte: Elaborada pela autora com base em Ferreira, 2019.

As medições de volume foram realizadas com auxílio de béquer em tempo fixo de 10 s. O volume foi medido três vezes para cada formulação e na pressão constante de 0,5 bar. Os primeiros volumes de água foram descartados para estabilização do sistema. A Equação 4

mostra o cálculo para obtenção do fluxo permeado Ferreira (2019):

$$FP = \frac{V}{A \times t} \quad (4)$$

Onde:

FP= fluxo permeado;

V= volume;

A= área da cerâmica porosa;

t= tempo.

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho, a análise dos resultados foi dividida em duas etapas: ensaios de caracterização dos subprodutos e ensaios tecnológicos. Em ambas as etapas, os dados coletados foram representados através de tabelas, gráficos e figuras como forma de sintetizar os resultados obtidos a partir das análises e correlações com a literatura, com vistas ao desenvolvimento de produto com possibilidade de aplicação em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração.

Os dados obtidos através das variáveis respostas retração linear, absorção de água, porosidade aparente e fluxo permeado foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e regressão polinomial. Todas as análises foram realizadas com auxílio do software RBio, versão 167 (Bhering, 2017). A princípio foi utilizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5%. A aplicação do teste teve como objetivo a obtenção do p-valor para cada tratamento que, nesta pesquisa, está representado pelas formulações, com *n* repetições ou quantidade de corpos de prova ensaiados (Carvalho, 2022).

Como forma de compreender a influência do percentual de particulado de PRFV em relação às variáveis respostas (RL, AA, PA e FP), realizou-se análise dos coeficientes de correlação de Pearson (R) e de determinação (R²). Os coeficientes de correlação determinam o grau de relação entre duas variáveis em valores entre -1 a 1. Quando os coeficientes apresentam valor de R > 0,85, a forte relação de causa e efeito entre as variáveis. O sinal de R traz, ainda, a relação de acréscimo (sinal positivo) ou redução (sinal negativo) entre os resultados de duas variáveis respostas (Estolano *et al.*, 2017). Já o coeficiente de determinação (R²) indica a qualidade e precisão do modelo de regressão, variando entre 0 a 1. Quanto mais próximo da unidade, melhor a qualidade do ajuste (Cavalcante e Costa, 2021).

Por fim, foi utilizado o software Excel para a construção dos gráficos e tabelas da análise estatística para posterior discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção os resultados e discussões dos ensaios realizados no desenvolvimento da cerâmica porosa foram apresentados através de tabelas, gráficos e figuras.

4.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS

4.1.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

4.1.1.1 Análise Química por FRX do PPRFV

O resultado da análise química semiquantitativa em percentual com relação à massa em óxido da amostra analisada é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra de PPRFV

| Óxidos | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Tb ₄ O ₇ | K ₂ O | TiO ₂ |
|--------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| (%) | 47,79 | 36,38 | 11,12 | 2,40 | 0,94 | 0,69 | 0,43 |

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

De acordo com os dados obtidos a partir da análise química por fluorescência de Raios X, constatou-se a presença majoritária de óxido de cálcio (CaO), com 47,79% e de silício (SiO₂), com 36,38% na composição amostral. Como esperado, o alto teor de óxido de cálcio e dióxido de silício está relacionado com a natureza inorgânica do material, que estão presentes na formação da fibra de vidro, quando fundidas e fabricadas através de específicas quantidades de matérias-primas como areia, sílica, calcita e alumina (Cevahir, 2017).

Em estudos correlatos, com subprodutos incorporados em cerâmicas porosas, os compostos CaO, SiO₂ e Al₂O₃ também apareceram de forma significativa, como no trabalho de Milak (2018) que apresentou mais de 50% de CaO na amostra de lama de cal, e o subproduto proveniente da indústria siderúrgica (escória) com cerca de 36% de CaO, 30% de SiO₂ e 20% de alumínio, apresentado no trabalho de Arkame *et al.* (2023). A incorporação de subprodutos que contém grande quantidade de óxido de metal alcalino e alcalino-terroso proporciona a possibilidade de redução da temperatura de sinterização, além de contribuir com o processo de formação de poros, sobretudo, pela presença do cálcio (Hao *et al.*, 2019).

4.1.1.2 Análise Química por FRX do LETA

O resultado da análise química semiquantitativa em percentual com relação à massa em óxido da amostra analisada é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra LETA

| Óxidos | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | MgO | SO ₃ |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------------------|------|-----------------|
| (%) | 52,06 | 29,83 | 8,81 | 4,25 | 1,75 | 1,44 | 1,11 | 0,31 |

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A partir dos resultados de FRX do LETA, constatou-se valores mais expressivos de óxido de silício e alumínio, seguidos, em menor proporção, de óxidos como o potássio, cálcio e magnésio, que podem promover diminuição da temperatura de sinterização, principalmente, pela interação com compostos formadores de fase vítrea que, neste trabalho, despontaram com mais de 80% da amostra. Resultados semelhantes também foram observados por Gonçalves (2018), Silva e Maciel (2019) e Vakalova e Revva (2022).

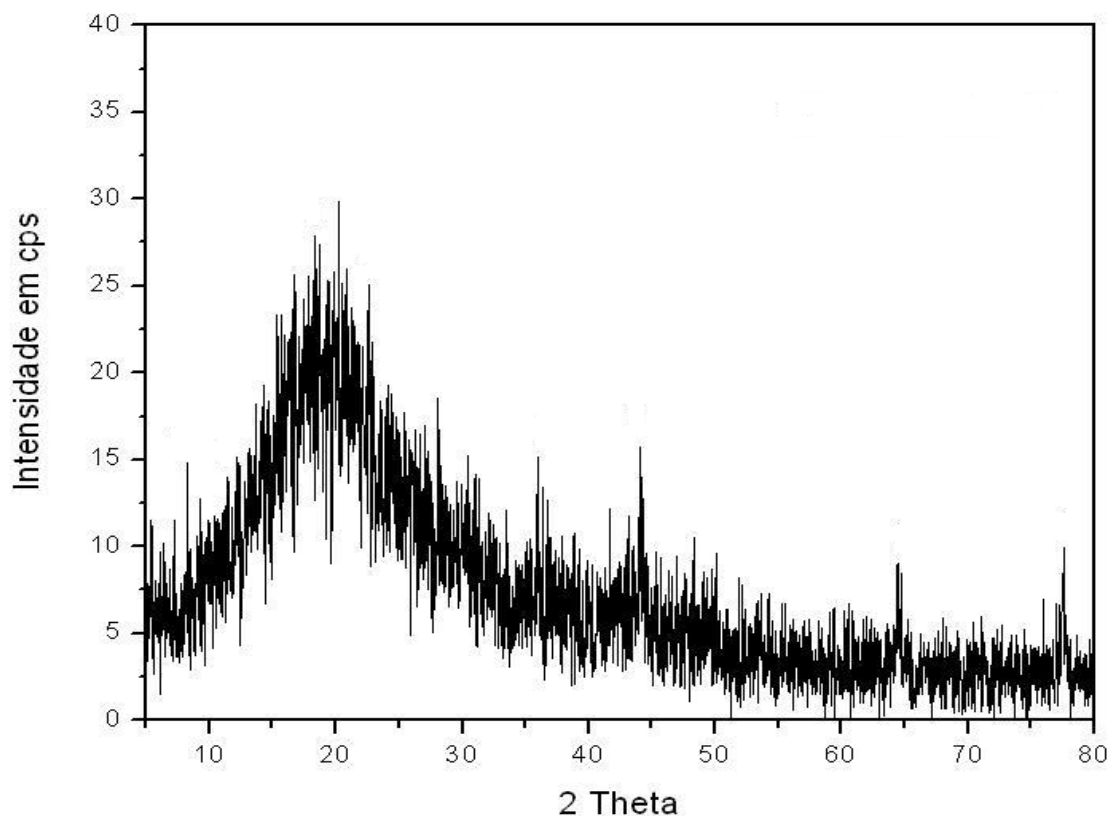
Além dessas características, os óxidos de silício e alumínio apresentaram-se de forma predominante em materiais como a argila, matéria-prima principal para a fabricação de cerâmicas porosas (Manni *et al.*, 2019; Mouiya *et al.*, 2019; Serewane Deramne *et al.*, 2020; Vakalova e Revva, 2022). Em estudos similares, os compostos SiO₂ e Al₂O₃ apareceram em subprodutos utilizados na produção de cerâmicas porosas, como o lodo de esgoto, que apresentou 34,79% de SiO₂ e 15,62% de Al₂O₃ (Yu *et al.*, 2023); e as cinzas de carvão com 65,66% de SiO₂ e 20,91% de Al₂O₃ (Vakalova e Revva, 2022).

4.1.2 Análise por Difração de Raios X (DRX)

4.1.2.1 Análise por DRX do PPRFV

O difratograma de Raios X do PPRFV, evidenciado na Figura 30, não apresentou picos característicos de material cristalino, mas halo amorfo, corroborando, desta forma, com estudos correlatos que atribuiu propriedade amorfa aos subprodutos incorporados em cerâmicas porosas (Albuquerque *et al.*, 2019; Fu *et al.*, 2021; Lipowska *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2023).

Figura 30 - Difração de Raios X do PPRFV



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

No trabalho desenvolvido por Leite Filho (2021), não foi possível identificar a fase cristalina no PPRFV, caracterizando-o como amorfo. Segundo o autor, a presença de sílica no subproduto é responsável pela banda típica amorfa. Destaca-se que este óxido representa o segundo composto químico mais abundante detectado no material particulado desta pesquisa.

No setor da construção civil subprodutos com características amorfas como os vidros são amplamente utilizados em produtos à base de cerâmica como tijolos, telhas, vitrocerâmicas e materiais de filtração, melhorando o desempenho físico, térmico e mecânico do produto final (Albuquerque *et al.*, 2019; Rodrigues, 2018; Silva *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2023). Logo, a detecção de halo amorfo no PPRFV contribuiu para a obtenção de cerâmicas porosas mais estáveis termicamente e com propriedades físicas similares às reportadas na literatura sobre a produção de cerâmicas porosas.

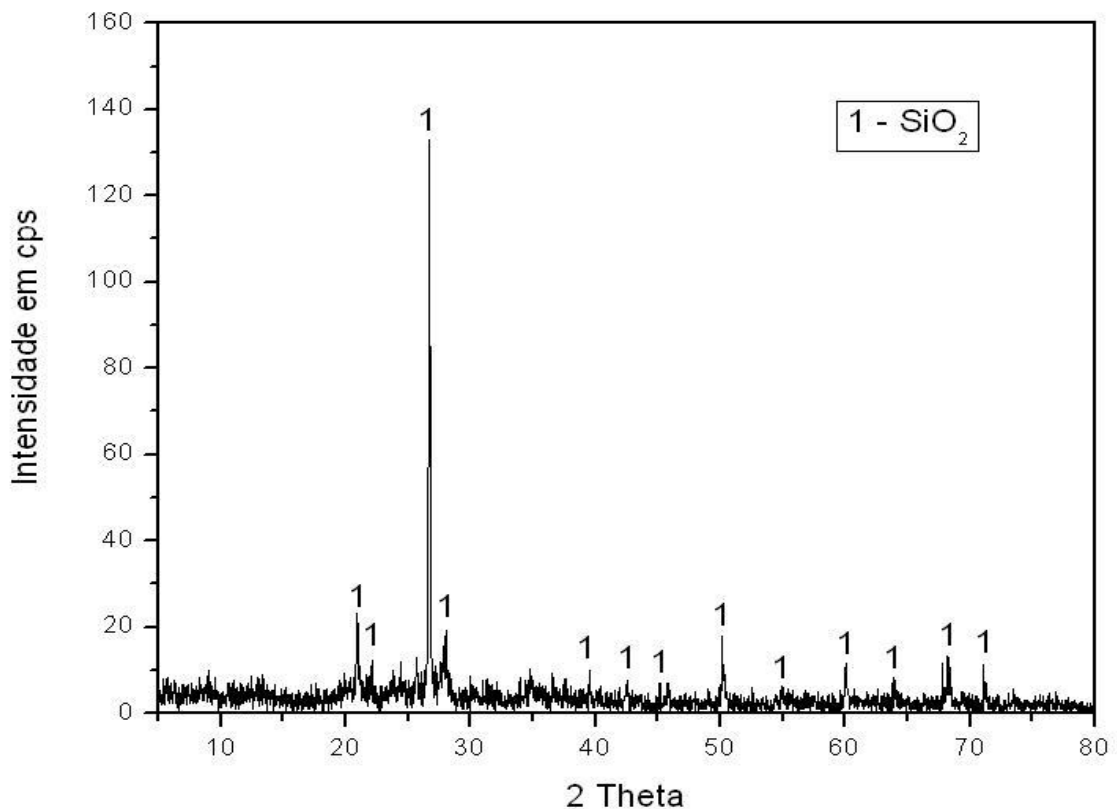
Além disso, o teor amorfo permite, ainda, a utilização do passivo em matrizes cimentícias, como substituto do cimento, já que estes materiais possuem capacidade de interagir com o hidróxido de cálcio, produzido durante a hidratação do cimento, fabricando quantidades

extras de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsáveis por garantir microestrutura mais densa no decorrer do tempo, bem como, ganho de resistência mecânica (Brito, 2021).

4.1.2.2 Análise por DRX do LETA

A Figura 31 mostra o difratograma de Raios X do LETA com pico característico do óxido de silício (SiO_2), fase cristalina do quartzo.

Figura 31 - Difração de Raios X do LETA



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Em trabalhos similares, a presença do óxido de silício na análise química foi relacionada à forma cristalina do mineral quartzo, estando este estudo em consonância com essa análise, visto que mais de 50% da amostra é composta por sílica (Buselatto *et al.*, 2019; Oliveira, Tenório e Marques, 2023; Silva e Maciel, 2019). A detecção da fase majoritária do quartzo no LETA pode ser visualizada em materiais como as argilas, podendo contribuir para as reações de vitrificação em formulações cerâmicas (Lipowska *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2019). Essa característica implicou na obtenção de cerâmicas porosas mais densas e com menores distorções, após processo de sinterização.

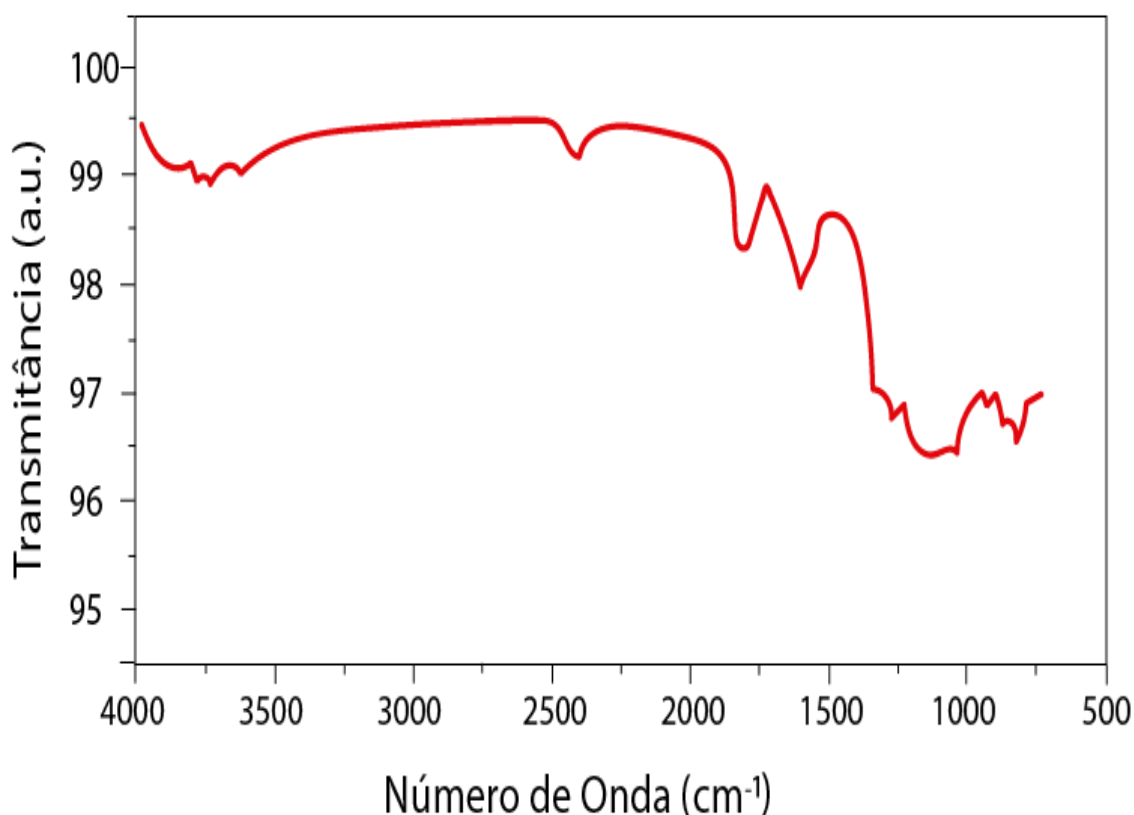
4.1.3 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

4.1.3.1 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) do PPRFV

As bandas de absorção do PPRFV podem ser observadas na Figura 32. O primeiro espectro de FTIR situa-se entre 3200 e 3600 cm^{-1} , o que corresponde ao modo de estiramento dos grupos hidroxilas na resina epóxi. O segundo grupo de bandas detectado em 2948 e 2842 cm^{-1} pode ser atribuído à vibração de estiramento do grupo C–H do epóxi. Para o terceiro grupo, abaixo de 2000 cm^{-1} , de bandas de absorção próximas de 1718 cm^{-1} são características da vibração de estiramento do grupo C=O (éster carbonil) (Pessanha *et al.*, 2008; Sun, 2023).

A existência do pico em 1450 cm^{-1} indica a presença do grupo alceno. Os espectros ésteres das bandas entre 1050 e 1300 cm^{-1} correspondem à vibração de alongamento C–O–C. As bandas $1036,49\text{ cm}^{-1}$ e $1010,82\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas a vibrações de estiramento do álcool C–OH. O pico em torno de 1000 cm^{-1} sinaliza a presença de silicatos existentes na fibra de vidro (Caban, 2023; Pessanha *et al.*, 2008; Sun, 2023).

Figura 32 - Espectros de FTIR do PPRFV



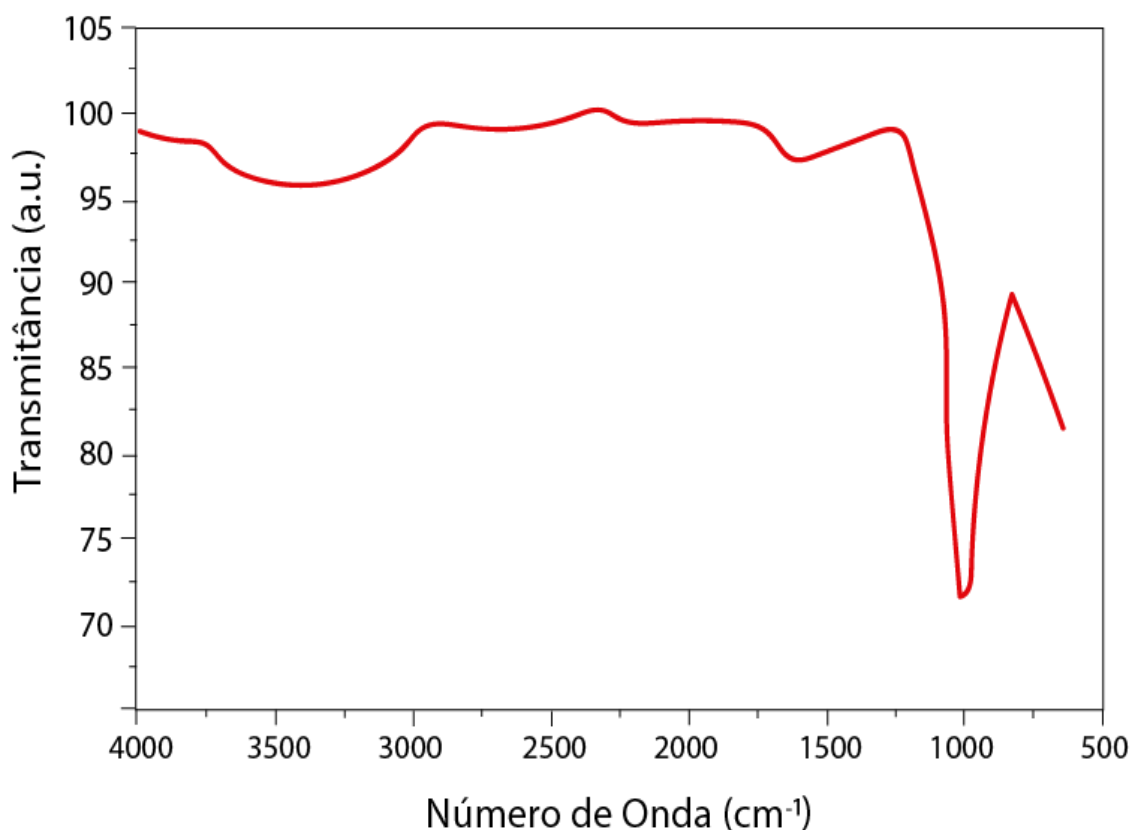
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Ao analisar espectros de amostras de PRFV, Pessanha *et al.* (2008) e Sun (2023) identificaram grupos funcionais característicos que ocorrem na estrutura química da resina epóxi, semelhantes aos espectros obtidos neste trabalho, indicando a possibilidade da resina do material utilizado pela indústria de referência ser do tipo bisfenol A.

4.1.3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) do LETA

A Figura 33 apresenta os espectros no infravermelho do LETA. A banda na região de 3400 cm^{-1} pode ser atribuída ao grupo O-H livre presente na água. A existência do pico em 1000 cm^{-1} indica a presença de aluminossilicatos, atribuída a alta porcentagem de SiO_2 (52,06%) e Al_2O_3 (29,83%) quantificada na análise de FRX (Clausi e Pinto, 2023; Quang *et al.*, 2022).

Figura 33 - Espectros de FTIR do LETA



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Análise semelhante foi realizada no trabalho de Clausi e Pinto (2023), que avaliaram a viabilidade de utilização do LETA como matéria-prima para a produção de ligantes ativados por álcalis. Os espectros das amostras de lodo obtidos das duas unidades fabris apresentaram bandas de absorção correspondentes com a do presente estudo, revelando o potencial do LETA

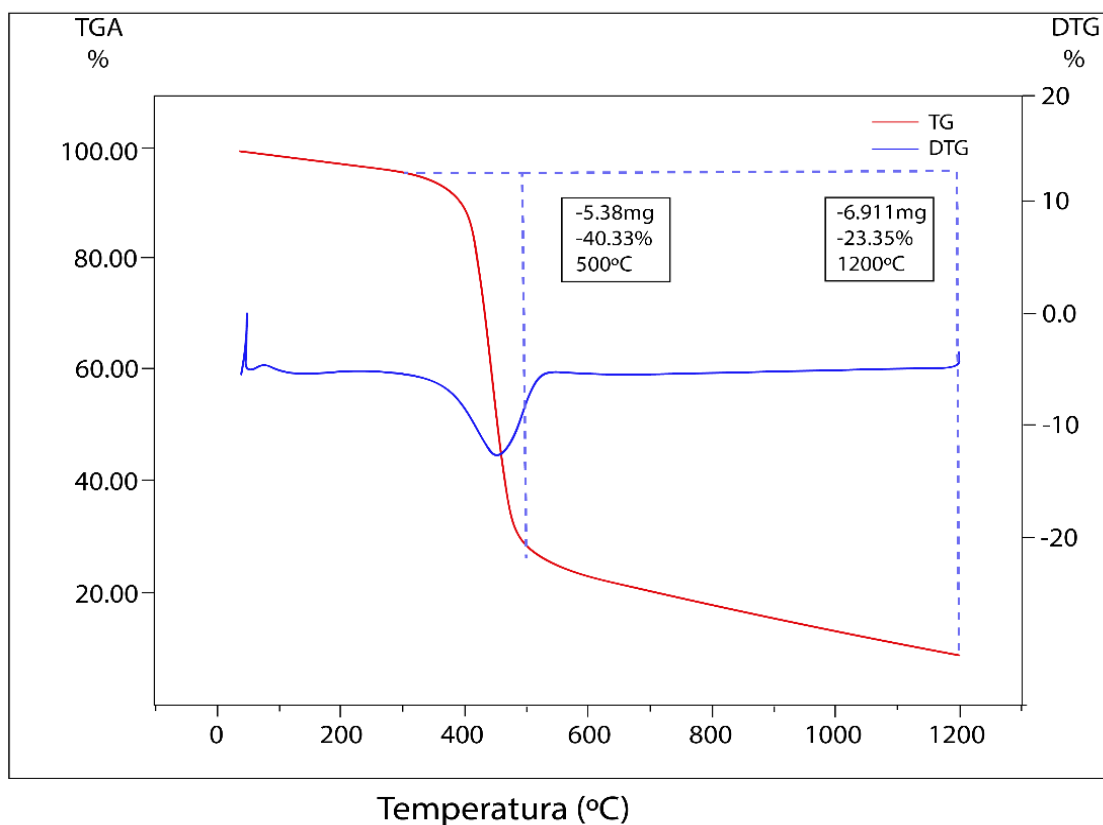
como precursor em materiais cerâmicos, tendo em vista a presença de minerais similares aos encontrados na argila.

4.1.4 Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial (TG/DTG/DSC)

4.1.4.1 Análise TG/DTG/DSC do PPRFV

A Figura 34 mostra a curva termogravimétrica (TG) do PPRFV em conjunto com a sua derivada (DTG). Infere-se da curva da TG que a maior perda de massa ocorre entre 390°C e 500°C, com percentual em torno de 40,33%, restando 23,35% de resíduo que continua a se decompor com o aumento da temperatura.

Figura 34 - Curva Termogravimétrica e Derivada (TG/DTG) do PPRFV



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

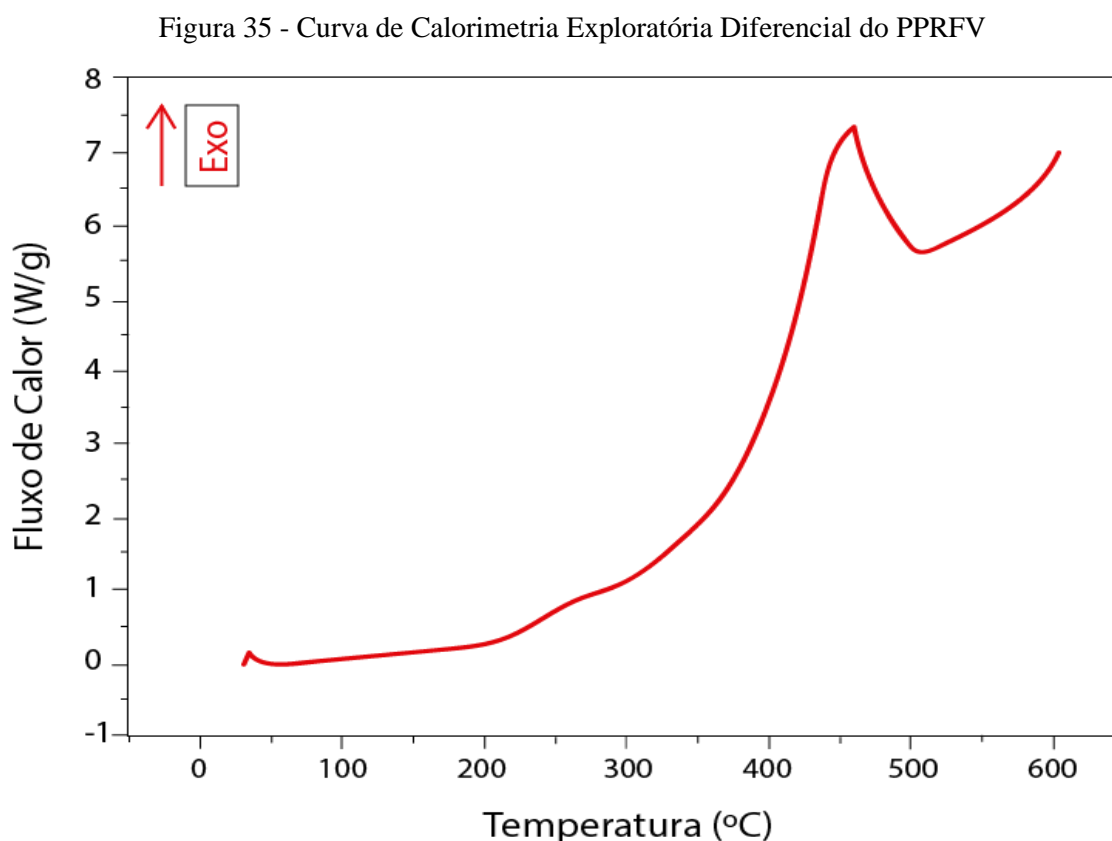
A grande perda mássica detectada neste trabalho pode ser justificada pela faixa de materiais voláteis presentes na matriz polimérica (resina poliéster), na qual a fibra de vidro é incorporada. A faixa de teor de sólidos presentes nestes solventes orgânicos variam entre 64%-68%, segundo dados dos fabricantes das resinas (Maia e Moraes, 2021).

A curva da termogravimetria derivada (DTG) confirma as análises observadas da TG com a maior decomposição térmica do material na temperatura entre 390°C e 500°C. Possível fenômeno físico de cristalização pode ter ocorrido na temperatura de 1200°C, detectado pelo pico da derivada da TG, confirmando a característica amorfa do PRFV observada na difração de Raios X.

Em estudos correlatos foi possível observar similaridade entre as curvas da TG, com percentual de perda mássica em torno de 4% até a temperatura de 300°C. Essa perda foi atribuída pelos autores a degradação do estireno e água livre do material. A partir desta temperatura foi observado o maior evento térmico de degradação da resina, que alcançou 20% até a temperatura de 500°C (Leite Filho, 2021; Moraes e Maia, 2021).

Comportamento inesperado acima de 500°C foi observado no presente trabalho, visto que a decomposição do particulado continuou acontecendo até a temperatura de 1200°C (limite do aparelho). Em outros estudos a estabilização da perda de massa aconteceu a partir da temperatura de 500°C, de modo que o resíduo obtido seria proveniente da não degradabilidade da fibra de vidro (Leite Filho, 2021; Moraes e Maia, 2021).

A Figura 35 mostra a curva de Calorimetria Diferencial de Varredura do PPRFV.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O primeiro pico exotérmico observado em torno de 450 °C pode ser atribuído a decomposição da resina, estando esta análise em correspondência com a perda de massa das curvas TG/DTG. A temperatura de transição vítrea do subproduto aparece, aproximadamente, em 525 °C, o que indica mudança do estado físico do PPRFV para temperaturas superiores à sinalizada neste trabalho (Zhou *et al.*, 2023).

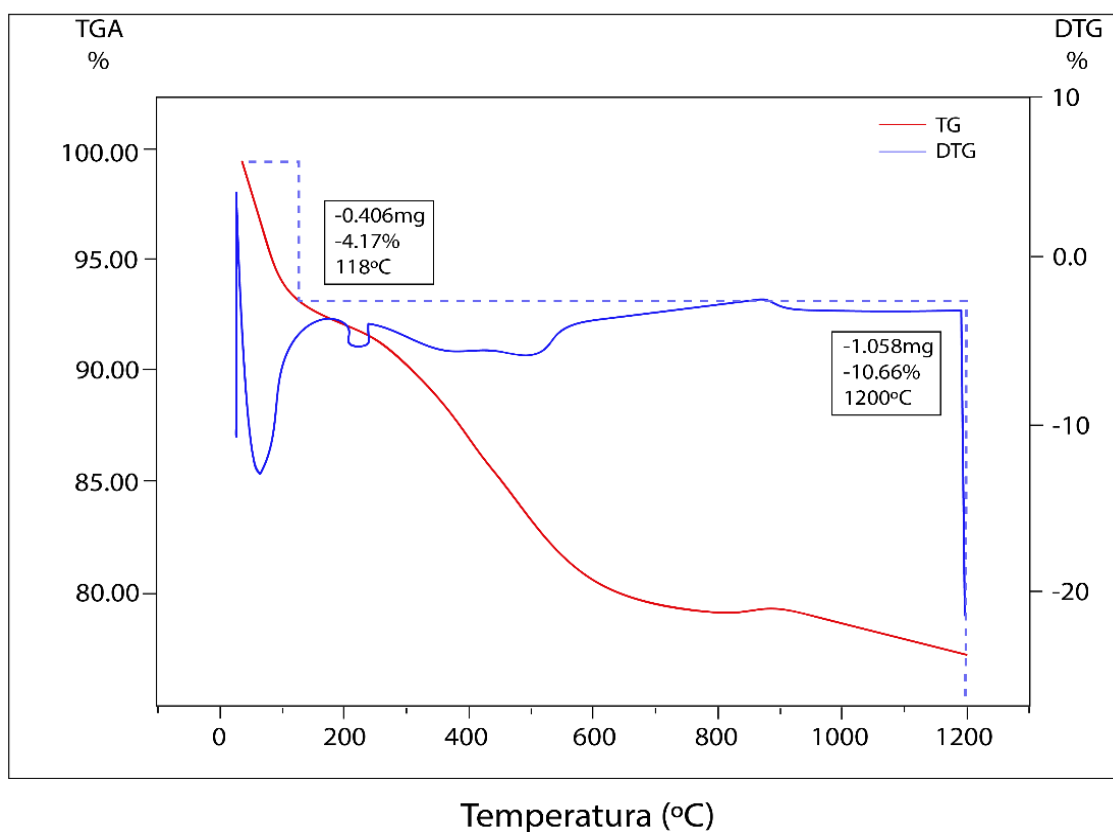
Trabalhos como de Zheng *et al.* (2021) e Zhou *et al.* (2023) apontaram temperaturas de transição vítrea para amostras de vidro, a partir de 695 °C e 525 °C, respectivamente. Segundo os autores estas temperaturas marcam a transição do estado vítreo para o estado emborrachado do material. Além disso, possível processo exotérmico a temperatura de 600 °C pode ser atribuído ao processo de desvitrificação do estado vítreo. Pela limitação do aparelho não foi possível observar evento endotérmico nas faixas de temperaturas de 883 °C - 1100 °C, atribuído à transformação gradual do estado emborrachado para o estado de fluxo viscoso. Contudo, pode-se inferir com base na literatura que a temperatura de sinterização das amostras pode ser selecionada entre a temperatura de transição vítrea (~525 °C) e as faixas de 883 °C -1100 °C (Zheng *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2023).

4.1.4.2 Análise TG/DTG/DSC do LETA

As curvas TG/DTG do LETA estão apresentadas na Figura 36. As análises da curva TG mostram dois eventos de perda de massa: o primeiro até a temperatura de 118 °C com perda média de 4,17% e o segundo, entre as temperaturas de 118 °C e 1200 °C, com perda mássica de aproximadamente 10,66%.

Godoy *et al.* (2019) encontraram valor de perda de massa igual a 16,7%; Ruviaro *et al.* (2020) descobriram perda mássica em torno de 14%; Silva e Maciel (2019) detectaram perda de massa total de 18,24%, ao tempo que, Buselatto *et al.* (2019) e Oliveira, Tenório e Marques (2023), determinaram para o LETA do município de Gravataí-RS e Palmeira dos Índios-AL, perda de massa de 31,7% e 42%, respectivamente.

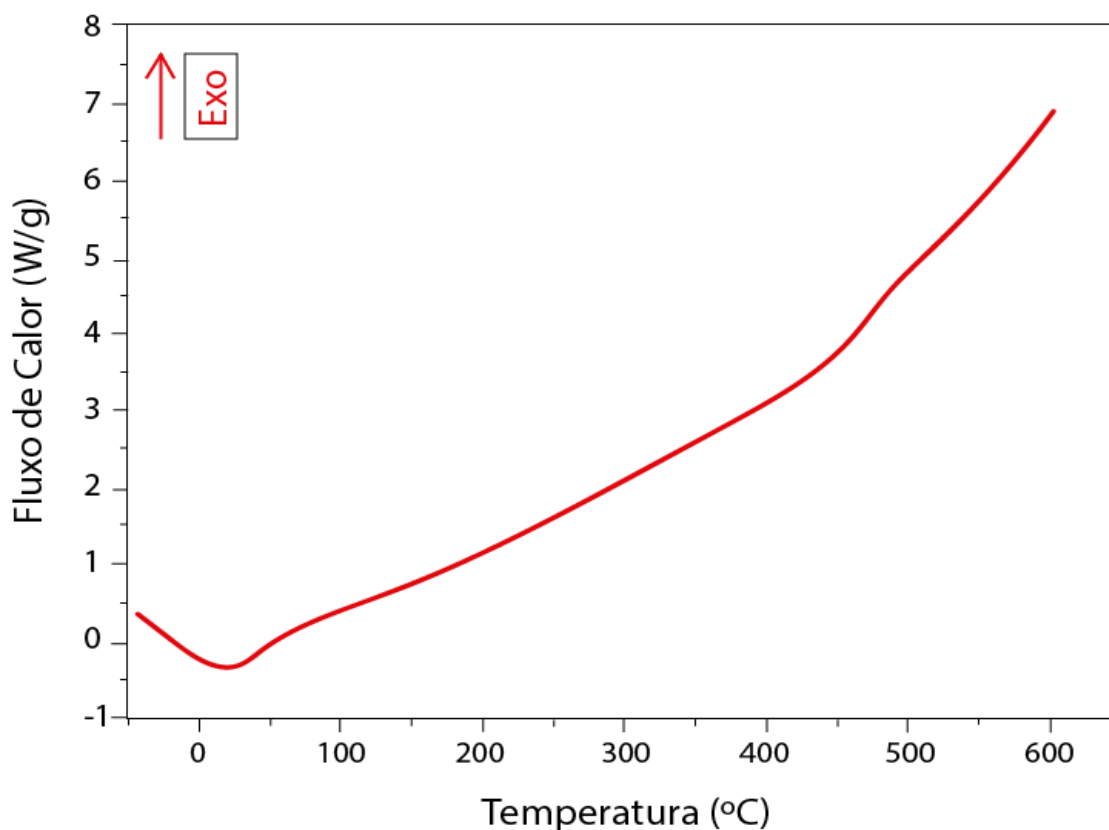
Figura 36 - Curva Termogravimétrica e Derivada (TG/DTG) do LETA



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A menor ou maior capacidade de perda mássica do subproduto, justifica-se pelas características distintas dos locais de captação da água bruta e tratamento aplicado, que pode se dá pelo uso de diferentes produtos químicos, principalmente, na etapa de floculação e coagulação (Buselatto *et al.*, 2019). A Figura 37 mostra a curva DSC do LETA, correspondente com a análise da TG da amostra de LETA.

Figura 37 - Curva de calorimetria exploratória diferencial do LETA



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O primeiro pico endotérmico observado em torno de 118 °C pode ser associado à desidratação, com perda de água livre e/ou fisicamente adsorvida. A decomposição da matéria orgânica, decorrente da volatilização de compostos orgânicos e de fases baseadas no silício, ocorre entre as temperaturas de 200 °C e 400 °C (pico exotérmico), sendo pouco perceptível na curva DSC; entretanto, com correspondência com a derivada da TG e o estudo de Ruviano *et al.* (2020). A faixa de temperatura entre 400 °C e 600 °C pode estar relacionada à transição de fase dos minerais argilosos, sendo responsável pela maior perda de massa no presente estudo e em trabalhos como de Buselatto *et al.* (2019), Godoy *et al.* (2019), Oliveira, Tenório e Marques (2023) e Ruviano *et al.* (2020).

4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

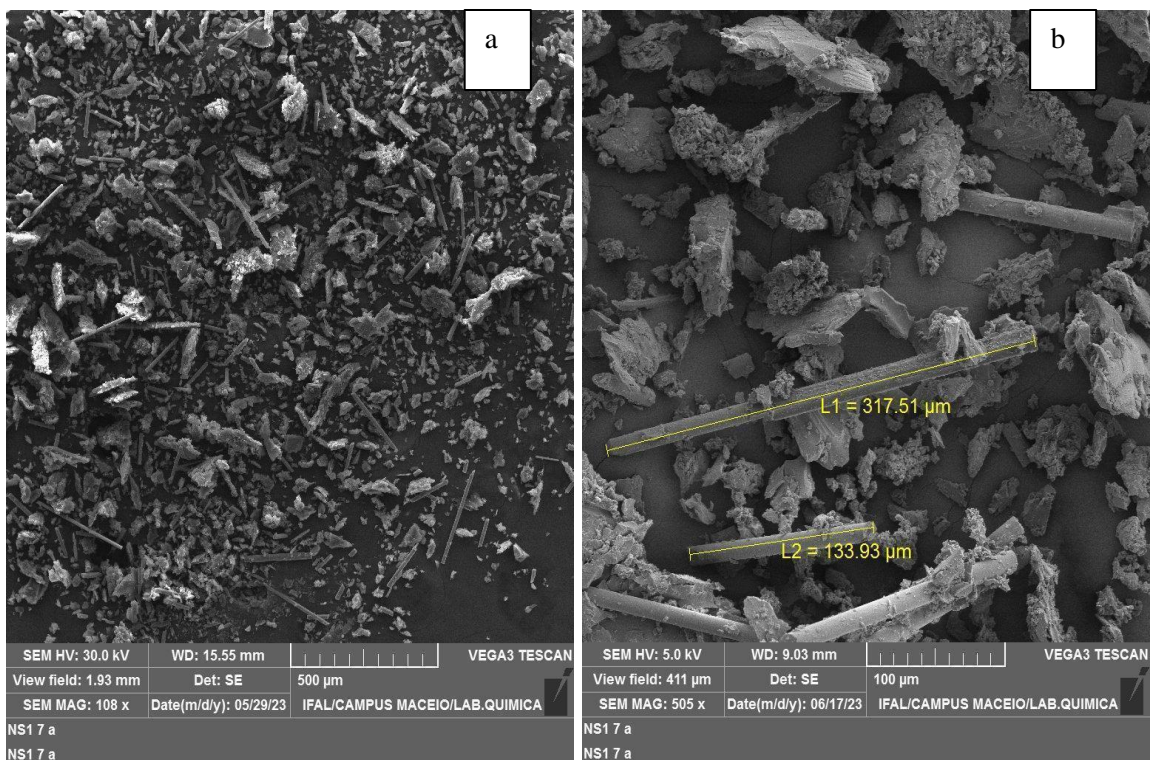
4.1.5.1 MEV do PPRFV

A Figura 38 mostra as micrografias obtidas do PRFV com magnificação de 108x (Figura 38a) e 505x (Figura 38b). Morfologicamente o particulado apresentou-se na forma de bastonetes alongados rugosos e com grânulos de configuração angulosa, de diferentes

dimensões e orientação randômica. Observações similares foram constatadas no trabalho de Colling *et al.* (2022), que buscaram melhorar a capacidade mecânica do concreto produzido com PRFV, de modo a direcionar o compósito para a produção de pavimento intertravado.

Com a magnificação de 505x (Figura 38b) foi possível confirmar as observações destacadas anteriormente quanto a não uniformidade do PPRFV. Esta característica pode possibilitar novas formas de arranjos e reforço estrutural em matrizes de composições diversas, contribuindo para o aumento da qualidade do produto final (Trentin *et al.*, 2020).

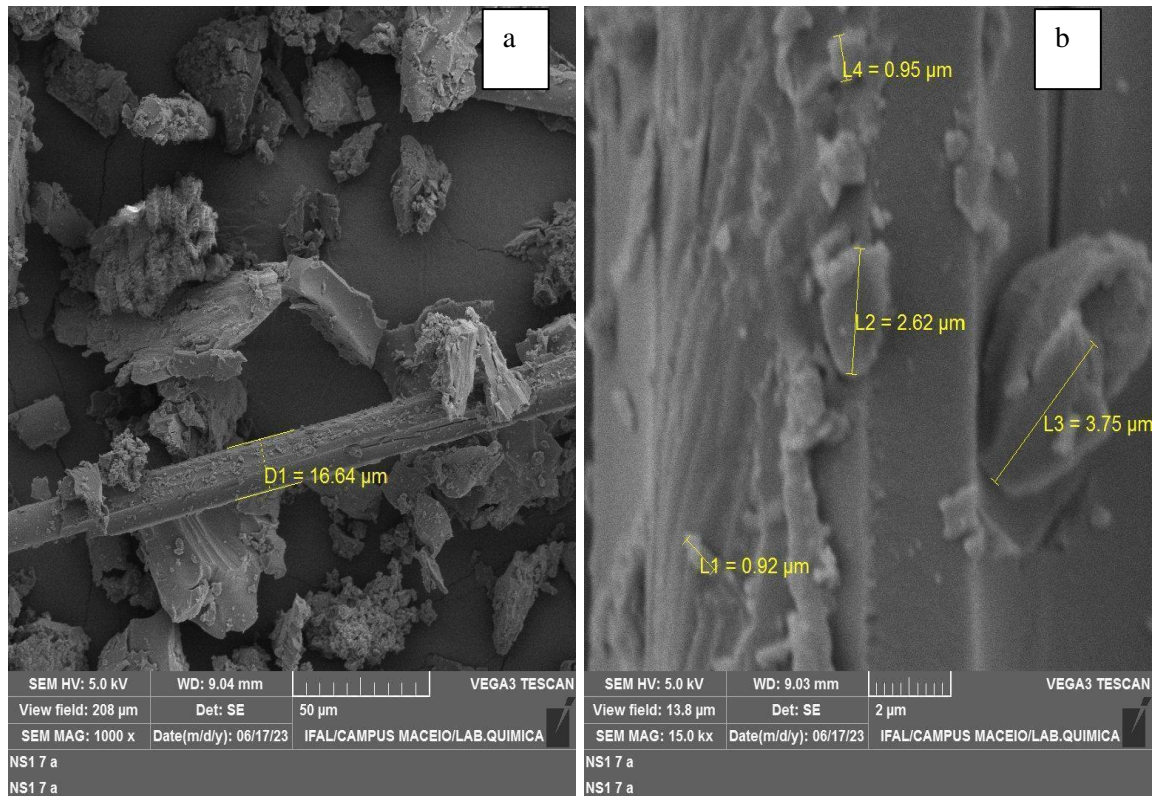
Figura 38 - Micrografias obtidas por MEV do PPRFV com magnificações de (a) 108x e (b) 550x



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Através da realização do MEV os comprimentos dos bastonetes foram determinados e apresentam dimensões na ordem de 133,93 μm e 317,51 μm (Figura 38b). Apesar da falta de padronização dos tamanhos, a micrografia obtida demonstra a existência de filamentos fibrosos aderidos a partículas de textura rugosa, que podem ser associadas a resinas ou outros compostos solúveis (Leite Filho, 2021). A Figura 39a e 39b, evidenciadas abaixo, ratificam esses apontamentos, através da magnificação de 1000x e 15000x realizada na superfície do subproduto de PRFV.

Figura 39 - Micrografias obtidas por MEV do PPRFV com magnificações de (a) 1000x e (b) 15000x



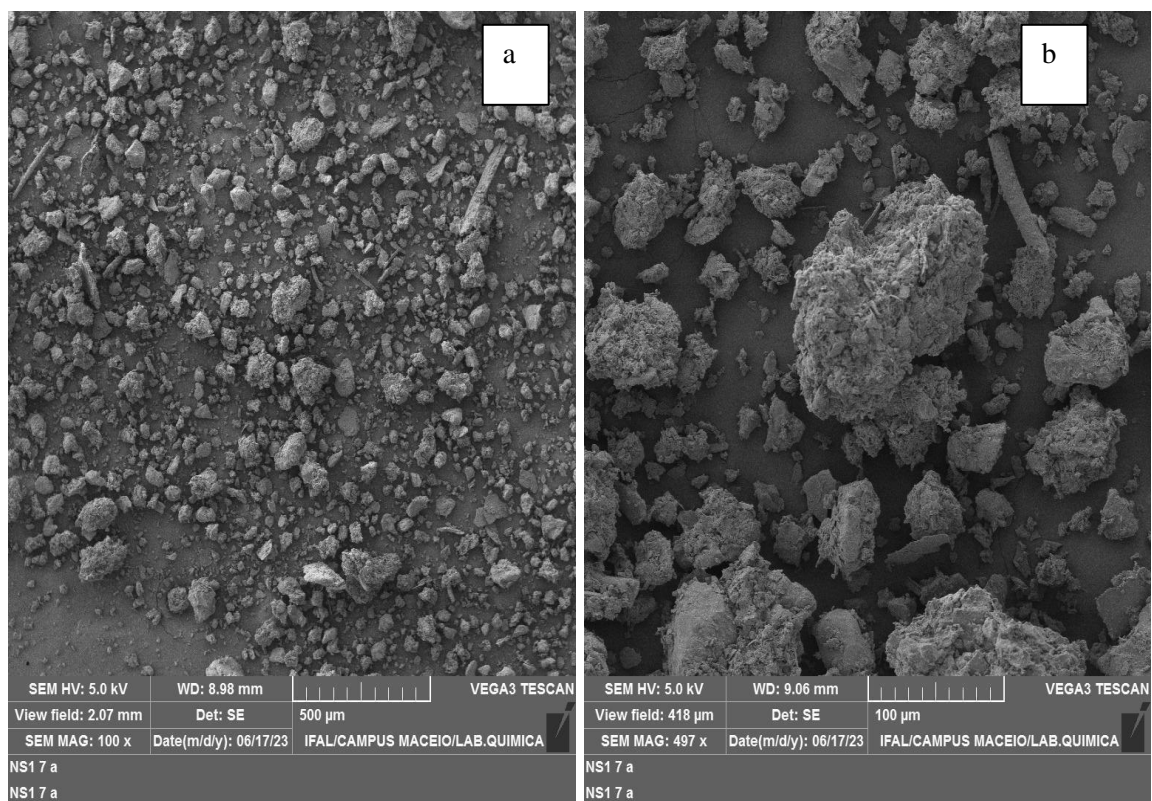
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O diâmetro médio das fibras foi determinado e encontra-se na ordem de grandeza de $16,64 \mu\text{m}$. Em estudo correlato os autores Colling *et al.* (2022) determinaram diâmetros de aproximadamente $25 \mu\text{m}$, estimados para a escala descrita no MEV. Na fabricação de cerâmicas porosas a presença de partículas menores contribui para a não formação de poros de maiores dimensões, que venham a surgir após o processo de sinterização. Na Figura 39b foi possível observar com mais clareza a superfície das fibras aderidas com partículas de dimensões variadas de $0,92 \mu\text{m}$, $0,95 \mu\text{m}$, $2,62 \mu\text{m}$ e $3,75 \mu\text{m}$, demonstrando a capacidade de combinação com materiais de características distintas como, por exemplo, matrizes cimentícias, poliméricas e argilosas (Borges, 2021; Leite Filho, 2021).

4.1.5.2 MEV do LETA

A Figura 40 apresenta as micrografias obtidas do LETA com magnificação de 100x (Figura 40a) e 497x (Figura 40b).

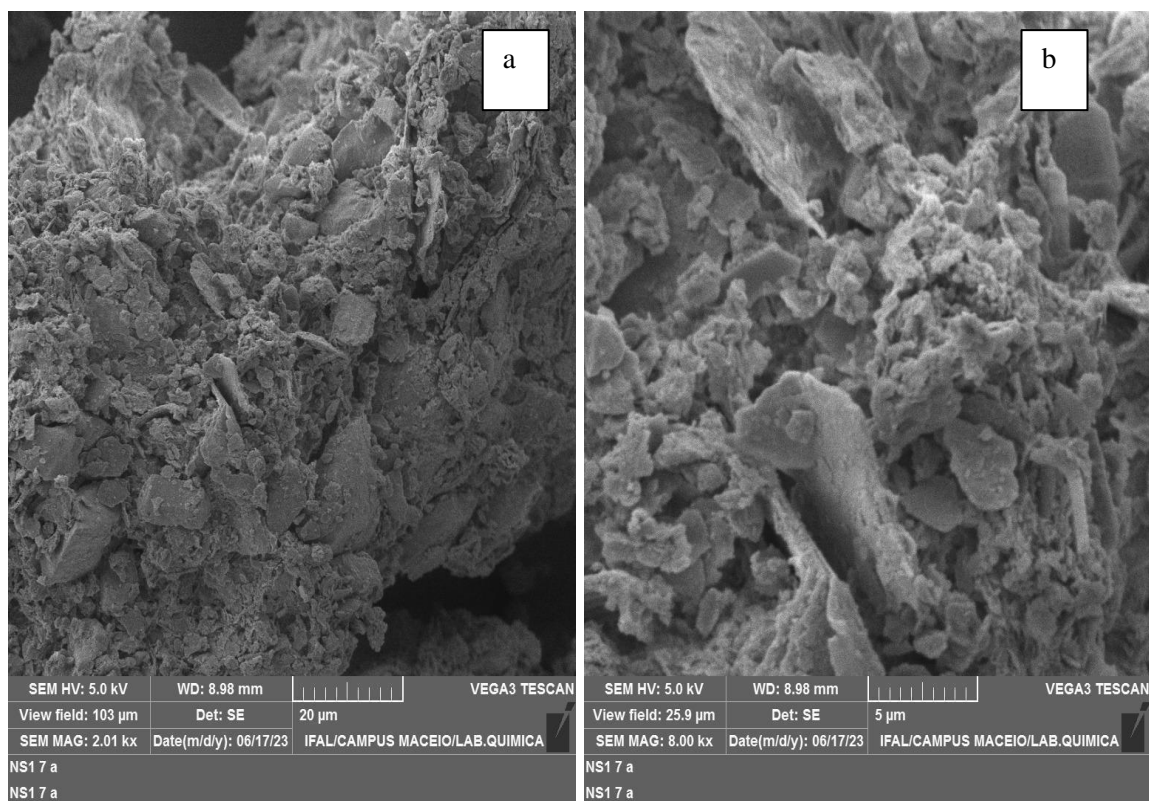
Figura 40 - Micrografias obtidas por MEV do LETA com magnificações de (a) 100x e (b) 497x



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Morfologicamente o subproduto apresenta-se na forma de pequenos aglomerados constituídos por mesoporos. Características semelhantes foram relatadas no trabalho de Godoy *et al.* (2019), que investigaram o potencial de utilização do LETA calcinado para desenvolvimento de material cimentício suplementar. Pode-se observar que o lodo *in natura*, do estudo de Godoy *et al.* (2019), possui partículas de diferentes tamanhos e formatos, que quando calcinados retornam micrografias similares a deste trabalho, evidenciadas na Figura 41a e 41b.

Figura 41 - Micrografias obtidas por MEV do LETA com magnificações de (a) 2000x e (b) 8000x



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 41a partículas de granulometria fina ficam aderidas à superfície de partículas maiores, formando pequenos espaços vazios, característicos de materiais com alta porosidade. Além disso, observa-se partículas de texturas rugosas, formando conglomerados em formato de escamas ou lascas. Godoy *et al.* (2019) apresentaram partículas de lodo de ETA calcinadas, em apenas alguns décimos de segundo (calcinação flash), de formato achatado e semelhante a uma folha, assim como, na micrografia da Figura 41b. Entretanto, com adoção de diferentes temperaturas de calcinação, entre 650 °C - 800 °C, características mais específicas do processo de sinterização levaram a distinção entre o lodo do presente trabalho e do subproduto investigado pelos referidos autores.

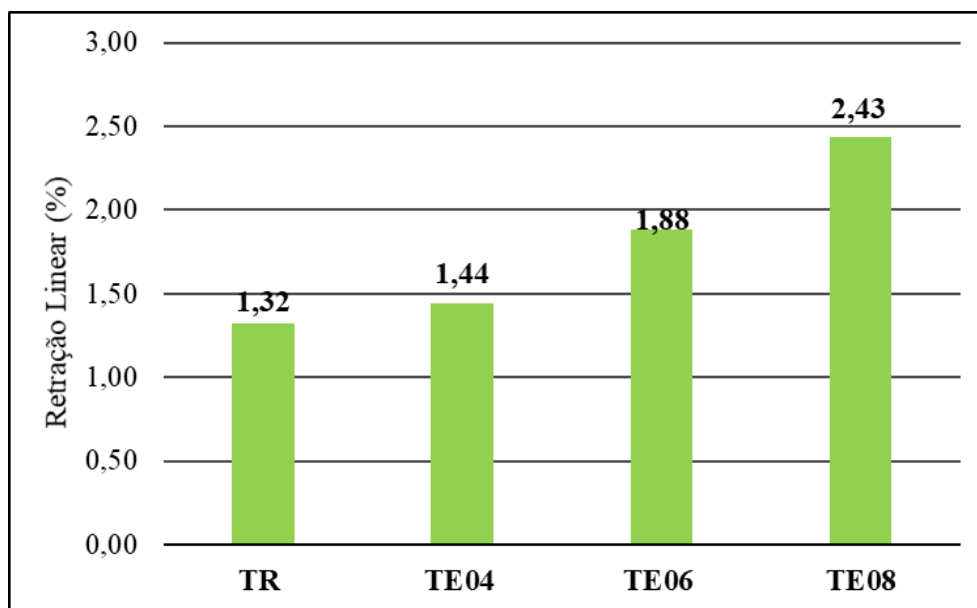
As análises do MEV obtidas neste estudo confirmam a presença de matéria orgânica e inorgânica no LETA, visto que o comportamento observado nas micrografias é característico desse tipo de amostra. Explicação análoga foi reportada no trabalho de Silva e Maciel (2019), que avaliaram o uso do lodo de ETA do município de Sacavém, São Luís-MA, como carga em argila para produção de blocos cerâmicos.

4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

4.2.1 Retração Linear (RL)

A Figura 42 mostra os valores médios de variação dimensional dos corpos de prova, antes e após o processo de queima.

Figura 42 - Retração linear em relação ao traço de referência



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Observou-se a partir da Figura 42 que a substituição da argila por particulado de PRFV (PPRFV) e lodo de ETA (LETA), aumentou os níveis de retração linear. Em termos comparativos a introdução dos subprodutos acarretou aumento, em relação ao traço de referência, de 9,06%, 42,30% e 83,84% para os traços experimentais TE04, TE06 e TE08, respectivamente. Resultados semelhantes na fabricação de cerâmicas porosas foram relatados por Bou-Issa, Loiola e Holanda (2020), com aumento em torno de 50% para a composição com 30% de lama de papel e temperatura de 1000°C; Ferreira (2019) na composição com até 10% de serragem de madeira obteve aumento de 20% em relação ao traço base.

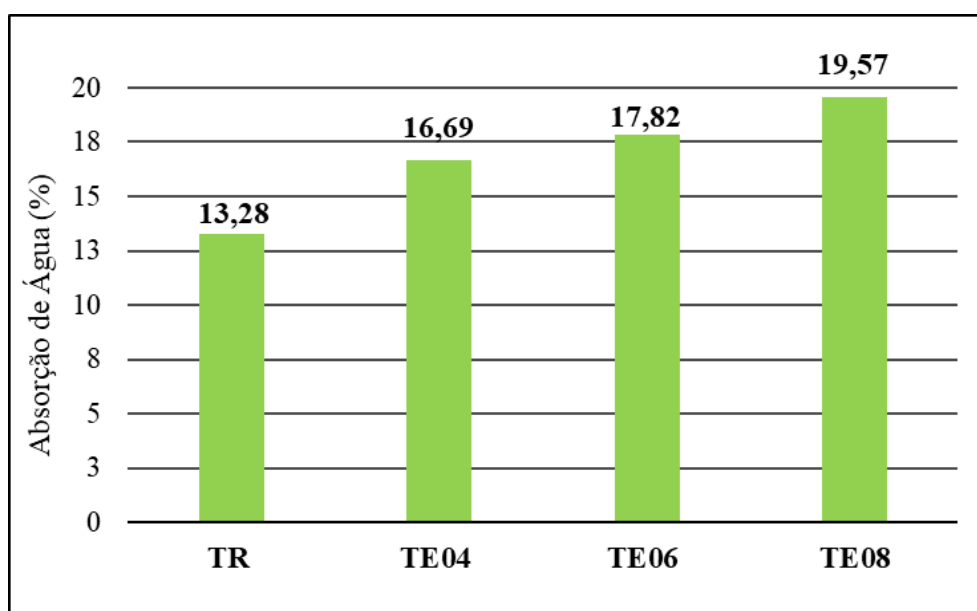
O aumento dos índices de retração linear pode ser atribuído à formação da fase líquida durante o processo de sinterização dos corpos cerâmicos. Esta análise possui correspondência com os resultados de fluorescência de Raios X dos subprodutos de PRFV e lodo de ETA, visto a interação dos óxidos de cálcio, magnésio e potássio, com compostos formadores de fase vítrea, sílica e alumínio (Gonçalves, 2018).

4.2.2 Absorção de Água (AA)

A Figura 43 apresenta os valores médios de absorção de água dos corpos de prova para o traço referência e os traços experimentais com incorporação do PPRFV e LETA.

Verificou-se que a incorporação dos subprodutos nas composições cerâmicas causou crescimento nos valores de absorção de água. Em relação ao traço de referência os aumentos foram de 25,68%, 34,19% e 47,36%, para os traços experimentais TE04, TE06 e TE08, respectivamente. Este aumento pode ser atribuído à capacidade de formação de poros por parte do agente parogênico sacrificial, que promove liberação de CO₂ durante o processo de sinterização das peças cerâmicas (Sverguzova *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2022).

Figura 43 - Absorção de água em relação ao traço de referência



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O mecanismo de formação de poros detectados pelo aumento dos níveis médios de absorção de água possui relação com o tamanho e formato do PPRFV, confirmado nas micrografias do subproduto que apresentaram bastonetes na ordem de grandeza de 133,93 μm e 317,51 μm , aderidos a partículas rugosas, associadas a impregnação das fibras em matriz polimérica (resina). Esse apontamento possui correspondência com a maior perda de massa (40,33%), observada na curva da TG e ratificada pelo pico exotérmico da curva de DSC, na temperatura de 450 °C. É em torno desta temperatura que a resina se decompõe formando poros abundantes (Zhu *et al.*, 2022).

De modo similar, os resultados de Zhu *et al.* (2022) também apresentaram aumento de absorção de água nas cerâmicas porosas com maiores teores de substituição de argila por lodo

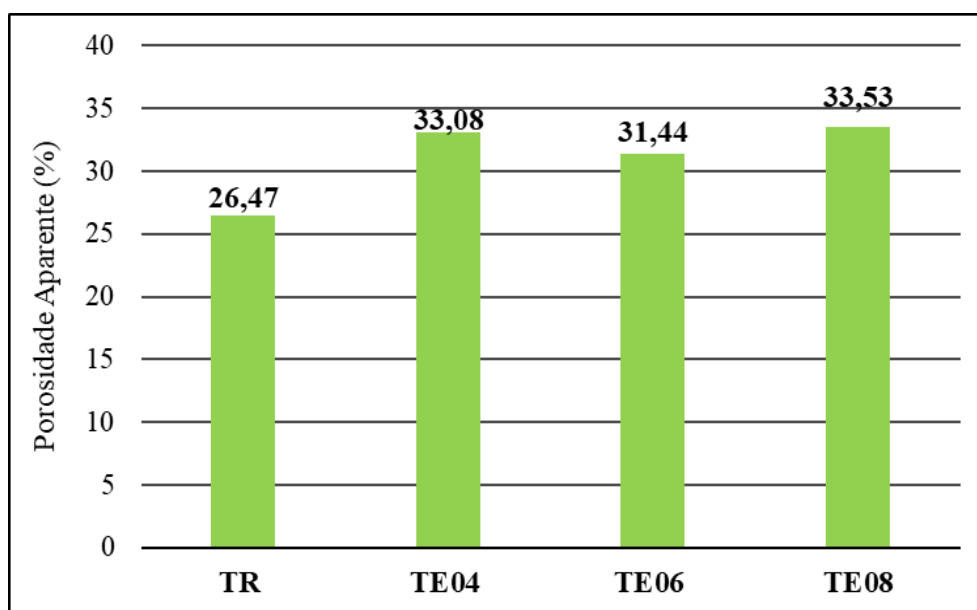
de tratamento de água residual, chegando a aproximadamente 18% na temperatura de sinterização de 950 °C e com 8% de subproduto. Para temperaturas superiores, 1000 °C e 1050 °C, os autores revelaram valores médios máximos em torno de 15% e 16%, respectivamente, demonstrando que a temperatura adotada na pesquisa foi a mais indicada para a não densificação completa da cerâmica porosa.

Vale ressaltar que não há padrão normativo para os índices físicos de cerâmicas porosas, sendo necessário utilizar-se de literatura pertinente na discussão dos resultados. Além disso, é importante frisar o interesse desta pesquisa no crescimento dos níveis de absorção de água, visto a possibilidade de aumento da porosidade e permeabilidade dos corpos cerâmicos, sem prejuízo das propriedades mecânicas.

4.2.3 Porosidade Aparente (PA)

A identificação dos percentuais de porosidade aparente dos corpos de prova estão evidenciados na Figura 44, na qual apresenta valores médios obtidos a partir do referido ensaio.

Figura 44 - Porosidade aparente em relação ao traço de referência



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Como esperado o aumento da absorção de água acarretou crescimento na porosidade aparente dos corpos de prova, que está relacionado a decomposição dos subprodutos, sobretudo, do PPRFV, visto a presença majoritária do óxido de cálcio (47,48%) que participa em conjunto com os elementos fundentes da formação de novas fases de cristais precipitados na superfície dos poros (Jiang *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2022). Ao comparar com o traço de referência foi

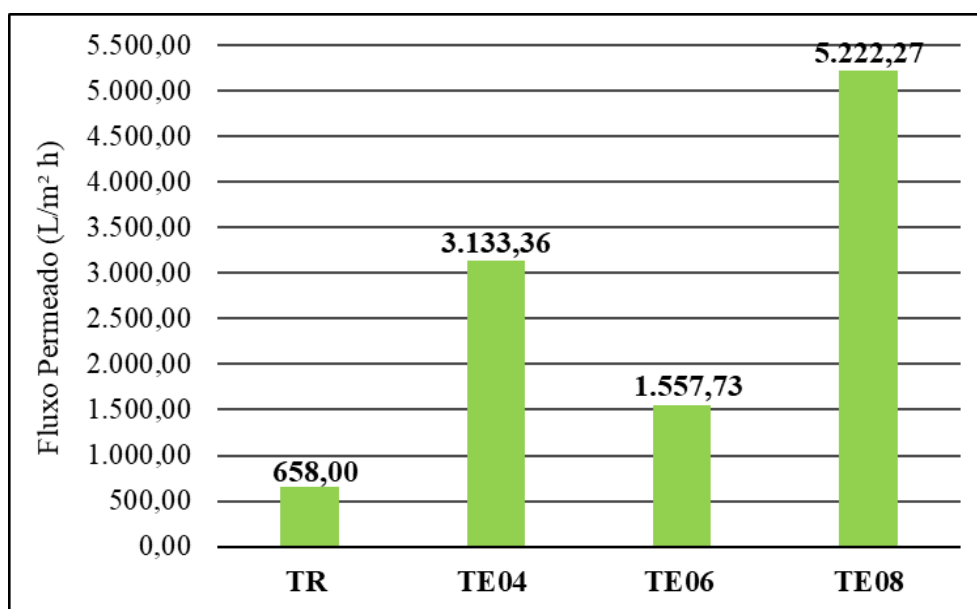
possível detectar, a partir da Figura 44, aumento de 24,97%, 18,77% e 26,67% para os traços experimentais TE04, TE06 e TE08, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados nos estudos de Kremzer (2022), Mouiya *et al.* (2019) e Serewane Deramne *et al.* (2020).

No trabalho de Kremzer (2022), cerâmicas porosas produzidas com cinzas volantes e grânulos de borracha de pneus alcançaram valores de porosidade na faixa de 13,61%-35,12%. Entretanto, a composição com escória de fundo e grânulos de borracha apresentou maior porosidade, superior a 50%. Mouiya *et al.* (2019) obtiveram aumento da porosidade aparente de 15,93% para 40,33% na composição com até 20% de casca de banana. Serewane Deramne *et al.* (2020) revelaram porosidade >35% no desenvolvimento de cerâmicas porosas com casca de banana e argila local.

4.2.4 Fluxo Permeado (FP)

Os resultados de fluxo permeado da cerâmica porosa estão apresentados na Figura 45, revelando aumento da permeabilidade na medida que os subprodutos foram sendo incorporados.

Figura 45 - Fluxo permeado em relação ao traço de referência



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O desempenho da cerâmica porosa na obtenção do permeado, sobretudo, na composição com maior teor de PPRFV e LETA, confirmou a dependência do fluxo com as técnicas de

caracterização dos subprodutos e ensaios tecnológicos pelos quais os corpos cerâmicos foram submetidos.

Constatou-se relação positiva entre o aumento do fluxo de água e a adição do PPRFV e LETA. Os valores mostraram-se compatíveis com a literatura pertinente sobre o tema de produção de suportes cerâmicos porosos submetidos à pressão de 0,5 bar - 2,0 bar. No trabalho de Mouiya *et al.* (2019) o desenvolvimento de membranas cerâmicas a base de argila e cascas de banana revelou valores de permeabilidade entre $550 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ e $1150 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, enquanto que no estudo de Gonçalves (2018), a utilização de subprodutos de alumina em massas argilosas promoveu valor de fluxo permeado de $2000 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

Não foi possível observar nestes trabalhos a influência do teor de agentes parogênicos no fluxo de água das membranas cerâmicas, visto que as análises foram realizadas com base na variação da pressão e tempo. No entanto, para as condições de temperatura de sinterização de $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, próxima à utilizada neste trabalho, e pressão de 0,5 bar foi possível observar resultados que excedem os valores obtidos pelos autores Mouiya *et al.* (2019) e Gonçalves (2018).

Vale frisar, que o decréscimo observado no traço experimental com 6% de PPRFV pode ser atribuído à dificuldade encontrada em posicionar o corpo de prova no módulo permeado (suporte), visto o seu maior diâmetro em relação aos demais, acarretando possíveis erros de medição. Contudo, esta intercorrência não descaracteriza os resultados aqui encontrados, principalmente, quando comparados com os achados da literatura.

4.2.5 Tratamento Estatístico

A Tabela 9 mostra as correlações existentes entre os resultados das variáveis respostas com o incremento dos níveis de PPRFV ajustados por meio de equações de regressão aplicadas na Anova.

Tabela 9 - Correlações de Pearson entre as variáveis respostas e equações de regressão

| Variáveis Respostas | Retração linear | Absorção de água | Porosidade Aparente | Equação | | | | R ² |
|-----------------------------|-----------------|------------------|---------------------|--|------|------|------|----------------|
| | | | | TR | TE04 | TE06 | TE08 | |
| Retração linear | - | - | 0,111 | $\hat{Y} = 1,1717 + 0,1333x$ ** | | | | 0,82 |
| Absorção de água | 0,592** | - | 0,612** | $\hat{Y} = 13,349 + 0,7755x$ ** | | | | 0,99 |
| Porosidade Aparente | - | - | - | $\hat{Y} = 27,416 + 0,8252x$ ** | | | | 0,76 |
| ¹ Fluxo Permeado | - | - | - | $\hat{Y} = 48,569x^2 + 84,95x + 852,07$ ** | | | | 0,65 |

** : significativo a 1% pelo teste F. ¹Não foi realizada correlação de Pearson para a variável.
 Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Os resultados para os coeficientes de determinação (R²) dos ensaios de AA, PA e RL demonstraram a eficiência do modelo de regressão linear adotado, com nível de significância (P-valor) a 1%. Deste modo, através do teste F foi possível conhecer as alterações que a incorporação dos teores de PPRFV poderiam promover sobre os valores obtidos pelas variáveis respostas, confirmando que houve diferença significativa entre os traços experimentais e o traço de referência, sendo esse resultado o que se buscava obter neste trabalho.

Quanto aos resultados do coeficiente de correlação (R) observou-se relações positivas entre as variáveis absorção de água e porosidade aparente, absorção de água e retração linear, com nível de significância (P < 0,01). Estas relações indicam que o aumento da absorção de água promove crescimento nas porcentagens de porosidade aparente e retração linear; no entanto, baixos valores de R < 0,85, sinalizam correlações fracas entre as variáveis.

Milak (2018) mostrou através de inferência estatística relação positiva entre o aumento da porosidade do material com incremento de teor de fibras poliméricas. O nível de significância (P < 0,05) representou a confiança de 95% da análise ser verdadeira, estando este resultado em conformidade com os valores encontrados neste estudo.

Portanto, o tratamento estatístico realizado contribuiu na análise dos resultados tecnológicos, no que diz respeito à confiabilidade dos dados e à relação estabelecida entre as variáveis resposta.

4.2.6 Ficha Técnica

A ficha técnica da Membrana de Filtração Cerâmica (ver Quadro 7), oferece descrição do produto, incluindo seus constituintes; características físico-químicas e mineralógicas dos subprodutos; especificações técnicas com parâmetros relacionados ao tipo de material, temperatura de sinterização da membrana, pressão de operação e ensaios tecnológicos. Ademais, destaca-se a aplicação principal da membrana em sistemas de tratamento de água potável em Estações Compactas de Tratamento de Água (ECTA).

Quadro 7 - Ficha Técnica da Membrana de Filtração Cerâmica

| | |
|--|--|
| Nome do produto | Membrana de Filtração Cerâmica |
| Descrição do produto | Membrana porosa projetada para uso em aplicações de filtração de água potável. É produzida através de processos de prensagem uniaxial e sinterização, resultando em estrutura porosa que permite a passagem seletiva de partículas e contaminantes, retendo impurezas indesejadas. |
| Constituintes | Argila, Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) e Particulado de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PPRFV). |
| Características Físico-Químicas e Mineralógicas - LETA | Composição Química: 52,06% de SiO ₂ ; 29,83% de Al ₂ O ₃ e 8,81% de Fe ₂ O ₃ Mineral: Quartzo Grupo Funcional: Minerais similares aos encontrados na argila Temperatura de Maior Degradação: Até 600 °C Características Morfológicas: Formato de escamas ou lascas, característico de materiais com elevada carga orgânica e inorgânica. |
| Características Físico-Químicas e Mineralógicas - PPRFV | Composição Química: 47,79% de CaO; 36,38% de SiO ₂ e 11,12% de Al ₂ O ₃ Mineral: Amorfo Grupo Funcional: Resina Epóxi do tipo bisfenol A Temperatura de Maior Degradação: Até 500 °C Características Morfológicas: Filamentos fibrosos na ordem de grandeza de 133,93 µm e 317,51 µm e diâmetro de 16,64 µm |
| Especificações Técnicas | Material: Cerâmico |

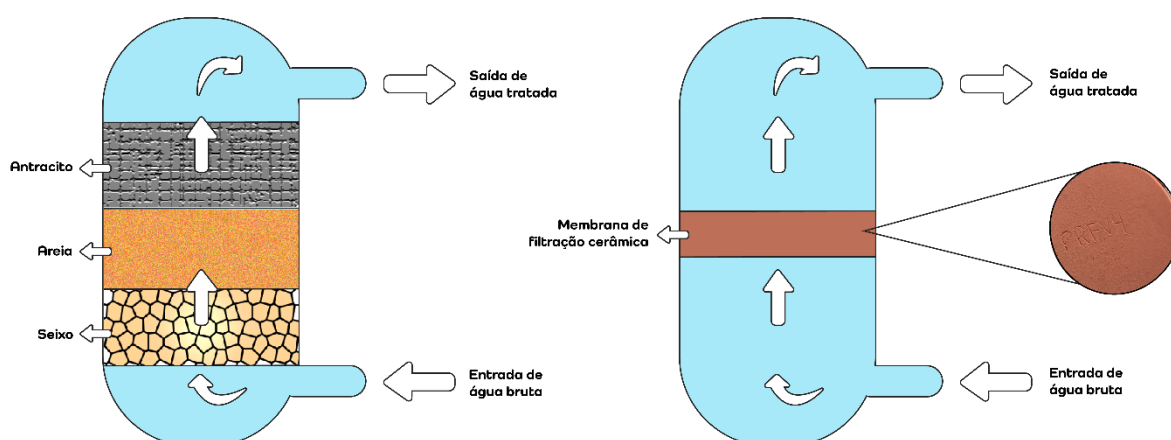
| | |
|----------------------------|---|
| | <p>Temperatura de sinterização: 950 °C por 2h40 min, taxa de aquecimento 5 °C/min</p> <p>Área de filtração: Conforme especificação de projeto</p> <p>Pressão de Operação: 0,5 bar</p> <p>Retração Linear: 2,43%</p> <p>Absorção de Água: 19,57%</p> <p>Porosidade Aparente: 33,53%</p> <p>Fluxo Permeado: 5.222,27 L/m².h</p> |
| Aplicação Principal | Filtração de água potável em Estações Compactas de Tratamento de Água (ECTA) |
| Modo de uso | <p>Preparar o sistema de filtração de acordo com as instruções do fabricante;</p> <p>Colocar a membrana de filtração na câmara de filtração;</p> <p>Aplicar água a ser filtrada na câmara de filtração;</p> <p>Aplicar pressão para forçar a água através da membrana.</p> |

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Em suma, a ficha técnica da Membrana de Filtração Cerâmica fornece visão abrangente das propriedades e especificações técnicas do produto desenvolvido nesta pesquisa, de modo a contribuir com as demandas crescentes por melhorias de tratamento de água potável e processos de separação em ECTA.

A Figura 46 mostra o modelo esquemático da aplicação da Membrana de Filtração Cerâmica em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração.

Figura 46 - Modelo esquemático da aplicação da Membrana de Filtração Cerâmica



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A proposta de aplicação da Membrana de Filtração, esquematizada na Figura 46, ocorrerá por meio da substituição das camadas (seixo, areia e carvão antracito), responsáveis pelo processo de filtração da água, pelo referido meio filtrante.

5 CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto, evidencia-se que o particulado de PRFV e o lodo de ETA apresentaram características favoráveis para a produção de cerâmicas porosas à base de argila vermelha, com materiais e processos característicos da indústria da cerâmica tradicional, denotando possibilidades de configuração do ciclo técnico, a partir da reciclagem externa dos passivos ambientais para a produção de membranas de filtração em Estações Compactas de Tratamento de Água.

Vale salientar que as considerações aqui realizadas se limitam a estudos com temáticas voltadas à proposta neste trabalho, quanto a utilização da argila, ou outro precursor, como carga cerâmica, e materiais alternativos sacrificiais.

A RSL apresentou as principais características dos subprodutos utilizados na produção de cerâmicas porosas, conceitos e panorama de obtenção dessa tecnologia, servindo como aporte teórico e prático da pesquisa.

A Análise de Fluorescência de Raios X do PPRFV constatou a presença majoritária de óxido de cálcio (47,79%) e dióxido de silício (36,38%). Quanto a análise química do LETA, esta apresentou valores mais expressivos de sílica (52,06%) e alumínio (29,83%), seguidos, em menor proporção, de óxidos como o potássio (4,25%), cálcio (1,75%) e magnésio (1,11%), que podem promover diminuição da temperatura de sinterização. Esses resultados estão em consonância com os picos do difratograma de Raios X, que apresentaram bandas típicas amorfas para o PPRFV e fase cristalina quartzo para o LETA.

Os espectros de infravermelho da amostra de PRFV identificaram grupos funcionais característicos que ocorrem na estrutura química da resina epóxi, indicando a possibilidade da resina do material utilizado pela indústria de referência ser do tipo bisfenol A. Enquanto, as bandas de absorção do LETA revelaram a presença de minerais similares aos encontrados na argila, permitindo a utilização do subproduto como precursor em materiais cerâmicos.

A curva Termogravimétrica (TG) do PPRFV mostrou perda mássica de 40,33%, entre as temperaturas de 390 °C e 500 °C, restando 23,35% de resíduo que continua a se decompor até a temperatura limite de 1200°C. O pico exotérmico observado na curva de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), na temperatura em torno de 450 °C, confirma a perda de massa da TG. Além disso, foi possível inferir a partir da temperatura de transição vítrea (~525 °C) e as faixas de 883 °C - 1100 °C, a temperatura de sinterização das amostras desse estudo. Quanto à TG do LETA, esta correspondeu a perda mássica total de 14,83%, tendo como principal

evento térmico na curva de DSC a faixa de temperatura entre 400 °C e 600 °C, associada à transição de fase dos minerais argilosos.

A Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície do PPRFV demonstrou a não padronização dos tamanhos, assim como a existência de filamentos fibrosos aderidos a partículas de textura rugosa, que podem ser associadas a resinas ou outros compostos solúveis. As micrografias do LETA detectaram a predominância de partículas de diferentes granulometrias e de texturas rugosas, que formam conglomerados em formato de escamas ou lascas, característico de materiais com elevada carga orgânica e inorgânica.

No que diz respeito aos resultados dos ensaios tecnológicos, os traços experimentais, com substituição do PPRFV e LETA, apresentaram crescimento nos valores médios com nível de significância a 1% em relação ao traço de referência. O traço com 8% de PPRFV e 20% LETA despontou como mais promissor, demonstrando aumento, em relação ao traço referência, de 83,84%, 47,36% e 26,67% nos resultados de Retração Linear, Absorção de Água e Porosidade Aparente, respectivamente, se mantendo na faixa de valores apresentados na literatura.

Os dados de Fluxo Permeado comprovaram o aumento observado nos ensaios físicos, alcançando valor de 5.222,27 L/m².h para o traço experimental 8% de PPRFV e 20% de LETA. Os valores de fluxo mostraram-se compatíveis com a literatura pertinente sobre o tema de produção de suportes cerâmicos porosos submetidos a pressão de 0,5 bar - 2,0 bar. A alta permeabilidade, resultante dos maiores índices de absorção de água e porosidade aparente, possuem relação com os elementos fundentes presentes nos subprodutos, que interagem com os compostos formadores de fase vítrea.

É importante frisar o interesse desta pesquisa no crescimento dos níveis físicos dos corpos cerâmicos, sem prejuízo das propriedades mecânicas. O desempenho da cerâmica porosa, sobretudo, na composição com maior teor de PPRFV e LETA, apresenta possibilidades de produção de membranas de filtração direcionadas para sistemas de tratamento de água potável em ECTA, estando esta análise em conformidade com outros trabalhos.

Por fim, esse estudo demonstrou-se importante no desenvolvimento de material compósito de interesse ambiental com vistas à reintrodução do PPRFV e LETA no sistema de tratamento de água na etapa de filtração, contribuindo, assim, para a mitigação dos impactos gerados pela destinação inadequada dos subprodutos supracitados.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, a autora sugere as seguintes propostas:

- Estudo com a mesma aplicação proposta neste trabalho, com até 20% de PPRFV e 40% de LETA, buscando aumentar a porosidade e fluxo permeado, sem perda da resistência à flexão;
- Avaliação do desempenho das cerâmicas porosas com diferentes granulometrias $>75 \mu\text{m}$;
- Para melhor compreensão do comportamento dos subprodutos em altas temperaturas, submeter os corpos verdes a análises térmicas;
- Verificação do desempenho dos corpos cerâmicos em diferentes temperaturas de sinterização de 950°C a 1200°C ;
- Realização do ensaio de lixiviação para comprovar a viabilidade de utilização da cerâmica porosa em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração;
- Análise da superfície de fratura e poros presentes nos corpos cerâmicos, através da Microscopia Eletrônica de Varredura;
- Análise de durabilidade das cerâmicas porosas com incorporação de PPRFV e LETA;
- Aplicação de fatorial como método estatístico para analisar as interações dos subprodutos nos resultados das variáveis respostas;
- Apreciação mercadológica e ambiental com foco no processo de fabricação proposto neste trabalho, a fim de obter dados de emissões de CO_2 , quantidade de água, consumo de energia elétrica e desperdícios de materiais.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil, 2022.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2022.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2019.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2021.

ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica. Informações Técnicas - Definição e Classificação. Disponível em: <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/> Acesso em 24 ago. 2023.

ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica, Seis décadas de conquistas e superação de desafios, 1 ed., São Paulo, Editora BB, 2017.

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.

ALBUQUERQUE, Regina Coeli Brito *et al.* Espumas cerâmicas aditivadas com resíduos de vidro plano pelo método da réplica. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 14, n. 2, 2019.

ALBUQUERQUE, Thiago de Norões; BARRETO, Francisco Maurício de Sá. Identificação do ponto ótimo de lavagem de um sistema de dupla filtração convencional de bancada através de curva de lodo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 30º, 16 a 19 jun. 2019, Natal, no Rio Grande do Norte. Anais [...] Natal, no Rio Grande do Norte, 2019.

ALMEIDA, J. D. B. **Análise Da Substituição do Agregado por Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo na Produção de Concreto Permeável**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, Campus Marechal Deodoro, 2022.

AL-NAIB, Uday M. Basheer. Introductory chapter: a brief introduction to porous ceramic. In: Recent advances in porous ceramics. IntechOpen, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C20-00 (ASTM, 2022). Métodos de teste padrão para porosidade aparente, absorção de água, gravidade específica aparente e densidade aparente de tijolos refratários queimados e formas por água fervente.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C210:95 (ASTM, 2019). Método de teste padrão para troca de reaquecimento de tijolo isolante.

ANDRADE, Erik de Lima. **Análise de eficiência de biopolímero como composto coadjuvante no processo de coagulação-floculação e sedimentação**. 2017. 91f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba), 2017.

ARKAME, Youssef *et al.* Effects of slag addition and sintering temperature on the technological properties of dolomite based porous ceramics. **Open Ceramics**, v. 13, p. 100333, 2023.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciencia e Ingeniería de materiales**. 7. ed. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BARG, Suelen *et al.* Cellular ceramics by direct foaming of emulsified ceramic powder suspensions. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, n. 9, p. 2823-2829, 2008.

BARROS, Liana de Holanda Viana. **Reciclagem de resíduos de plástico reforçado com fibras de vidro na indústria de piscinas**. 75 f.: il. color. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

BECKHOFF, B. K.; LANGHOFF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. (EDS.) **Handbook of Practical X-ray Fluorescence Analysis**. Springer, Berlin, 2006.

BFM AMBIENTAL. **Coprocessamento de Embalagens Contaminadas**. Disponível em: <https://www.bfmambiental.com.br/coprocessamento-de-embalagens-contaminadas.php>. Acesso em: 22 out. 2023.

BHERING, L. L. **Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. Crop Breeding and applied biotechnology**. v.17:187-190p, 2017. DOI <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2s29>.

BORGES, A. L. **Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2021.

BOU-ISSA, R. A.; LOIOLA, R. L.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of paper sludge waste in the production of low-cost porous ceramic support. **Cerâmica**, v. 66, p. 106-113, 2020.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF, 8 jan. 1997.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 21 set. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 635/Bsb, de 26 de dezembro de 1975. Aprova normas e padrões sobre a fluoretação da água de sistemas públicos de abastecimento. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/349893/>. Acesso em: 01 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n.888 de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: MS, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico]** / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. Brasília, DF: MMA, 2022.

BRASIL. **Pacto Global da ONU.** Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/sobre-nos/>. Acesso em: 10 out. 2023.

BRITO, B. R. **Efeito da Incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Materiais. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, São Paulo, 2021.

BUSELATTO, Denis Meira *et al.* Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

CABAN, Renata. FTIR-ATR spectroscopic, thermal and microstructural studies on polypropylene-glass fiber composites. **Journal of Molecular Structure**, v. 1264, p. 133181, 2022.

CALLISTER, William D., Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. il.; 28 cm.

CARVALHO URASHIMA, Denise de *et al.* Sistema de confinamento de resíduos: Estudo de caso lodo de ETA. Ponta Grossa- PR, 2021. **Coleção desafios das engenharias: engenharia sanitária 2.** Editora Atena. p. 1-388-416.

CARVALHO, J. L. B. **Análise do desempenho de argamassa de assentamento com substituição parcial do agregado miúdo de embalagens cartonadas trituradas.** Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Alagoas, IFAL, Marechal Deodoro – AL, 2022.

CAVALCANTE, M.; COSTA, J.G. Considerações sobre planejamento experimental e adequabilidade do uso de testes estatísticos em Ciências Agrárias. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 4, p. 3706-5215, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v6i4.1931>.

CEVAHIR, Aref. **Glass fibers. In: Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites.** Woodhead Publishing, 2017. p. 99-121.

CLAUSI, Marina; PINTO, Daniela. Valorisation of Water Potabilization Sludges as Precursors for Alkali-Activated Binders: Characterization and Feasibility Study. **Materials**, v. 16, n. 5, p. 1998, 2023.

COLLING, *et al.* Incorporation of GFRP in interlocking floors: an ecological solution for industrial waste. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 1, p. 157-169, jan./mar. 2023.

CRESWELL, J.W.; CRESWELL, J. D. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativos, quantitativos e misto Grupo a Educação S.A.**, São Paulo, São Paulo, 2021.

DELE-AFOLABI, T. *et al.* Effect of agro-waste pore formers on the microstructure, hardness, and tensile properties of porous alumina ceramics. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 15, n. 4, p. 1060-1071, 2018. DOI <https://doi.org/10.1111/ijac.12874>.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e Aplicações da Análise Térmica.** São Paulo. IQSC, 40p, 2012.

EMPRESA DE REFERÊNCIA. Disponível em: <https://igua.com.br/sustentabilidade>. Acesso em: 11 out. 2023a.

EMPRESA DE REFERÊNCIA. Disponível em: <https://ri.igua.com.br/esg/kpis-esg/>. Acesso em: 11 out. 2023b.

ESTOLANO, V.; FUCALE, S.; VIEIRA FILHO, J.; GABRIEL, D.; ALENCAR, Y. Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, 2018.

FEROLLA, Laura; OLIVEIRA, Aline; OLIVEIRA, Viviane Cesário; MOUCHREK, Fabiana; ZANETTE, Andressa; SILVA, Alex Fonseca. **Relatório Integrado, 2022.**

FERREIRA FILHO, S. S.; WAELKENS, P. Aplicação de soluções aquosas de sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio para controlar a liberação de fósforo dos sedimentos lacustres. **Poluição Ambiental**, v. 157, n. 3, p. 1033-1040, 2009.

FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. **Tratamento de Água: Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento – Um Guia Prático para Alunos e Profissionais.** 1. ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FERREIRA, Chrystiano Araujo. **Obtenção de membrana cerâmica porosa a partir da utilização do resíduo de caulim como matéria-prima alternativa e da serragem da madeira como agente parogênico.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2019.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. Viçosa-MG: Editora UFV, 2018.

FRANCO, CAMILA SILVA. **Sistema alternativo de tratamento de água em escala descentralizada**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas)- Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2015. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/5083/1/TESE_Sistema%20alternativo%20de%20tratamento%20de%20%C3%A1gua%20em%20escala%20descentralizada.pdf. Acesso em 05 dez. 2021.

FU, Chong *et al.* Recycling of waste glass as raw materials for the preparation of self-cleaning, light-weight and high-strength porous ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, p. 128395, 2021.

GODOY, Luis Gabriel Graupner de 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, Fernanda Cavalcante. **Decantação acelerada: alternativa para o tratamento de vazão excedente de esgoto-estudo na ETE Martim de Sá (Caraguatatuba/SP)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-17082010-101003/en.php>. Acesso em 28 nov. 2021.

GONÇALVES, Wherllyson Patricio. **Comportamento físico, mecânico e microestrutural de massas contendo argilas e resíduo de alumina**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2018.

HENRIQUE, M.C.; LINHARES, A.M.A., “Cerâmica marajoara e Círio de Nazaré: significação e sacralização do patrimônio cultural brasileiro”, *Topoi*, v. 20, n. 41, pp. 394–420, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2237-101x02004106>

HAO, Liping *et al.* Preparation and characterization of porous ceramics with low-grade diatomite and oyster shell. **Materials Chemistry and Physics**, v. 235, p. 121741, 2019.

HOSSAIN, S. K.; ROY, P. K. Fabricação de Refratário De Isolamento Sustentável. **Cerâmica e Vidro**, p. 115-125, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.09.002>.

HOWE, K. J.; RIDA, A. R.; MINK, J. E. Caracterização de resíduos de tratamento de água potável para aplicação no solo. **Jornal de qualidade ambiental**, v. 45, n. 1, p. 278-287, 2016.

HUANG, Y. A novel route for the fabrication of melilite-spinel porous ceramics with ultralow thermal conductivity and sufficient strength. **Ceramics International**, v. 48, n. 24, pág. 37488-37491, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.231>.

IBG - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/84366>. Acesso em: 14 set 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2017: abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IONASHIRO, M. Giolito. Fundamentos da Termogravimetria Análise Térmica Diferencial Calorimetria Exploratória Diferencial. Editorial Giz. p. 07, 2004.

ISWA - INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. **O futuro do setor de gestão de resíduos: tendências, oportunidades e desafios para a década, 2021-2030**. Acesso em: 21 set. 2023.

JIANG, F. *et al.* Formation mechanism of high apparent porosity ceramics prepared from fly ash cenosphere. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 749, p. 750-757, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.303>.

JUNIOR, M. C. *et al.* Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: Parte I – Introdução e a indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 24, 2019. DOI <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.003>

KAYALAR, Merve TORMAN *et al.* Fabrication of porous anorthite ceramics using eggshell waste as a calcium source and expanded polystyrene granules. **Politeknik Dergisi**, p. 1-1, 2022.

KHATER, Gamal A. *et al.* Use of Arc furnace slag and ceramic sludge for the production of lightweight and highly porous ceramic materials. **Materials**, v. 15, n. 3, p. 1112, 2022.

KREMZER, M. Ceramic Porous Preforms Manufactured from Waste Materials. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 67, n. 1, p. 283-288, 2022.

LE GUERN, Claire. Plastic Pollution. 2019. Disponível em: <https://plastic-pollution.org/>. Acesso em: 17 nov. 2023.

LEITE FILHO, Gildenor Pereira. **Análise das características físico-químicas de material particulado de painel de fibra de média densidade e de plástico reforçado com fibra de vidro para material compósito**. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Alagoas, IFAL, Marechal Deodoro – AL, 2021.

LIMA, N. B.; PADILHA, A. F. Difração de raios X: uma introdução para iniciantes. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), 2022.

LIPOWSKA, B. *et al.* Recycling of residual sludge from aluminum anodizing in fired clay bricks. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, p. 100055, 2022.

LOPES, Ana Maria Beims. **Desenvolvimento de nova concepção autolimpante na conformação interna de decantadores de alta taxa do tipo tubular horizontal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/222003>. Acesso em 10 out. 2020.

LOPES, Verônica dos Santos *et al.* Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, Tiago José Carrilho. **Sistemas de abastecimento de água para consumo humano—desenvolvimento e aplicação de ferramenta informática para a sua gestão integrada**. Dissertação (Mestrado em tecnologia ambiental) Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior Agrária, 2014. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/9311>. Acesso em 28 nov. 2021.

MALIK, Nisha; BULASARA, Vijaya Kumar; BASU, Soumen. Preparation of novel porous ceramic microfiltration membranes from fly ash, kaolin and dolomite mixtures. **Ceramics International**, v. 46, n. 5, p. 6889-6898, 2020.

MANNI, AHMED *et al.* Valorization of coffee waste with Moroccan clay to produce a porous red ceramics (class BIII). **Cerámica y Vidrio**, v. 58, p. 211-220, 2019.

MESTRE, S. *et al.* Low-cost ceramic membranes: A research opportunity for industrial application. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 39, n. 12, p. 3392-3407, 2019.

MILAK, G. B. *et al.* Efeito da temperatura de sinterização e da adição de fibras poliméricas em cerâmica porosa obtida a partir de resíduos do processo Kraft. **Cerâmica**, v. 65, p. 416-425, 2019. DOI <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752685>.

MILAK, Gabriela Bortolin. **Cerâmicas porosas obtidas a partir da substituição parcial de matérias-primas por resíduos da indústria de papel e celulose e utilização de fibras poliméricas para aumento de permeabilidade**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma-SC, 2018.

MOUIYA, Mossaab *et al.* Fabrication and characterization of a ceramic membrane from clay and banana peel powder: Application to industrial wastewater treatment. **Materials Chemistry and Physics**, v. 227, p. 291-301, 2019.

MORAES, L. S.; MAIA, V. A. P. Reciclagem de plástico reforçado com fibra de vidro. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 40747-40765, 2021.

NIJSSEN, R.P.L. **Composite Materials: An Introduction**. In: Holland University of Applied Sciences, 2015.

NISHIHORA, Rafael Kenji *et al.* Manufacturing porous ceramic materials by tape casting—A review. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 4, p. 988-1001, 2018.

OHJI, T.; FUKUSHIMA, M. Macro-porous ceramics: processing and properties. **International Materials Reviews**, v. 57, n. 2, p. 115-131, 2012.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Dissertação (mestrado) – PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, Samantha Ferreira Mendonça de; TENÓRIO, Taísa Menezes; MARQUES, Sheyla Karolina Justino. Caracterização do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Palmeira dos Índios - Alagoas para potencial aplicação em massas cerâmicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0088>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU, 2015. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.estrategiaods.org.br/conheca-os-ods/>. Acesso em: 18 maio. 2023.

OTITOJU, Tunmise Ayode *et al.* Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications. **Journal of industrial and engineering chemistry**, v. 85, p. 34-65, 2020.

PADAKI, Mahesh *et al.* Membrane technology enhancement in oil–water separation. A review. *Desalination*, v. 357, p. 197-207, 2015.

PESSANHA, Maikon CR *et al.* Caracterização de tubos e adesivos de plástico reforçado com fibra de vidro utilizados em plataformas offshore. **Polímeros**, v. 18, pág. 70-75, 2008.

PORTO, Valdênia de Sousa. **Desenvolvimento de cerâmica porosa celular utilizando resíduos de vidro de lâmpada fluorescente em sua composição**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

PRADO, G. G. **Projeto e caracterização de membranas cerâmicas utilizando microfibras como precursoras de porosidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). 2014. 106 f. Universidade de São Paulo. São Paulo.

PEREIRA, L. C. F. **O Design para a Economia Circular Repensando a forma como fazemos as coisas**. Dissertação (Mestrado em Design). Universidade de Brasília, 2020.

QUANG, Huy Hoang Phan *et al.* Using ZrO₂ coated sludge from drinking water treatment plant as a novel adsorbent for nitrate removal from contaminated water. **Environmental Research**, v. 212, p. 113410, 2022.

RAMOS, Sileide de Oliveira *et al.* Characterization of clays of deposits new located in Parelhas/RN, Brasil, aiming for application in the ceramic industry. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

RAPÔSO, A. L. Q. R. S. **Modelo de Sistema de Produto-Serviço para Estofado personalizado: sustentabilidade ambiental e inovação em modelo de negócio para Estofadora do APL de Móveis do Agreste** (Alagoas, Brasil). Tese (doutorado) - Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador: UFBA, 2014.

RODRIGUES, Maykmiller Carvalho. **Estudo do comportamento de blocos cerâmicos queimados com adição de fibras de resíduos industriais**. 127 p.: il. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

RONCALLI, Angelo Giuseppe *et al.* Fluoretação da água no Brasil: distribuição regional e acurácia das informações sobre vigilância em municípios com mais de 50 mil habitantes. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, 2019.

ROUQUEROL, Jean *et al.* Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). **Pure and applied chemistry**, v. 66, n. 8, p. 1739-1758, 1994.

RUVIARO, A.S., SILVESTRO, L., SCOLARO, T.P., *et al.*, "Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar", **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, pp. 243–260, 2020.
doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400470>.

SALMAN, M. M. *et al.* Utilization of diverse cheap materials as pore generating agent to manufacture low-cost porous ceramic. **Cerâmica**, v. 66, p. 179-185, 2020.

SALVANI, V. R., PUPIM, A. M., INNOCENTINI, M.D.M., PADOLFELLI V.C.: Otimização do processo para fabricação de filtros no sistema SiC-Al₂O₃. **Cerâmica**. V.47.p.13-18, 2001.

SAMPAIO, Cláudio P. *et al.* **Design para a sustentabilidade: dimensão ambiental**. Curitiba, PR: Insight, 2018. 183 p. (Design para a sustentabilidade; 1).

SANTOS, Diego Hildebrando dos *et al.* **Influência da sílica e da temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduo do processo bayer**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA/ITEC), Belém, Pará, 2019. Disponível em: http://200.239.66.58/jspui/bitstream/2011/11261/1/Tese_InfluenciaSilicaTemperatura.pdf

SANTOS, Hudson Carlos Melo dos. **Caracterização mecânica e análise fractográfica de compósitos poliméricos com fibras naturais do epicarpo do coco babaçu**. 67 f.: il. color. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Belém, 2022.

SCHÄFER, M.; LOWER, M. Ecodesign - Uma revisão de revisões. **Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, pág. 315. DOI <https://doi.org/10.3390/su13010315>, 2020.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Pensamento do ciclo de vida: negócios conscientes à caminho da sustentabilidade**. Cuiabá, MT, 2017.
SERCEL SOLUÇÕES EM FIBRAS, 2017. Disponível em:
<http://www.sercel.com.br/blog/fibra-de-vidro-blog/os-aditivos-utilizados-nos-processos-spray-up-e-hand-lay-up.html>. Acesso em: 06 set. 2023.

SERCEL SOLUÇÕES EM FIBRAS, 2018. Disponível em:
<http://www.sercel.com.br/blog/resina-poliester.html>. Acesso em: 06 set. 2023.

SEREWANE DERAMNE, Rosellyne *et al.* Use of a kaolinitic-illitic clay from Central African Republic and an organic waste for the production of porous ceramic materials. International. **Journal of Ceramic Engineering & Science**, v. 2, n. 6, p. 292-302, 2020.

SILVA, E.L.G., MACIEL, A.P. "Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em blocos cerâmicos", **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 4, pp. 29–36, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.021>.

SILVA, Hugo Guilherme. **Avaliação e tratamento de oocistos de *Cryptosporidium* spp. e cistos de *Giardia* spp. presentes na água de lavagem dos filtros e no resíduo flotado gerados pela tecnologia de ciclo completo com flotação por ar dissolvido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos -SP, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18062018-105134/publico/Dissertacao_Final_Hugo.pdf. Acesso disponível em: 17 nov. 2021.

SILVA, L. B. **Desenvolvimento de cerâmicas com alta sinterabilidade à base de Nano Alumina reforçada com CBC produzidas por tape casting**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/27925/1/Desenvolvimentocer%20micascalta_Silva_2019.pdf

SILVA, R. V. *et al.* The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 346-364, 2017.

SILVA, T. S. da; MARQUES, M. M. N.; EL-DEIR, S. G. **Desmaterialização dos resíduos sólidos: estratégias para a sustentabilidade**. Edufrpe e Gampe (ed), Recife, Pernambuco, 2020.

SOUZA, Mykaell Yan Muniz de. **Obtenção de cerâmicas porosas a partir de argila Ball Clay, alumina e talco**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia. Campina Grande – PB, 2018.

SUN, Yanan *et al.* Initial stage degradation of GFRP bars based on functional group ratio change using FTIR in high temperature and alkaline solution. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106190, 2023.

SVERGUZOVA, S. *et al.* Application of sorbent waste material for porous ceramics production. **International Journal of Engineering**, v. 34, n. 3, p. 621-628, 2021.

TRENTIN, Priscila Ongaratto *et al.* Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020. See More. UFV, 2018. 588p.

TEGA – Engenharia e Meio Ambiente. Disponível em: <https://tegaengenharia.com.br/eta-compacta/>. Acesso em: 14 mar. 2024.

VAKALOVA, T. V.; REVVA, I. V. Highly porous building ceramics based on «clay-ash microspheres» and «zeolite-ash microspheres» mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 317, p. 125922, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125922>.

XAVIER, Lorena Alves *et al.* Effect of stainless-steel slag concentration in the fabrication of cost-effective ceramic membranes: Seawater pre-treatment application. **Ceramics International**, v. 48, n. 16, p. 23273-23283, 2022.

YU, Laihao *et al.* Structure evolution, properties and synthesis mechanism of ultra-lightweight eco-friendly ceramics prepared from kaolin clay and sewage sludge. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 109061, 2023.

ZHANG, Yingyi *et al.* Microstructure and mechanical properties of high strength porous ceramics with high sewage sludge content. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 135084, 2022.

ZHENG, Feng *et al.* Effective utilization of extracted titanium tailing to prepare high performance glass-ceramic and their formation mechanism. **Ceramics International**, v. 47, n. 12, p. 17391-17399, 2021.

ZHOU, Zi-wei *et al.* Preparation of an environment-friendly LTCC material by using waste soda-lime glass and natural volcanic ash. **Ceramics International**, v. 49, n. 5, p. 7861-7870, 2023.

ZHU, Y. *et al.* Effect of sintering temperature on structure and properties of porous ceramics from tungsten ore tailings. **Materials Chemistry and Physics**, v. 287, p. 126315, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126315>.

ZILBOVICIUS, Celso; FERREIRA, Regina Glaucia Lucena Aguiar; NARVAI, Paulo Capel. Água e saúde: fluoretação e revogação da Lei Federal n. 6.050/1974. **Revista de Direito Sanitário**, v. 18, n. 3, p. 104-124, 2018.

APÊNDICE 2 - ARTIGO

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO E LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS POROSAS

Samantha Ferreira Mendonça de Oliveira^{a,2}, Taísa Menezes Tenório^a, Ana Paula da Silva Peres^b, Aurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Rapôso^c, Sheyla Karolina Justino Marques^a

^aInstituto Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, R. da Matança (Rua Lourival Alfredo), 176 - Poeira, 57160-000, Marechal Deodoro, Alagoas, Brasil.

^bInstituto Federal da Paraíba, PB-264, s/nº - Serrote, 58500-000, Monteiro, Paraíba, Alagoas, Brasil.

^cInstituto Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Rua barão de Atalaia - s/nº, Centro, 57020510, Maceió, Alagoas, Brasil.

RESUMO

A geração de resíduos nas indústrias de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) e nas Estações de Tratamento de Água (ETA) constitui sérios problemas ambientais e sociais, em decorrência da falta de áreas de destinação dos passivos, que se configuram como matéria-prima secundária para outros processos industriais. A partir deste contexto, esta pesquisa teve por objetivo analisar as características e propriedades do particulado de PRFV (PPRFV) e lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) na produção de cerâmicas porosas, de modo a obter produto mais eficiente à luz da economia circular. As cerâmicas porosas foram preparadas por moldagem da massa à verde, com níveis de PPRFV (0%, 4%, 6% e 8%) e de LETA (5%, 10%, 15% e 20%), em substituição parcial à argila. O PPRFV apresentou, de forma majoritária, o óxido de cálcio CaO (47,79%) e óxido de silício SiO₂ (36,38%), na forma não-cristalina, enquanto o LETA apresentou o óxido de silício SiO₂ (52,06%), na fase cristalina quartzo, e óxido de alumínio Al₂O₃ (29,83%). A análise térmica do particulado revelou evento exotérmico na temperatura em torno de 450°C e perda mássica de 40,33%. Em relação ao lodo, este sofreu

² Autor correspondente. Instituto Federal de Alagoas, R. da Matança (Rua Lourival Alfredo), 176 - Poeira, 57160-000, Marechal Deodoro, Alagoas, Brasil.
Endereço de e-mail: sfml@aluno.ifal.edu.br

perda de massa total de 14,83%. As micrografias de MEV do particulado revelaram a existência de filamentos fibrosos aderidos às partículas de textura rugosa, ao passo que o lodo apresentou formato de lascas, característico de materiais com carga orgânica e inorgânica. No que diz respeito aos ensaios tecnológicos, o traço experimental com 8% de PPRFV e 20% de LETA despontou como o mais promissor, demonstrando aumento, em relação ao traço de referência, de 83,84%, 47,36% e 26,67% nos índices de Retração Linear, Absorção de Água e Porosidade Aparente, respectivamente. Os dados de Fluxo Permeado comprovaram o aumento observado nos ensaios físicos, alcançando valor de 5.222,27 L/m².h, para o traço experimental com maior porcentagem de resíduos. Baseado nos dados obtidos, este estudo demonstrou-se importante no desenvolvimento de produto técnico com vista à reintrodução do particulado de PRFV e lodo de ETA no sistema de tratamento de água potável na etapa de filtração.

Palavras-chave: Economia circular, Resíduos, Agente parogênico, Membrana porosa.

1. Introdução

Com o crescimento das metrópoles e do consumo de vários produtos, intensificou-se a geração de resíduos, tornando-se um dos maiores problemas atuais da sociedade. Esse problema é agravado pela ausência de áreas de destinação ambientalmente adequadas, que acabam por causar diversos problemas e impactos significativos ao meio ambiente, piorando as condições de saúde do planeta. No Brasil a disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, alcançou a marca em 2022, de 29,7 milhões de toneladas, valor esse que corresponde a 39% do total de resíduos dispostos de forma indiscriminada no meio ambiente [1,2].

A versatilidade do plástico na produção industrial permitiu o desenvolvimento de materiais com características de leveza e durabilidade. Entretanto, a disposição destes produtos, principalmente, pós-consumo, têm acarretado a contaminação de rios, lagos, aquíferos e lençóis

subterrâneos, com impactos negativos potenciais na vida marinha. Cerca de 100.000 mamíferos aquáticos morrem pelo lançamento de plásticos nos oceanos, problemática a qual promove descontinuidade da cadeia alimentar [3,4].

Em decorrência da origem fóssil dos plásticos, sobretudo, dos polímeros termorrígidos combinados com materiais de reforço, como as fibras de vidro, a baixa degradabilidade no meio ambiente prejudica a reintegração do compósito nos ciclos naturais da terra. Materiais com características enrijecedoras e de difícil separação dos componentes no processo de reciclagem colocam a indústria de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) em cenário de dificuldade de compartilhamento das perdas de processo para as indústrias de transformação de plásticos no Brasil [3,5].

Além do segmento de plástico reforçado, outra empresa que possui responsabilidade de gerenciar os seus resíduos são as Estações de Tratamento de Água (ETA), que procuram garantir à sociedade acesso à água tratada e de qualidade, dentro dos padrões de potabilidade. A tendência de crescimento da população ocasionará maior consumo de água potável e conseqüentemente, a necessidade de exploração de novas fontes de água bruta para o abastecimento dos usuários [6].

Concomitantemente com o ganho de produção, haverá aumento no montante de resíduos gerados pelas ETA, que, na maioria das vezes, são responsáveis pelo lançamento indevido de lodo nos corpos hídricos, sem o devido tratamento e autorização dos órgãos competentes, causando efeitos nocivos ao meio ambiente como elevação dos níveis de alumínio e assoreamento dos cursos d'água [7].

Convém esclarecer que o termo subprodutos é compreendido como os insumos derivados da ineficiência das operações e processos dos sistemas industriais, considerando o ciclo de vida do produto-serviço, que se encontram em estado de perdas e podem entrar em

estado de fluxo de materiais e se reintegrar ao sistema produtivo de origem ou a novo sistema industrial [8].

Tendo em vista o panorama apresentado da necessidade de destinação dos subprodutos por parte da indústria de PRFV e das empresas de tratamento de água, surge o setor da construção civil, mais especificamente a indústria cerâmica, receptível a adoção de novas tecnologias capazes de melhorar a operacionalização dos seus sistemas e agregar valor comercial aos seus produtos. No contexto das cerâmicas porosas com composições e processos de fabrico similares às cerâmicas tradicionais, o interesse por essas tecnologias tem aumentado, visto o desempenho e economia obtidos com a incorporação de materiais alternativos [9].

Estudos que viabilizem o reprocessamento de matérias-primas secundárias, quando estas não podem ser evitadas em seus sistemas de origem, podem promover a integração dos passivos no fabrico de novos materiais. Logo, pesquisas estão sendo amplamente discutidas na literatura, especialmente, na fabricação de cerâmicas porosas, que normalmente são constituídas por óxidos de alta pureza e processos que exigem alta temperatura de sinterização, tornando as cerâmicas com preços mais elevados [9,10].

Trabalhos recentes demonstraram a viabilidade de aplicação de subprodutos na fabricação de cerâmicas porosas como o de Bou-Issa, Loiola e Holanda [11] que utilizaram lama de papel na produção de suportes cerâmicos porosos; Manni et al. [12] que analisaram a incorporação da borra de café na fabricação de revestimento poroso; Mouiya et al. [13] que investigaram a utilização do particulado da casca de banana em membranas cerâmicas; e Kayalar et al. [14] que avaliaram o uso de casca de ovo na confecção de cerâmicas porosas.

Portanto, a partir dos estudos já realizados, evidencia-se o potencial de utilização de matérias-primas alternativas na produção de cerâmicas porosas, fortalecendo o desenvolvimento de novas investigações acerca do assunto, sobretudo, no sentido de buscar resultados sobre o desempenho técnico da incorporação do PPRFV e LETA na fabricação de

cerâmicas porosas. Além disso, esta pesquisa apresenta oportunidades de desenvolvimento intrinsecamente sustentável para as indústrias cerâmicas reduzirem a utilização de matérias-primas não renováveis e diminuírem os custos inerentes ao processo de fabricação, principalmente na etapa de sinterização [9].

Nesse sentido, este trabalho teve como foco a análise da incorporação do PPRFV e LETA na produção de cerâmicas porosas, tendo como material precursor a argila, matéria-prima típica da indústria cerâmica tradicional. Caso comprovada a viabilidade técnica do produto tecnológico, este poderá ser direcionado para sistemas de filtração de água potável, possibilitando o fechamento do ciclo produtivo do PPRFV e LETA.

2. Materiais e métodos

As abordagens de pesquisas seguiram pressupostos baseados em procedimentos e métodos específicos de coleta, análise, interpretação e validação dos dados [15]. Logo, o desenho de pesquisa adotado foi baseado na abordagem quantitativa, com base na experimentação e natureza tecnológica, com instrumento de coleta de dados para a realização de ensaios, sendo executada, predominantemente, *in vitro* [16].

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma de desenvolvimento da pesquisa no qual constam as etapas de realização da revisão sistemática de literatura, pesquisa experimental e análise dos resultados.

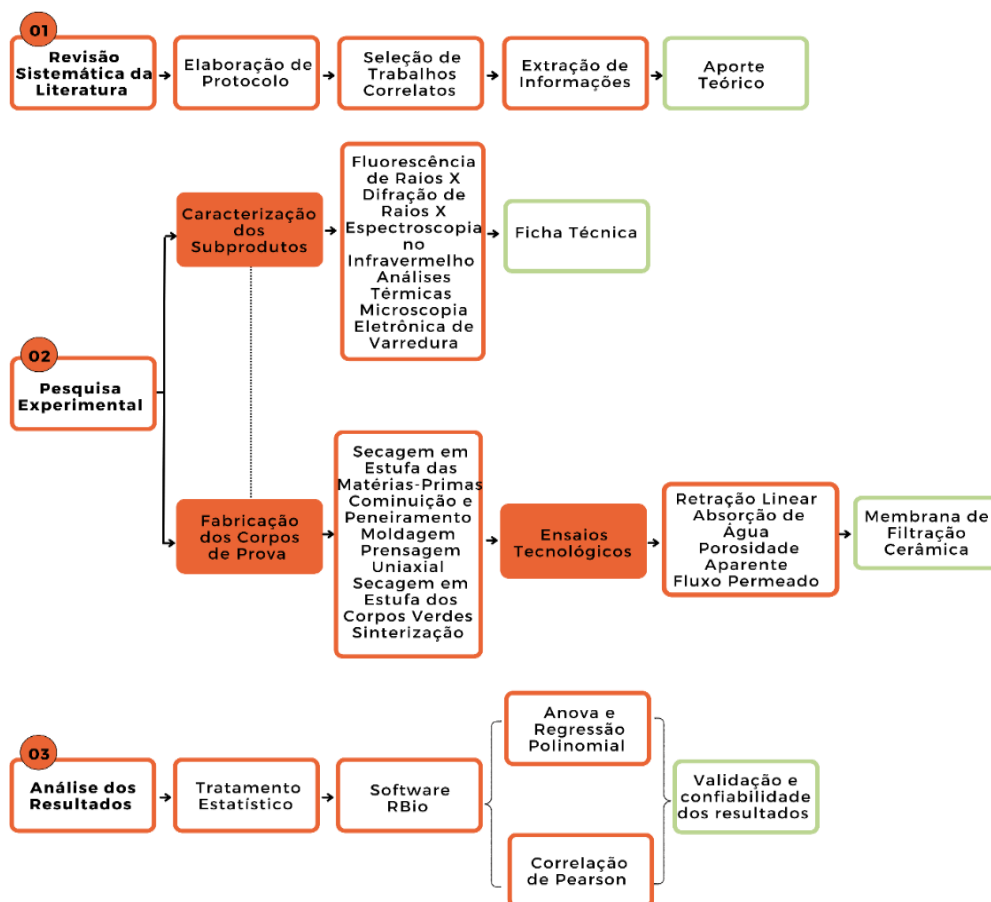


Fig. 1. Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa

A primeira etapa da pesquisa tratou da realização da revisão sistemática da literatura sobre a produção de cerâmicas porosas a partir da incorporação de diferentes subprodutos. A segunda etapa foi composta pelos ensaios de caracterização dos subprodutos, fabricação dos corpos de prova e realização dos ensaios tecnológicos. E, por fim, a terceira etapa consistiu na análise dos resultados com aplicação de tratamento estatístico (ANOVA), regressão polinomial e correlação de Pearson.

2.1 Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas nesta pesquisa foram argila, lodo de ETA e particulado de PRFV. A argila foi coletada em Olaria, situada no Sítio Uruçu, localizada a 2,7 km da Zona Urbana de Palmeira dos Índios-AL. O lodo de ETA foi obtido dos leitos de secagem da Estação

de Tratamento de Água do Município de São Brás-AL. E, por fim, o particulado de PRFV foi proveniente da indústria alagoana de tubos, conexões e equipamentos diversos, localizada na cidade de Marechal Deodoro-AL.

A preparação da argila e lodo de ETA contou com processo de secagem em estufa, a temperatura de 110 °C, por período de 24 h, cominuição dos grãos e peneiramento, através do uso de almofariz com mão de gral e peneira de malha 150 µm, respectivamente [11-13,17]. Estes procedimentos foram importantes para a padronização do tamanho dos grãos necessária para a homogeneização das matérias-primas e posterior formação de poros na fase de sinterização dos corpos verdes. Nesta pesquisa, tanto a argila quanto o lodo, foram utilizados como materiais precursores na fabricação das cerâmicas porosas, tendo o lodo objetivo de conferir a massa verde elementos fundentes importantes para a redução do tempo e temperatura de sinterização, além de contribuir com a diminuição de distorções no produto final [18].

A preparação do particulado de PRFV para o processo de moldagem deu-se através da passagem do material particulado na peneira de 150 µm, com a finalidade de padronização do tamanho e remoção das fibras oriundas do processo de desmoldagem e rebarbamento. O PPRFV resultante dessa etapa entrou na massa verde com a função de agente formador de poros, agente parogênico sacrificial, devido a pirólise de matéria orgânica e liberação de gás carbônico [11-13,17,18].

2.2 Caracterização dos subprodutos

Essa seção sintetiza os principais aspectos relacionados à caracterização das matérias-primas, tomando como base os métodos relatados na literatura para produção de cerâmicas porosas com incorporação de subprodutos [11-13,19-22].

Desse modo, o lodo de ETA e o particulado de PRFV foram submetidos às técnicas de: Fluorescência de Raios X, em equipamento do tipo EDX-720 da Shimadzu, empregando

atmosfera a vácuo. Difração de Raios X, em equipamento do tipo XRD-6000 da Shimadzu, sob as seguintes condições: radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de (10° a 80°). Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier, usando o modo de transmitância na faixa de $4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ com espectrômetro SHIMADZU IRAffinity-1. Análise Termogravimétrica, em equipamento de marca Shimadzu TG-51, temperatura máxima de $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, fluxo de gás de 50 mL/min , taxa de aquecimento de 10°C/min , em atmosfera de gás nitrogênio. Calorimetria Exploratória Diferencial, em equipamento de marca Shimadzu DSC-60, faixa de temperatura $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $600 \text{ }^\circ\text{C}$, taxa de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$, vazão de gás de 50 mL/min e gás nitrogênio. E Microscopia Eletrônica de Varredura, em equipamento de modelo INCAx-act, resolução de $5,9 \text{ keV}$ – *Oxford Instruments*, com ampliações de 108x, 505x, 1000x e 15000x para o particulado de PRFV e 100x, 497x, 2000x e 8000x para o lodo de ETA.

2.3 Composições para a fabricação das cerâmicas porosas

A adoção dos percentuais de particulado de PRFV e lodo de ETA, descritos na Tabela 1, seguiram estudos realizados por Dele-Afolabi et al. [23], Sousa [24], Milak [26], Salman et al. [25] e Bou-Issa, Loiola e Holanda [11], que relacionaram a boa combinação das propriedades mecânicas, físicas e de permeabilidade das cerâmicas porosas a faixa de valores estabelecidos na presente pesquisa.

Tabela 1 Percentuais de referência para este trabalho

| Agente formador de poros | Material Precursor | Percentual agente formador de poros | Percentual material precursor | Referência |
|---|--|--|--|----------------------|
| Casca do arroz e bagaço da cana-de-açúcar | Pó de alumina | (5%, 10%, 15% e 20%) | (95%, 90%, 85% e 70%) | [23] |
| Gesso e telha | Caulim | 20% | 40% | [24] |
| Lama de cal | Caulim, areia, feldspato (albita), feldspato (potássico) e areia | 21,6% | (51,2%; 6,8%; 10% e 10,4%) | [26] |
| Papel, amido de milho e serragem | Caulim | 20% | 25% | [25] |
| Lama de papel | Caulim | (10%, 20% e 30%) | (90%, 80% e 70%) | [11] |
| PPRFV | LETA e argila | (0%, 4%, 6% e 8%) | Lodo (5%, 10%, 15% e 20%) Argila (95%, 86%, 79%, 72%) | Este trabalho |

Através da Tabela 1 foi possível relacionar os tipos de subprodutos utilizados como agente formador de poros em cerâmicas porosas, material precursor e os percentuais de incorporação reportados na literatura, servindo como referência para definição dos traços da pesquisa.

A Tabela 2 apresenta os percentuais utilizados no processo de quantificação das massas de cada material, cujas composições foram denominadas de Traço de Referência (TR), Traço Experimental com 4% de PPRFV (TE04), Traço Experimental com 6% de PPRFV (TE06) e Traço Experimental com 8% de PPRFV (TE08).

Tabela 2 Traços experimentais e de referência

| Traço | Argila | LETA | PPRFV |
|--------------|---------------|-------------|--------------|
| TR | 95% | 5% | 0% |
| TE04 | 86% | 10% | 4% |
| TE06 | 79% | 15% | 6% |
| TE08 | 72% | 20% | 8% |

Nota: TR: Traço Referência. TE: Traço Experimental. LETA: Lodo de Estação de Tratamento de Água. PPRFV: Particulado de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro.

A adoção de até 10% de PPRFV deu-se pelo possível comportamento do subproduto quando submetido a altas temperaturas. Materiais de natureza polimérica termorrígida apresentam ligações cruzadas em rede entre as cadeias moleculares, de modo que sob aquecimento excessivo causará rompimento das ligações e degradação do polímero [27].

2.4 Moldagem dos corpos de prova

O procedimento de conformação das placas cerâmicas porosas com incorporação do PPRFV e do LETA seguiu metodologia similar aos estudos de Bou-Issa, Loiola e Holanda [11], Manni et al. [12], Mouiya et al. [13], Salman *et al.* [25] e Serewane Deramne et al. [28]. As etapas do processo de fabricação dos corpos de prova estão apresentadas na Figura 2.

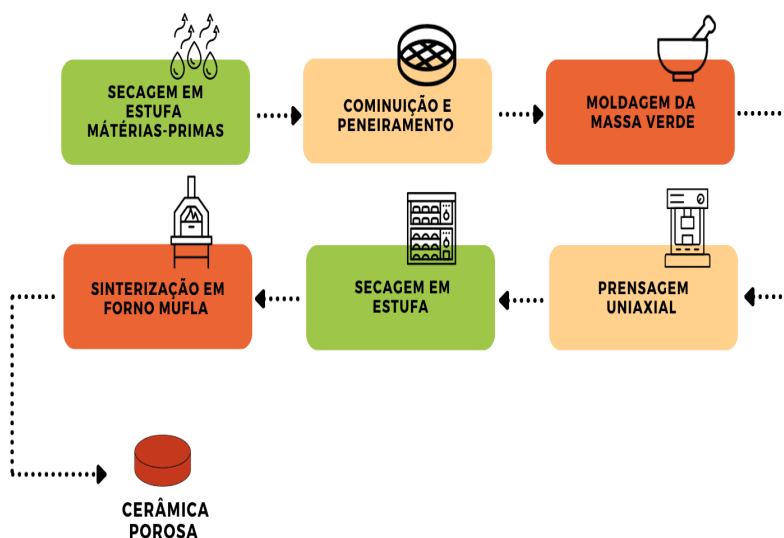


Fig. 2. Fluxograma de obtenção dos corpos de prova

A primeira etapa tratou do processo de secagem em estufa do LETA e argila, a temperatura de 110 °C por período de 24 h. A segunda contou com o processo de cominuição dos grãos *in natura*, seguido do processo de peneiramento para obtenção de partículas de granulometria de 150 μm (100 mesh) [12,13,17,23,29].

A terceira etapa foi composta pelo processo de moldagem das massas a verde realizada imediatamente após a homogeneização manual das matérias-primas, com umedecimento em torno de 8% em relação ao Traço de Referência e acréscimo de 1,6% de água nos traços seguintes. O aumento do percentual de água foi necessário para a aglutinação das matérias-primas, justificado pela possível hidrofobicidade do particulado de PRFV [18,29- 31].

Para as composições com incorporação do material particulado a massa a verde foi deixada em repouso para melhor absorção da água de amassamento. Logo após a moldagem, os corpos de prova foram conformados, através de prensagem uniaxial com pressão de 25 MPa em moldes metálicos de 50 mm de diâmetro e 8 mm de espessura, integrando a quarta etapa do fluxograma [18,28-31]. Todo processo de preparação das matérias-primas e moldagem dos corpos cerâmicos foi realizado no Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*. A Figura 3 mostra os corpos verdes após a moldagem.



Fig. 3. Corpos de prova a verde após a moldagem

Quanto à quinta e sexta etapa, versaram sobre o tratamento térmico que as cerâmicas porosas foram submetidas, iniciando pela secagem em estufa a 110 °C por 24 h, a fim de eliminar a água adsorvida pelas partículas sólidas, seguido do processo de sinterização dos corpos verdes em forno mufla com taxa de aquecimento 5 °C/min, a temperatura de 950 °C por 2h40 min [18,19,24,25,29,31]. O tratamento térmico pelo qual os corpos de prova foram submetidos foi realizado no Laboratório de Química do Centro Universitário Maurício de Nassau.

Vale salientar que o número de corpos de prova foi determinado com base nos princípios da casualização, repetição e ordenação dos tratamentos dentro das parcelas, que deve ser constituída de 20 ou mais para redução do efeito da variação acidental [10,32]. Portanto, o experimento foi instalado no Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com quatro tratamentos (0%, 4%, 6% e 8% de PPRFV) e cinco repetições, totalizando 20 unidades experimentais, cada uma constituída por dois corpos de prova. Ressalva para a quantidade de repetições adotada para a variável resposta fluxo permeado, que devido às adaptações realizadas no equipamento de Associação de Bombas, houve a necessidade de redução de cinco repetições para três, totalizando 12 parcelas.

2.5 Ensaio tecnológicos

Os ensaios de retração linear, absorção de água, porosidade aparente e fluxo permeado seguiram as normas: ASTM C210-95 - Método de teste padrão para troca de reaquecimento de tijolo isolante [33]; ASTM C20-00 - Métodos de teste padrão para porosidade aparente, absorção de água, gravidade específica aparente e densidade aparente de tijolos refratários queimados e formas por água fervente [34] e literaturas existentes sobre a temática de produção de cerâmicas porosas [11-13,20,21,35-37]. A Figura 4 apresenta a imagem dos corpos de prova sinterizados, prontos para a realização dos ensaios tecnológicos.



Fig. 4. Corpos de prova sinterizados prontos para a realização dos ensaios tecnológicos

Os ensaios físicos foram realizados no Laboratório de Química do Centro Universitário Maurício de Nassau e o de fluxo permeado no Laboratório de Hidráulica do Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Palmeira dos Índios.

O Fluxo Permeado foi determinado a partir de metodologia proposta por Ferreira [35], de modo a avaliar a viabilidade da utilização da cerâmica porosa em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração. O ensaio foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Palmeira dos Índios, em equipamento para testes de Associação de Bombas HD36 (ver Figura 5a), a fim de determinar a capacidade de transporte de água pela

cerâmica porosa contribuindo, desta forma, para a aplicação do produto técnico em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração.

A planta de funcionamento do equipamento foi adaptada em escala laboratorial para que o fluxo de água ocorresse de forma perpendicular à área efetiva da membrana de 8,04 cm². A filtração foi realizada utilizando tanque de alimentação de 342 L, bomba hidráulica, válvula de controle de pressão, manômetro, módulo permeado e béquer para captação da água. O princípio de funcionamento da planta piloto se deu através do bombeamento da água do tanque de alimentação (A) para o módulo permeado (B), no qual serviu como suporte para a cerâmica porosa. Todo procedimento de transporte do fluido pode ser observado no esquema da Figura 5b.

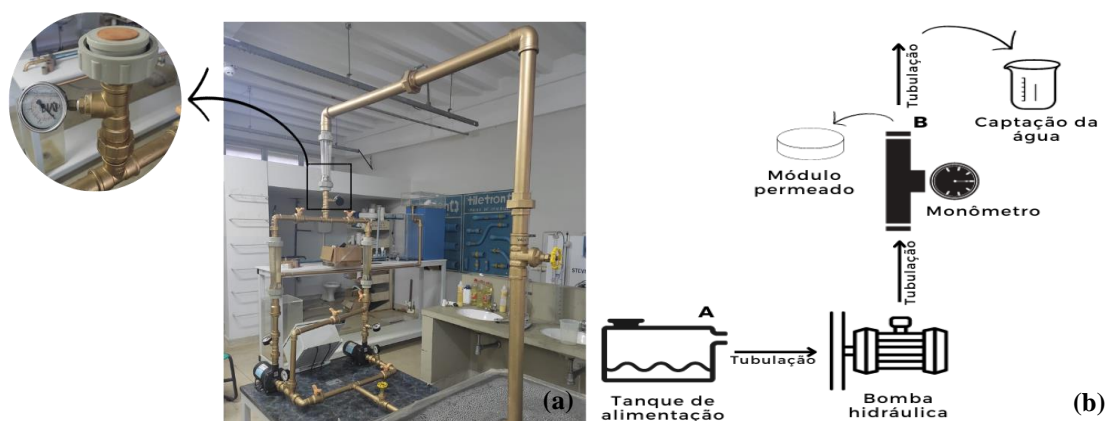


Fig. 5. (a) Equipamento de Associação de Bombas e (b) Esquema do processo de realização do ensaio de fluxo permeado

As medições de volume foram realizadas com auxílio de béquer em tempo fixo de 10 s. O volume foi medido três vezes para cada formulação e na pressão constante de 0,5 bar. Os primeiros volumes de água foram descartados para estabilização do sistema. A Equação 1 mostra o cálculo para obtenção do fluxo permeado [35]:

$$FP = \frac{V}{A \times t} \quad (1)$$

Onde:

FP= fluxo permeado;

V= volume;

A= área da cerâmica porosa;

t= tempo.

2.6 Análise dos resultados

Neste trabalho, a análise dos resultados foi dividida em duas etapas: ensaios de caracterização dos subprodutos e ensaios tecnológicos. Em ambas as etapas, os dados coletados foram representados através de tabelas, gráficos e figuras como forma de sintetizar os resultados obtidos a partir das análises e correlações com a literatura, com vistas ao desenvolvimento de produto com possibilidade de aplicação em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração.

Os dados obtidos através das variáveis respostas retração linear, absorção de água, porosidade aparente e fluxo permeado foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e regressão polinomial. Todas as análises foram realizadas com auxílio do software RBio, versão 167 [38]. A princípio foi utilizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5%. A aplicação do teste teve como objetivo a obtenção do p-valor para cada tratamento que, nesta pesquisa, está representado pelas formulações, com n repetições ou quantidade de corpos de prova ensaiados [10].

Como forma de compreender a influência do percentual de particulado de PRFV em relação às variáveis respostas (RL, AA, PA, RF e FP), realizou-se análise dos coeficientes de correlação de Pearson (R) e de determinação (R²). Os coeficientes de correlação determinam o grau de relação entre duas variáveis em valores entre -1 a 1. Quando os coeficientes apresentam valor de $R > 0,85$, a forte relação de causa e efeito entre as variáveis. O sinal de R traz, ainda, a relação de acréscimo (sinal positivo) ou redução (sinal negativo) entre os resultados de duas variáveis respostas [39]. Já o coeficiente de determinação (R²) indica a qualidade e precisão do

modelo de regressão, variando entre 0 a 1. Quanto mais próximo da unidade, melhor a qualidade do ajuste [40].

Por fim, foi utilizado o software Excel para a construção dos gráficos e tabelas da análise estatística para posterior discussão dos resultados.

3. Resultados e discussões

Nesta seção os resultados e discussões dos ensaios realizados no desenvolvimento da cerâmica porosa foram apresentados através de tabelas, gráficos e figuras.

3.1 Ensaio de caracterização dos subprodutos

3.1.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX) do PPRFV

O resultado da análise química semiquantitativa em percentual com relação à massa em óxido da amostra analisada é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 Resultado da análise química semiquantitativa da amostra de PPRFV

| Óxidos | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Tb ₄ O ₇ | K ₂ O | TiO ₂ |
|--------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| (%) | 47,79 | 36,38 | 11,12 | 2,40 | 0,94 | 0,69 | 0,43 |

De acordo com os dados obtidos a partir da análise química por fluorescência de Raios X, constatou-se a presença majoritária de óxido de cálcio (CaO), com 47,79% e de silício (SiO₂), com 36,38% na composição amostral. Como esperado, o alto teor de óxido de cálcio e dióxido de silício está relacionado com a natureza inorgânica do material, que estão presentes na formação da fibra de vidro, quando fundidas e fabricadas através de específicas quantidades de matérias-primas como areia, sílica, calcita e alumina [41].

Em estudos correlatos, com subprodutos incorporados em cerâmicas porosas, os compostos CaO, SiO₂ e Al₂O₃ também apareceram de forma significativa, como no trabalho de Milak [26] que apresentou mais de 50% de CaO na amostra de lama de cal, e o subproduto proveniente da indústria siderúrgica (escória) com cerca de 36% de CaO, 30% de SiO₂ e 20% de alumínio, apresentado no trabalho de Arkame et al. [42]. A incorporação de subprodutos que contém grande quantidade de óxido de metal alcalino e alcalino-terroso proporciona a possibilidade de redução da temperatura de sinterização, além de contribuir com o processo de formação de poros, sobretudo, pela presença do cálcio [19].

3.1.2 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX) do LETA

O resultado da análise química semiquantitativa em percentual com relação à massa em óxido da amostra analisada é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 Resultado da análise química semiquantitativa da amostra LETA

| Óxidos | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | MgO | SO ₃ |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------------------|------|-----------------|
| (%) | 52,06 | 29,83 | 8,81 | 4,25 | 1,75 | 1,44 | 1,11 | 0,31 |

A partir dos resultados de FRX do LETA, constatou-se valores mais expressivos de óxido de silício e alumínio, seguidos, em menor proporção, de óxidos como o potássio, cálcio e magnésio, que podem promover diminuição da temperatura de sinterização, principalmente, pela interação com compostos formadores de fase vítrea que, neste trabalho, despontaram com mais de 80% da amostra. Resultados semelhantes também foram observados por Vakalova e Revva [30], Gonçalves [36], Silva e Maciel [43].

Além dessas características, os óxidos de silício e alumínio apresentaram-se de forma predominante em materiais como a argila, matéria-prima principal para a fabricação de

cerâmicas porosas [12,13,28,30]. Em estudos similares, os compostos SiO_2 e Al_2O_3 apareceram em subprodutos utilizados na produção de cerâmicas porosas, como o lodo de esgoto, que apresentou 34,79% de SiO_2 e 15,62% de Al_2O_3 [17]; e as cinzas de carvão com 65,66% de SiO_2 e 20,91% de Al_2O_3 [30].

3.1.3 Análise por Difração de Raios X (DRX) do PPRFV

O difratograma de Raios X do PPRFV, evidenciado na Figura 6, não apresentou picos característicos de material cristalino, mas halo amorfo, corroborando, desta forma, com estudos correlatos que atribuiu propriedade amorfa aos subprodutos incorporados em cerâmicas porosas [44-46,22].

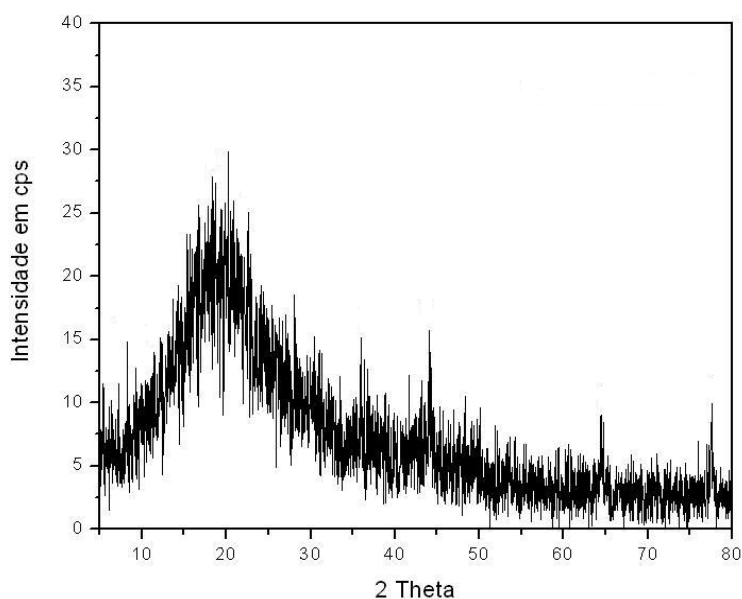


Fig. 6. Difração de Raios X do PPRFV

No trabalho desenvolvido por Leite Filho [47], não foi possível identificar a fase cristalina no PPRFV, caracterizando-o como amorfo. Segundo o autor, a presença de sílica no subproduto é responsável pela banda típica amorfa. Destaca-se que este óxido representa o segundo composto químico mais abundante detectado no material particulado desta pesquisa.

No setor da construção civil subprodutos com características amorfas como os vidros são amplamente utilizados em produtos à base de cerâmica como tijolos, telhas, vitrocerâmicas e materiais de filtração, melhorando o desempenho físico, térmico e mecânico do produto final [44,48,49,22]. Logo, a detecção de halo amorfo no PPRFV contribuiu para a obtenção de cerâmicas porosas mais estáveis termicamente e com propriedades físicas similares às reportadas na literatura sobre a produção de cerâmicas porosas.

Além disso, o teor amorfo permite, ainda, a utilização do passivo em matrizes cimentícias, como substituto do cimento, já que estes materiais possuem capacidade de interagir com o hidróxido de cálcio, produzido durante a hidratação do cimento, fabricando quantidades extras de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsáveis por garantir microestrutura mais densa no decorrer do tempo, bem como, ganho de resistência mecânica [50].

3.1.4 Análise por Difração de Raios X (DRX) do LETA

A Figura 7 mostra o difratograma de Raios X do LETA com pico característico do óxido de silício (SiO_2), fase cristalina do quartzo.

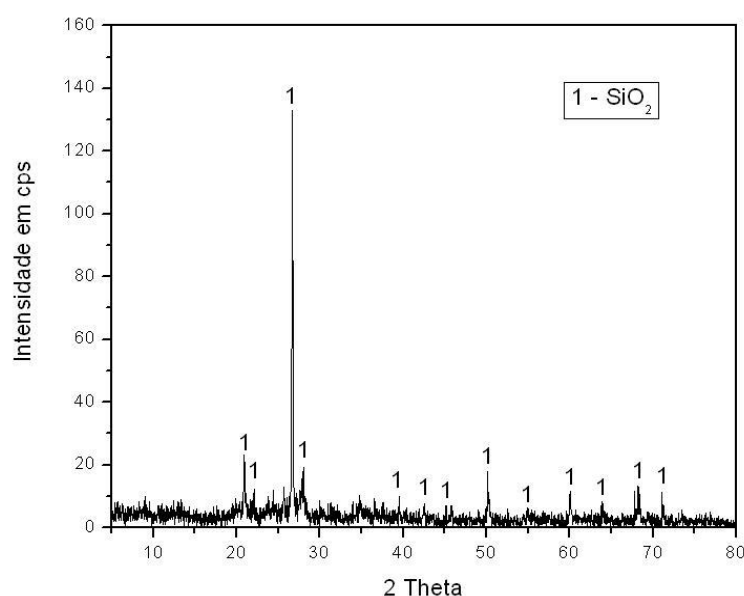


Fig. 7. Difração de Raios X do LETA

Em trabalhos similares, a presença do óxido de silício na análise química foi relacionada à forma cristalina do mineral quartzo, estando este estudo em consonância com essa análise, visto que mais de 50% da amostra é composta por sílica [43,51,52]. A detecção da fase majoritária do quartzo no LETA pode ser visualizada em materiais como as argilas, podendo contribuir para as reações de vitrificação em formulações cerâmicas [46,53]. Essa característica implicou na obtenção de cerâmicas porosas mais densas e com menores distorções, após processo de sinterização.

3.1.5 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) do PPRFV

As bandas de absorção do PPRFV podem ser observadas na Figura 8. O primeiro espectro de FTIR situa-se entre 3200 e 3600 cm^{-1} , o que corresponde ao modo de estiramento dos grupos hidroxilas na resina epóxi. O segundo grupo de bandas detectado em 2948 e 2842 cm^{-1} pode ser atribuído à vibração de estiramento do grupo C–H do epóxi. Para o terceiro grupo, abaixo de 2000 cm^{-1} , de bandas de absorção próximas de 1718 cm^{-1} são características da vibração de estiramento do grupo C=O (éster carbonil) [54,55]

A existência do pico em 1450 cm^{-1} indica a presença do grupo alceno. Os espectros ésteres das bandas entre 1050 e 1300 cm^{-1} correspondem à vibração de alongamento C–O–C. As bandas 1036,49 cm^{-1} e 1010,82 cm^{-1} são atribuídas a vibrações de estiramento do álcool C–OH. O pico em torno de 1000 cm^{-1} sinaliza a presença de silicatos existentes nas fibras de vidro [54-56].

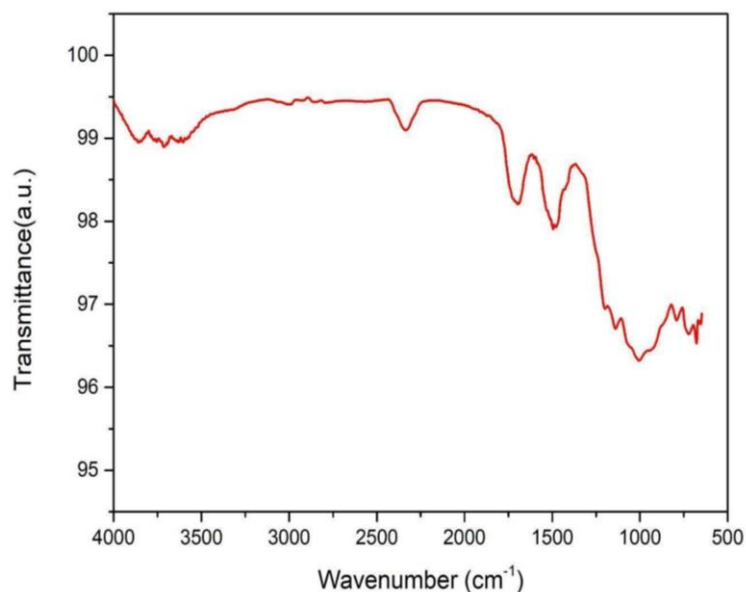


Fig. 8. Espectros de FTIR do PPRFV

Ao analisar espectros de amostras de PRFV, Pessanha et al. [54] e Sun [55] identificaram grupos funcionais característicos que ocorrem na estrutura química da resina epóxi, semelhantes aos espectros obtidos neste trabalho, indicando a possibilidade da resina do material utilizado pela indústria de referência ser do tipo bisfenol A.

3.1.6 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) do LETA

A Figura 9 apresenta os espectros no infravermelho do LETA. A banda na região de 3400 cm⁻¹ pode ser atribuída ao grupo O-H livre presente na água. A existência do pico em 1000 cm⁻¹ indica a presença de aluminossilicatos, atribuída a alta porcentagem de SiO₂ (52,06%) e Al₂O₃ (29,83%) quantificada na análise de FRX [57,58].

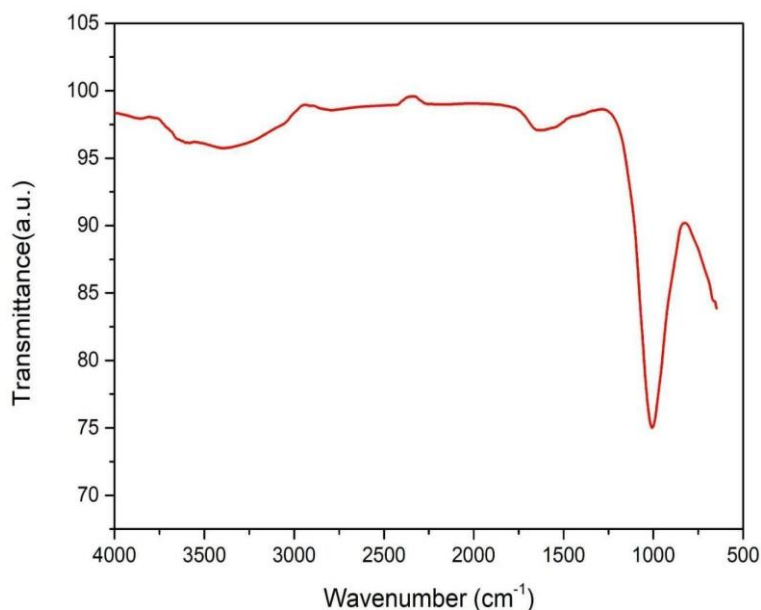


Fig. 9. Espectros de FTIR do LETA

Análise semelhante foi realizada no trabalho de Clausi e Pinto [57], que avaliaram a viabilidade de utilização do LETA como matéria-prima para a produção de ligantes ativados por álcalis. Os espectros das amostras de lodo obtidos das duas unidades fabris apresentaram bandas de absorção correspondentes com a do presente estudo, revelando o potencial do LETA como precursor em materiais cerâmicos, tendo em vista a presença de minerais similares aos encontrados na argila.

3.1.7 Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial (TG/DTG/DSC) do PPRFV

A Figura 10 mostra a curva termogravimétrica (TG) do PPRFV em conjunto com a sua derivada (DTG). Infere-se da curva da TG que a maior perda de massa ocorre entre 390 °C e 500 °C, com percentual em torno de 40,33%, restando 23,35% de resíduo que continua a se decompor com o aumento da temperatura.

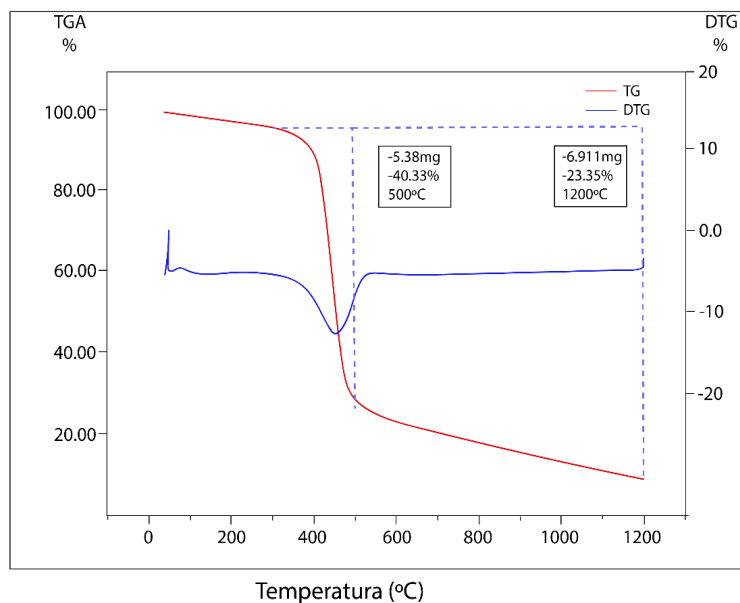


Fig. 10. Curva Termogravimétrica e Derivada (TG/DTG) do PPRFV

A grande perda mássica detectada neste trabalho pode ser justificada pela faixa de materiais voláteis presentes na matriz polimérica (resina poliéster), na qual a fibra de vidro é incorporada. A faixa de teor de sólidos presentes nestes solventes orgânicos variam entre 64%-68%, segundo dados dos fabricantes das resinas [59].

A curva da termogravimetria derivada (DTG) confirma as análises observadas da TG com a maior decomposição térmica do material na temperatura entre 390 °C e 500 °C. Possível fenômeno físico de cristalização pode ter ocorrido na temperatura de 1200 °C, detectado pelo pico da derivada da TG, confirmando a característica amorfa do PRFV observada na difração de Raios X.

Em estudos correlatos foi possível observar similaridade entre as curvas da TG, com percentual de perda mássica em torno de 4% até a temperatura de 300 °C. Essa perda foi atribuída pelos autores a degradação do estireno e água livre do material. A partir desta temperatura foi observado o maior evento térmico de degradação da resina, que alcançou 20% até a temperatura de 500 °C [47,59].

Comportamento inesperado acima de 500 °C foi observado no presente trabalho, visto que a decomposição do particulado continuou acontecendo até a temperatura de 1200 °C (limite do aparelho). Em outros estudos a estabilização da perda de massa aconteceu a partir da temperatura de 500 °C, de modo que o resíduo obtido seria proveniente da não degradabilidade da fibra de vidro [47,59].

A Figura 11 mostra a curva de Calorimetria Diferencial de Varredura do PPRFV.

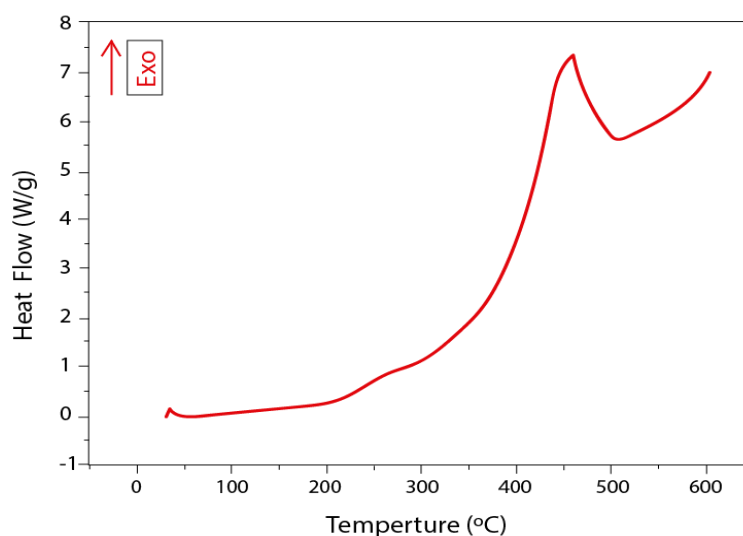


Fig. 11. Curva de Calorimetria Exploratória Diferencial do PPRFV

O primeiro pico exotérmico observado em torno de 450 °C pode ser atribuído a decomposição da resina, estando esta análise em correspondência com a perda de massa das curvas TG/DTG. A temperatura de transição vítrea do subproduto aparece, aproximadamente, em 525 °C, o que indica mudança do estado físico do PPRFV para temperaturas superiores à sinalizada neste trabalho [22].

Trabalhos como de Zheng et al. [60] e Zhou et al. [22] apontaram temperaturas de transição vítrea para amostras de vidro, a partir de 695 °C e 525 °C, respectivamente. Segundo os autores estas temperaturas marcam a transição do estado vítreo para o estado emborrachado do material. Além disso, possível processo exotérmico a temperatura de 600 °C pode ser atribuído ao processo de desvitrificação do estado vítreo. Pela limitação do aparelho não foi

possível observar evento endotérmico nas faixas de temperaturas de 883 °C - 1100 °C, atribuído à transformação gradual do estado emborrachado para o estado de fluxo viscoso. Contudo, pode-se inferir com base na literatura que a temperatura de sinterização das amostras pode ser selecionada entre a temperatura de transição vítrea (~525 °C) e as faixas de 883 °C - 1100 °C [22,60].

3.1.8 Análise Termogravimétrica, Derivada e Diferencial (TG/DTG/DSC) do LETA

As curvas TG/DTG do LETA estão apresentadas na Figura 12. As análises da curva TG mostram dois eventos de perda de massa: o primeiro até a temperatura de 118 °C com perda média de 4,17% e o segundo, entre as temperaturas de 118 °C e 1200 °C, com perda mássica de aproximadamente 10,66%.

Godoy et al. [61] encontraram valor de perda de massa igual a 16,7%; Ruviaro et al. [62] descobriram perda mássica em torno de 14%; Silva e Maciel [43] detectaram perda de massa total de 18,24%, ao tempo que, Buselatto et al. [51] e Oliveira, Tenório e Marques [52], determinaram para o LETA do município de Gravataí-RS e Palmeira dos Índios-AL, perda de massa de 31,7% e 42%, respectivamente.

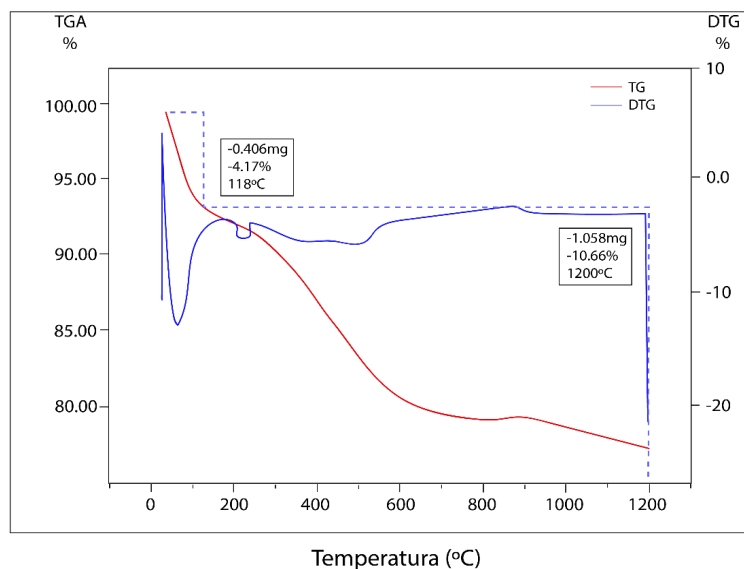


Fig. 12. Curva Termogravimétrica e Derivada (TG/DTG) do LETA

A menor ou maior capacidade de perda mássica do subproduto, justifica-se pelas características distintas dos locais de captação da água bruta e tratamento aplicado, que pode se dá pelo uso de diferentes produtos químicos, principalmente, na etapa de floculação e coagulação [51]. A Figura 13 mostra a curva DSC do LETA, correspondente com a análise da TG da amostra de LETA.

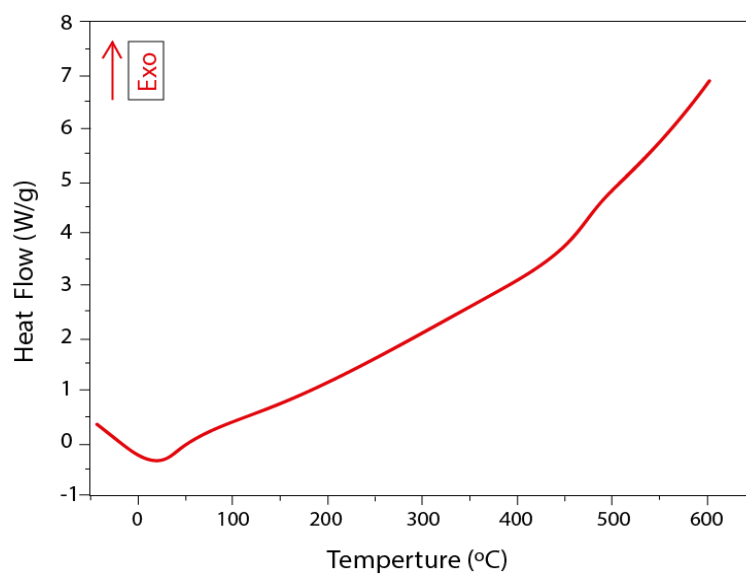


Fig. 13. Curva de calorimetria exploratória diferencial do LETA

O primeiro pico endotérmico observado em torno de 118 °C pode ser associado à desidratação, com perda de água livre e/ou fisicamente adsorvida. A decomposição da matéria orgânica, decorrente da volatilização de compostos orgânicos e de fases baseadas no silício, ocorre entre as temperaturas de 200 °C e 400 °C (pico exotérmico), sendo pouco perceptível na curva DSC; entretanto, com correspondência com a derivada da TG e o estudo de Ruviaro et al. [62]. A faixa de temperatura entre 400 °C e 600 °C pode estar relacionada à transição de fase dos minerais argilosos, sendo responsável pela maior perda de massa no presente estudo e em trabalhos como de Buselatto et al. [51], Godoy et al. [61], Oliveira, Tenório e Marques [52] e Ruviaro et al. [62].

3.1.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do PPRFV

A Figura 14 mostra as micrografias obtidas do PRFV com magnificação de 108x (Figura 14a), 505x (Figura 14b), 1000x (Figura 14c) e 15000x (Figura 14d). Morfologicamente o particulado apresentou-se na forma de bastonetes alongados rugosos e com grânulos de configuração angulosa, de diferentes dimensões e orientação randômica. Observações similares foram constatadas no trabalho de Colling et al. [62], que buscaram melhorar a capacidade mecânica do concreto produzido com PRFV, de modo a direcionar o compósito para a produção de pavimento intertravado.

Com a magnificação de 505x (Figura 14b) foi possível confirmar as observações destacadas anteriormente quanto a não uniformidade do PPRFV. Esta característica pode possibilitar novas formas de arranjos e reforço estrutural em matrizes de composições diversas, contribuindo para o aumento da qualidade do produto final [64].

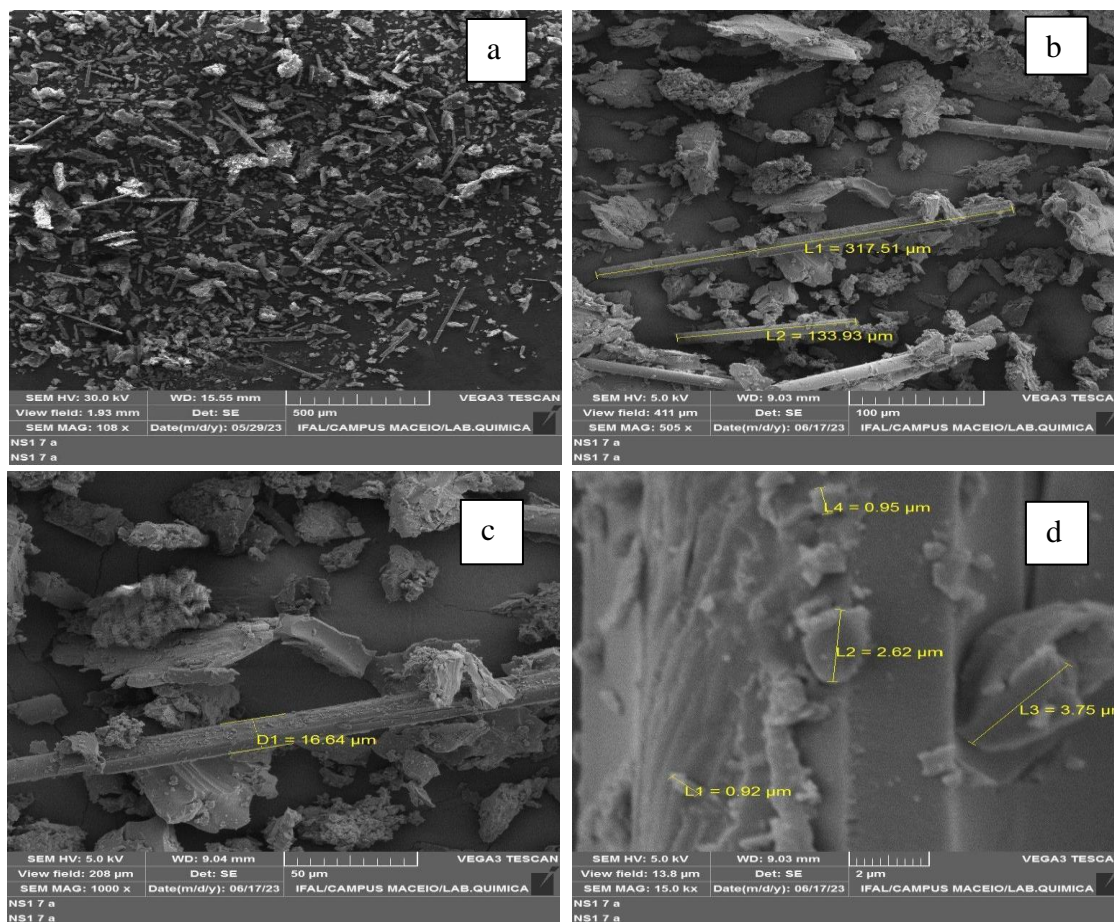


Fig. 14. Micrografias obtidas por MEV do PPRFV com magnificações de (a) 108x, (b) 550x, (c) 1000x e (d) 15000x

Através da realização do MEV os comprimentos dos bastonetes foram determinados e apresentam dimensões na ordem de $133,93 \mu\text{m}$ e $317,51 \mu\text{m}$ (Figura 14b). Apesar da falta de padronização dos tamanhos, a micrografia obtida demonstra a existência de filamentos fibrosos aderidos a partículas de textura rugosa, que podem ser associadas a resinas ou outros compostos solúveis [47]. A Figura 14c e 14d ratificam esses apontamentos, através da magnificação de 1000x e 15000x realizada na superfície do subproduto de PRFV.

O diâmetro médio das fibras foi determinado e encontra-se na ordem de grandeza de $16,64 \mu\text{m}$. Em estudo correlato os autores Colling et al. [63] determinaram diâmetros de aproximadamente $25 \mu\text{m}$, estimados para a escala descrita no MEV. Na fabricação de cerâmicas

porosas a presença de partículas menores contribui para a não formação de poros de maiores dimensões, que venham a surgir após o processo de sinterização. Na Figura 14d foi possível observar com mais clareza a superfície das fibras aderidas com partículas de dimensões variadas de $0,92 \mu\text{m}$, $0,95 \mu\text{m}$, $2,62 \mu\text{m}$ e $3,75 \mu\text{m}$, demonstrando a capacidade de combinação com materiais de características distintas como, por exemplo, matrizes cimentícias, poliméricas e argilosas [63,65].

3.1.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do LETA

A Figura 15 apresenta as micrografias obtidas do LETA com magnificação de 100x (Figura 15a), 497x (Figura 15b), 2000x (Figura 15c) e 8000x (Figura 15d).

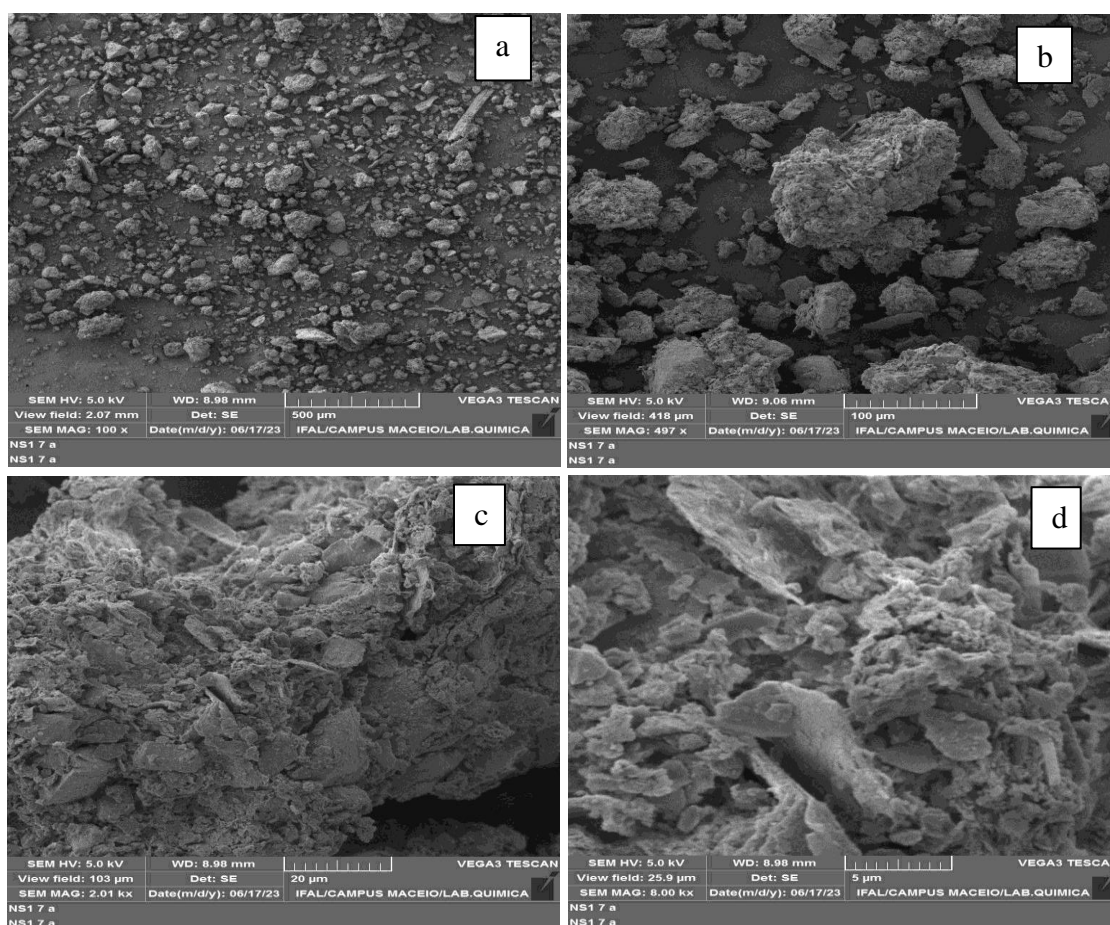


Fig. 15. MEV do lodo de ETA para as magnificações de (a) 100x, (b) 497x, (c) 2000x e (d) 8000x

Morfologicamente o subproduto apresenta-se na forma de pequenos aglomerados constituídos por mesoporos. Características semelhantes foram relatadas no trabalho de Godoy et al. [61], que investigaram o potencial de utilização do LETA calcinado para desenvolvimento de material cimentício suplementar. Pode-se observar que o lodo *in natura*, do estudo de Godoy et al. [61], possui partículas de diferentes tamanhos e formatos, que quando calcinados retornam micrografias similares a deste trabalho, evidenciadas na Figura 15c e 15d.

Na Figura 15c partículas de granulometria fina ficam aderidas à superfície de partículas maiores, formando pequenos espaços vazios, característicos de materiais com alta porosidade. Além disso, observa-se partículas de texturas rugosas, formando conglomerados em formato de escamas ou lascas. Godoy et al. [61] apresentaram partículas de lodo de ETA calcinadas, em apenas alguns décimos de segundo (calcinação flash), de formato achatado e semelhante a uma folha, assim como, na micrografia da Figura 15d. Entretanto, com adoção de diferentes temperaturas de calcinação, entre 650 °C - 800 °C, características mais específicas do processo de sinterização levaram a distinção entre o lodo do presente trabalho e do subproduto investigado pelos referidos autores.

As análises do MEV obtidas neste estudo confirmam a presença de matéria orgânica e inorgânica no LETA, visto que o comportamento observado nas micrografias é característico desse tipo de amostra. Explicação análoga foi reportada no trabalho de Silva e Maciel [43], que avaliaram o uso do lodo de ETA do município de Sacavém, São Luís-MA, como carga em argila para produção de blocos cerâmicos.

3.2 Ensaios tecnológicos

3.2.1 Retração Linear (RL)

A Figura 16 mostra os valores médios de variação dimensional dos corpos de prova, antes e após o processo de queima.

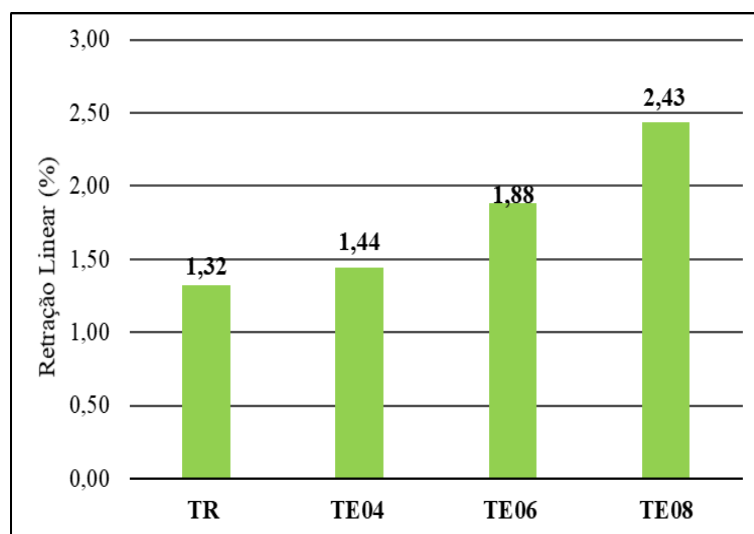


Fig. 16. Retração linear em relação ao traço de referência

Observou-se a partir da Figura 16 que a substituição da argila por particulado de PRFV (PPRFV) e lodo de ETA (LETA), aumentou os níveis de retração linear. Em termos comparativos a introdução dos subprodutos acarretou aumento, em relação ao traço de referência, de 9,06%, 42,30% e 83,84% para os traços experimentais TE04, TE06 e TE08, respectivamente. Resultados semelhantes na fabricação de cerâmicas porosas foram relatados por Bou-Issa, Loiola e Holanda [11], com aumento em torno de 50% para a composição com 30% de lama de papel e temperatura de 1000°C; Ferreira [35] na composição com até 10% de serragem de madeira obteve aumento de 20% em relação ao traço base.

O aumento dos índices de retração linear pode ser atribuído à formação da fase líquida durante o processo de sinterização dos corpos cerâmicos. Esta análise possui correspondência com os resultados de fluorescência de Raios X dos subprodutos de PRFV e lodo de ETA, visto a interação dos óxidos de cálcio, magnésio e potássio, com compostos formadores de fase vítrea, sílica e alumínio [36].

3.2.2 Absorção de Água (AA)

A Figura 17 apresenta os valores médios de absorção de água dos corpos de prova para o traço referência e os traços experimentais com incorporação do PPRFV e LETA.

Verificou-se que a incorporação dos subprodutos nas composições cerâmicas causou crescimento nos valores de absorção de água. Em relação ao traço de referência os aumentos foram de 25,68%, 34,19% e 47,36%, para os traços experimentais TE04, TE06 e TE08, respectivamente. Este aumento pode ser atribuído à capacidade de formação de poros por parte do agente parogênico sacrificial, que promove liberação de CO₂ durante o processo de sinterização das peças cerâmicas [66,31].

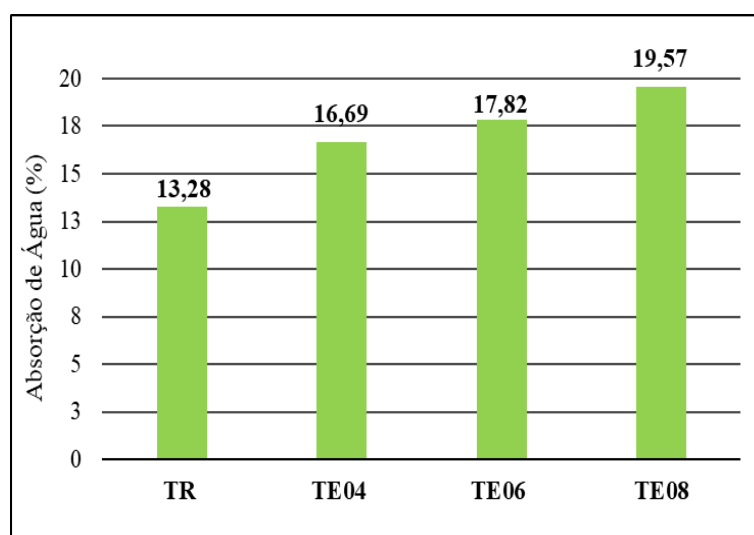


Fig. 17. Absorção de água em relação ao traço de referência

O mecanismo de formação de poros detectados pelo aumento dos níveis médios de absorção de água possui relação com o tamanho e formato do PPRFV, confirmado nas micrografias do subproduto que apresentaram bastonetes na ordem de grandeza de 133,93 μm e 317,51 μm , aderidos a partículas rugosas, associadas a impregnação das fibras em matriz polimérica (resina). Esse apontamento possui correspondência com a maior perda de massa (40,33%), observada na curva da TG e ratificada pelo pico exotérmico da curva de DSC, na

temperatura de 450 °C. É em torno desta temperatura que a resina se decompõe formando poros abundantes [31].

De modo similar, os resultados de Zhu et al. [31] também apresentaram aumento de absorção de água nas cerâmicas porosas com maiores teores de substituição de argila por lodo de tratamento de água residual, chegando a aproximadamente 18% na temperatura de sinterização de 950 °C e com 8% de subproduto. Para temperaturas superiores, 1000 °C e 1050 °C, os autores revelaram valores médios máximos em torno de 15% e 16%, respectivamente, demonstrando que a temperatura adotada na pesquisa foi a mais indicada para a não densificação completa da cerâmica porosa.

Vale ressaltar que não há padrão normativo para os índices físicos de cerâmicas porosas, sendo necessário utilizar-se de literatura pertinente na discussão dos resultados. Além disso, é importante frisar o interesse desta pesquisa no crescimento dos níveis de absorção de água, visto a possibilidade de aumento da porosidade e permeabilidade dos corpos cerâmicos, sem prejuízo das propriedades mecânicas.

3.2.3 Porosidade Aparente (PA)

A identificação dos percentuais de porosidade aparente dos corpos de prova estão evidenciados na Figura 18, na qual apresenta valores médios obtidos a partir do referido ensaio.

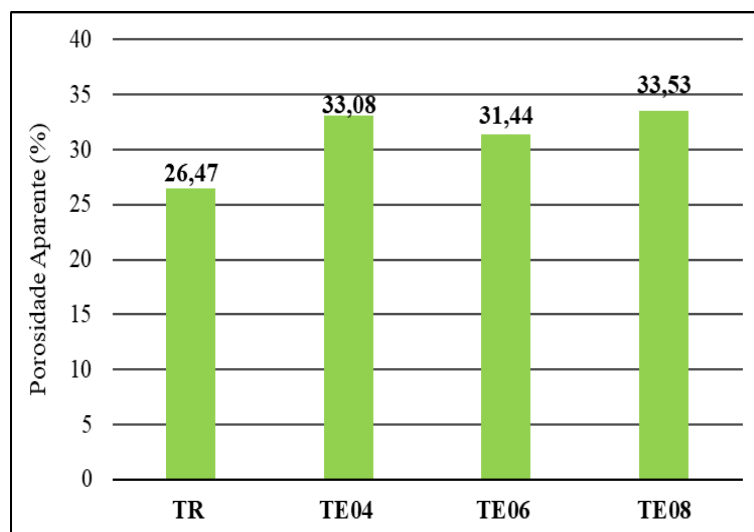


Fig. 18. Porosidade aparente em relação ao traço de referência

Como esperado o aumento da absorção de água acarretou crescimento na porosidade aparente dos corpos de prova, que está relacionado a decomposição dos subprodutos, sobretudo, do PPRFV, visto a presença majoritária do óxido de cálcio (47,48%) que participa em conjunto com os elementos fundentes da formação de novas fases de cristais precipitados na superfície dos poros [31,67]. Ao comparar com o traço de referência foi possível detectar, a partir da Figura 44, aumento de 24,97%, 18,77% e 26,67% para os traços experimentais TE04, TE06 e TE08, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados nos estudos de Kremzer [68], Mouiya et al. [13] e Serewane Deramne et al. [28].

No trabalho de Kremzer [68], cerâmicas porosas produzidas com cinzas volantes e grânulos de borracha de pneus alcançaram valores de porosidade na faixa de 13,61%-35,12%. Entretanto, a composição com escória de fundo e grânulos de borracha apresentou maior porosidade, superior a 50%. Mouiya et al. [13] obtiveram aumento da porosidade aparente de 15,93% para 40,33% na composição com até 20% de casca de banana. Serewane Deramne et al. [28] revelaram porosidade >35% no desenvolvimento de cerâmicas porosas com casca de banana e argila local.

3.2.4 Fluxo Permeado (FP)

Os resultados de fluxo permeado da cerâmica porosa estão apresentados na Figura 19, revelando aumento da permeabilidade na medida que os subprodutos foram sendo incorporados.

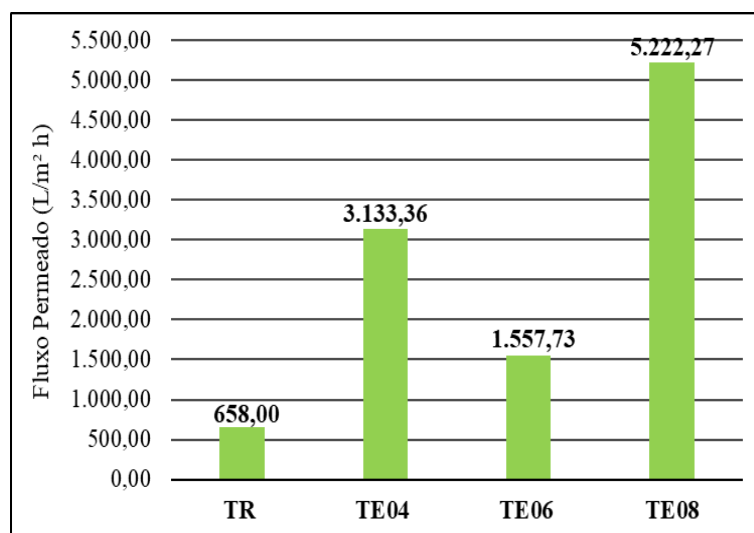


Fig. 19. Fluxo permeado em relação ao traço de referência

O desempenho da cerâmica porosa na obtenção do permeado, sobretudo, na composição com maior teor de PPRFV e LETA, confirmou a dependência do fluxo com as técnicas de caracterização dos subprodutos e ensaios tecnológicos pelos quais os corpos cerâmicos foram submetidos.

Constatou-se relação positiva entre o aumento do fluxo de água e a adição do PPRFV e LETA. Os valores mostraram-se compatíveis com a literatura pertinente sobre o tema de produção de suportes cerâmicos porosos submetidos à pressão de 0,5 bar - 2,0 bar. No trabalho de Mouiya et al. [13] o desenvolvimento de membranas cerâmicas a base de argila e cascas de banana revelou valores de permeabilidade entre $550 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ e $1150 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, enquanto que no estudo de Gonçalves [36], a utilização de subprodutos de alumina em massas argilosas promoveu valor de fluxo permeado de $2000 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

Não foi possível observar nestes trabalhos a influência do teor de agentes parogênicos no fluxo de água das membranas cerâmicas, visto que as análises foram realizadas com base na variação da pressão e tempo. No entanto, para as condições de temperatura de sinterização de 1100 °C, próxima à utilizada neste trabalho, e pressão de 0,5 bar foi possível observar resultados que excedem os valores obtidos pelos autores Mouiya et al. [13] e Gonçalves [36].

Vale frisar, que o decréscimo observado no traço experimental com 6% de PPRFV pode ser atribuído à dificuldade encontrada em posicionar o corpo de prova no módulo permeado (suporte), visto o seu maior diâmetro em relação aos demais, acarretando possíveis erros de medição. Contudo, esta intercorrência não descaracteriza os resultados aqui encontrados, principalmente, quando comparados com os achados da literatura.

3.2.5 Tratamento Estatístico

A Tabela 5 mostra as correlações existentes entre os resultados das variáveis respostas com o incremento dos níveis de PPRFV ajustados por meio de equações de regressão aplicadas na Anova.

Tabela 5 Correlações de Pearson entre as variáveis respostas e equações de regressão

| Variáveis Respostas | Retração linear | Absorção de água | Porosidade Aparente | Equação | | | | R ² |
|---------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------------------|------|------|------|----------------|
| | | | | TR | TE04 | TE06 | TE08 | |
| Retração linear | - | - | 0,111 | $\hat{Y} = 1,1717 + 0,1333x$ ** | | | | 0,82 |
| Absorção de água | 0,592** | - | 0,612** | $\hat{Y} = 13,349 + 0,7755x$ ** | | | | 0,99 |
| Porosidade Aparente | - | - | - | $\hat{Y} = 27,416 + 0,8252x$ ** | | | | 0,76 |

| | | | | | |
|-----------------------------|---|---|---|--|------|
| ¹ Fluxo Permeado | - | - | - | $\hat{Y} = 48,569x^2 + 84,95x + 852,07$ ** | 0,65 |
|-----------------------------|---|---|---|--|------|

** : significativo a 1% pelo teste F. ¹ Não foi realizada correlação de Pearson para a variável.

Os resultados para os coeficientes de determinação (R^2) dos ensaios de AA, PA e RL demonstraram a eficiência do modelo de regressão linear adotado, com nível de significância (P-valor) a 1%. Deste modo, através do teste F foi possível conhecer as alterações que a incorporação dos teores de PPRFV poderiam promover sobre os valores obtidos pelas variáveis respostas, confirmando que houve diferença significativa entre os traços experimentais e o traço de referência, sendo esse resultado o que se buscava obter neste trabalho.

Quanto aos resultados do coeficiente de correlação (R) observou-se relações positivas entre as variáveis absorção de água e porosidade aparente, absorção de água e retração linear, com nível de significância ($P < 0,01$). Estas relações indicam que o aumento da absorção de água promove crescimento nas porcentagens de porosidade aparente e retração linear; no entanto, baixos valores de $R < 0,85$, sinalizam correlações fracas entre as variáveis. Milak [26] mostrou através de inferência estatística relação positiva entre o aumento da porosidade do material com incremento de teor de fibras poliméricas. O nível de significância ($P < 0,05$) representou a confiança de 95% da análise ser verdadeira, estando este resultado em conformidade com os valores encontrados neste estudo.

Portanto, o tratamento estatístico realizado contribuiu na análise dos resultados tecnológicos, no que diz respeito à confiabilidade dos dados e à relação estabelecida entre as variáveis resposta.

4. Conclusões

Diante do que foi exposto, evidencia-se que o particulado de PRFV e o lodo de ETA apresentaram características favoráveis para a produção de cerâmicas porosas à base de argila

vermelha, com materiais e processos característicos da indústria da cerâmica tradicional, denotando possibilidades de configuração do ciclo técnico, a partir da reciclagem externa dos passivos ambientais para a produção de membranas de filtração em Estações Compactas de Tratamento de Água.

A Análise de Fluorescência de Raios X do PPRFV constatou a presença majoritária de óxido de cálcio (47,79%) e dióxido de silício (36,38%). Quanto a análise química do LETA, esta apresentou valores mais expressivos de sílica (52,06%) e alumínio (29,83%), seguidos, em menor proporção, de óxidos como o potássio (4,25%), cálcio (1,75%) e magnésio (1,11%), que podem promover diminuição da temperatura de sinterização. Esses resultados estão em consonância com os picos do difratograma de Raios X, que apresentaram bandas típicas amorfas para o PPRFV e fase cristalina quartzo para o LETA.

Os espectros de infravermelho da amostra de PRFV identificaram grupos funcionais característicos que ocorrem na estrutura química da resina epóxi, indicando a possibilidade da resina do material utilizado pela indústria de referência ser do tipo bisfenol A. Enquanto, as bandas de absorção do LETA revelaram a presença de minerais similares aos encontrados na argila, permitindo a utilização do subproduto como precursor em materiais cerâmicos.

A curva Termogravimétrica (TG) do PPRFV mostrou perda mássica de 40,33%, entre as temperaturas de 390 °C e 500 °C, restando 23,35% de resíduo que continua a se decompor até a temperatura limite de 1200 °C. O pico exotérmico observado na curva de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), na temperatura em torno de 450 °C, confirma a perda de massa da TG. Além disso, foi possível inferir a partir da temperatura de transição vítrea (~525 °C) e as faixas de 883 °C - 1100 °C, a temperatura de sinterização das amostras desse estudo. Quanto à TG do LETA, esta correspondeu a perda mássica total de 14,83%, tendo como principal evento térmico na curva de DSC a faixa de temperatura entre 400 °C e 600 °C, associada à transição de fase dos minerais argilosos.

A Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície do PPRFV demonstrou a não padronização dos tamanhos, assim como a existência de filamentos fibrosos aderidos a partículas de textura rugosa, que podem ser associadas a resinas ou outros compostos solúveis. As micrografias do LETA detectaram a predominância de partículas de diferentes granulometrias e de texturas rugosas, que formam conglomerados em formato de escamas ou lascas, característico de materiais com elevada carga orgânica e inorgânica.

No que diz respeito aos resultados dos ensaios tecnológicos, os traços experimentais, com substituição do PPRFV e LETA, apresentaram crescimento nos valores médios com nível de significância a 1% em relação ao traço de referência. O traço com 8% de PPRFV e 20% LETA despontou como o mais promissor, demonstrando aumento, em relação ao traço referência, de 83,84%, 47,36% e 26,67% nos resultados de Retração Linear, Absorção de Água e Porosidade Aparente, respectivamente, se mantendo na faixa de valores apresentados na literatura.

Os dados de Fluxo Permeado comprovaram o aumento observado nos ensaios físicos, alcançando valor de 5.222,27 L/m².h para o traço experimental 8% de PPRFV e 20% de LETA. Os valores de fluxo mostraram-se compatíveis com a literatura pertinente sobre o tema de produção de suportes cerâmicos porosos submetidos a pressão de 0,5 bar - 2,0 bar. A alta permeabilidade, resultante dos maiores índices de absorção de água e porosidade aparente, possuem relação com os elementos fundentes presentes nos subprodutos, que interagem com os compostos formadores de fase vítrea.

Por fim, esse estudo demonstrou-se importante no desenvolvimento de material compósito de interesse ambiental com vistas à reintrodução do PPRFV e LETA no sistema de tratamento de água na etapa de filtração, contribuindo, assim, para a mitigação dos impactos gerados pela destinação inadequada dos subprodutos supracitados.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas Campus Palmeira dos Índios. Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas Campus Marechal Deodoro. E ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas Campus Maceió.

Referências

- [1] Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2022.
- [2] T.S. Silva, M.M.N. Marques, S.G. El-Deir, Desmaterialização dos resíduos sólidos: estratégias para a sustentabilidade. Edufrpe e Gampe (ed), Recife, Pernambuco, 2020.
- [3] Associação Brasileira da Indústria do Plástico - ABIPLAST. As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil, 2022.
- [4] C.Le Guern. Plastic Pollution. 2019. Disponível em: <https://plastic-pollution.org/>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- [5] C.P. Sampaio, et al. Design para a sustentabilidade: dimensão ambiental. Curitiba, PR: Insight, 2018. 183 p. (Design para a sustentabilidade; 1).
- [6] T. Ahmad, K. Ahmad, M. Alam. Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept. Journal of Cleaner Production, v. 124, p. 1-13, 2016.
- [7] D. Carvalho Urashima, et al. Sistema de confinamento de resíduos: Estudo de caso lodo de ETA. Ponta Grossa- PR, 2021. Coleção desafios das engenharias: engenharia sanitária 2. Editora Atena. p. 1-388-416.
- [8] A.L.Q.R.S. Rapôso. Modelo de Sistema de Produto-Serviço para Estofado personalizado: sustentabilidade ambiental e inovação em modelo de negócio para Estofadora do APL de Móveis do Agreste (Alagoas, Brasil). Tese (doutorado) - Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador: UFBA, 2014.
- [9] S. Mestre, et al. Low-cost ceramic membranes: A research opportunity for industrial application. Journal of the European Ceramic Society, v. 39, n. 12, p. 3392-3407, 2019.
- [10] J.L.B. Carvalho. Análise do desempenho de argamassa de assentamento com substituição parcial do agregado miúdo de embalagens cartonadas trituradas. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Alagoas, IFAL, Marechal Deodoro – AL, 2022.
- [11] R.A. Bou-Issa, R.L. Loiola, J.N.F. Holanda. Reuse of paper sludge waste in the production of low-cost porous ceramic support. Cerâmica, v. 66, p. 106-113, 2020.
- [12] A. Manni, et al. Valorization of coffee waste with Moroccan clay to produce a porous red ceramics (class BIII). Cerâmica y Vidrio, v. 58, p. 211-220, 2019.
- [13] M. Mouiya, et al. Fabrication and characterization of a ceramic membrane from clay and banana peel powder: Application to industrial wastewater treatment. Materials Chemistry and Physics, v. 227, p. 291-301, 2019.

- [14] M.T. Kayalar, et al. Fabrication of porous anorthite ceramics using eggshell waste as a calcium source and expanded polystyrene granules. *Politeknik Dergisi*, p. 1-1, 2022.
- [15] J.W. Creswell, J.D. Creswell. Projeto de pesquisa: métodos qualitativos, quantitativos e misto Grupo a Educação S.A., São Paulo, São Paulo, 2021.
- [16] J.D.B. Almeida. Análise Da Substituição do Agregado por Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo na Produção de Concreto Permeável. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, Campus Marechal Deodoro, 2022.
- [17] L. Yu, et al. Structure evolution, properties and synthesis mechanism of ultra-lightweight eco-friendly ceramics prepared from kaolin clay and sewage sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 1, p. 109061, 2023.
- [18] G.B. Milak, et al. Efeito da temperatura de sinterização e da adição de fibras poliméricas em cerâmica porosa obtida a partir de resíduos do processo Kraft. *Cerâmica*, v. 65, p. 416-425, 2019. DOI <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752685>.
- [19] L. Hao, et al. Preparation and characterization of porous ceramics with low-grade diatomite and oyster shell. *Materials Chemistry and Physics*, v. 235, p. 121741, 2019.
- [20] N. Malik, V.K. Bulasara, S. Basu. Preparation of novel porous ceramic microfiltration membranes from fly ash, kaolin and dolomite mixtures. *Ceramics International*, v. 46, n. 5, p. 6889-6898, 2020.
- [21] Y. Zhang, et al. Microstructure and mechanical properties of high strength porous ceramics with high sewage sludge content. *Journal of Cleaner Production*, v. 380, p. 135084, 2022.
- [22] Z. Zhou, et al. Preparation of an environment-friendly LTCC material by using waste soda-lime glass and natural volcanic ash. *Ceramics International*, v. 49, n. 5, p. 7861-7870, 2023.
- [23] T. Dele-Afolabi, et al. Effect of agro-waste pore formers on the microstructure, hardness, and tensile properties of porous alumina ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, v. 15, n. 4, p. 1060-1071, 2018. DOI <https://doi.org/10.1111/ijac.12874>.
- [24] M.Y.M. Souza. Obtenção de cerâmicas porosas a partir de argila Ball Clay, alumina e talco. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia. Campina Grande – PB, 2018.
- [25] M.M. Salman, et al. Utilization of diverse cheap materials as pore generating agent to manufacture low-cost porous ceramic. *Cerâmica*, v. 66, p. 179-185, 2020.
- [26] G.B. Milak. Cerâmicas porosas obtidas a partir da substituição parcial de matérias-primas por resíduos da indústria de papel e celulose e utilização de fibras poliméricas para aumento de permeabilidade. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma-SC, 2018.
- [27] W.D.Jr. Callister, D.G. Rethwisch. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. il.; 28 cm.
- [28] R. Serewane Deramne, et al. Use of a kaolinitic-illitic clay from Central African Republic and an organic waste for the production of porous ceramic materials. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, v. 2, n. 6, p. 292-302, 2020.
- [29] Y. Huang. A novel route for the fabrication of melilite-spinel porous ceramics with ultralow thermal conductivity and sufficient strength. *Ceramics International*, v. 48, n. 24, p. 37488-37491, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.231>.
- [30] T.V. Vakalova, I.V. Revva. Highly porous building ceramics based on «clay-ash microspheres» and «zeolite-ash microspheres» mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 317, p. 125922, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125922>.
- [31] Y. Zhu, et al. Effect of sintering temperature on structure and properties of porous ceramics from tungsten ore tailings. *Materials Chemistry and Physics*, v. 287, p. 126315, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126315>.

- [32] P.V. Ferreira. Estatística experimental aplicada à agronomia. Viçosa-MG: Editora UFRV, 2018.
- [33] American Society for Testing and Materials - ASTM C210:95 (ASTM, 2019). Método de teste padrão para troca de reaquecimento de tijolo isolante.
- [34] American Society for Testing and Materials - ASTM C20-00 (ASTM, 2022). Métodos de teste padrão para porosidade aparente, absorção de água, gravidade específica aparente e densidade aparente de tijolos refratários queimados e formas por água fervente.
- [35] C.A. Ferreira. Obtenção de membrana cerâmica porosa a partir da utilização do resíduo de caulim como matéria-prima alternativa e da serragem da madeira como agente parogênico. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2019.
- [36] W.P. Gonçalves. Comportamento físico, mecânico e microestrutural de massas contendo argilas e resíduo de alumina. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2018.
- [37] L.A. Xavier, et al. Effect of stainless-steel slag concentration in the fabrication of cost-effective ceramic membranes: Seawater pre-treatment application. *Ceramics International*, v. 48, n. 16, p. 23273-23283, 2022.
- [38] L.L. Bhering. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. *Crop Breeding and applied biotechnology*. v.17:187-190p, 2017. DOI <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2s29>.
- [39] V. Estolano, S. Fucale, J. Vieira Filho, D. Gabriel, Y. Alencar. Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. *Revista Matéria*, v.23, n. 1, 2018.
- [40] M. Cavalcante, J.G. Costa. Considerações sobre planejamento experimental e adequabilidade do uso de testes estatísticos em Ciências Agrárias. *Diversitas Journal*, v. 6, n. 4, p. 3706-5215, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v6i4.1931>.
- [41] A. Cevahir. Glass fibers. In: *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. Woodhead Publishing, 2017. p. 99-121.
- [42] Y. Arkame, et al. Effects of slag addition and sintering temperature on the technological properties of dolomite based porous ceramics. *Open Ceramics*, v. 13, p. 100333, 2023.
- [43] E.L.G. Silva, A.P. Maciel. Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em blocos cerâmicos, *Cerâmica Industrial*, v. 24, n. 4, pp. 29–36, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.021>.
- [44] R.C.B. Albuquerque, et al. Espumas cerâmicas aditivadas com resíduos de vidro plano pelo método da réplica. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 14, n. 2, 2019.
- [45] C. Fu, et al. Recycling of waste glass as raw materials for the preparation of self-cleaning, light-weight and high-strength porous ceramics. *Journal of Cleaner Production*, v. 317, p. 128395, 2021.
- [46] B. Lipowska, et al. Recycling of residual sludge from aluminum anodizing in fired clay bricks. *Cleaner Waste Systems*, v. 3, p. 100055, 2022.
- [47] G.P. Leite Filho. Análise das características físico-químicas de material particulado de painel de fibra de média densidade e de plástico reforçado com fibra de vidro para material compósito. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Alagoas, IFAL, Marechal Deodoro – AL, 2021.
- [48] M.C. Rodrigues. Estudo do comportamento de blocos cerâmicos queimados com adição de fibras de resíduos industriais. 127 p.: il. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.
- [49] R.V. Silva, et al. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 167, p. 346-364, 2017.

- [50] B.R. Brito. Efeito da Incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Materiais. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, São Paulo, 2021.
- [51] D.M. Buselatto, et al. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, 2019.
- [52] S.F.M. Oliveira, T.M. Tenório, S.K.J. Marques. Caracterização do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Palmeira dos Índios - Alagoas para potencial aplicação em massas cerâmicas. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 28, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0088>.
- [53] D.H. Santos, et al. Influência da sílica e da temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduo do processo bayer. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA/ITEC), Belém, Pará, 2019. Disponível em: http://200.239.66.58/jspui/bitstream/2011/11261/1/Tese_InfluenciaSilicaTemperatura.pdf
- [54] M.C. Pessanha, et al. Caracterização de tubos e adesivos de plástico reforçado com fibra de vidro utilizados em plataformas offshore. *Polímeros*, v. 18, pág. 70-75, 2008.
- [55] Y. SUN, et al. Initial stage degradation of GFRP bars based on functional group ratio change using FTIR in high temperature and alkaline solution. *Journal of Building Engineering*, v. 68, p. 106190, 2023.
- [56] R. Caban. FTIR-ATR spectroscopic, thermal and microstructural studies on polypropylene-glass fiber composites. *Journal of Molecular Structure*, v. 1264, p. 133181, 2022.
- [57] M. Clausi, D. Pinto. Valorisation of Water Potabilization Sludges as Precursors for Alkali-Activated Binders: Characterization and Feasibility Study. *Materials*, v. 16, n. 5, p. 1998, 2023.
- [58] H.H.P. Quang, et al. Using ZrO₂ coated sludge from drinking water treatment plant as a novel adsorbent for nitrate removal from contaminated water. *Environmental Research*, v. 212, p. 113410, 2022.
- [59] L.S. Moraes, V.A.P. Maia. Reciclagem de plástico reforçado com fibra de vidro. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 4, p. 40747-40765, 2021.
- [60] F. Zheng, et al. Effective utilization of extracted titanium tailing to prepare high performance glass-ceramic and their formation mechanism. *Ceramics International*, v. 47, n. 12, p. 17391-17399, 2021.
- [61] L.G.G. Godoy, et al. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 939-950, 2019.
- [62] A.S. Ruviaro, L. Silvestro, T.P. Sclaro, et al., Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar, *Ambiente Construído*, v. 20, n. 4, pp. 243–260, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400470>.
- [63] Colling, et al. Incorporation of GFRP in interlocking floors: an ecological solution for industrial waste. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 23, n. 1, p. 157-169, jan./mar. 2023.
- [64] P.O. Trentin, et al. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, 2020. See More. UFV, 2018. 588p.

- [65] A.L. Borges. Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2021.
- [66] S. Sverguzova, et al. Application of sorbent waste material for porous ceramics production. *International Journal of Engineering*, v. 34, n. 3, p. 621-628, 2021.
- [67] F. Jiang, et al. Formation mechanism of high apparent porosity ceramics prepared from fly ash cenosphere. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 749, p. 750-757, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.303>.
- [68] M. Kremzer. Ceramic Porous Preforms Manufactured from Waste Materials. *Archives of Metallurgy and Materials*, v. 67, n. 1, p. 283-288, 2022.

APÊNDICE 3 – PRODUTO TÉCNICO/TECNOLÓGICO – CARTILHA

Panorama geral dos resultados tecnológicos

Em termos comparativos, a introdução dos subprodutos acarretou aumento, nos Níveis de Retração Linear em relação ao traço de referência.

+9,06%
em relação ao traço de referência

+42,30%
em relação ao traço de referência

+83,84%
em relação ao traço de referência

Apesar da maior variação dimensional observada nas composições com particulado de PRFV e lodo de ETA, os resultados permitiram a obtenção de **membranas cerâmicas mais densas** e consequentemente, com **menor grau de deterioração**.

Níveis de Absorção de Água e Porosidade Aparente

+25,68%
+24,97%
em relação ao traço de referência

+34,19%
+18,77%
em relação ao traço de referência

+47,36%
+26,67%
em relação ao traço de referência

O desempenho da cerâmica porosa na obtenção do fluxo permeado, sobretudo na composição com maior teor de particulado de PRFV e lodo de ETA, confirmou a dependência do ensaio com os aumentos de absorção de água e porosidade aparente.

Permeabilidade

Fluxo permeado de **5.222,27 L/m²h**
A pressão de 0,5-zbar

+87,40%
em relação ao traço de referência



CATÁLOGO

Transformando Subprodutos em Soluções: Cerâmica Porosa de PRFV e Lodo de ETA para Filtração de Água

- Resultados satisfatórios
- Produção similar a indústria de cerâmica tradicional
- Possibilidade de produção de Membrana de Filtração Cerâmica
- Aplicação em sistemas de tratamento de água na etapa de filtração



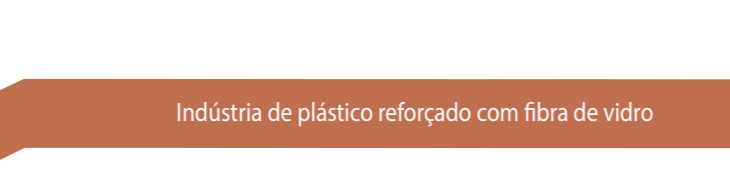
Este catálogo possui como objetivo apresentar informações acerca da tecnologia desenvolvida a partir da incorporação do particulado de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) e lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). Esses resíduos compreendidos como subprodutos, advêm das perdas de processo das indústrias de plástico reforçado e tratamento de água.



Lodo em bag de desidratação da Estação de Tratamento de Água

A forma como as empresas de plástico reforçado e tratamento de água gerenciam os seus subprodutos acarretam sérios problemas ambientais, como: contaminação do solo, poluição da água e problemas para a saúde humana. Deste modo, pensar práticas de economia circular que viabilizem o reprocessamento de matérias-primas secundárias pode promover a integração dos passivos no fabrico de novos materiais.

Nesse sentido, visando a valorização e mitigação dos impactos ambientais inerentes a disposição do particulado de PRFV e lodo de ETA, surgiu a oportunidade de desenvolvimento de cerâmica porosa com propriedades que permitem a aplicação em sistemas de tratamentode água na etapa de filtração, de modo a possibilitar o fechamento do ciclo produtivo das indústrias geradoras dos passivos ambientais.



Indústria de plástico reforçado com fibra de vidro

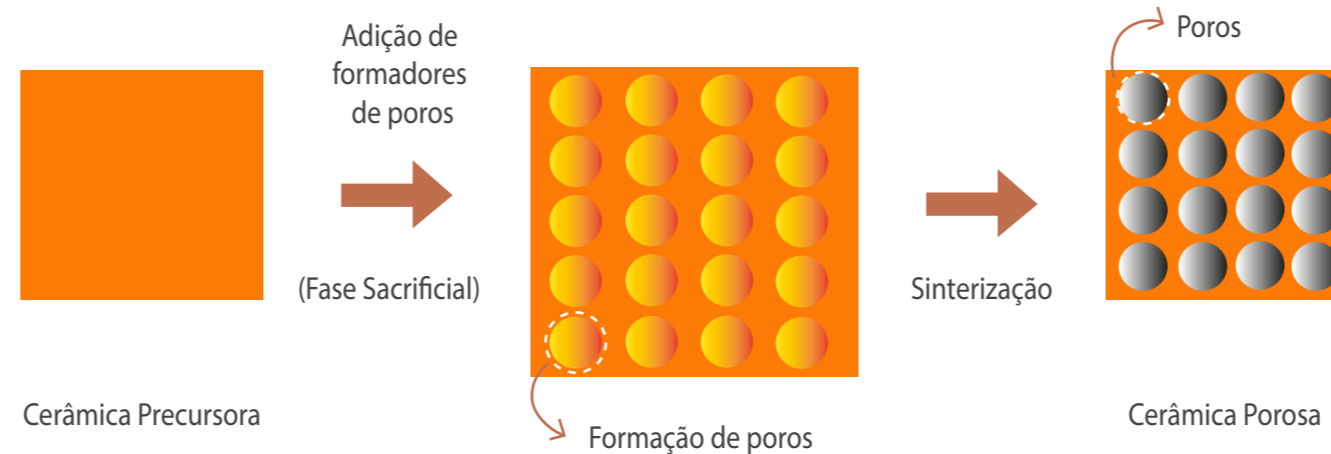


Particulado de PRFV gerado do processo de lixamento de peças e equipamentos



Processamento de cerâmicas porosas

O processamento de cerâmicas porosas por meio do método da fase sacrificial é uma técnica na qual se utiliza de precursores cerâmicos seguido de agentes parogênicos formadores de poros, (polímeros, fibras orgânicas, amido, celulose, carbono, cinzas volantes, partículas de vidro, entre outros), que geram espaços antes ocupados pelo material sacrificial tratado termicamente.



Esquema do método sacrificial utilizado na fabricação de cerâmicas porosas

O desenvolvimento de cerâmicas porosas utilizando materiais como argilas, lodo de ETA e minerais como agentes formadores de poros (particulado de PRFV) aparece como alternativa promissora na obtenção de materiais de menor custo. A compatibilidade química de alguns subprodutos com matérias-primas naturais pode acarretar possibilidade de inseri-los na matriz cerâmica, diminuindo o consumo de recursos naturais e o impacto ambiental.

O que são cerâmicas porosas?

São materiais que envolvem transporte de fluido por membranas de filtração.

Características das cerâmicas porosas

As cerâmicas porosas comumente apresentam propriedades de alta permeabilidade, alto ponto de fusão, baixa densidade, estabilidade química e alta resistência mecânica (ABCERAM, 2023; Souza, 2018).



Processo de fabricação das cerâmicas porosas

As matérias-primas argila, lodo de ETA e particulado de PRFV devem ser secas em estufa para posterior processo de cominuição dos grãos e peneiramento.



Almofariz com mão de gral e peneira de malha 150µm

Em seguida a massa a verde deve ser homogeneizada juntamente com o processo de adição de água



Homogeneização dos constituintes secos e úmidos da massa a verde

Após a moldagem, os corpos de prova devem ser conformados, através de prensagem uniaxial para posterior tratamento térmico em estufa e forno mufla.



Tratamento térmico dos corpos de prova a verde em forno mufla