

**INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
MESTRADO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS**

TAÍSA MENEZES TENÓRIO

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DE PÓ DE VIDRO PROVENIENTE DE
GARRAFAS PÓS-CONSUMO PARA PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO
PISO TÁTIL**

Marechal Deodoro

2025

TAÍSA MENEZES TENÓRIO

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DE PÓ DE VIDRO PROVENIENTE DE
GARRAFAS PÓS-CONSUMO PARA PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO
PISO TÁTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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

2025



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

363.7

T312a Tenório, Taísa Menezes.

Análise do aproveitamento de pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo para produção de ladrilho hidráulico piso tátil / Taísa Menezes Tenório. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 6,60 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Profa. Dra. Sheyla Karolina Justino Marques.
Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) –
Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Marechal Deodoro,
Marechal Deodoro, 2025.

1. Sustentabilidade. 2. Economia circular. 3.
Subprodutos. 4. Ladrilhos hidráulicos. I. Marques, Sheyla
Karolina Justino. II. Título.

TAÍSA MENEZES TENÓRIO

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DE PÓ DE VIDRO PROVENIENTE DE
GARRAFAS PÓS-CONSUMO PARA PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO
PISO TÁTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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:

Orientadora:

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

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ronny Francisco Marques de Souza, IFAL / *campus* Piranhas.

Prof. Dr. Ramón Victor Alves Ramalho, IFAL / *campus* Coruripe.

Marechal Deodoro, AL

2025

*Dedico este trabalho à Deus e Nossa Senhora,
aos meus pais, Jorge e Rosângela, ao meu
esposo, Diego, que sempre me incentivaram e
estiveram ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Nossa Senhora, por sempre me guiarem, conduzirem meus passos e me darem forças para superar todas as adversidades.

Aos meus pais, Jorge e Rosângela, pelos ensinamentos sobre a importância da educação como chave para realizar nossos maiores sonhos, e pelos sacrifícios feitos para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu esposo, Diego, por todo amor, paciência e por estar sempre ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e me incentivando a jamais desistir dos meus objetivos.

Aos meus irmãos, Túlio e Tiago, e às minhas cunhadas, Gislane e Andressa, pelo carinho e companheirismo e por sempre estarem ao meu lado.

À minha amiga, Samantha, pela longa e querida amizade. Que Deus nos conserve unidas e que possamos seguir juntas, alcançando nossas metas e celebrando conquistas.

À minha professora, Dra. Sheyla Marques, que me orienta desde o ensino médio-técnico. Sou imensamente grata pelo conhecimento transmitido e por ter me apresentado ao universo da pesquisa. A Senhora é um exemplo de dedicação e competência.

Sou grata ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTEC) e a todos os docentes, pela contribuição fundamental tanto para o desenvolvimento deste trabalho quanto para o meu crescimento profissional.

Aos meus colegas de sala, pela troca de conhecimentos e companheirismo, com especial carinho à Flávia e à Erlande.

Aos meus amigos Casalianos, pelo incentivo constante e pelo auxílio desde o primeiro momento em que decidi ingressar no mestrado.

Ao Professor Diôgo, do IFAL *campus* Coruripe, pelo apoio prestado no laboratório para a realização desta pesquisa, assim como ao técnico do laboratório do IFAL *campus* Maceió, Sheldon, pela assistência essencial durante a execução dos ensaios.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para concretização deste sonho, muito obrigada.

TENÓRIO, Taísa Menezes Tenório. **Análise do aproveitamento de pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo para produção de ladrilho hidráulico piso tátil**. 125 f. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – *campus* Marechal Deodoro, Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, 2025.

RESUMO

A cadeia produtiva da indústria cimenteira é reconhecida por sua intensa emissão de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO_2), resultado da calcinação do calcário e do uso de combustíveis fósseis no processo de produção. Considerando os desafios climáticos contemporâneos e a busca por soluções mais sustentáveis, este estudo investiga a viabilidade técnica e ambiental do aproveitamento de pó de vidro, proveniente de garrafas pós-consumo, como substituto parcial do cimento Portland na produção de ladrilhos hidráulicos piso tátil. Para tanto, foram utilizados cimento CP-V ARI, areia natural e pó de vidro finamente moído, coletado em entidade pública do estado de Alagoas com estrutura para trituração de embalagens de vidro. As matérias-primas foram caracterizadas por meio de ensaios de análise granulométrica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica (TG) e ensaio de ação pozolânica. Os resultados indicaram que o subproduto possui partículas angulares e irregulares, alta concentração de sílica (69,63% de SiO_2), além de estabilidade térmica. A pesquisa experimental envolveu a produção de corpos de prova prismáticos com diferentes teores de substituição do cimento por pó de vidro: 0%, 6%, 12% e 18%. As amostras foram submetidas aos ensaios de absorção de água por imersão, resistência à compressão e resistência à tração na flexão, com análise estatística dos dados por meio de ANOVA, regressão polinomial e correlação de Pearson. Os resultados revelaram que não houve diferença significativa na absorção de água entre as formulações, o que indica manutenção da porosidade do compósito. A resistência à compressão teve desempenho superior com 7,20% de substituição, atingindo 47,39 MPa, enquanto a resistência à tração na flexão apresentou redução com o aumento do teor de subproduto. A formulação com 7,20% de pó de vidro foi selecionada para produção do ladrilho hidráulico, que atendeu aos requisitos de resistência mecânica estabelecidos pela NBR 9457 (ABNT, 2013). Em relação aos parâmetros dimensionais, o ladrilho final apresentou conformidade quanto à largura, altura e comprimento. Os resultados obtidos demonstram que a incorporação do pó de vidro configura-se como alternativa tecnicamente viável e ambientalmente relevante para a produção de ladrilhos hidráulicos. Assim, a proposta está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo práticas sustentáveis na construção civil e estimulando o uso de matérias-primas secundárias, em consonância com os princípios da economia circular.

Palavras-chave: Economia Circular; Subprodutos; Sustentabilidade; Ladrilhos Hidráulicos.

TENÓRIO, Taísa Menezes Tenório. **Analysis of the use of glass powder from post-consumer bottles to produce vibrated hydraulic tiles tactile flooring.** 125 f. 2025. Final Paper (Master's Degree in Environmental Technologies) - *campus* Marechal Deodoro, Federal Institute of Alagoas, Marechal Deodoro, 2025.

ABSTRACT

The cement industry production chain is known for its high emission of greenhouse gases, especially carbon dioxide (CO₂), resulting from the calcination of limestone and the use of fossil fuels in the manufacturing process. Considering current climate challenges and the search for more sustainable alternatives, this study investigates the technical and environmental feasibility of using glass powder from post-consumer bottles as a partial replacement for Portland cement in the production of tactile hydraulic tiles. For this purpose, CP-V ARI cement, natural sand, and finely ground glass powder—collected from a public institution in the state of Alagoas equipped with glass packaging crushing equipment—were used. The raw materials were characterized through particle size analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM) coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TG), and pozzolanic activity tests. The results indicated that the by-product presents angular and irregular particles, a high silica content (69.63% SiO₂), and thermal stability. The experimental program involved the production of prismatic test specimens with different glass powder replacement levels: 0%, 6%, 12%, and 18%. The samples were subjected to water absorption by immersion, compressive strength, and flexural tensile strength tests. Statistical analyses included ANOVA, polynomial regression, and Pearson correlation. The results showed no significant difference in water absorption among the formulations, indicating that the composite's porosity was maintained. The compressive strength performance was optimal at 7.20% substitution, reaching 47.39 MPa, while flexural tensile strength decreased as the glass powder content increased. The formulation with 7.20% glass powder was selected for tile production, meeting the mechanical strength requirements defined by NBR 9457 (ABNT, 2013). The final tile also met dimensional specifications in terms of width, height, and length. The findings demonstrate that incorporating glass powder is a technically viable and environmentally relevant solution for producing hydraulic tiles. This proposal aligns with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), promoting sustainable practices in the construction sector and encouraging the use of secondary raw materials in accordance with circular economy principles.

Keywords: Circular Economy; By-products; Sustainability; Glass Powder; Hydraulic Tile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Fluxograma da estrutura da dissertação.....	23
Figura 2-Molécula de silicato.....	25
Figura 3- Ciclo de produtivo das embalagens de vidro.....	27
Figura 4-Economia de matéria-prima e energia a partir dos volumes de reciclagem do vidro	30
Figura 5- Ciclo de logística reversa.....	31
Figura 6- ODS e a indústria vidreira.....	32
Figura 7- Requisitos dimensionais para os relevos do piso tátil de alerta.....	39
Figura 8-Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.....	43
Figura 9- Protótipo do equipamento utilizado para trituração das embalagens de vidro.....	49
Figura 10- Etapas de obtenção do subproduto.....	50
Figura 11-Massa retida nas peneiras da série normal (a) para subproduto e (b) para o agregado miúdo.....	52
Figura 12-Corpos de prova cilíndricos para execução do ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	57
Figura 13- (a) homogeneização das matérias-primas secas, (b) após adição da água, (c) moldagem dos corpos de prova prismáticos, (d) corpos de prova desmoldados e (e) cura úmida.....	59
Figura 14-Fluxograma de obtenção do ladrilho hidráulico.....	61
Figura 15- (a) Argamassa fresca no molde e (b) ladrilho após desmoldagem.....	62
Figura 16 - (a) Marcações nos corpos de prova e (b) Execução do ensaio de resistência à tração na flexão.....	64
Figura 17 - Execução do ensaio de compressão utilizando-se metade dos corpos de prova....	65
Figura 18-(a) molde metálico preenchido com a argamassa, (b) após a remoção do molde tronco cônico e (c) após a aplicação dos golpes na mesa de consistência.....	67
Figura 19- Execução do ensaio de resistência à tração na flexão no ladrilho hidráulico.....	68
Figura 20- Análise dimensional do ladrilho hidráulico (a) comprimento e largura (b) espessura.....	69
Figura 21-Avaliação dimensional dos relevos presentes no piso tátil de alerta (a) distância diagonal entre centros do relevo e (b) diâmetro da base do relevo.....	70
Figura 22- Curva granulométrica do agregado miúdo.....	72
Figura 23 - Curva de análise granulométrica do subproduto.....	74

Figura 24- Micrografias obtidas por MEV do pó de vidro com ampliações de (a) 100x, (b) 500x, (c) 1500x e (d) 2500x	75
Figura 25-(a) área da amostra utilizada para quantificar os elementos, (b) espectros gerados por EDS.....	76
Figura 26- Difractometria do pó de vidro	79
Figura 27- Curva termogravimétrica e derivada (TG/DTG) do pó de vidro	80
Figura 28-Resultado do ensaio de índice de desempenho com cimento aos 28 dias	81
Figura 29- Valores médios de absorção de água por imersão aos 28 dias	82
Figura 30- Valores médios de resistência à compressão	84
Figura 31- Ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	85
Figura 32- Valores médios de resistência à tração na flexão	87
Figura 33- Ensaio de resistência à tração na flexão.....	88
Figura 34- Resultados de resistência à tração na flexão do ladrilho hidráulico	89
Figura 35- Corpos de prova fraturados após execução do ensaio de resistência à tração na flexão	90
Figura 36 - Insumos utilizados para a produção de um ladrilho hidráulico	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Limites e tolerâncias dimensionais para ladrilhos hidráulicos	38
Tabela 2-Quantidade de material para produção de quatro corpos de prova cilíndricos	56
Tabela 3-Formulação referência e experimentais em relação ao percentual de substituição do cimento Portland.....	58
Tabela 4-Resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria da areia	71
Tabela 5-Resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria do subproduto.....	73
Tabela 6-Resultado da análise química semiquantitativa do pó de vidro.....	77
Tabela 7-Correlação de Pearson entre as variáveis tecnológicas	85
Tabela 8-Dimensões coletadas no ladrilho hidráulico.....	91
Tabela 9- Dimensões coletadas dos relevos presentes no piso tátil alerta.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Strings de buscas definidas por base de dados	45
Quadro 2-Critérios de exclusão e inclusão	46
Quadro 3-Critérios de qualidade.....	46
Quadro 4-Critérios de extração dos estudos	47
Quadro 5 - Ficha Técnica do ladrilho hidráulico.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS

- AA - Absorção de Água
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ABREMA - Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
- ANOVA - Análise de Variância
- CISPER - Companhia Industrial São Paulo e Rio
- CV - Coeficiente de Variação
- DIC - Delineamento Inteiramente Casualizado
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
- DRX - Difração de Raios X
- DTG - Termogravimetria Derivada
- EDS- Espectroscopia por Dispersão de Elétrons
- FE06 - Formulação Experimental com 6% de subproduto
- FE12 - Formulação Experimental com 12% de subproduto
- FE18 - Formulação com 18% de subproduto
- FR - Formulação de Referência
- FRX - Fluorescência de Raios X
- LBRO - Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais
- MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
- NBR - Norma Brasileira Regulamentadora
- ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- ONU - Organização das Nações Unidas
- PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos
- RAS - Reação Álcalis-Sílica
- RSL - Revisão Sistemática da Literatura
- RSU - Resíduos Sólidos Urbanos
- TGA - *Thermographic Analysis*
- TG - Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	JUSTIFICATIVA	20
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	VIDRO	24
2.1.1	Breve Histórico	24
2.1.2	Principais propriedades	25
2.1.3	Processo de fabricação de embalagens de vidro na indústria	27
2.2	ASPECTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS À INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO	29
2.3	APLICAÇÃO DO VIDRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	33
2.4	LADRILHO HIDRÁULICO	36
2.4.1	Propriedades avaliadas durante a produção do ladrilho hidráulico	38
2.4.2	Ladrilho hidráulico piso tátil	39
2.5	PRINCIPAIS ESTUDOS ACERCA DA INCORPORAÇÃO DE SUBPRODUTOS PARA FABRICAÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO	40
3	MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	44
3.2	MATÉRIAS-PRIMAS.....	47
3.2.1	Cimento Portland	47
3.2.2	Agregado miúdo	48
3.2.3	Obtenção do subproduto	48
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	50
3.3.1	Análise Granulométrica	51
3.3.2	Massa Específica	52
3.3.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS)	53
3.3.4	Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)	54

3.3.5	Análise por Difração de Raios X (DRX)	54
3.3.6	Análise Termogravimétrica	55
3.3.7	Ação pozolânica do subproduto	56
3.4	DEFINIÇÃO DO TRAÇO E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS	57
3.5	PRODUÇÃO DO LADRILHO HIDRÁULICO	60
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS E DE QUALIDADE	62
3.6.1	Absorção de água por imersão	63
3.6.2	Resistência à tração na flexão	63
3.6.3	Resistência à compressão	65
3.6.4	Índice de consistência	66
3.6.5	Resistência à tração na flexão no ladrilho hidráulico	68
3.6.6	Avaliação dimensional do ladrilho hidráulico	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	71
4.1.1	Análise granulométrica do agregado miúdo e massa específica	71
4.1.2	Análise granulométrica do subproduto	72
4.1.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS)	74
4.1.4	Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)	77
4.1.5	Análise por Difração de Raios X (DRX)	78
4.1.6	Análise Termogravimétrica	79
4.1.7	Ação pozolânica do subproduto	81
4.2	ENSAIOS TECNOLÓGICOS	82
4.2.1	Absorção de água por imersão	82
4.2.2	Resistência à compressão	83
4.2.3	Resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos	86
4.2.4	Índice de consistência	88
4.2.5	Resistência à tração na flexão do ladrilho hidráulico	88
4.2.6	Avaliação dimensional do ladrilho hidráulico	91
4.2.7	Ficha técnica	92
4.2.8	Contribuições ambientais da aplicação de pó de vidro em ladrilho hidráulico piso tátil	95
5	CONCLUSÕES	97

REFERÊNCIAS.....	100
APÊNDICE 1 - PRODUTO TÉCNICO/TECNOLOGIO - PEDIDO DE PATENTE	111
APÊNDICE 2 - PRODUTO TÉCNICO/TECNOLOGIO- CATÁLOGO TÉCNICO	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A construção civil corresponde ao segmento industrial que mais consome recursos naturais em sua cadeia produtiva (Farias; Farias; Picanço, 2023). De acordo com o relatório *Beyond Foundations: Mainstreaming Sustainable Solutions to Cut Emissions from the Buildings Sector* (2023), a produção de materiais de construção como cimento, aço e alumínio resulta na geração de cerca de 2,5 gigatoneladas de CO₂. Em edificações novas, as emissões de carbono atingem cerca de 50% e estão associadas exclusivamente à produção desses materiais.

Em razão disso, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de mitigar os impactos ambientais ocasionados pelo setor, propondo a redução da exploração de recursos naturais, a partir da incorporação de matérias-primas alternativas, provenientes de diversos setores industriais, comumente denominadas como subprodutos (Alves; Mazzaro; Almeida, 2021).

Nesse contexto, o modelo de economia linear, baseado na extração de recursos naturais para produção de bens de consumo e descarte de resíduos, configura-se como sistema insustentável para o cenário vigente, exigindo-se mudanças imediatas no modo de produzir. Diante disso, surge o conceito de economia circular, norteadada por princípios sustentáveis, que objetiva inserir resíduos no ciclo produtivo, como subprodutos ou fonte de energia, reduzindo sua disponibilidade e fomentando o desenvolvimento de novos materiais (International Solid Waste Association, 2022; Assunção, 2019).

O ciclo de vida dos materiais de construção ocasiona danos ao meio ambiente, já que durante todo o processo (fabricação, uso e descarte) ocorre o consumo de energia, de recursos naturais e emissões de poluentes para a atmosfera. Por esta razão, a incorporação de subprodutos no processo produtivo promove a diminuição no uso dos recursos naturais, através da redução da exploração de novas jazidas de matérias-primas, reduzindo os impactos negativos ao meio ambiente relacionados à atividade (Huang *et al.*, 2020).

O cimento é um dos materiais de construção mais consumidos pela indústria da construção civil. No entanto, trata-se de um aglomerante cuja produção envolve a necessidade de elevado consumo energético (combustíveis fósseis), ocasionando a liberação de grandes quantidades de CO₂. Os valores correspondentes às emissões de gases do efeito estufa, podem ser reduzidos, se houver alteração no percentual de clínquer na mistura do cimento ou na escolha de fonte alternativa de combustível (Lira; Assis, 2020).

Dentro desta perspectiva, pesquisas vêm sendo desenvolvidas, com o intuito de substituir parcialmente o cimento por subprodutos na composição de materiais de construção, como concretos, argamassas e tijolos ecológicos. O vidro, ao ser finamente moído, despontou como excelente material para ser aplicado como material cimentício suplementar, devido ao elevado percentual de sílica amorfa em sua constituição (Brito, 2021b).

Apresentando ampla variedade no mercado, o vidro é constituído, majoritariamente, por matérias-primas naturais como areia, óxido de alumínio, carbonato de sódio, calcário e corantes. Ademais, caracteriza-se como material 100% reciclável, embora, no Brasil, alguns fatores contribuem para que as taxas de reciclagem não atinjam maiores patamares dentre eles, destacam-se o custo reduzido das matérias-primas virgens e o valor não atrativo de coleta do vidro para os catadores de materiais recicláveis, oriundos de embalagens pós-consumo (Moreira, 2022; Santana; Lange; Magalhães, 2022).

As garrafas de vidro não retornáveis, como as *long necks*, utilizadas para o armazenamento de bebidas, ocasionam sérios problemas ambientais, por se tratar de passivo de difícil destinação e que demanda longos períodos de decomposição, quando enviados a aterros sanitários. Segundo Oliveira (2021) o processo de reciclagem dessas garrafas é pouco explorado no Brasil, já que, para torná-las competitivas no mercado, foi necessário, por parte da indústria, alteração em sua composição química, impossibilitando o processo de reutilização, transformando-as em embalagens “*one way*”, de uso único.

Segundo informações do Ministério do Meio Ambiente (2022) calcula-se que anualmente são descartadas, de maneira inadequada, cerca de 1 bilhão de garrafas de vidro, causando sérios prejuízos ao meio ambiente. Em contrapartida, o direcionamento deste material para aterros sanitários, embora se trate de medida legal, reduz o tempo de vida útil do aterro, já que tal material poderia ser reaproveitado.

Borges (2021) investigou a influência da incorporação do pó de vidro, proveniente de garrafas de bebidas pós-consumo, em substituição ao teor de cimento na produção de argamassa, a fim de verificar a ocorrência de efeito pozolânico e de preenchimento do subproduto. O autor evidenciou resultados favoráveis com percentual de substituição em 20%, constatando ganho de resistência à compressão 24% superior ao corpo de prova de referência. Adicionalmente, no ensaio de resistência à tração constatou-se resultados viáveis com teores de substituição de 10 e 20%, conferindo viabilidade técnica à implementação do vidro em argamassas.

A partir da necessidade de reprocessamento do pó de vidro, que pode constituir matéria-prima secundária para a produção de novos materiais, tem-se dentro da cadeia produtiva da construção civil o ladrilho hidráulico, placa cimentícia produzida por meio de argamassa constituída por cimento Portland, agregados e água, permitindo-se a implementação de corantes e aditivos na mistura, conforme destacado na NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

Os ladrilhos hidráulicos vêm sendo amplamente empregados como material de construção em calçadas para sinalização tátil em atendimento a NBR 9050 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos Urbanos (ABNT, 2020). Na literatura é possível identificar a confecção de ladrilhos hidráulicos piso tátil a partir da incorporação de subprodutos como nos estudos de Savazzini-Reis e Fagundes (2019), Fontes *et al.* (2018), Torres (2020) e Ferreira, Campos e Barros (2023).

Diante desse cenário e da capacidade de incorporação de subprodutos pelo setor da construção civil, tem-se por objetivo analisar as características e propriedades de ladrilho hidráulico, produzido através da substituição parcial do cimento Portland pelo pó de vidro finamente moído. Este processo possibilitará a redução do descarte irregular das embalagens de vidro, bem como, do percentual de cimento na composição, considerado grande emissor de CO₂ para atmosfera durante o processo de fabricação.

Baseado na perspectiva exposta, surge o seguinte questionamento como problema de investigação desta pesquisa: **Quais contribuições podem surgir a partir da aplicação de pó de vidro proveniente de embalagens pós-consumo na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil?**

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades do ladrilho hidráulico piso tátil produzido a partir da incorporação de pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo em substituição parcial ao cimento Portland.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão sistemática da literatura acerca da fabricação de ladrilhos hidráulicos, reunindo os estudos primários mais relevantes e que contribuam para o desenvolvimento do presente estudo;

- Caracterizar o pó de vidro por meio da execução dos ensaios de análise granulométrica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica (TG) e ação pozolânica do subproduto para compreensão do comportamento do subproduto e potenciais aplicações;

- Confeccionar corpos de prova prismáticos a partir da incorporação de diferentes teores de subproduto (0%, 6%, 12% e 18%) em substituição parcial ao cimento Portland, para realização dos ensaios mecânicos, incluindo absorção de água por imersão, resistência à tração na flexão e resistência à compressão na idade de 28 dias, identificando a influência do subproduto nas características finais do material compósito;

- Selecionar a formulação mais promissora para a produção do ladrilho hidráulico piso tátil, visando a análise do desempenho do material com a incorporação do pó de vidro;

- Avaliar as características do ladrilho hidráulico, submetendo-o ao ensaio mecânico de resistência à tração na flexão e avaliação dimensional, identificando a adequação do material a norma NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013) e a NBR 9050 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos (ABNT, 2020).

1.3 JUSTIFICATIVA

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), instituída por meio da Lei 12.305, de agosto de 2010, destaca a importância da destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos produzidos, com o intuito de mitigar os efeitos adversos que podem afetar o meio ambiente (Brasil, 2010). Para isso, faz-se necessária a implementação de gestão integrada entre diversos setores da sociedade, no que concerne à indicação de soluções para problemas de destinação dos resíduos, conforme abordado ao longo deste estudo.

Segundo dados fornecidos pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) e publicados no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022, no país foram gerados cerca de 81,8 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), equivalente a produção diária de 224 mil toneladas (Abrelpe, 2022). A região Sudeste apresentou maior contribuição, correspondente a 49,7%, seguido pelo Nordeste com percentual de 24,7%.

Levando-se em consideração a composição gravimétrica do RSU, o vidro está incluído entre os resíduos recicláveis secos. De acordo com o Anuário da Reciclagem 2022, a proporção da quantidade de vidro coletado e encaminhado para reciclagem em 2021 no Brasil foi de 16%, ficando atrás do papel com 46% e do plástico com 22%. Na região nordeste, a situação é alarmante, já que apenas 5,6% do vidro coletado foi devidamente direcionado à reciclagem.

Neste cenário, infere-se que a maior parte do vidro coletado não está sendo submetido às práticas ambientais adequadas de disposição. Apesar de não ocasionar contaminação direta do meio ambiente, visto que se trata de material inerte, o vidro demanda longos períodos de decomposição, devido à sua natureza inorgânica e não biodegradável. Sendo assim, a incorporação do vidro pela construção civil como material cimentício suplementar proporciona o aumento da vida útil dos aterros sanitários, minimiza a exploração de matérias-primas e reduz as emissões de CO₂ para a atmosfera (Morais *et al.*, 2022b).

No que diz respeito à preocupação com destinação do vidro, pesquisas em âmbito nacional e internacional apontaram a viabilidade técnica de incorporação do subproduto pelo setor da construção civil em substituição parcial ao teor de cimento, devido à presença de elevado percentual de sílica amorfa. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o setor é reconhecido mundialmente pelas altas taxas de emissões de gases poluentes para a atmosfera, as quais estão intrinsecamente relacionadas à sua cadeia produtiva, no que concerne à calcinação de matérias-primas (SNIC, 2022).

Na perspectiva de Oliveira (2022) a indústria da construção civil consome grandes quantidades de recursos naturais, contribuindo, significativamente, com diversos problemas ambientais. Por esta razão, a incorporação do vidro em matrizes cimentícias minimiza o uso do cimento, promove a circularidade do passivo ambiental, aumenta a vida útil de aterros sanitários e contribui para o desenvolvimento de materiais de construção com viés sustentável.

Ressalta-se, que o presente estudo está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), acordado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, que se preocupa, prioritariamente, em alcançar desenvolvimento sustentável global até 2030. Dentre os 17 ODS, este trabalho contribui, principalmente, para alcance dos ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, como o vidro, atende às metas: “12.2- Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso”. A capacidade de incorporação do subproduto em ladrilhos hidráulicos, contribui para a redução do uso do cimento, e conseqüentemente, diminui a necessidade de

extração de matérias-primas virgens, estimulando a utilização responsável dos recursos naturais. Além de promover o processo de reciclagem a partir da aplicação do vidro na cadeia produtiva da construção civil.

A diminuição do percentual de cimento na composição de materiais de construção, também contribui para mitigação dos efeitos causados pelas mudanças climáticas, conforme enfatizado pelo ODS 13. Segundo Jativa, Dalton e Pourghaz (2024), a indústria cimenteira é responsável pela emissão mundial de 8% a 10% de gases de efeito estufa. Além disso, de acordo com Farias, Farias e Picanço (2023), a cada uma tonelada de cimento produzida, emite-se para a atmosfera cerca de uma tonelada de gás carbônico. Por esta razão, o objeto desta pesquisa contribui diretamente para atenuar os principais impactos ambientais decorrentes da emissão de gases poluentes pelas cimenteiras.

Ademais, convém destacar a relevância deste trabalho, tendo em vista a metodologia de produção de ladrilhos hidráulicos em camada única e por processo de vibração a partir da inserção de subprodutos. Tal metodologia, garantirá maior agilidade na fabricação e redução de custos, já que o processo tradicional é artesanal e complexo (Destefani, 2013).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi organizado e estruturado em seis seções, incluindo as referências, com o objetivo de detalhar todas as etapas de execução do presente estudo.

A seção um abrange os principais aspectos relacionados à contextualização do emprego do pó de vidro em matrizes cimentícias em substituição parcial ao cimento Portland, bem como a problemática de disponibilização das embalagens de vidro. Oitrossim, a seção inclui a justificativa do estudo, objetivo geral, objetivos específicos e a estrutura da dissertação.

A seção dois apresenta o referencial teórico, iniciando-se com breve histórico do vidro e as principais propriedades, que justificam a aplicação do vidro como material cimentício suplementar. Em seguida, são discutidos os aspectos ambientais relacionados à indústria de embalagens de vidro. A seção também aborda os principais estudos sobre a aplicação do pó de vidro em matrizes cimentícias, bem como o uso de subprodutos na produção de ladrilhos hidráulicos, destacando as características avaliadas e os resultados obtidos nas pesquisas desenvolvidas.

A seção três traz a metodologia empregada no decorrer do trabalho, que engloba o processo de execução da revisão sistemática da literatura, obtenção do subproduto,

caracterização das matérias-primas, definição do traço e preparação dos corpos de prova prismáticos, moldagem dos ladrilhos hidráulicos e realização dos ensaios mecânicos e de qualidade.

A seção quatro discute os resultados experimentais de caracterização das matérias-primas e dos ensaios tecnológicos executados tanto nos corpos de prova prismáticos, quanto nos ladrilhos hidráulicos que inclui absorção de água por imersão, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e análise dimensional. Os resultados dos ensaios supracitados foram apresentados por meio de gráficos, tabelas e figuras e as discussões realizadas tomando por base a literatura e a análise estatísticas para melhor acurácia dos dados.

A seção cinco é composta pelas conclusões sobre o desenvolvimento do presente estudo, destacando, sobretudo, os principais resultados obtidos. Ao término são expostas todas as referências empregadas, na seção 6. Na Figura 1 pode ser observado o fluxograma da estrutura empregada nesta dissertação.

Figura 1-Fluxograma da estrutura da dissertação



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 VIDRO

2.1.1 Breve Histórico

A origem do vidro é tema bastante discutido entre diversos historiadores. No entanto, existem evidências arqueológicas que assinalam seu surgimento na Mesopotâmia, por volta de 2500 a.C. No Egito, a técnica de fabricação do vidro foi aperfeiçoada, empregando-se, sobretudo, para a produção de artefatos abertos, como tigelas e jarros (Oliveira, 2022; Silva; Filgueiras, 2023).

Na idade média, sobretudo na Ilha de Murano, nas proximidades da cidade de Veneza, na Itália, destacou-se a qualidade do vidro produzido e o pioneirismo na fabricação de lentes de óculos, configurando-se como um dos principais centros de desenvolvimento da indústria vidreira a partir do século XVI na Europa. A produção de lentes revolucionou o campo da visão e a saúde humana, em razão do domínio da técnica de produção de vidro transparente pelos venezianos (Nascimento; Zanotto, 2016).

Segundo Amorim (2019), durante o período da Revolução Industrial, entre os séculos XVIII e XIX, o vidro foi largamente empregado, especialmente na Europa e nos Estados Unidos. Em meados do século XVIII, na França, durante o reinado de Luís XIV, a Companhia Saint-Gobain produziu vidros para o Palácio de Versalhes, estabelecendo-se como precursora na indústria vidreira no mundo (Brito, 2021b).

No território brasileiro, o vidro chegou com os portugueses em 1500, sendo utilizado, inclusive, como escambo, na forma de espelhos, com os indígenas em troca de pau-brasil. No período compreendido entre 1624 e 1635 foi instalada a primeira oficina de vidro, em Pernambuco, a partir da chegada dos holandeses, que trouxeram consigo artesãos para a confecção de janelas, frascos e copos. No entanto, com a expulsão dos holandeses pelos portugueses em 1654, a oficina encerrou suas atividades (Abravidro, 2015).

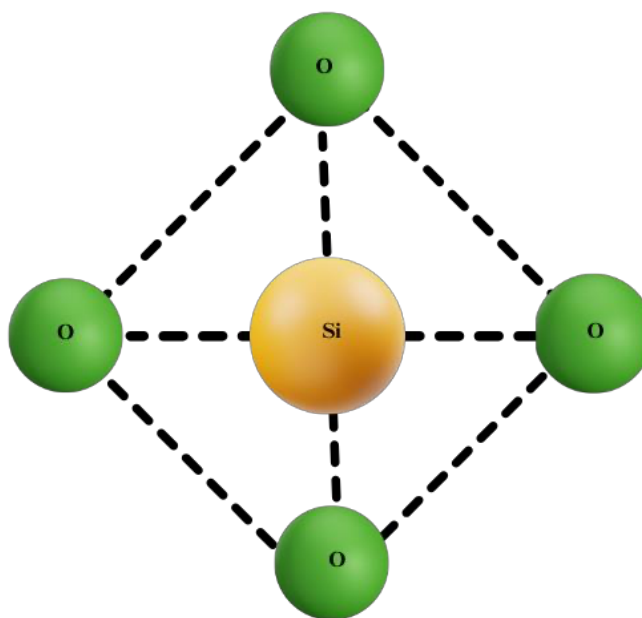
Posteriormente, em 1810, foi instalada a primeira fábrica de vidro na cidade baiana de Jiquitaia, recebendo a denominação de Real Fábrica de Vidros da Bahia. A implantação ocorreu por meio de incentivos do governo português, que trouxe vidreiros portugueses e ingleses para atuar no setor. As primeiras fábricas operavam de modo artesanal, mas, no início do século XX foi inaugurada a Companhia Industrial São Paulo e Rio (CISPER), pioneira na utilização de máquinas automáticas, que produziam principalmente garrafas e copos (Da Silva; Filgueiras, 2023).

Desde então, a indústria vidreira vem incorporando ao setor inovações tecnológicas, com o intuito de otimizar a linha de produção, minimizando custos e aumentando a eficiência. Atualmente, a AGC Vidros do Brasil Ltda é considerada a maior empresa do segmento no país, gerando aproximadamente 6,2% da produção total do setor em 2023 (Euromonitor Internacional, 2023).

2.1.2 Principais propriedades

O vidro é um sólido amorfo que apresenta composição química bastante heterogênea. É obtido pelo aquecimento da sílica (SiO_2) na presença de compostos inorgânicos que modulam as temperaturas de fundição e outras propriedades, como: transparência, cor, resistência química e mecânica, entre outras (Garanito, 2018; Silva; Filgueiras, 2023). Os silicatos formados durante o processo, Figura 2, conferem suas propriedades finais, após resfriamento.

Figura 2-Molécula de silicato



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Cumprе destacar que o vidro enquadra-se como material cerâmico, que quando submetido a elevadas temperaturas, diferencia-se por apresentar estrutura homogênea e amorfa (Amorim, 2019). Nesse processo, as matérias-primas utilizadas na produção do vidro, sobretudo a areia, ao serem expostas a temperaturas entre 1400 °C e 1600 °C, transformam-se em material viscoso, que após breve período de resfriamento, dá origem a sílica vítrea,

caracterizada por sua estrutura amorfa, não apresentando arranjo atômico regular (Bueno *et al.*, 2020).

Durante a etapa de fusão no processo de fabricação do vidro, as matérias-primas empregadas são essenciais para definição da temperatura de fusão. A sílica, por exemplo, possui a capacidade de ser utilizada isoladamente na produção do vidro, contudo, a temperatura de fusão ultrapassaria 1700 °C. Esse fator impacta diretamente os custos de fabricação, fazendo-se necessário o emprego de compostos fundentes, com o intuito de reduzir a temperatura e, por conseguinte, os custos operacionais na planta produtiva (Delaqua, 2022).

A barrilha, por exemplo, é utilizada na fabricação do vidro como material fundente, podendo reduzir a temperatura de fusão da sílica em até 200 °C. Esse material sintético é comumente conhecido como soda, constituído por carbonato de sódio (Na_2CO_3) (Ramos; Luz; Milhomem, 2022). Ressalta-se que a barrilha se configura como a como a matéria-prima mais onerosa na indústria vidreira, já que não há produção nacional (Montano; Bastos, 2013).

Segundo Guo *et al.* (2020), a composição química do vidro pode ser utilizada como critério para sua classificação. Assim, pode-se categorizá-lo como: vidro soda-cal, vidro chumbo, vidro de borossilicato e vidro elétrico. O vidro soda-cal é o tipo mais amplamente empregado, sobretudo para a produção de embalagens e pratos, com percentual entre 71% e 75% de sílica. De forma geral, o vidro é composto por sílica (SiO_2), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e cálcio (CaCO_3).

Em relação à estrutura atômica, o pó de vidro caracteriza-se por ser amorfo, ou seja, apresenta arranjo aleatório e pouco estruturado, ao contrário da sílica cristalina, cujo arranjo atômico é bem ordenado e de cadeia longa. Dessa forma, a sílica amorfa favorece maior reatividade quando incorporada ao concreto, contribuindo para a ocorrência do efeito pozolânico e, conseqüentemente, melhores resultados mecânicos (Bueno *et al.*, 2020).

Esse fenômeno ocorre porque, em matrizes cimentícias, o pó de vidro contribui para a ocorrência do efeito pozolânico, que consiste na reação entre o pó de vidro e o hidróxido de cálcio presente no cimento. Essa reação produz silicato de cálcio hidratado com pseudo-fórmula C-S-H, considerado a principal fase oriunda da hidratação do cimento Portland, responsável pela resistência mecânica. Ressalta-se que isso só será possível se as partículas do vidro forem menores ou semelhantes às partículas de cimento e se não houver quantidades excessivas de subproduto, já que poderá não existir hidróxido de cálcio disponível para a reação (Guo *et al.*, 2020; Andrade, 2024).

2.1.3 Processo de fabricação de embalagens de vidro na indústria

O vidro é considerado material de ciclo infinito, 100% reciclável, apresentando a capacidade de retornar a indústria vidreira na forma de cacos, como matéria-prima sem comprometer a qualidade do produto final (Moreira, 2022). No fluxograma da Figura 3 é possível verificar as etapas que envolvem o ciclo produtivo das embalagens de vidro.



Fonte: Elaborado pela autora (2024) com base no Guia reciclagem do vidro (2022).

O ciclo produtivo inicia-se com o beneficiamento das matérias-primas, que inclui basicamente o emprego dos minerais oriundos da areia (dióxido de silício), barrilha (carbonato de sódio) e calcário (carbonato de cálcio). Após a homogeneização das matérias-primas supracitadas na indústria, o material é encaminhado para fornos, onde ocorre a fusão dos componentes e a transformação em vidro. A etapa seguinte é constituída pelo envase das embalagens (Henrique, 2023).

Finalizada a etapa na indústria, as garrafas são encaminhadas para distribuição até chegar ao consumidor final. Após o descarte, deve-se iniciar o processo de beneficiamento do vidro pós-consumo para ser reinserido no ciclo produtivo das embalagens na forma de caco. Segundo Venâncio *et al.* (2020) o beneficiamento ocorre por meio da separação das embalagens de acordo com o tipo e cor. Em seguida, é realizada a limpeza prévia, com o intuito remover sujeiras incrustadas nas paredes dos recipientes que possam prejudicar a qualidade do produto final.

Segundo Samarakoon, Ranjith e Silva (2020), o processo de beneficiamento das embalagens de vidro pós-consumo, que envolve a separação por cor e a remoção das impurezas, é um dos fatores que contribuem para a baixa taxa de reciclagem. Como consequência, grande parte desse material é encaminhado para aterros sanitários, o que compromete o retorno das embalagens como matéria-prima para a indústria de vidro e reduz a circularidade do material.

Convém destacar, que o processo de beneficiamento do vidro agrega valor ao produto final. O caco limpo, por exemplo, apresenta maior valor de mercado em comparação ao caco sujo, sendo facilmente empregado como matéria-prima pela indústria vidreira. A cor do vidro também é critério relevante na definição do preço, sendo o vidro branco o mais valorizado seguido pelo âmbar, verde e, por fim, o vidro misto (Circula Vidro, 2023).

Ainda na perspectiva de Venâncio *et al.* (2020), o emprego do caco de vidro impacta na redução do ponto de fusão durante a fabricação do vidro na indústria. Resultando na diminuição dos gastos com energia em cerca de 60%, além de reduzir a necessidade de barrilha e feldspato, que são considerados agentes fundentes bastante onerosos. Desta maneira, a incorporação de cacos de vidro como matéria-prima, busca preservar os recursos naturais e minimizar os impactos ambientais decorrentes do setor.

Chaparro *et al.* (2021) destacam que o reaproveitamento de uma tonelada de vidro pós-consumo reduz em aproximadamente 70% os gastos necessários na indústria de vidro. Os autores ressaltam que a reciclagem do vidro impacta positivamente tanto o meio ambiente, quanto os catadores de materiais recicláveis, por meio da geração de renda por meio da coleta dos materiais vítreos.

Embora o vidro configure-se como material 100% reciclável, alguns fatores dificultam seu reaproveitamento no ciclo produtivo e maximizam seu direcionamento aos aterros sanitários. A separação por tonalidade e a presença de contaminantes, por exemplo, são considerados desafios para seu retorno à indústria, já que demandam maiores custos

inviabilizando, muitas vezes, o processo de reciclagem e tornando os aterros o caminho mais comum e fácil (Carvalho, 2021; Oliveira, 2021).

Além das embalagens pós-consumo, outros tipos de vidros como espelhos, box de banheiro, lâmpadas e vidros de automóveis, devido sua composição química, exigem a utilização de tecnologia mais elevada e acarretam em maiores custos para sua inserção como insumo na indústria, comprometendo o volume de material submetido ao processo de reciclagem e tornando o direcionamento a aterros sanitários frequente (Venâncio *et al.* 2020).

Segundo o Manual Operacional Básico da Logística Reversa do Vidro (Circula Vidro, 2023), as embalagens produzidas pela indústria vidreira diferenciam-se de outros materiais por sua retornabilidade, ou seja, pela capacidade de ser reenvasadas, o que em média, pode ocorrer por até 35 ciclos sem comprometer suas características finais. Dentre as vantagens, destacam-se a geração de empregos por meio da coleta seletiva, triagem e beneficiamento, a redução da emissão de gases de efeito estufa, do consumo de energia nas fábricas e da extração de matérias-primas virgens.

Além das embalagens retornáveis, a indústria de vidro também produz vasilhames classificados como de uso único (*one way*), utilizados sobretudo pelas indústrias de alimentos, cosméticos e bebidas. Esses recipientes possuem características que impedem o processo de reenvase, como paredes menos espessas, o que inviabiliza seu retorno à indústria, diferentemente do que ocorre com as embalagens retornáveis. Ressalta-se que as embalagens *one way*, têm potencial para serem encaminhadas à reciclagem, no entanto, os elevados custos para beneficiamento do material dificultam sua destinação adequada (Circula Vidro, 2023).

2.2 ASPECTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS À INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO

Segundo o Anuário da Reciclagem 2022, as organizações de catadores e catadoras de materiais recicláveis no Brasil coletaram 66.867 toneladas de vidro em 2021. Esse volume representa cerca de 16% da totalidade do vidro coletado e destinado à reciclagem no país. Com isso, a indústria vidreira economizou 80,20 mil toneladas de areia e 53,5 milhões de kWh de energia, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4-Economia de matéria-prima e energia a partir dos volumes de reciclagem do vidro



Fonte: Elaborado pela autora (2024) com base no Anuário da Reciclagem 2022 (2022).

Apesar disso, o setor vidreiro está aquém dos índices ideais de reciclagem. Entre as barreiras enfrentadas está o baixo valor de comercialização do vidro reciclado. No Brasil, a média de preço por quilo do vidro foi de R\$ 0,21. No Nordeste, embora seja a segunda região que menos coleta e destina o vidro para reciclagem, o preço médio por quilo é o mais alto, atingindo R\$0,59 (Anuário da Reciclagem 2022).

Buscando maximizar os índices de reciclagem e promover a responsabilidade compartilhada entre os diversos setores da sociedade, o Governo Federal, por meio do Decreto 10.936, de 12 de janeiro de 2022, que regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos, destacou a importância da gestão integrada de todos os agentes no ciclo de vida dos produtos, sejam pessoas físicas ou jurídicas (Brasil, 2022).

Nessa perspectiva, a implementação da logística reversa, conforme o art. 13 do Decreto 10.936, configura-se como instrumento fundamental para a indústria vidreira, viabilizando o retorno das embalagens de vidro pós-consumo ao setor industrial e reintegrando-as como matérias-primas no ciclo produtivo, principalmente por tratar-se de um material de ciclo infinito, 100% reciclável. Na Figura 5 é possível verificar o ciclo de logística reversa para as embalagens de vidro.

Figura 5- Ciclo de logística reversa



Fonte: Elaborado pela autora (2024) com base no Associação Brasileira de Bebidas, (2024).

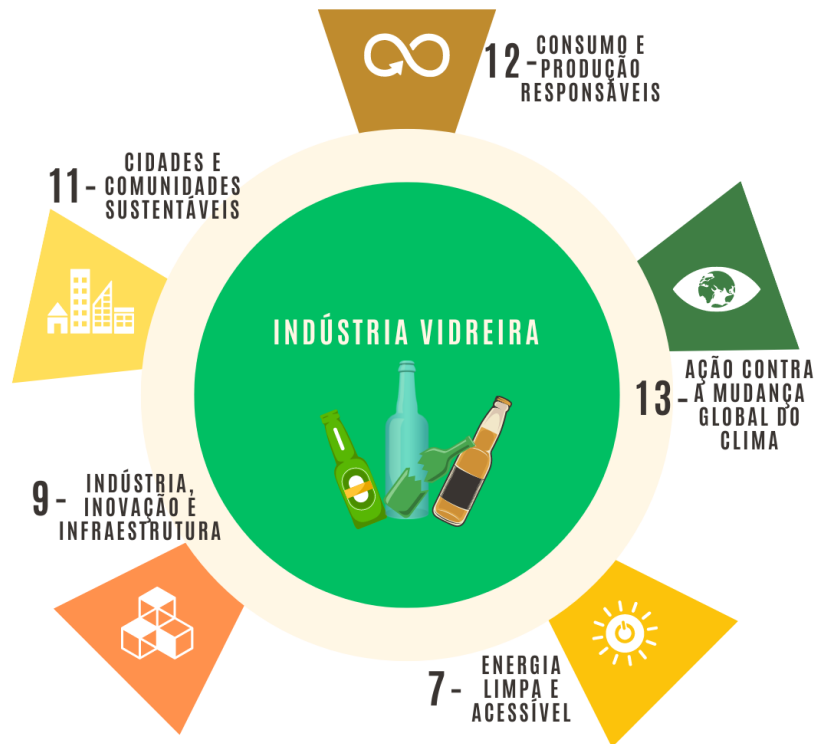
A logística reversa do vidro impacta diretamente o meio ambiente ao promover a circularidade ao passivo ambiental, minimizando o uso de energia, reduzindo as emissões de CO₂, o volume de vidro enviado aos aterros sanitários e a extração dos recursos naturais, especialmente a areia, que compõe a maior parte do vidro. Sendo assim, a aplicação e fiscalização, por parte do poder público, são cruciais para o cumprimento integral deste decreto (Oliveira, 2021).

Nos últimos tempos, a indústria de vidro, preocupada com as questões ambientais, tem ampliado os investimentos em metodologias que minimizem os impactos ao meio ambiente, como a adoção de matriz energética renovável, alteração no design das embalagens e reutilização de cacos de vidro reciclados. Essas práticas contribuem para a manutenção de um segmento comprometido com a preservação dos recursos naturais e diretamente relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Lutti, 2024).

Os ODS foram discutidos e definidos durante a Assembleia Geral das Nações Unidas de 2015, estabelecendo 17 Objetivos para a implementação da Agenda 2030, com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de um mundo mais sustentável. A indústria vidreira, ao adotar as práticas supracitadas, tem contribuído significativamente para o alcance dos ODS 7 - Energia

Limpa e Acessível, 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura, 12 - Consumo e Produção Responsáveis e 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima. Na Figura 6 é possível verificar os ODS citados.

Figura 6- ODS e a indústria vidreira



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Segundo a Associação dos Industriais de Vidro de Embalagens (2024), a indústria vidreira europeia possui o desafio de produzir seguindo os padrões da economia circular. Para isso, o setor vem incorporando mecanismos inovadores para minimizar as emissões de carbono, como o emprego de fornos híbridos, buscando reduzir o uso do gás natural ao substituí-lo por eletricidade proveniente de fontes alternativas como a biomassa. Essa alteração contribui para o alcance dos ODS 7, 9, 12 e 13.

Cabe ressaltar que, de acordo com a Abravidro (2024), a indústria vem adotando práticas sustentáveis no ambiente corporativo, incluindo o tratamento de efluentes, o que possibilita a reutilização de até 98% da água utilizada no processo. O setor também estabeleceu a logística reversa com empresas parceiras e fornecedores, além de incentivar o desenvolvimento que

envolvam o reaproveitamento do pó de vidro, oriundo do processo de tratamento de água na indústria.

Apesar desse avanço, grande parte do vidro pós-consumo não é reciclado ou direcionado ao ciclo de logística reversa, tendo os lixões, rios, oceanos, terrenos baldios e aterros sanitários como destino final. Embora os aterros sanitários possuam infraestrutura legal e apropriada para o recebimento de resíduos sólidos, não são o local ideal para o vidro, considerando que o material é 100% reciclável e pode retornar ao ciclo produtivo na forma de matéria-prima (Abividro, 2022).

Contudo, o processo de reciclagem do vidro ainda é pouco explorado no Brasil, devido à baixa rentabilidade, se comparado a outros materiais recicláveis, além do custo reduzido das matérias-primas virgens (Santana; Lange; Magalhães, 2022). Destaca-se ainda, os elevados custos de transporte, devido as longas distâncias das vidrarias e recicladoras de vidro e a disparidade geográfica em relação a oferta de coleta seletiva em nosso país, principalmente nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, diferentemente do que ocorre em outros países como a Alemanha e a Coreia do Sul, líderes mundiais no índice de reciclagem (Croce, 2023).

Buscando propor destinação ambientalmente viável as embalagens de vidro pós-consumo, diversas pesquisas acadêmicas na área da construção civil vêm sendo desenvolvidas propondo sua incorporação parcial em substituição ao teor de cimento na fabricação de artefatos cimentícios.

2.3 APLICAÇÃO DO VIDRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

O ciclo de produção do cimento Portland envolve a utilização de grandes quantidades de matérias-primas e combustíveis fósseis, resultando na emissão de gases intensificadores do efeito estufa, impactando diretamente o meio ambiente. Por essa razão, pesquisadores ao longo dos anos vêm investigando a aplicação de materiais ligantes ecológicos em substituição parcial ao cimento Portland (Shoaei *et al.*, 2020).

Segundo a NBR 12653 - Materiais pozolânicos (ABNT, 2014), as propriedades dos materiais compósitos (concretos, argamassas e pasta) são fortemente influenciadas pela inserção de materiais pozolânicos. No entanto, devem ser observados alguns critérios, como teor de substituição, adensamento, condições de cura, entre outras características, para que os resultados sejam positivos.

Sendo assim, a aplicação do pó de vidro para fabricação de materiais cimentícios vem sendo amplamente investigada pela comunidade científica. Brito (2021b) analisou o efeito da incorporação do pó de vidro para a fabricação de argamassas, buscando avaliar o comportamento físico e mecânico dos corpos de prova a partir da incorporação de diferentes teores de subproduto 3%, 5%, 10% e 15% nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias de cura.

Para isso, o autor empregou o pó de vidro oriundo de garrafas *long neck* na cor âmbar, que após processo de beneficiamento tiveram suas partículas reduzidas em moinhos de bola. O ensaio de difratometria de Raios X, revelou banda amorfa característica na região $2\Theta=30^\circ$. No ensaio de fluorescência de Raios X foram identificados majoritariamente a presença dos seguintes componentes: SiO_2 (73,23%), CaO (13,83%) e Na_2O (8,01%). O óxido de silício é considerado determinante para seu emprego como material cimentício suplementar em matrizes cimentícias.

Ademais, os resultados de resistência à compressão axial para os corpos de prova contendo 15% de subproduto apresentaram melhor desempenho, com acréscimo de resistência superior a 34% aos 28 dias em comparação ao corpo de prova de referência. Aos 91 dias, o ganho de resistência foi de 97%. Estes resultados corroboram com a NBR 12653 - Materiais pozolânicos (ABNT, 2014), que enfatiza aumento da resistência dos corpos de prova em idades superiores.

Dias *et al.* (2021) investigaram a influência da incorporação do pó de vidro em substituição parcial ao cimento Portland na fabricação de compósitos cimentícios de ultra desempenho. Para isso, foram empregados percentuais variados de 0%, 10%, 20%, 30% e 50%, e avaliadas propriedades relacionadas à resistência mecânica e à migração de cloretos dos corpos de prova aos 28 dias de idade.

Os pesquisadores obtiveram resultados favoráveis quanto à inserção do subproduto na produção do compósito cimentício. Para o resultado de resistência à compressão, não houve diferença estatística significativa entre os dados obtidos para os corpos de prova com 10%, 20% e 30% em relação ao de referência. No entanto, houve diminuição de 23,5% para o percentual de substituição de 50%. Apesar disso, segundo os autores todas as formulações foram consideradas compósitos cimentícios de ultra alto desempenho.

Dias *et al.* (2021) também evidenciaram que os corpos de prova produzidos foram altamente resistentes à penetração de cloretos, configurando o pó de vidro como subproduto promissor para a substituição parcial do cimento em concretos especiais. Apesar do aumento

que ocorreu no coeficiente de difusão de cloretos, à medida que se aumentava o teor de subproduto, os valores foram abaixo dos dados presentes na literatura.

Guo *et al.* (2020) realizaram uma revisão acerca das principais discussões sobre a influência da incorporação de diferentes tipos de vidro na produção de concreto. Para tanto, foram analisados os efeitos de resistência à compressão, de análise microestrutural e durabilidade. Os pesquisadores apontam viabilidade para o emprego do pó de vidro, oriundo de embalagens pós consumo, como material cimentício suplementar eficaz para substituição parcial do aglomerante.

Na perspectiva dos autores, a maioria das pesquisas apontou para o aumento dos índices de resistência à compressão de concretos produzidos a partir da incorporação do subproduto, sendo utilizado inclusive na fabricação de concretos de ultra alto desempenho. Guo *et al.* (2020) afirmaram que a dimensão das partículas e o percentual de substituição são cruciais para o alcance de bons resultados de compressão.

No quesito durabilidade, a incorporação do pó de vidro no concreto auxilia na redução dos índices de permeabilidade e dificulta o transporte de íons prejudiciais no concreto. Esse resultado é atribuído ao efeito filer e pozolânico desempenhado pelo subproduto, cuja granulometria contribui para a maior densidade de empacotamento das partículas e, conseqüentemente, para melhores resultados em termos de permeabilidade (Guo *et al.*, 2020).

Ademais, outro aspecto bastante discutido ao se incorporar o pó de vidro em matrizes cimentícias é a Reação Álcalis Sílica (RAS). Segundo Shoaie *et al.* (2020), a reação ocorre por meio da interação entre os álcalis presentes no cimento e a sílica reativa encontrada em agregados ou minerais de pequena granulometria, empregados em substituição ao aglomerante. Esta reação proporciona a formação de gel, que se expande causando fissuras internas, reduzindo assim, a capacidade de resistência.

Bueno *et al.* (2020) destacaram que a RAS é considerada uma das maiores preocupações quanto ao uso do pó de vidro em matrizes para produção de concreto. No entanto, esse problema pode ser atenuado com o controle da granulometria das partículas. Segundo os autores, a tendência é que o pó de vidro com menor dimensão seja mais reativo e, por conseguinte, minimize o efeito da RAS, uma vez que uma maior área superficial favorece a reatividade.

Santos *et al.* (2024) investigaram a influência da utilização de resíduo de vidro proveniente do processo de lapidação na produção de argamassas, como substituição parcial ao cimento Portland e ao agregado miúdo em diferentes percentuais de 5%, 10% e 20%. Os

resultados indicaram viabilidade para ambas as substituições, entretanto, determinados parâmetros, como a resistência à compressão, foram mais significativamente influenciados pela presença do vidro do que outros.

No que se refere à resistência à compressão, não houve diferença significativa até o teor de 10% em relação a massa de cimento. Contudo, detectou-se queda de aproximadamente 12% na resistência para o percentual de 20% em relação ao corpo de prova de referência. Por outro lado, a substituição do agregado miúdo pelo pó de vidro apresentou diferenças significativas até o teor de 10%, com incremento de resistência de até 18%.

Borges *et al.* (2025) analisaram os efeitos filler e pozolânico em argamassas ocasionados pela incorporação de pó de vidro com partículas inferiores a 0,075mm, em substituição parcial ao cimento Portland, nas proporções de 0%, 10%, 20%, 30% e 50%. Os autores observaram que a substituição de 20% não resultou em diferença significativa nas propriedades mecânicas da argamassa em relação à de referência, evidenciando a viabilidade técnica da incorporação do subproduto como material cimentício suplementar.

Os autores realizaram os ensaios mecânicos em diferentes idades: 7, 28 e 91 dias. No entanto, apenas aos 91 dias de cura foi observada uniformidade no ganho de resistência à compressão à medida que se aumentava o percentual de substituição pelo subproduto. Em comparação com a argamassa de referência, observou-se acréscimo de 24,06% na resistência, atribuído ao efeito pozolânico, ao qual foi relacionado pelos autores à reatividade lenta do pó de vidro ao longo do tempo (Borges *et al.*, 2025).

2.4 LADRILHO HIDRÁULICO

Segundo Medeiros e Silva (2023) o ladrilho hidráulico é um revestimento produzido por meio da utilização de cimento, agregados e pigmentos, que pode ser aplicado tanto em pisos quanto em paredes. Sua aplicação iniciou-se no fim do século XIX, mas, por volta da década de 1960, começou a perder espaço para o revestimento cerâmico devido à facilidade de produção.

Segundo Lamas, Longo e Souza (2018) os primeiros ladrilhos que chegaram ao Brasil no fim do século XIX foram oriundos de países europeus como a França, Portugal e Bélgica. No decorrer do tempo imigrantes residentes no território brasileiro assimilaram a técnica de produção e implantaram as indústrias pioneiras no país, mais precisamente na cidade de São Paulo e Pelotas, no Rio Grande do Sul.

A quantidade de pesquisas científicas acerca dos ladrilhos hidráulicos é bastante reduzida no meio acadêmico. Esse fato pode estar relacionado à técnica artesanal de produção, que se mantém similar ao longo dos anos. Para se ter uma ideia, na planta produtiva, um único ladrilheiro pode atuar em todas as etapas de fabricação, imprimindo caráter peculiar a cada peça produzida (Lamas; Longo; Souza, 2018).

O processo de fabricação dos ladrilhos hidráulicos tradicionais inclui a execução de três camadas. A camada superior, que corresponde à face exposta, é formada por cimento Portland, pigmento, mistura de dolomita, quartzo e água. A camada intermediária, responsável por absorver água da camada superior, é constituída por cimento Portland e quartzo. Por fim, a terceira e última camada é utilizada para promover aderência à superfície a qual será fixada, sendo composta por argamassa, que inclui areia, cimento Portland e água (Lamas; Longo; Souza, 2018).

Embora a técnica de fabricação dos ladrilhos hidráulicos mantenha características artesanais, Fontes *et al.* (2018) enfatizaram que ela foi aprimorada ao longo do tempo, com o intuito de maximizar sua adoção em larga escala. Pesquisas desenvolvidas como as de Destefani (2013) e Savazzini-Reis e Fagundes (2019) apontaram viabilidade técnica para a produção de ladrilho hidráulico vibrado e em camada única sem interferir em suas propriedades físicas e mecânicas, conferindo maior agilidade na produção em comparação à técnica tradicional.

O processo de cura do ladrilho hidráulico pode ser realizado por imersão ou cura úmida, métodos que, aliados à capacidade de incorporar subprodutos em sua composição, conferem a este material características ambientais e de menor impacto. Isso se deve à dispensa do processo de sinterização, comum aos materiais cerâmicos, que são seus principais concorrentes no mercado, além de reduzir a necessidade de utilização de matérias-primas virgens ao inserir subprodutos na mistura (Torres, 2020).

Apesar disso, segundo Castro (2022), a fabricação do ladrilho hidráulico envolve o consumo de grande quantidade de cimento, grande emissor de gases intensificadores do efeito estufa para a atmosfera. Por esta razão, destaca-se a importância do desenvolvimento de pesquisas que envolvam a substituição parcial do aglomerante por subprodutos oriundos de diversos setores, com o intuito de promover circularidade aos passivos ambientais e promover o desenvolvimento de ladrilho hidráulico de menor impacto, conforme a proposta do presente trabalho.

2.4.1 Propriedades avaliadas durante a produção do ladrilho hidráulico

A NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013), estabelece os principais parâmetros para a aceitação dos ladrilhos hidráulicos, incluindo a avaliação dimensional e resistência mecânica. Na Tabela 1, evidenciam-se as principais tolerâncias dimensionais que devem ser observadas na produção das peças.

Tabela 1-Limites e tolerâncias dimensionais para ladrilhos hidráulicos

Dimensões avaliadas	Requisitos dimensionais	Tolerância
Largura	100 mm dimensão mínima	± 3 mm
Comprimento	400 mm dimensão máxima	± 3 mm
Espessura	18 a 20 mm	± 1 mm
	Maior que 20 mm	± 2 mm

Fonte: Elaborado pela autora (2024) baseado na NBR 9457 (ABNT, 2013).

Além das tolerâncias dimensionais citadas anteriormente, os relevos tronco-cônicos presentes no piso tátil de alerta também foram avaliados, conforme NBR 16537 - Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação (ABNT, 2024). Na seção 2.4.2 é possível verificar as dimensões recomendadas pela norma regulamentadora, com o intuito de garantir melhor conforto durante o deslocamento.

Destefani (2013) submeteu o ladrilho hidráulico piso tátil, produzido com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais, à avaliação dimensional, analisando tanto os formatos e dimensões quanto a textura de sinalização tátil de alerta, conforme avaliado no presente estudo e obedecendo os parâmetros e tolerâncias mencionados pelas normas.

No que se refere à resistência mecânica dos ladrilhos hidráulicos, a norma regulamentadora prescreve que os elementos devem apresentar resistência à flexão igual ou superior a 3,5 Mpa. Para isso, segundo a NBR 16790 - Pisos assentados de placa de concreto - Requisitos e procedimentos (ABNT, 2020), eles devem ser submetidos ao ensaio no mínimo 6 corpos de prova.

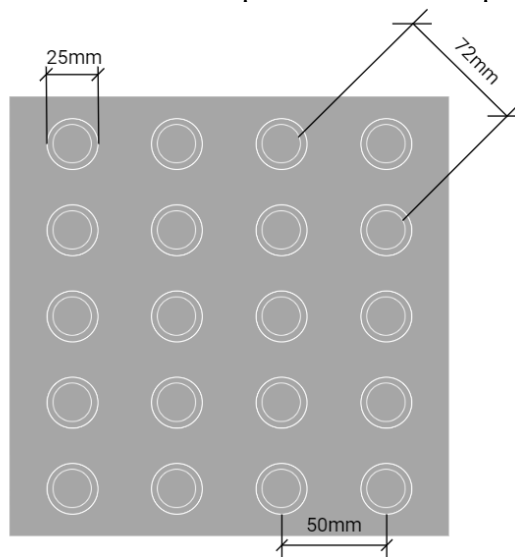
2.4.2 Ladrilho hidráulico piso tátil

Na perspectiva de Torres (2020) a aplicação de ladrilhos hidráulicos em ambientes públicos, como calçadas, contribui para a transformação desses espaços em áreas mais inclusivas e acessíveis para pessoas com mobilidade reduzida. Isso se deve às características das peças, que podem apresentar relevos diferenciados facilitando a circulação dos pedestres e contribuindo para cumprimento da NBR 9050 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos (ABNT, 2020).

Segundo a NBR 16537 - Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação (ABNT, 2024), a utilização de sinalização tátil em piso trata-se de importante mecanismo complementar para assegurar maior orientação durante o deslocamento dos pedestres, sobretudo para pessoas com deficiência visual ou surdo-cegueira.

Para isso, os ladrilhos hidráulicos piso tátil, devem obedecer aos limites dimensionais especificados pela NBR 16537 - Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação (ABNT, 2024), no que diz respeito ao dimensionamento dos relevos presentes no piso tátil de alerta. As distâncias recomendadas podem ser evidenciadas na Figura 7 e têm como objetivo proporcionar maior comodidade aos pedestres que transitam sobre os ladrilhos.

Figura 7- Requisitos dimensionais para os relevos do piso tátil de alerta



Fonte: Autora (2024) adaptado da NBR 16537 (ABNT, 2024).

A sinalização tátil de alerta no piso é utilizada para indicar situações de risco, como desníveis, mudanças de direção ou percurso, início e fim de escadas e rampas, e locais para

travessia de pedestres. Além disso, a peça deve ser antiderrapante, manter a cor durante sua vida útil para facilitar o deslocamento de pessoas com baixa visão e ter o relevo em contraste com o piso adjacente. Essas características são consideradas requisitos fundamentais para piso tipo alerta para garantir ambientes mais acessíveis, segundo a NBR 16537 - Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação (ABNT, 2024).

2.5 PRINCIPAIS ESTUDOS ACERCA DA INCORPORAÇÃO DE SUBPRODUTOS PARA FABRICAÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO

Na literatura, foram identificados estudos que investigaram a viabilidade técnica de incorporação de subprodutos provenientes de diversas cadeias produtivas na fabricação de ladrilhos hidráulicos. Esses trabalhos avaliaram tanto a substituição parcial do agregado miúdo quanto do aglomerante, com o intuito de minimizar a exploração de matérias-primas virgens, impactando diretamente de maneira benéfica o meio ambiente.

Brito (2021a) avaliou a incorporação de diferentes percentuais de vermiculita (0%, 10%, 30% e 50%) em substituição parcial ao teor de areia artificial (pó de pedra) em argamassas para fabricação de ladrilho hidráulico. Para isso, foram produzidos corpos de prova cilíndricos para avaliar as propriedades da argamassa no estado endurecido, mais especificamente por meio dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por imersão e capilaridade. A formulação mais promissora foi utilizada para fabricação do protótipo do ladrilho hidráulico.

O estudo apontou a viabilidade técnica de incorporação de 10% de vermiculita, observando-se resistência à compressão de 13,36 Mpa aos 14 dias de cura. Em relação ao ensaio de absorção de água por imersão e por capilaridade, os índices apresentaram tendência de aumento à medida que os teores de subproduto se elevavam na composição. Apesar disso, não houve maior influência nas características finais da argamassa, e o protótipo do ladrilho hidráulico pôde ser produzido por meio de moldes plásticos e submetido a análise visual.

Savazzini-Reis e Fagundes (2019) investigaram a incorporação de subproduto oriundo de marcenaria para a produção de ladrilho hidráulico vibrado. Para isso, o agregado miúdo foi substituído parcialmente em diferentes teores de 5%, 15% e 25%, e as propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas por meio da realização do ensaio de resistência à flexão, absorção de água e análise dimensional, conforme prescrito pela NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

Os autores apontaram que a formulação contendo 5% de subproduto se destacou como

a mais promissora, com resistência à flexão de 3,71 Mpa e o menor índice de absorção de água, de 16,14%. Essa análise sugere uma relação inversamente proporcional entre os resultados de absorção de água e resistência à flexão dos corpos de prova produzidos. No que tange à análise dimensional dos ladrilhos, os resultados foram satisfatórios, segundo os parâmetros das normas regulamentadoras.

Ferreira, Campos e Barros (2023) analisaram a incorporação de Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), proveniente do processo de corte e polimento, para produção de ladrilho hidráulico piso tátil vibrado e em única camada. Para isso, foram inseridos diferentes percentuais de 10%, 20%, 30% e 40% em substituição ao teor de cimento na mistura. A viabilidade técnica do material pôde ser verificada através dos ensaios de resistência à flexão, absorção de água e análises dimensionais do material produzido.

Os autores obtiveram 1,95 Mpa como o melhor resultado com o teor de substituição de 30% de LBRO no ensaio de resistência à flexão. Apesar disso, os resultados encontrados não foram satisfatórios para apontar viabilidade técnica de incorporação do subproduto para fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil, no que concerne os aspectos mecânicos (Ferreira; Campos; Barros, 2023).

Destefani (2013) propôs avaliar o comportamento de ladrilho hidráulico vibrado a partir da inserção de subproduto oriundo do beneficiamento de rochas ornamentais em substituição ao percentual de cimento. O autor optou pela fabricação de corpos de prova prismáticos para avaliar seu comportamento e posterior produção do ladrilho hidráulico, com a formulação mais promissora.

O estudo apontou viabilidade técnica de inserção do subproduto. Para os corpos de prova prismáticos, obteve-se módulo de ruptura à flexão superior a 5 Mpa e teor de absorção de água inferior a 8% aos 28 dias. Ao realizar os testes supracitados nos ladrilhos hidráulicos, a média do módulo de ruptura à flexão foi de 5 Mpa, enquanto o índice de absorção de água médio foi de 6%. O resultado mecânico enquadrou-se dentro dos parâmetros da norma regulamentadora NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

Fontes *et al.* (2021) investigaram a utilização de rejeitos de barragem de minério de ferro no desenvolvimento de ladrilhos hidráulicos. Para isso, os autores realizaram testes com diferentes proporções de substituição do agregado miúdo por rejeito: 0%, 25% e 50%, para aplicação tanto na camada base quanto como pigmento. Ademais, o estudo também contemplou uma análise ambiental, social, técnica e de valor acerca da incorporação do rejeito na fabricação

do ladrilho.

As análises realizadas comprovaram viabilidade técnica de incorporação do rejeito como substituto dos corantes convencionais, configurando-se como alternativa sustentável e visualmente atrativa para o uso como pigmento em ladrilhos hidráulicos. Quanto ao desempenho físico e mecânicos, os autores ressaltaram a necessidade da realização de ensaios complementares para validar plenamente a aplicação do material.

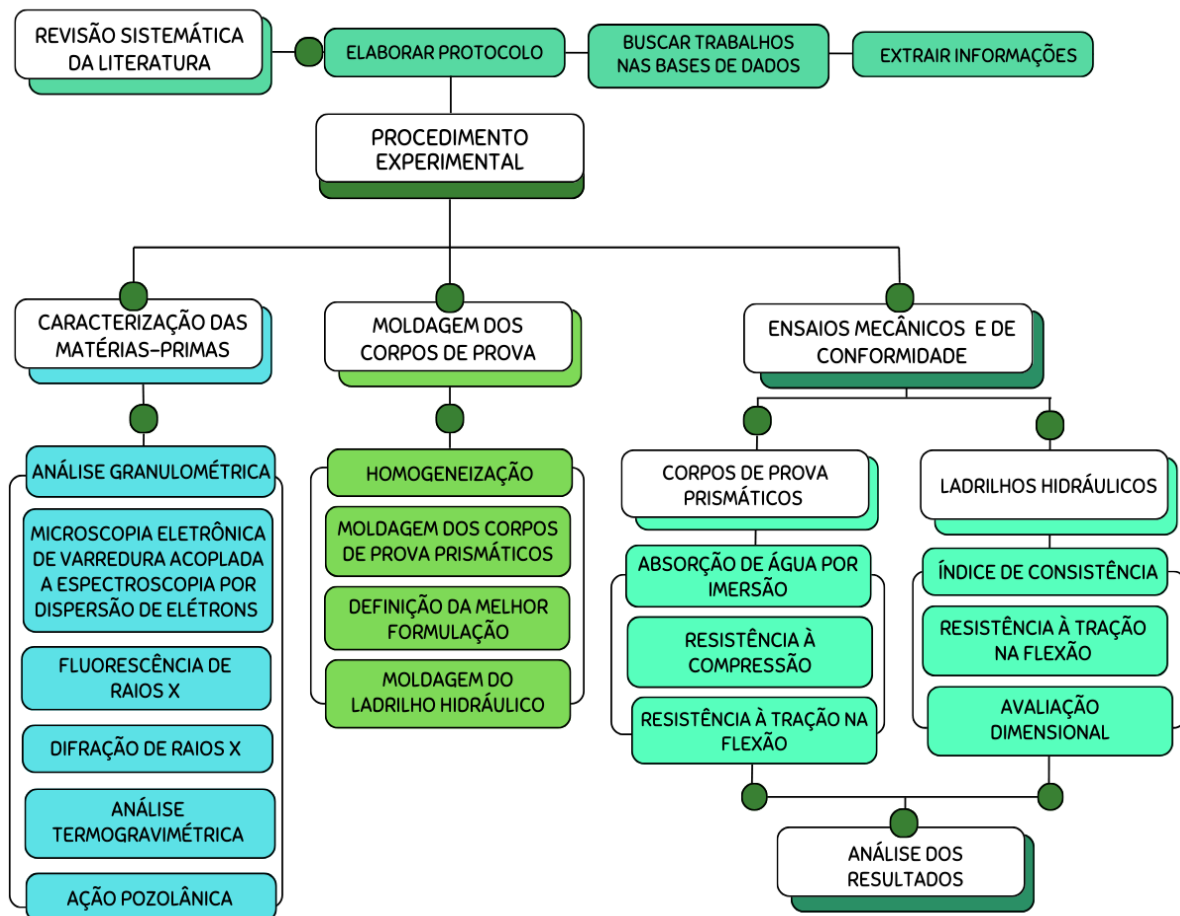
Baseando-se nos estudos apresentados, foi possível estabelecer a metodologia para a produção dos ladrilhos hidráulicos, bem como as principais características físicas e mecânicas que deveriam ser analisadas tanto nos corpos de prova, quanto no subproduto utilizado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi de caráter experimental, com natureza tecnológica e abordagem quantitativa. Segundo Guerra (2023), a pesquisa experimental é considerada importante ferramenta para testar hipóteses, envolvendo o controle rigoroso de variáveis para que fenômenos relacionados ao estudo possam ser observados e discutidos.

Na Figura 8 pode ser observado o fluxograma que contém todas as etapas deste estudo, incluindo o desenvolvimento da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), caracterização das matérias-primas, moldagem dos corpos de prova, realização dos ensaios tecnológicos e análise dos resultados.

Figura 8-Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O procedimento de desenvolvimento da pesquisa foi dividido em 5 etapas. A primeira abordou o processo de elaboração da RSL, acerca da produção de ladrilhos hidráulicos com objetivo de constituir o suporte teórico do estudo. A segunda etapa tratou da caracterização do

pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo para compreensão das propriedades e características do subproduto. A terceira etapa incluiu o processo de homogeneização e moldagem de corpos de prova prismáticos e ladrilhos hidráulicos para realização dos ensaios mecânicos. Na quarta etapa foram executados os ensaios mecânicos e de conformidade. Na quinta e última etapa foram analisados os resultados para cada variável resposta.

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Segundo Galvão e Ricarte (2019), a RSL consiste em uma metodologia de estudo que engloba, em seu desenvolvimento, a aplicação de protocolos específicos que permitem a replicabilidade por outros estudiosos. Nesta modalidade de pesquisa, ficam explícitas todas as etapas do desenvolvimento do estudo, incluindo as questões de pesquisa, as plataformas de busca empregadas, os critérios de inclusão e exclusão de periódicos e os métodos aplicados para seleção dos estudos.

A execução desta revisão sistemática da literatura foi de suma importância para o desenvolvimento do presente estudo, ao tempo que possibilitou a identificação das principais metodologias empregadas no desenvolvimento de ladrilhos hidráulicos, principalmente no que se refere às características físicas-químicas e mineralógicas dos subprodutos que foram incorporados em substituição parcial ao teor de cimento.

Nesta perspectiva, esta RSL teve como objetivo reunir os principais estudos presentes nas bases bibliográficas, previamente definidas, acerca da incorporação de resíduos para produção de ladrilhos hidráulicos. Convém esclarecer que, para efeitos desta RSL, foi aplicado o termo “resíduo” como sinônimo de “subproduto”, já que apenas este último, por se tratar de nomenclatura ainda recente na academia, retornou menor quantidade de trabalhos nas plataformas de busca.

Para isso, inicialmente foram elaboradas três perguntas de pesquisa, essenciais para a execução da RSL, pois nortearam as etapas subsequentes. São elas: P1- Quais as principais características físico-químicas e mineralógicas dos resíduos incorporados em substituição parcial do cimento na fabricação de ladrilhos hidráulicos? P2- Quais os procedimentos experimentais mais comuns empregados na produção dos ladrilhos hidráulicos? P3- Houve viabilidade técnica de incorporação de resíduos para produção de ladrilhos hidráulicos?

Após a elaboração das perguntas de pesquisa, foram definidas as plataformas de busca que foram utilizadas no decorrer da RSL. Para tanto, foram selecionadas as bases de dados:

Science Direct, *Google Scholar* e *Scopus*. Vale ressaltar que inicialmente pensou-se em uma *string* de busca por pergunta de pesquisa, no entanto, detectou-se grande quantidade de estudos duplicados.

As *strings* foram formuladas, a partir do emprego de palavras-chave e seus respectivos sinônimos, utilizando-se operadores booleanos AND (e) e OR (ou). Destaca-se a necessidade de adaptação dessas *strings* às plataformas de busca, além da utilização dos termos em língua inglesa, com o intuito de ampliar o escopo de busca nas bases bibliográficas, por se tratar de idioma universal. No Quadro 1 evidencia-se as bases de dados selecionadas, bem como as *strings* que foram aplicadas por pergunta de pesquisa.

Quadro 1-Strings de buscas definidas por base de dados

Base de dados	Strings de busca	
	Português	Inglês
<i>Science Direct</i>		("cement tile" OR "hydraulic tile") AND ("waste" OR "residue" OR "byproduct") AND ("experimental procedure" OR tests OR experimental OR trials)
<i>Google Scholar</i>	("ladrilho hidráulico") AND (incorporação) AND (resíduo OR subproduto)	("hydraulic tiles") AND (paving OR pavement) AND (incorporation) AND (waste"OR residue OR byproduct)
<i>Scopus</i>		("cement tiles" OR "hydraulic tiles") AND ("waste" OR "residue" OR "byproduct")

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Após realização das buscas nas bases de dados, quantidade significativa de periódicos, teses, dissertações e outros materiais acadêmicos retornaram, fazendo-se necessário a aplicação de estratégias de buscas, com o intuito de eliminar aqueles que não fazem parte do escopo deste trabalho ou que não satisfazem critérios de inclusão e exclusão, conforme Quadro 2. Os estudos passaram por triagem através da aplicação de metodologia específica, que inclui, sequencialmente, a leitura do título, resumo, palavras-chave, leitura diagonal e por último a leitura completa do material selecionado.

Quadro 2-Critérios de exclusão e inclusão

Exclusão (E)	Artigos com número de páginas inferior ou igual a 3
	Artigos duplicados
	Artigos não relacionados com a temática de ladrilhos hidráulicos
	Estudos que não apresentem metodologia estruturada
	Estudos provenientes de monografias
	Estudos que não estejam publicados na língua inglesa ou portuguesa
	Estudos que não respondam as perguntas de pesquisa
Inclusão (I)	Artigos publicados integralmente
	Estudos publicados nos últimos 12 anos
	Os estudos devem abordar, especificamente, a produção de ladrilhos hidráulicos
	Os estudos devem envolver a incorporação de resíduos para produção de ladrilhos hidráulicos

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A aplicação dos critérios de exclusão e inclusão, mencionados no Quadro 2, contribuíram para a seleção dos estudos mais relevantes e atuais acerca da produção de ladrilhos hidráulicos. Isso influenciou diretamente na qualidade dos resultados desta RSL, bem como otimizou o tempo, evitando que estudos que não se enquadraram nos parâmetros citados fossem analisados.

Os materiais acadêmicos aceitos (teses, dissertações e artigos) foram submetidos aos critérios de qualidade, com o intuito de avaliar tópico a tópico, a presença dos parâmetros estabelecidos, de acordo com o Quadro 3. Para cada item, foi atribuída nota entre 0 e 20. Aqueles estudos cujo somatório final estiveram entre 0 e 59 foram considerados reprovados e somente aprovados entre 60 e 100.

Quadro 3-Critérios de qualidade

Tópico	Critério de qualidade	Pontuação
Introdução	Este tópico apresenta contextualização adequada, incluindo os objetivos do estudo, bem como a justificativa acerca do desenvolvimento de ladrilhos hidráulicos?	
Referencial Teórico	O referencial teórico inclui estudos recentes e autores proeminentes sobre a fabricação de ladrilhos hidráulicos?	
Metodologia	Estão detalhadas todas etapas do desenvolvimento do estudo, englobando materiais utilizados, equipamentos e normas regulamentadoras empregadas?	
Resultados e Discussão	A discussão dos resultados é embasada por estudos recentes da literatura, quanto à produção de ladrilhos hidráulicos? São empregados métodos estatísticos?	

Conclusão	Na conclusão, é possível identificar se foram alcançados os objetivos e se houve viabilidade técnica, quanto a fabricação de ladrilhos hidráulicos?	
-----------	---	--

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Após a definição dos estudos selecionados, foi possível realizar a etapa de extração dos dados. Para isso, foram coletadas informações, através do emprego de critérios de extração (Quadro 4), que nortearam o desenvolvimento do presente estudo.

Quadro 4-Critérios de extração dos estudos

Campo	Conteúdo
Componente substituído na formulação	{Areia, Cimento, Ambos}
Técnicas de caracterização empregadas para caracterização do resíduo	Inserir todas as técnicas de caracterização aplicadas
Tipos de resíduos empregados em substituição ao cimento Portland	Inserir os resíduos evidenciados
Procedimentos experimentais empregados para análise da viabilidade técnica dos ladrilhos hidráulicos	Inserir os procedimentos empregados
Como o estudo evidenciou viabilidade técnica para produção de ladrilhos hidráulicos	{Apresentação de dados, Comparação, Normas/Referências}

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Foi utilizada a ferramenta Parsifal, disponível de maneira online e gratuita, com o intuito de organizar todo processo de desenvolvimento da RSL. Através desta plataforma, foram identificados estudos duplicados, que porventura pudessem estar disponíveis em diferentes bases de dados, além de auxiliar na etapa de extração de dados.

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS

O processo de fabricação dos ladrilhos hidráulicos envolveu a utilização de cimento Portland, agregado miúdo e pó de vidro. O cimento utilizado foi o CP V-ARI, habitualmente empregado para fabricação de ladrilhos hidráulicos, areia proveniente de jazida local, nas imediações da cidade de Palmeira dos Índios e vidro coletado por meio de entidade administrativa do estado de Alagoas.

3.2.1 Cimento Portland

Segundo Bauer (2008), o cimento Portland é constituído majoritariamente por cal, sílica, alumina, óxido de ferro, magnésia e pequena quantidade de anidrido sulfúrico, que é utilizado

para retardar o tempo de pega. Ademais, estão presentes outros óxidos em percentuais menos expressivos, como o óxido de sódio, potássio e titânio.

Ainda de acordo com o autor, quando as matérias-primas mencionadas são adequadamente homogeneizadas em proporções específicas e submetidas à temperatura de fusão formam o clínquer, que quando pulverizado dá origem ao cimento Portland, largamente empregado na construção civil.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2024) o cimento pode ser encontrado no mercado como cimento Portland comum (CP I), composto (CP II), alto forno (CP III), pozolânico (CP IV), alta resistência inicial (CP V), resistente a sulfatos (RS), baixo calor de hidratação (BC) e branco (CPB).

Nesta pesquisa, optou-se pela utilização do CP V-ARI, igualmente empregado para produção de ladrilho hidráulico nos trabalhos desenvolvidos por Brito (2021a) e Santos, Reis e Rodrigues (2022). O cimento foi facilmente encontrado no mercado em embalagens de 50 Kg e armazenado no Laboratório de Materiais de Construção do IFAL *campus* Palmeira dos Índios.

3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo é definido como material incoeso, composto por partículas de variadas dimensões, que em sua maioria, não apresenta reatividade química com outros componentes. A areia proveniente de rios é classificada como agregado natural, sendo encontrada na natureza com diâmetros entre 0,06mm e 2,00mm (Bauer, 2008).

A areia utilizada para a produção dos corpos de prova foi adquirida em jazida local e armazenada em baias, localizadas no Laboratório de Materiais de Construção do IFAL *campus* Palmeira dos Índios. O agregado miúdo foi caracterizado por meio do ensaio de massa específica, de acordo com a NBR 9776 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman (ABNT, 1987), e de análise granulométrica, conforme NBR NM 248 - Agregado para concreto – determinação da composição granulométrica (ABNT, 2001).

3.2.3 Obtenção do subproduto

O subproduto foi coletado por meio de entidade administrativa pública do município de Maceió em Alagoas, que vem desenvolvendo ação pioneira no que diz respeito à transformação de garrafas de vidro pós-consumo em areia para aplicação em diversos setores da sociedade,

com destaque para a construção civil, que consome grandes quantidades de recursos naturais em seu ciclo produtivo.

O processo de trituração das garrafas de vidro ocorreu por meio de máquinas disponibilizadas por empresa parceira, equipadas com tela eletrônica que apresenta o passo a passo para uso do equipamento. O manuseio é bastante simplificado e inclui duas etapas: a primeira de descarte do líquido em compartimento específico e a segunda de inserção da garrafa no local indicado para trituração. Segundo informações do fabricante, em apenas 3 segundos a garrafa inserida transforma-se em areia.

O vidro triturado é armazenado na parte inferior da máquina por meio de bombona de 50 kg, que, após atingir sua capacidade máxima, tem o material recolhido e encaminhado para local apropriado. Na Figura 9 é possível visualizar protótipo do equipamento utilizado para trituração das embalagens de vidro.

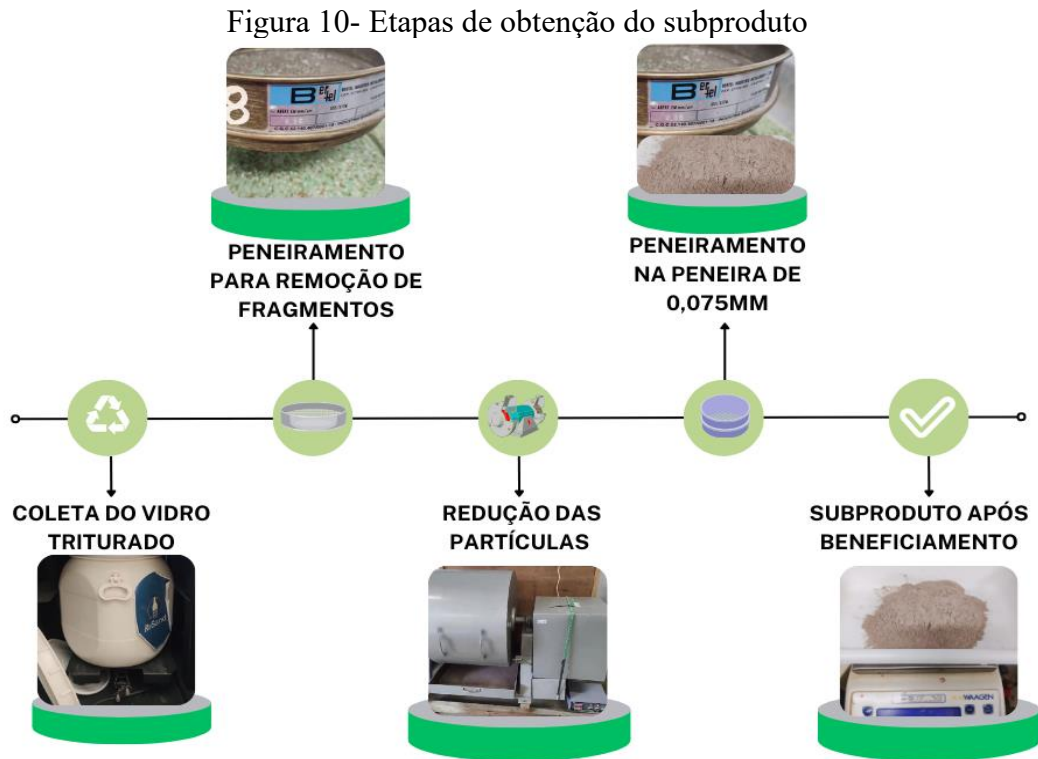
Figura 9- Protótipo do equipamento utilizado para trituração das embalagens de vidro



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Após coleta do subproduto diretamente na entidade pública, o vidro triturado foi encaminhado ao Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Alagoas

(IFAL), *campus* Palmeira dos Índios. Inicialmente, o material passou pelo processo de peneiramento, por meio da peneira de 2,36mm ou 8 *mesh*, com o intuito de eliminar fragmentos de rótulos e outras impurezas que poderiam ficar retidas na malha da peneira. Na Figura 10 evidencia-se o fluxograma que inclui as etapas supracitadas de obtenção do subproduto.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Posteriormente, o material resultante foi encaminhado ao Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Coruripe, onde foi utilizada a máquina de desgaste de Los Angeles para redução das partículas de vidro, conforme utilizado por Moreira (2022). Neste estudo foi empregado o material passante na peneira de 0,075mm (200 *mesh*), visto que estudos desenvolvidos na literatura, como Borges (2021) e Patel *et al.* (2019), Zhu *et al.* (2024) apontaram resultados favoráveis e atividade pozolânica na substituição parcial do cimento pelo subproduto na granulometria mencionada.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A execução dos ensaios de caracterização é extremamente importante para a área de Ciência e Engenharia dos Materiais. Os resultados obtidos garantem a ampliação dos conhecimentos acerca das características e propriedades das matérias-primas, que influenciam

diretamente o comportamento do produto final. Destaca-se ainda a relevância da aplicação de técnicas de caracterização no que diz respeito à otimização de processos, minimização de falhas e maior eficiência dos materiais obtidos (Pio *et al.*, 2022).

Sendo assim, esta etapa foi primordial para desenvolvimento do presente estudo, que visou à execução dos ensaios de análise granulométrica, microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia por dispersão de elétrons, análise química por fluorescência de Raios X, análise por difração de Raios X, análise termogravimétrica e ação pozolânica. Os ensaios supracitados foram primordiais para compreensão das propriedades do pó de vidro oriundo de garrafas pós-consumo e sua influência nas características microestruturais e mecânicas do ladrilho hidráulico.

3.3.1 Análise Granulométrica

O agregado miúdo e o pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo foram submetidos ao ensaio de granulometria, de acordo com a NBR NM 248 - Agregado para concreto – determinação da composição granulométrica (ABNT, 2001) . Segundo o DNIT 412/2019 ME - Determinação da granulometria de solos, agregados e outros materiais pétreos por peneiramento (DNIT, 2019), esse ensaio configura-se como importante atributo físico para ampliar os conhecimentos acerca das características do material analisado, no que concerne a distribuição dos grãos e suas respectivas proporções.

Segundo a norma do DNIT 412/2019-ME - Determinação da granulometria de solos, agregados e outros materiais pétreos por peneiramento (DNIT, 2019) a técnica de peneiramento é comumente empregada para obter a dimensão dos grãos. Para isso, utiliza-se uma série de peneiras, cujas aberturas são previamente definidas e padronizadas, de acordo com as normas regulamentadoras. Este ensaio possibilita a obtenção da composição granulométrica do agregado em análise, podendo classificá-lo como agregado miúdo, graúdo e de enchimento.

Para execução do ensaio, utilizou-se 400g de ambas as matérias-primas, as quais foram dispostas em conjunto de peneiras da série normal: 9,5mm, 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 0,600mm, 0,300mm e 0,150 mm. A agitação foi realizada manualmente, por meio de movimentos circulares alternados, e o material retido em cada peneira foi pesado e devidamente identificado. Na Figura 11a apresenta-se as massas retidas nas peneiras do subproduto e na Figura 11b, as do agregado miúdo.

Figura 11-Massa retida nas peneiras da série normal (a) para subproduto e (b) para o agregado miúdo



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O procedimento experimental realizado conforme a NBR NM 248 - Agregado para concreto – determinação da composição granulométrica (ABNT, 2001), possibilitou a determinação diâmetro máximo do agregado e do módulo de finura, que corresponde ao somatório das massas retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividido por 100.

Os resultados obtidos foram apresentados por meio de tabelas e da curva granulométrica, o procedimento foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Palmeira dos Índios.

3.3.2 Massa Específica

A execução deste ensaio seguiu a metodologia descrita pela NBR 9776 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman (ABNT, 1987) e foi utilizada para caracterizar a areia, empregada para produção dos corpos de prova. Segundo a norma regulamentadora, a massa específica trata-se da relação entre a massa do agregado seco e o volume do sólido.

Para a execução deste ensaio, inicialmente, o frasco denominado de Chapman foi preenchido com água até a marca de 200cm³. Em seguida, adicionou-se massa previamente conhecida de 500g do agregado miúdo, no estado seco. Após esta etapa, realizou-se a agitação do frasco, por meio de movimentos circulares para eliminar todas as bolhas de ar. Finalizado o processo, foi realizada nova leitura e o resultado de massa específica pode ser expresso, através da Equação 1.

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (1)$$

Onde:

γ = Massa específica em g/cm³;

L= Leitura do nível no frasco de Chapman em cm;

500 = massa seca do agregado em g;

200 = volume inicial de água inserido no frasco de Chapman.

3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS)

O microscópio eletrônico de varredura é o equipamento empregado para realização deste ensaio. Este, por sua vez, utiliza um feixe de elétrons para varrer a superfície do material que se pretende analisar. O resultado deste ensaio possibilitou conhecimento abrangente acerca da morfologia das partículas, a partir da geração de imagens com alta resolução e em diferentes ampliações (Vieira *et al.*, 2021).

A Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), acoplada ao microscópio eletrônico de varredura, trata-se de técnica que possibilita a análise semiquantitativa e qualitativa, permitindo identificar elementos presentes na superfície da amostra analisada (Vieira *et al.*, 2021). Nesse processo, o feixe de elétrons interage com a superfície da amostra, emitindo radiação no espectro raios X. Essa radiação libera fótons com frequências específicas, capaz de identificar os elementos presentes (Porto Junior, 2024).

No estudo de Borges (2021), o ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi utilizado para observar a similaridade das características morfológicas existentes entre as partículas de vidro e cimento. Em seu estudo, o autor buscou avaliar o efeito pozolânico e de preenchimento ocasionados em argamassas devido à incorporação do pó de vidro proveniente de embalagens de cerveja pós-consumo na cor âmbar.

No presente estudo, o pó de vidro passante na peneira de 0,075mm teve a microestrutura de suas superfícies analisadas, através da técnica de MEV acoplada a EDS. Para isso, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- Ctgás, localizado na cidade de Natal no Rio Grande do Norte e submetidas ao microscópio eletrônico de varredura modelo Vega3 da Tescan nas ampliações de 100X, 500X e 1500X e 2500X, conforme utilizado por Morais *et al.* (2022), Patel *et al.* (2019) e Hilton *et al.* (2019).

3.3.4 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de Raios X caracteriza-se como técnica analítica, não invasiva e não destrutiva aplicada para identificar a composição elementar da amostra em análise (Adame, 2018). O pó de vidro foi submetido a este ensaio com o intuito de identificar, principalmente, a presença do silício e sua proporção, considerando que este componente influencia diretamente as características mecânicas finais do material compósito proposto. Além disso, buscou-se identificar a ocorrência de elementos nocivos ao meio ambiente.

Para isso, emite-se sobre o material um feixe de raios X, capaz de ocasionar a saída de um elétron da camada mais interna, devido à quebra da energia de ligação desse elétron. Com o objetivo de estabilizar o átomo, um elétron de uma camada mais externa, apresentando maior energia, passará a ocupar o espaço vazio, gerando durante a transição a liberação de um fóton fluorescente, que é característico e proporciona a identificação da composição elementar da amostra (Bezur *et al.*, 2020).

O ensaio foi executado no Laboratório do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- Ctgás, localizado na cidade de Natal no Rio Grande do Norte, que dispõe de espectrômetro por fluorescência de Raios X (EDX-720, Shimadzu) com limite de detecção do Na (11) ao U (92) (>0,001%). Foi empregado o método semiquantitativo para identificação da composição química do pó de vidro.

3.3.5 Análise por Difração de Raios X (DRX)

A difração de Raios X é uma técnica eficiente e amplamente empregada para identificar as fases cristalinas em amostras analisadas (Brito, 2021b). Na perspectiva de Oliveira, Tenório e Marques (2023) as espécies identificadas cristalograficamente neste ensaio, podem ser evidenciadas na forma de óxido, por meio do ensaio de fluorescência de Raios X.

Segundo Silva *et al.* (2021), este ensaio fundamenta-se na emissão de um feixe de Raios X monocromático, gerados por meio de tubos de raios catódicos, que são dispersos em ângulos específicos de 2θ . O resultado será apresentado por meio de difratograma, que evidencia a estrutura atômica ordenada de um material cristalino específico.

O ensaio foi executado no Laboratório do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- Ctgás, localizado na cidade de Natal no Rio Grande do Norte, utilizando-se de difratômetro de Raios X (XRD-6000, Shimadzu). Na ocasião, foram aplicados os seguintes parâmetros: 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°).

3.3.6 Análise Termogravimétrica

Segundo Saadatkah *et al.* (2020), a Análise Termogravimétrica (TG) ou *Thermographic Analysis* (TGA) refere-se a técnica analítica que acompanha a variação de massa da amostra, conforme o acréscimo de temperatura ao longo do tempo. Adicionalmente, através da TGA é possível analisar a evaporação de elementos voláteis, perda de água e reações de redução (Souza, 2015).

Na perspectiva de Ionashiro e Giolito (2004) informações adicionais a TG podem ser obtidas por meio da técnica de Termogravimetria Derivada (DTG), já que a presença de picos agudos no termograma indica o início da cadeia de reações que ocorrem na amostra analisada, diferentemente da curva térmica de TG, que envolve apenas a presença de degraus.

Este ensaio permitiu avaliar o comportamento do pó de vidro diante da exposição a variações térmicas. A partir dos resultados obtidos, podem haver restrições quanto à aplicabilidade do ladrilho hidráulico como pavimento em locais submetidos a elevadas temperaturas. Além disso, segundo Scalize *et al.* (2020), a partir do ensaio de TGA e DTG é possível avaliar até que temperatura o material poderá ser submetido sem perda significativa das principais propriedades.

O ensaio foi executado no Laboratório do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- Ctgás. Para realização do ensaio foi empregado equipamento da TA Instrument, modelo SDT Q600 em atmosfera de nitrogênio, sob taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até a temperatura de 1000°C , conforme utilizado por Nociti (2015). A quantidade de amostra utilizada no ensaio foi de aproximadamente 22mg.

3.3.7 Ação pozolânica do subproduto

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 5752- Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT, 2014), com o intuito de avaliar o potencial pozolânico do pó de vidro. Segundo a NBR 12653 - Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014) para ser considerado material pozolânico ativo o índice de desempenho deve ser igual ou superior a 90% aos 28 dias.

Para tanto, foram produzidas duas argamassas, denominadas “A” e “B”, com dosagens diferenciadas. A argamassa “A” foi composta por cimento CP II-F-32, areia normal e água, enquanto a argamassa “B” continha 25% do subproduto (pó de vidro) em substituição ao teor de cimento Portland. Ressalta-se que a areia normal foi produzida em laboratório seguindo o mecanismo descrito na NBR 5752- Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT, 2014).

A quantidade de material necessário pode ser verificada na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2-Quantidade de material para produção de quatro corpos de prova cilíndricos

Material	Massas (g)	
	Argamassa “A”	Argamassa “B”
Cimento CP II-F-32	416 ± 0,4	312 ± 0,4
Pó de vidro	-	104 ± 0,2
Areia normal	2,36mm - 1,18mm	312
	1,18mm - 600mm	312
	600mm - 300mm	312
	300mm - 150mm	312
Água	200 ± 0,2	200 ± 0,2

Fonte: Adaptada da NBR 5752 (ABNT, 2014).

A referida norma evidencia a necessidade de moldagem de no mínimo quatro corpos de prova cilíndricos de 50 x 100mm, que foram executados segundo a NBR 7215-Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2019). Transcorridas 24h, os corpos de prova foram desmoldados e encaminhados para cura úmida até a idade de 28 dias, momento em que foi determinada a carga de ruptura à compressão, conforme a norma mencionada anteriormente. Na Figura 12 é possível observar os corpos de prova produzidos.

Figura 12-Corpos de prova cilíndricos para execução do ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os valores médios de compressão obtidos em ambas as argamassas foram utilizados para determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, que foi calculado através da Equação (2).

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$I_{cimento}$ = Índice de desempenho em porcentagem (%);

f_{cB} = Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova com adição do pó de vidro (MPa);

f_{cA} = Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova sem adição do subproduto (MPa).

3.4 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

O experimento foi conduzido em ambiente com características homogêneas, utilizando-se, desta maneira, o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Para isso, foram empregados os princípios da casualização, repetição e ordenação dos tratamentos dentro das

parcelas ao acaso. Foram utilizados quatro tratamentos (0%, 6%, 12% e 18%) e cinco repetições, totalizando 20 unidades experimentais, cada uma constituída por dois corpos de prova.

Os percentuais de incorporação do subproduto foram definidos a partir de trabalhos correlatos presentes na literatura. Nos estudos desenvolvidos por Borges (2021) e Patel *et al.* (2019), foram observados resultados favoráveis de substituição do cimento Portland por pó de vidro em adições de até 20% na confecção de argamassas. Em ambos os estudos, foi detectada atividade pozolânica do subproduto, melhorando o desempenho dos corpos de prova produzidos.

Neste estudo foi adotado o traço de referência selecionado de 1:3 (cimento: agregado miúdo), conforme utilizado por Santos, Reis e Rodrigues (2022) e Borges (2021), que identificaram resultados benéficos na produção de argamassas a partir da incorporação do pó de vidro em substituição ao teor de cimento Portland na mistura.

Na Tabela 3, evidenciam-se as formulações empregadas para produção dos corpos de prova prismáticos em relação ao percentual de substituição do cimento Portland. Para isso, foi estabelecida a denominação de Formulação de Referência (FR), Formulação Experimental com 6% de subproduto (FE06), Formulação Experimental com 12% de subproduto (FE12) e Formulação com 18% de subproduto (FE18).

Tabela 3-Formulação referência e experimentais em relação ao percentual de substituição do cimento Portland

Formulação	Cimento	Pó de vidro
FR	100%	-
FE06	94%	6%
FE12	88%	12%
FE18	82%	18%

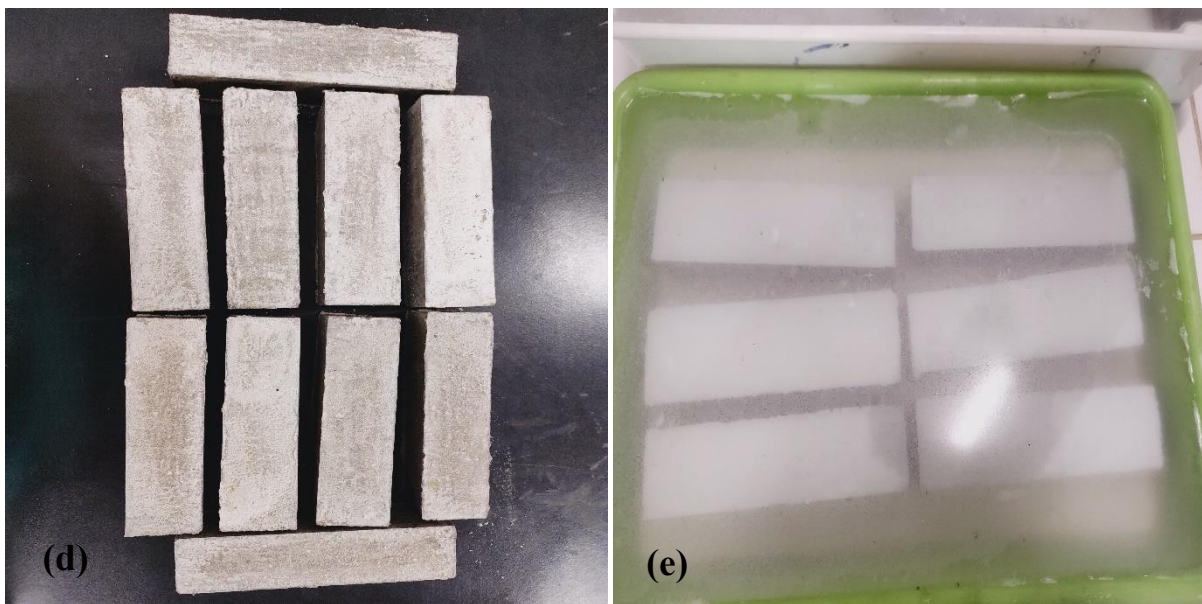
Fonte: Elaborada pela autora, 2024

Levando-se em consideração a trabalhabilidade requerida para moldagem dos ladrilhos, foi adotado fator água cimento (a/c) predefinido em 0,68, similar ao fator utilizado por Freitas *et al.* (2019), para produção de placas cimentícias. Após definição do traço de referência e dos percentuais de incremento do subproduto, deu-se início ao processo de homogeneização das matérias-primas secas (Figura 13a) e após adição da água (Figura 13b), seguiu-se o processo de moldagem dos corpos de prova prismáticos, utilizando-se formas metálicas com a presença

de três compartimentos horizontais, com 160mm de comprimento e 40mm de largura e altura (Figura 13c), desmoldagem após 24h (Figura 13d) e cura úmida em solução saturada de cal (Figura 13d).

Figura 13- (a) homogeneização das matérias-primas secas, (b) após adição da água, (c) moldagem dos corpos de prova prismáticos, (d) corpos de prova desmoldados e (e) cura úmida





Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os ensaios tecnológicos de absorção de água por imersão, resistência à compressão e de resistência à tração na flexão foram realizados na idade de 28 dias nos corpos de prova prismáticos produzidos.

3.5 PRODUÇÃO DO LADRILHO HIDRÁULICO

O ladrilho hidráulico foi confeccionado com a formulação que apresentou melhor comportamento, quanto às variáveis resposta de absorção de água por imersão, resistência à compressão e de resistência à tração na flexão, as quais foram avaliadas por meio da produção de corpos de prova prismáticos, conforme preconizado pelas normas brasileiras regulamentadoras referentes a cada ensaio. Ressalta-se que metodologia similar foi empregada por Destefani (2013) e Brito (2021a) ao confeccionar o ladrilho hidráulico com a composição mais promissora.

Após definição do teor de subproduto mais promissor, deu-se início ao processo de fabricação dos ladrilhos hidráulicos. Ressalta-se que a argamassa fresca foi submetida ao ensaio de índice de consistência, e logo após deu-se início a moldagem dos corpos de prova.

Posteriormente, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão e avaliação dimensional, sendo que a quantidade mínima de exemplares prevista pela NBR 16790 - Pisos assentados de placa de concreto - Requisitos e procedimentos (ABNT, 2020), é de 6 e 5 corpos de prova, respectivamente. O procedimento experimental referente à produção dos ladrilhos pode ser evidenciado no fluxograma da Figura 14.

Figura 14-Fluxograma de obtenção do ladrilho hidráulico



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

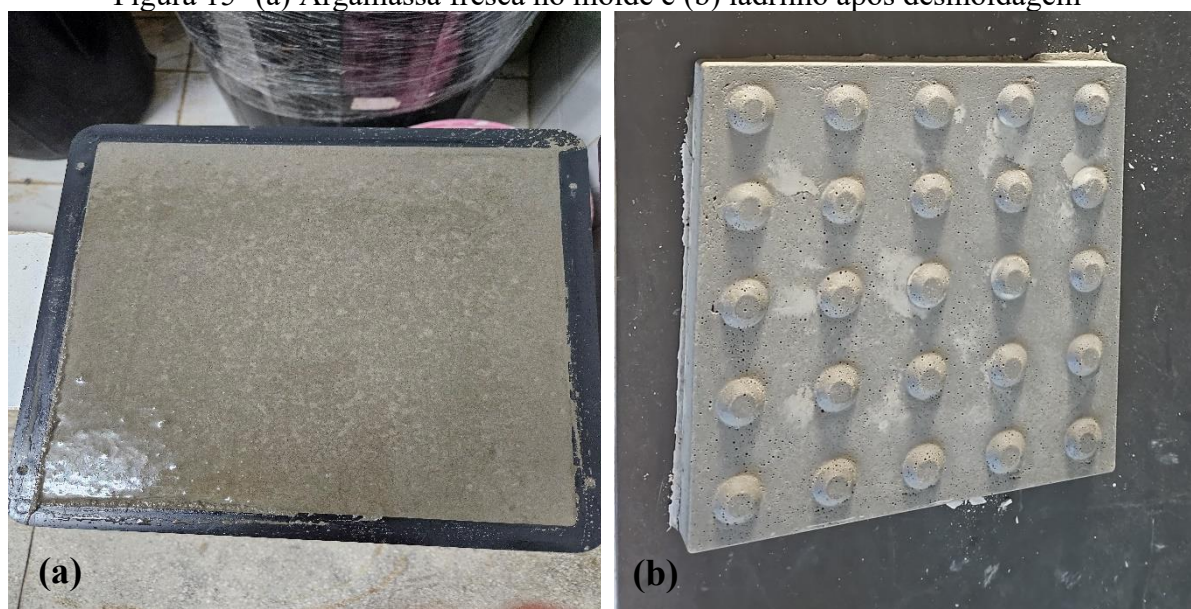
A primeira etapa foi composta inicialmente pelo processo de cominuição dos grãos, conforme descrito no item 3.2.3, que trata da obtenção do subproduto. O material coletado foi submetido ao processo de peneiramento, com o intuito de obter partículas 100% passantes na peneira de 0,075mm (Patel *et al.*, 2019).

Na segunda etapa, constituída pelo processo de homogeneização das matérias-primas (areia, cimento, pó de vidro, água), por meio de processo manual e pela conformação do ladrilho hidráulico, conforme formulação selecionada. A produção ocorreu por meio de moldes plásticos do tipo alerta, em camada única, e submetido a golpes na mesa de consistência para eliminar bolhas de ar presentes na mistura (Brito, 2021a; Destefani, 2013; Savazzini-Reis, Fagundes, 2019).

Ressalta-se que o processo de fabricação do ladrilho hidráulico seguiu a metodologia descrita por Silva e Cordeiro (2022). Inicialmente, foi aplicado o desmoldante no interior dos moldes plásticos. Em seguida, a argamassa foi inserida em duas camadas, cada uma submetida a 10 golpes na mesa de consistência, com o intuito de promover maior adensamento da mistura e, assim, melhorar as características finais do material. Por fim, o rasamento da argamassa nos moldes ocorreu com o auxílio de régua metálica. Na Figura 15, a seguir, é possível identificar a argamassa fresca no molde (Figura 15a) e o ladrilho após desmoldagem (Figura 15b).

A terceira etapa incluiu o processo de cura, no qual, após o período de 24h contados a partir do fim do processo de moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e encaminhados para cura úmida até o período de realização dos ensaios de módulo de ruptura à flexão e avaliação dimensional, conforme enfatizado pela NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

Figura 15- (a) Argamassa fresca no molde e (b) ladrilho após desmoldagem



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O procedimento experimental de fabricação dos ladrilhos hidráulicos foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Palmeira dos Índios.

3.6 ENSAIOS MECÂNICOS E DE QUALIDADE

Os ensaios de absorção de água por imersão, resistência à tração na flexão e resistência à compressão foram realizados para avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova prismáticos, produzidos com e sem a incorporação do subproduto. Nos ladrilhos hidráulicos, foram conduzidos ensaios de resistência à tração na flexão e avaliação dimensional, seguindo as normas brasileiras regulamentadoras aplicáveis a cada técnica. Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Palmeira dos Índios, que dispõe de infraestrutura para a realização das análises.

Após a coleta dos dados para as variáveis resposta (absorção de água por imersão, resistência à compressão e resistência à tração na flexão), foram realizados testes para avaliar a aditividade do modelo, a independência dos erros e a homogeneidade da variância, por meio dos testes de Tukey, Durbin Watson, Bartlett e Shapiro-Wilk, respectivamente. Posteriormente, foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) e a regressão polinomial, bem como, a correlação de Pearson entre as variáveis. Todas as análises foram executadas por meio do software Rbio, versão 183 (Bhering, 2017).

A aplicação adequada dos métodos estatísticos, selecionados conforme tipo de pesquisa, permite a obtenção de resultados com maior grau de confiabilidade, conferindo à pesquisa respaldo na divulgação dos dados obtidos à comunidade científica. Outrossim, proporciona a minimização de erros acidentais que podem ter ocorrido durante a execução dos ensaios, conforme citado por Carvalho (2022).

3.6.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de Absorção de Água (AA) foi executado conforme a NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2005). Este ensaio consiste no processo de imersão dos corpos de prova prismáticos em água, com o intuito de promover a ocupação dos poros permeáveis. A partir deste ensaio, foi possível compreender o efeito do subproduto quanto aos índices de AA.

Para a execução do ensaio a amostra foi retirada do recipiente de imersão e coletada sua massa saturada (m_{sat}). Finalizada esta etapa, o corpo de prova foi encaminhado à estufa à temperatura de (105 ± 5) °C por 24h, conforme Azevedo (2018). Após este período, foi coletada a massa seca (m_s). O índice de absorção foi expresso em percentual e por meio da aplicação da Equação (3).

$$AA = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

A= absorção de água, em porcentagem (%);

m_{sat} = massa saturada do corpo-de-prova prismático (g);

m_s = massa seca do corpo-de-prova prismático (g).

3.6.2 Resistência à tração na flexão

O mecanismo de execução deste ensaio seguiu a NBR 16738 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos (ABNT, 2019), que descreve de maneira opcional a realização deste ensaio pelo método de três pontos de carregamento. Antes do início da realização do ensaio, foram realizadas marcações nos corpos de prova (Figura 16a) com o objetivo de facilitar seu posicionamento na máquina, conforme mostrado na Figura 16b.

Figura 16 - (a) Marcações nos corpos de prova e (b) Execução do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

As partes resultantes deste ensaio foram reservadas para a execução do ensaio de compressão. A resistência à tração na flexão foi calculada por meio da aplicação da Equação (4).

$$f_{t,f} = \frac{1,5xFaxa}{b^3} \quad (4)$$

Onde:

$f_{t,f}$ = Resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

F = Força aplicada na parte central do corpo de prova em Newtons (N);

a = distância entre os apoios em mm;

b = lado da seção quadrada do prisma em mm.

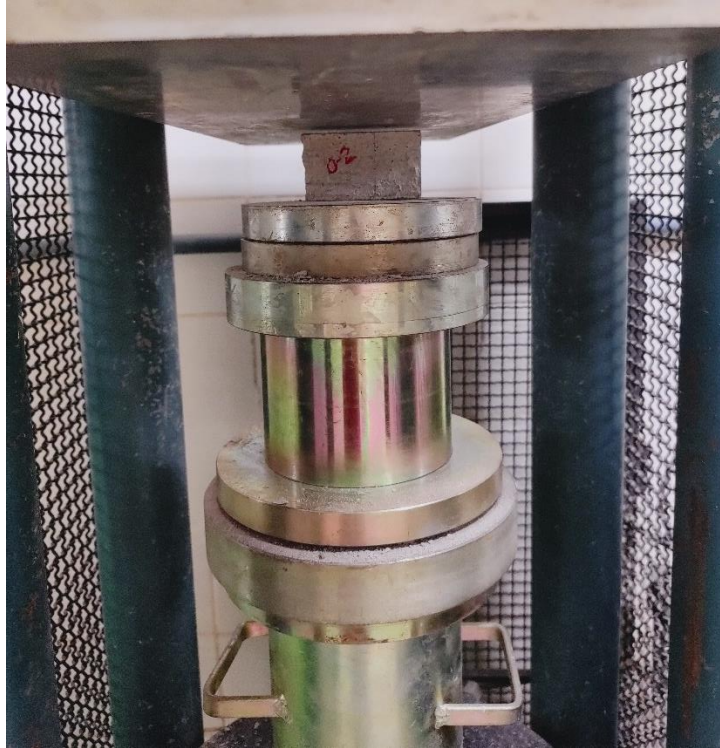
Foram submetidos ao ensaio 40 corpos de prova, distribuídos em quatro formulações, com 10 amostras para cada composição. Os ensaios foram realizados utilizando prensa elétrica da Fortest, modelo FT 01, com capacidade de 200 toneladas, localizada no Laboratório de Materiais de Construção, do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Maceió.

3.6.3 Resistência à compressão

A metodologia de execução desse ensaio seguiu a NBR 16738 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos (ABNT, 2019). Segundo Moreira (2022), a resistência à compressão é uma das propriedades mais relevantes para produção de materiais cimentícios, justificando sua execução neste estudo.

Na Figura 17 é possível observar a realização deste ensaio utilizando as metades dos corpos de prova oriundos do ensaio de resistência à tração na flexão, conforme orientado pela norma regulamentadora supracitada. Para isso, cada metade foi submetida ao ensaio de compressão, sendo calculada a média entre os resultados obtidos em cada lado.

Figura 17 - Execução do ensaio de compressão utilizando-se metade dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A resistência à compressão foi obtida através da Equação (5) descrita na NBR 16738 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos (ABNT, 2019).

$$f_c = \frac{F_c}{1600} \quad (5)$$

Onde:

f_c = Resistência à compressão em megapascals (MPa);

F_c = Média da força de ruptura em cada metade do corpo de prova prismático em Newton(N);

1600 Área em milímetros quadrados (mm^2).

O ensaio foi realizado por meio da prensa elétrica da Fortest, modelo FT 01, com capacidade de 200 toneladas, presente no Laboratório de Materiais de Construção, do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Maceió.

3.6.4 Índice de consistência

Anteriormente ao processo de moldagem dos ladrilhos hidráulicos, a argamassa no estado fresco, produzida com a incorporação do pó de vidro, foi avaliada quanto à trabalhabilidade. Segundo Patel *et al.* (2019) e Morais *et al.* (2022) as propriedades frescas das argamassas sofrem elevada influência das características do pó de vidro, que incluem finura e morfologia.

Para a execução do ensaio foram empregados os procedimentos preconizados pela NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência (ABNT, 2016), que estabelece a execução do ensaio em mesa para índice de consistência. Para isso, foi centralizado molde metálico tronco cônico, preenchido com a argamassa em três camadas aproximadamente semelhantes e golpeadas com o uso de soquete. Na primeira, segunda e terceira camada foram aplicados 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. Por fim, com o auxílio de régua metálica foi executado o rasamento. A Figura 18a mostra o molde metálico preenchido com a argamassa, enquanto a Figura 18b apresenta a amostra após a remoção do molde tronco cônico. Já a Figura 18c exhibe a argamassa após a aplicação dos golpes na mesa de consistência.

Figura 18-(a) molde metálico preenchido com a argamassa, (b) após a remoção do molde tronco cônico e (c) após a aplicação dos golpes na mesa de consistência



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Finalizada a etapa supracitada, o molde foi retirado verticalmente e a manivela presente na mesa para índice de consistência, acionada. Vale ressaltar que o movimento de subida e descida ocorreu 30 vezes em 30s, uniformemente. Por fim, com o auxílio de régua, na argamassa que sofreu espalhamento, houve coleta de três diâmetros em diferentes posições. O índice de consistência foi determinado a partir da média das três dimensões medidas em

milímetros.

3.6.5 Resistência à tração na flexão no ladrilho hidráulico

A execução do ensaio de resistência à tração na flexão foi realizada segundo a NBR 16790 - Pisos assentados de placa de concreto - Requisitos e procedimentos (ABNT, 2020), por meio da aplicação de carga transversal progressiva, igualmente distribuída no ladrilho (Figura 19). Segundo Savazzini-Reis e Fagundes (2019) os resultados encontrados neste ensaio podem evidenciar a relação inversa existente com o índice de absorção de água. A norma mencionada estabelece que os resultados deverão ser iguais ou superiores a 3,5 MPa.

Figura 19- Execução do ensaio de resistência à tração na flexão no ladrilho hidráulico



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Para tanto, o ladrilho em tamanho real foi imerso em água por período mínimo de 24h. Posteriormente a esse processo, a peça foi encaminhada para a prensa elétrica, constituída por duas barras de aço que serviram de apoio nas extremidades, cujos diâmetros eram de (38 ± 3) mm e comprimento mínimo de 200mm. Sabendo-se que a carga foi aplicada na parte central da placa ($L/2$), fez-se necessário inserir outra barra de aço para aplicação da carga. Os resultados foram expressos por meio da Equação (6).

$$f_t = \frac{1,5 \times P \times L}{b \times h^2} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

f_t = resistência à tração na flexão (MPa);

P = carga aplicada em Newtons (N);

L = distância entre os apoios (mm);

b = largura do ladrilho no trecho da fratura (mm);

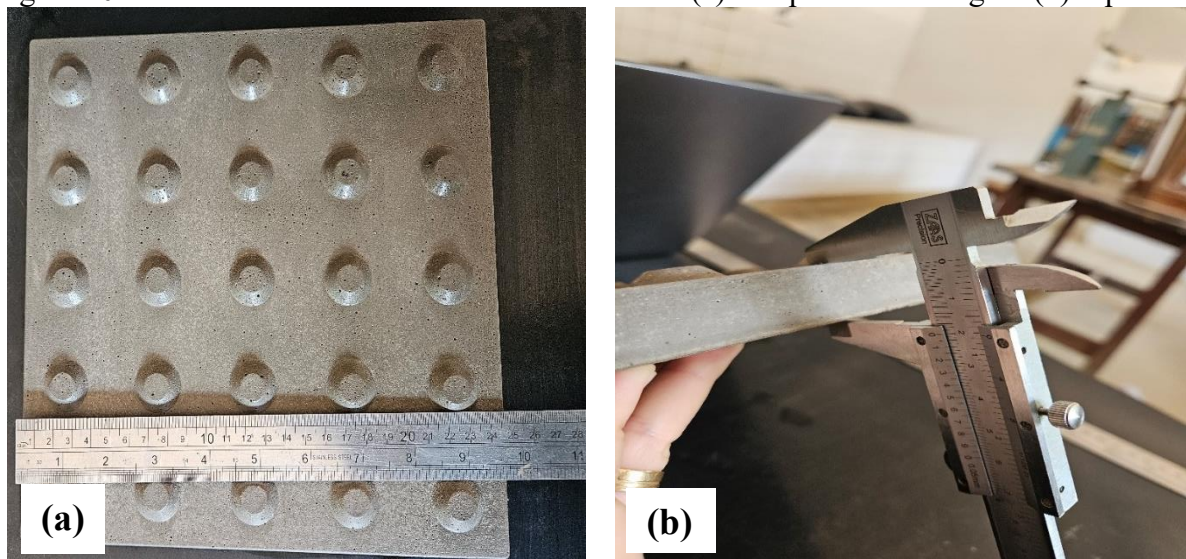
h = espessura do ladrilho (mm).

O ensaio de resistência à tração na flexão foi executado no Laboratório de Materiais de Construção, do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Maceió, através da utilização de prensa elétrica da Fortest, modelo FT 01, com capacidade de 200 toneladas.

3.6.6 Avaliação dimensional do ladrilho hidráulico

A NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013) determina limites para aceitação do ladrilho hidráulico. Para isso, finalizado o período de cura, aos 28 dias, e anteriormente a execução do ensaio de resistência à tração na flexão, os corpos de prova foram submetidos à avaliação dimensional, conforme destacado na norma. As dimensões foram coletadas, por meio de régua metálica de 60 cm e paquímetro analógico de 15 cm, sendo eles comprimento (Figura 20a) e largura (20b).

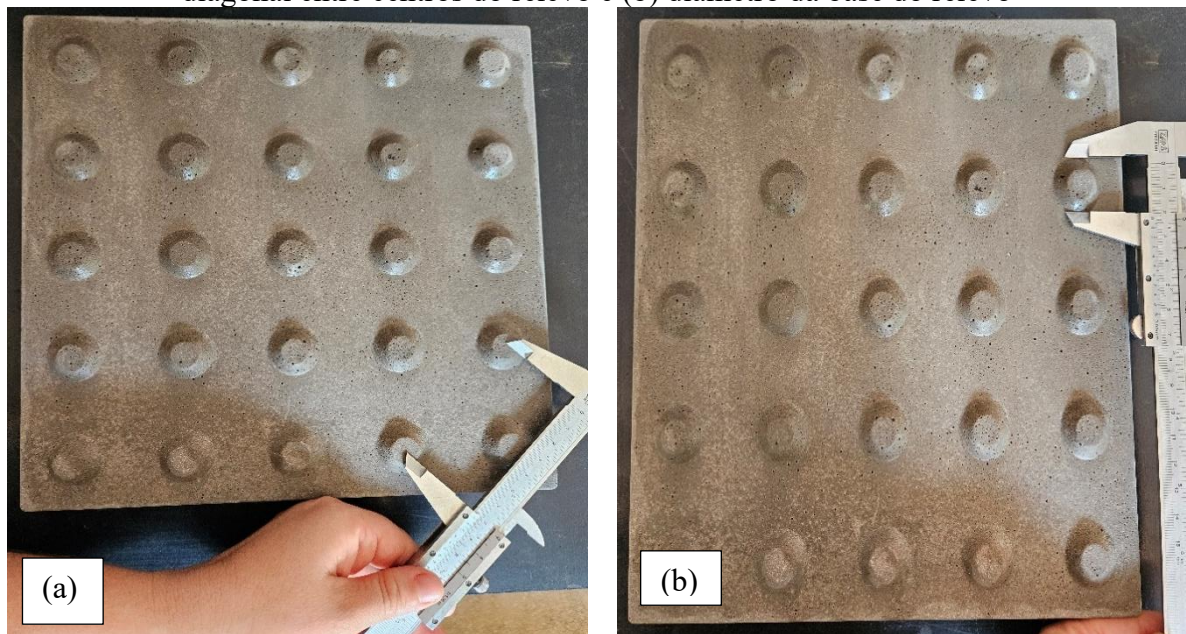
Figura 20- Análise dimensional do ladrilho hidráulico (a) comprimento e largura (b) espessura



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Além de atender aos parâmetros estabelecidos pela NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013), os ladrilhos hidráulicos também foram submetidos à avaliação dimensional dos relevos presentes no piso tátil de alerta, observando-se a distância diagonal entre centros do relevo (Figura 21a) e o diâmetro da base do relevo (Figura 21b).

Figura 21-Avaliação dimensional dos relevos presentes no piso tátil de alerta (a) distância diagonal entre centros do relevo e (b) diâmetro da base do relevo



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Os resultados encontrados da análise dimensional dos relevos presentes no piso tátil foram submetidos aos parâmetros da NBR 16537 - Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação (ABNT, 2024), com o intuito de facilitar o deslocamento dos pedestres.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.1.1 Análise granulométrica do agregado miúdo e massa específica

O resultado da análise granulométrica da areia pode ser evidenciado na Tabela 4, a seguir. A partir deste ensaio, foi possível determinar o diâmetro máximo característico e o módulo de finura, conforme os parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 - Agregados para concreto - Requisitos (ABNT, 2022).

Tabela 4-Resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria da areia

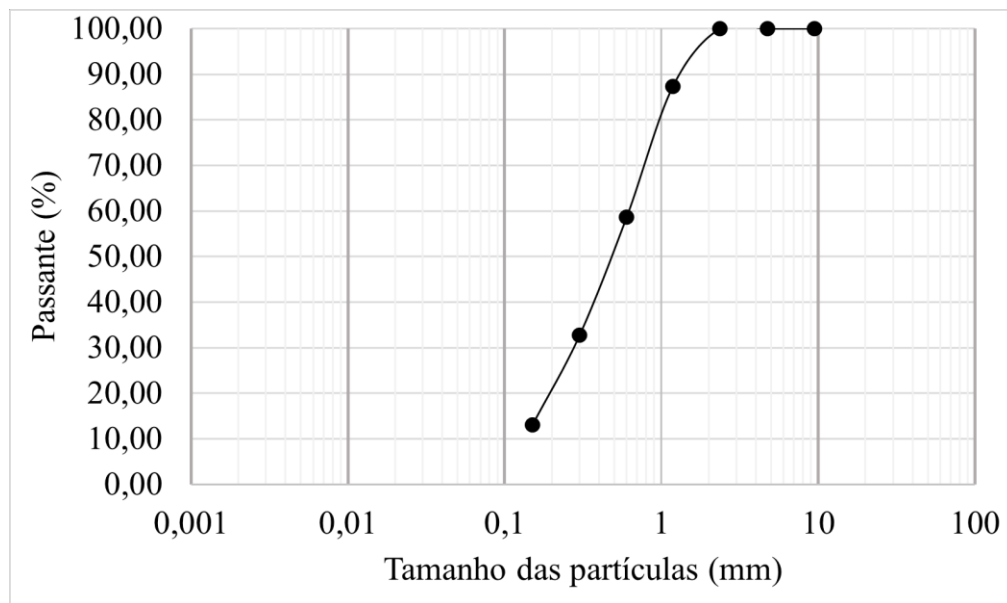
Abertura (mm)	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Passante (%)
19	0	0	100
9,5	0	0	100
4,75	0	0	100
2,36	17,00	4,27	100
1,18	33,70	12,75	87,25
0,60	113,60	41,31	58,69
0,30	103,20	67,26	32,74
0,15	78,10	86,90	13,10
Fundo	52,10	100	0,00

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Identificou-se módulo de finura de 2,12, situando-se na zona utilizável de limite inferior, e diâmetro máximo característico de 2,36mm, segundo parâmetros da NBR 7211 - Agregados para concreto - Requisitos (ABNT, 2022). Vale destacar que essas características são semelhantes às observadas no estudo de Savazzini-Reis e Fagundes (2019), que produziram ladrilhos hidráulicos utilizando subproduto da indústria moveleira. No estudo supracitado, o agregado miúdo apresentou diâmetro máximo característico de 2,36mm e módulo de finura de 2,64.

Por meio dos resultados expostos na Tabela 4, também foi possível confeccionar a curva granulométrica do agregado miúdo, conforme a Figura 22. Ressalta-se que esta foi similar à identificada por Fontes *et al.* (2018), que analisaram a incorporação de rejeitos de minério de ferro para produção de ladrilho hidráulico sustentável.

Figura 22- Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Empregando-se a metodologia do Frasco de Chapman, foi possível identificar a massa específica do agregado miúdo de $2,63\text{g/cm}^3$, análoga à encontrada por Savazzini-Reis e Fagundes (2019).

4.1.2 Análise granulométrica do subproduto

Na Tabela 5, a seguir, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de análise granulométrica do pó de vidro. Ressalta-se que o ensaio foi realizado após o processo de moagem, o que resultou em elevado percentual de finos, impossibilitando a determinação da dimensão máxima característica, definida pela NBR NM 248 - Agregado para concreto – determinação da composição granulométrica (ABNT, 2001), como a malha da peneira na qual a massa retida acumulada é igual ou imediatamente inferior a 5%.

Empregando-se a metodologia proposta na NBR NM 248 - Agregado para concreto – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2001), obteve-se módulo de finura igual a 2,38. Segundo a NBR 7211 - Agregados para concreto - Requisitos (ABNT, 2022), este módulo de finura enquadra o subproduto na zona ótima, configurando-se como opção para emprego do material como agregado miúdo para produção de argamassas e concretos.

Tabela 5-Resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria do subproduto

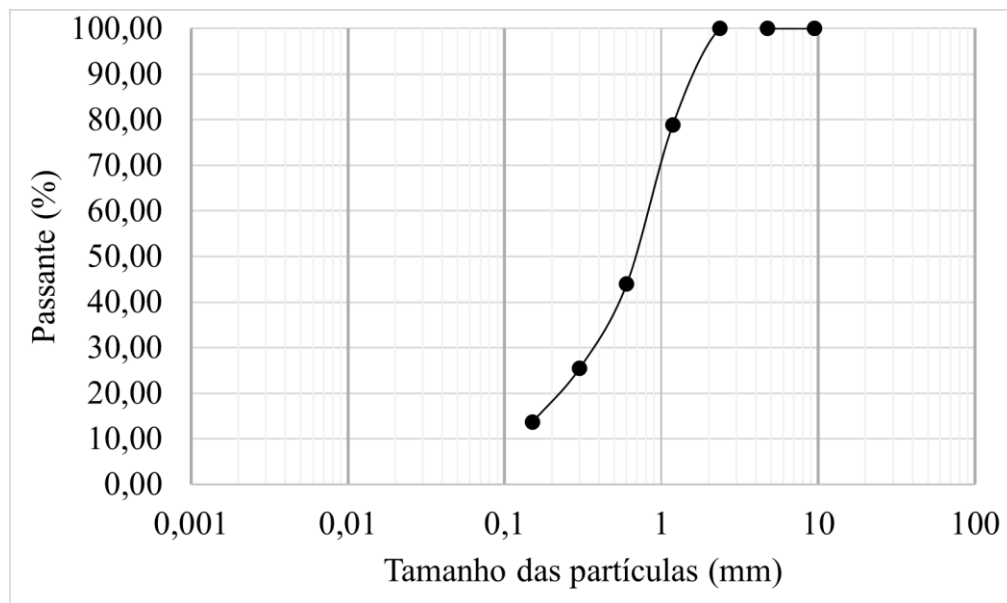
Abertura (mm)	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Passante (%)
19	0	0	100
9,5	0	0	100
4,75	0	0	100
2,36	0	0	100
1,18	21,21	21,21	78,79
0,60	34,89	56,10	43,90
0,30	18,50	74,60	25,40
0,15	11,80	86,40	13,60
Fundo	13,60	100	0,00

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Salienta-se que as características acima mencionadas se referem ao pó de vidro com partículas passantes na peneira de 4,750 mm e retidas na peneira de 0,150mm, categorizando-se como agregado miúdo. Para aplicação no presente estudo, o pó de vidro oriundo da máquina de desgaste de Los Angeles passou por processo de peneiramento até obter material 100% passante na peneira de 0,075mm.

Na Figura 23 observa-se a curva granulométrica obtida neste estudo, semelhante ao resultado obtido por Warnphen, Supakara e Kanokkantapong (2019), que submeteu o subproduto ao ensaio após o processo de moagem em moinho de bolas, análogo ao procedimento utilizado.

Figura 23 - Curva de análise granulométrica do subproduto



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na perspectiva de Oliveira, Tenório e Marques (2023), a execução do ensaio de granulometria é de fundamental importância quando se propõe a combinação entre diferentes materiais, conforme evidenciado no presente estudo. A forma de organização e arranjo dos grãos influenciará diretamente as características finais do material compósito obtido.

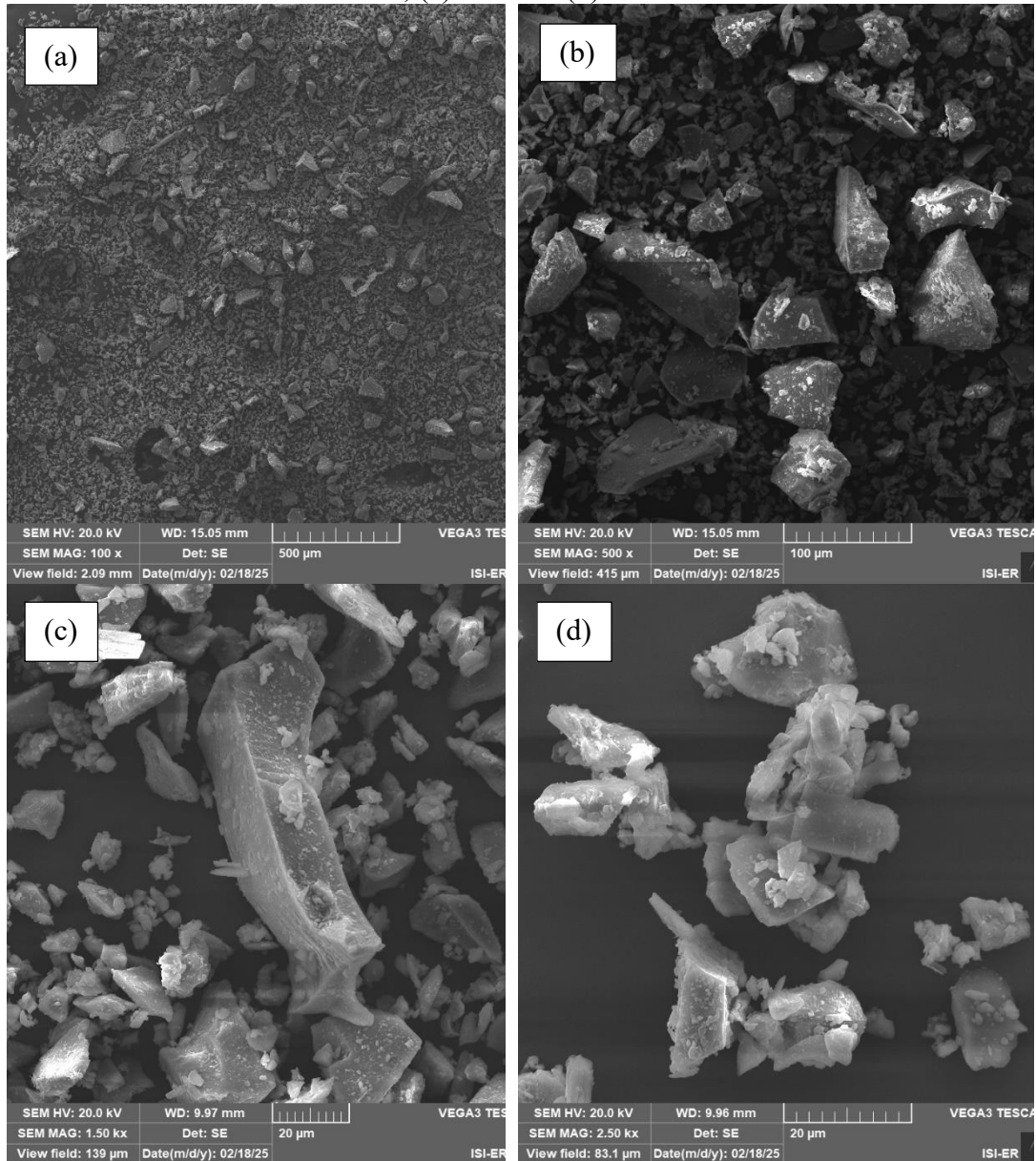
4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS)

Na Figura 24, evidenciam-se as micrografias obtidas a partir da amostra de pó de vidro, com ampliações de 100x (Figura 24a), 500x (Figura 24b), 1500x (Figura 24c) e 2500x (Figura 24d). Analisando-se morfológicamente a Figura 24a, com ampliação de 100x, detectou-se a variabilidade de partículas de menor dimensão, corroborando com a análise granulométrica realizada no subproduto (Morais *et al.*, 2022a). Hilton *et al.* (2019) destacam que os aspectos morfológicos das partículas de vidro, como área de superfície específica e a distribuição das partículas, influenciam propriedades importantes, como a resistência mecânica.

Na Figura 24b, observam-se partículas de vidro com formato angular e irregular, em concordância com as análises encontradas por Hilton *et al.* (2019), Shoaie *et al.* (2020) e Khan, Saha e Sarker (2020). Nesse último estudo, os autores apontam que essas características morfológicas podem impactar negativamente a resistência à compressão e aumentar a porosidade do compósito final, devido ao maior índice de vazios gerado pelo empacotamento

menos eficiente das partículas, ao empregar o pó de vidro como agregado. Ademais, *Morais et al.* (2022a) atribuíram o formato irregular ao processo de moagem ao qual o subproduto é submetido.

Figura 24- Micrografias obtidas por MEV do pó de vidro com magnificações de (a) 100x, (b) 500x, (c) 1500x e (d) 2500x



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

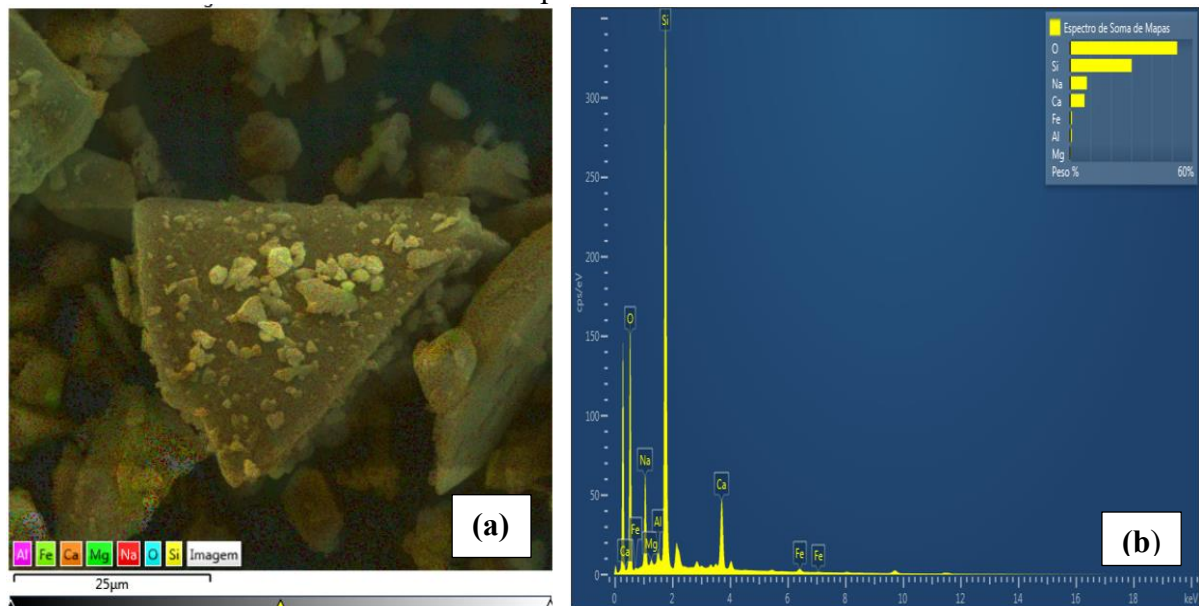
Borges (2021) ao investigar os efeitos filer e pozolânico do pó de vidro em argamassas, submeteu o subproduto a análise por MEV e também identificou partículas irregulares com arestas bem definidas. Segundo o autor estas são características típicas do cimento e de adições

minerais que podem ser incorporadas em concretos, corroborando com a ideia de incorporação deste subproduto para produção de ladrilhos hidráulicos em substituição parcial ao cimento Portland.

Nas Figuras 24c e 24d, identificam-se partículas aglomeradas, em conformidade com as observações de Brandão (2023). Essas partículas apresentam dimensões inferiores a $20\mu\text{m}$ em ambas as micrografias e baixa rugosidade. Scheuermann Filho (2019), ao analisar o pó de vidro com magnificação de 2500x, constatou que as partículas apresentavam contato grão a grão, sem evidências de ligação efetiva entre elas.

Na Figura 25b, observam-se os espectros resultantes da análise do subproduto, obtidos a partir da área apresentada na Figura 25a. Foram identificados picos característicos de três elementos, majoritariamente: oxigênio (O), silício (Si) e sódio (Na). Na perspectiva de Porto Junior (2024), esses resultados confirmam que a composição básica do pó de vidro é o dióxido silício (SiO_2), o que é esperado para esse tipo de material.

Figura 25-(a) área da amostra utilizada para quantificar os elementos, (b) espectros gerados por EDS



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Samarakoon, Ranjith e Silva (2020), ao submeterem o pó de vidro soda-cal ao mapeamento de Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS) também identificaram elevados teores de silício, sódio e cálcio, corroborando com os resultados da análise de FRX, como os elementos presentes em maior concentração. Os autores observaram que na argamassa

endurecida após 28 dias, produzida com a inserção do pó de vidro, houve a formação adicional de produtos C-S-H e, conseqüentemente melhores resultados mecânicos.

Segundo Scharnberg *et al.* (2019), os elementos supracitados são típicos e predominantes no vidro sodo-cálcico, e também contribuem na formação de microestrutura mais densa, devido à geração de novos produtos de hidratação, que interferem positivamente no ganho de resistência, conforme observado no ensaio de resistência à compressão.

4.1.4 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

O resultado da análise química semiquantitativa, em percentual em relação à massa de óxido, realizada no pó de vidro pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6-Resultado da análise química semiquantitativa do pó de vidro

Óxidos	(%)
SiO ₂	69,63
CaO	17,43
Na ₂ O	3,64
Al ₂ O ₃	3,42
Fe ₂ O ₃	2,73
K ₂ O	0,80
Cr ₂ O ₃	0,22
SO ₃	0,18
TiO ₂	0,16
SrO	0,06
ZrO ₂	0,04
MnO	0,04
ZnO	0,03
CuO	0,02
Rb ₂ O	0,01
P.F	1,59

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Identificou-se quantidade predominante de óxido de silício (69,63%), seguida pelo óxido de cálcio (17,43%) e pelo óxido de sódio (3,64%). De acordo com a NBR 12653 - Materiais pozolânicos (ABNT, 2014), o pó de vidro atendeu a um dos requisitos químicos para a utilização como material pozolânico, já que o somatório dos óxidos SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ foi superior a 70%.

No estudo desenvolvido por Warnphen, Supakara e Kanokkantapong (2019), que investigou a utilização de pó de vidro proveniente de garrafas coloridas pós-consumo na produção de blocos de concreto, foi identificado o óxido de silício como o composto químico

de maior representatividade, com 71,1%, valor similar ao percentual encontrado no presente estudo. Assim como no estudo de Guo *et al.* (2020), que identificou cerca de 68% de óxido de silício na amostra de vidro analisada e Yurt, Çelikten e Atabey (2024), que observou 69,42%.

O resultado da análise de fluorescência de Raios X também corrobora com a pesquisa desenvolvida por Shoaie *et al.* (2020), que enfatizaram a presença majoritária de óxido de silício, com percentual variando entre 70% e 90%. Na perspectiva dos autores, o óxido de silício é responsável pela reatividade pozolânica, conferindo melhores resultados físicos e mecânicos às argamassas no estado endurecido ao reagir com o cimento Portland na presença de água.

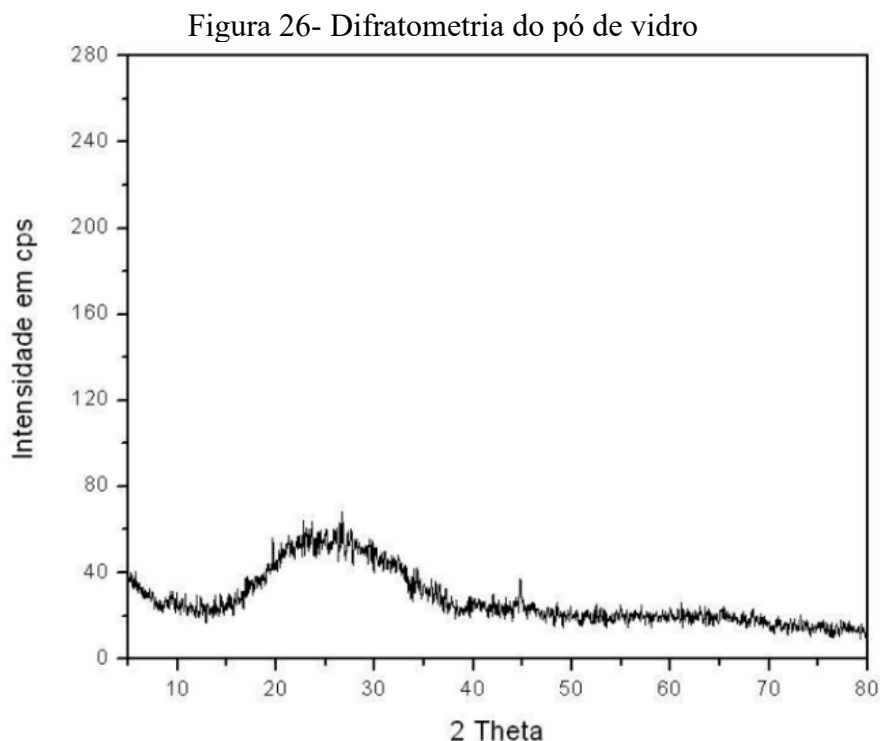
Ademais, ressalta-se o elevado percentual de óxido de cálcio (19,07%) identificado no ensaio de FRX. No estudo de Al-Zubaid, Shabeeb e Ali (2017), os autores justificam o ganho de resistência à compressão pela alta quantidade de carbonato de cálcio, formado por meio da interação entre o dióxido de silício e o óxido de cálcio durante o processo de hidratação. O CaCO_3 proporciona a manutenção de ambiente alcalino, mantendo assim o pH mais básico e melhorando as características mecânicas ao longo do tempo.

4.1.5 Análise por Difração de Raios X (DRX)

No difratograma apresentado na Figura 26, obtido a partir da análise do pó de vidro, não foi possível identificar picos característicos de material cristalino, apenas halo amorfo. Resultado semelhante foi obtido nos estudos de Yurt, Çelikten e Atabey (2024), Liu, Florea e Brouwers (2019) e Brito (2021b).

No difratograma do subproduto (Figura 26), a banda amorfa foi identificada na faixa $2\Theta = 15^\circ - 35^\circ$, análoga às características identificadas no estudo de Morais *et al.* (2022a). Evidencia-se, assim, que o óxido de silício, composto químico dominante no ensaio de FRX, apresenta estrutura desordenada e, conseqüentemente, capacidade de reação com o cimento Portland.

A sílica amorfa ao reagir com o hidróxido de cálcio, durante o processo de hidratação do cimento, produz quantidades adicionais de silicato de cálcio hidratado, o que contribui para o aprimoramento das propriedades mecânicas das argamassas (Bostanci, 2020; Morais *et al.*, 2022a).



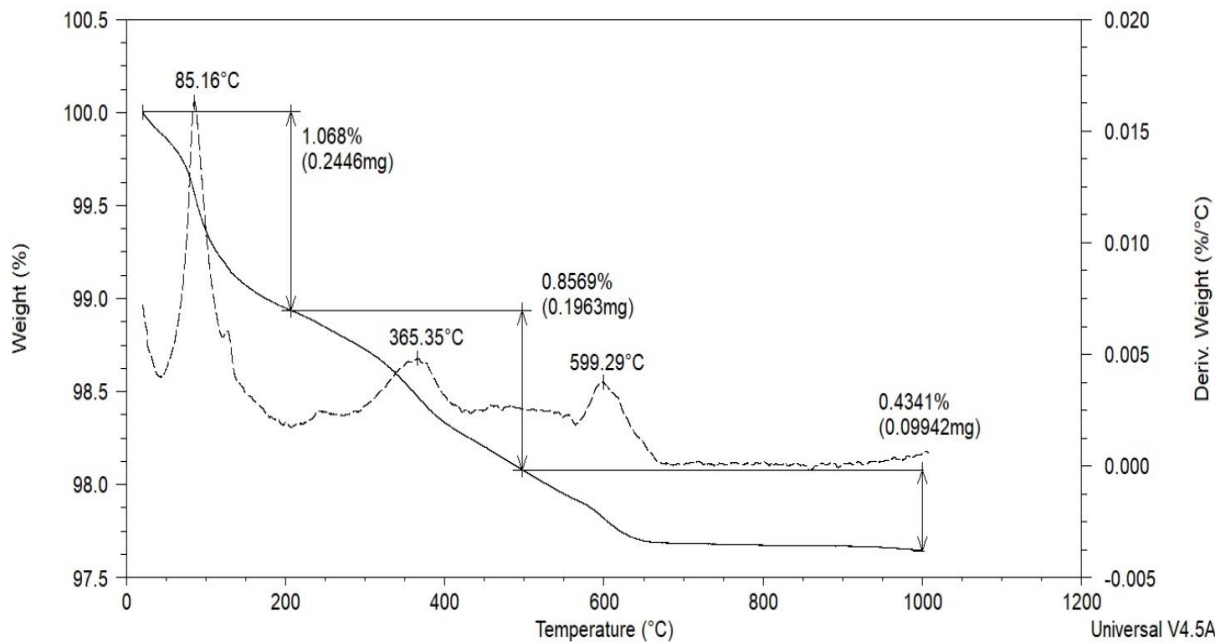
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Brito (2021b) submeteu o vidro moído oriundo de garrafas *long neck* ao ensaio de DRX e, de maneira semelhante, não constatou fases cristalinas, evidenciando apenas material com banda amorfa característica. Ressalta-se que a atividade pozolânica do vidro está associada à sua estrutura não ordenada (amorfa), o que demonstra grande potencial de reatividade, viabilizando, assim, seu emprego como material cimentício suplementar (Borges, 2021).

4.1.6 Análise Termogravimétrica

Na Figura 27, são apresentadas as curvas TG/DTG do pó de vidro. Realizando-se a análise das curvas detectou-se três eventos de perda de massa distintos: o primeiro ocorreu até 85,16 °C, com uma perda de massa de 0,2446 mg, correspondendo a 1,07%. O segundo evento foi registrado a 365,35 °C, com perda de massa de 0,1963 mg, equivalente a 0,86%. Já o terceiro evento ocorreu a 599,29 °C, com perda de 0,09942 mg, correspondente a 0,43%.

Figura 27- Curva termogravimétrica e derivada (TG/DTG) do pó de vidro



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

O primeiro evento por volta de 85,16 °C está relacionado a perda de massa associada à água residual. Nociti (2015) ao submeter a análise termogravimétrica o vidro na cor âmbar e transparente, de maneira semelhante a este estudo, também identificou perda de massa até 100 °C e atribuiu a água adsorvida. Em temperaturas superiores a partir de 260 °C o autor relacionou a decomposição de matéria orgânica presente na amostra.

No estudo desenvolvido Porto Junior (2024), que caracterizou o pó de vidro blindex para substituição parcial do cimento na mistura solo-cimento, identificou-se na curva de TG que entre as temperaturas de 600 °C a 1000 °C a perda de massa permaneceu constante, indicando estabilidade térmica do pó de vidro. De maneira análoga, no presente estudo, essa estabilidade foi observada no terceiro evento a temperatura de 599,29 °C.

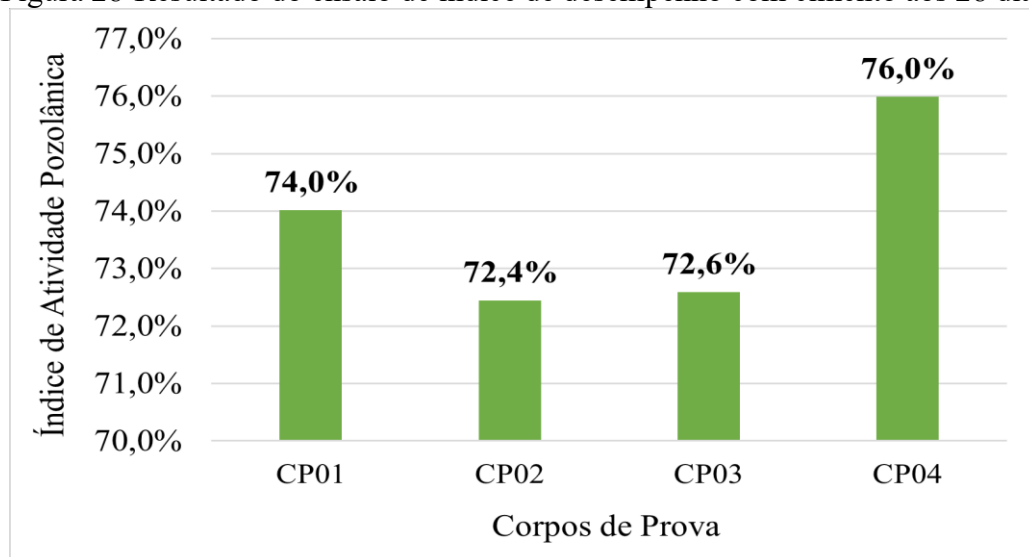
Destaca-se que a estabilidade térmica evidenciada no vidro após 599,29 °C está relacionada ao seu processo produtivo, uma vez que as matérias-primas são submetidas a elevadas temperaturas entre 1400 °C e 1600 °C (Bueno *et al.*, 2020). Moser (2019), ao produzir argamassas com pó de vidro e expô-las a temperaturas de 800 °C, 1000°C e 1200°C, constatou que os corpos de prova contendo subproduto apresentaram melhor desempenho mecânico e preservaram sua integridade física, em comparação aos corpos de prova de referência. Esses resultados comprovam a eficácia do pó de vidro na confecção de materiais compósitos mais resistentes a condições de elevadas temperaturas.

Diante da análise exposta, verifica-se que o pó de vidro possui estabilidade térmica em altas temperaturas, com perda de massa mínima após 600 °C. Esse comportamento favorece sua aplicação na fabricação de ladrilhos hidráulicos, contribuindo para a resistência, durabilidade do material e a possibilidade de exposição desses materiais à locais com maiores temperaturas.

4.1.7 Ação pozolânica do subproduto

Os resultados do ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias podem ser verificados na Figura 28. Para tanto, são apresentados os valores individuais referentes à razão entre os resultados obtidos de resistência à compressão dos corpos de prova com a incorporação de 25% de subproduto e os corpos de prova de referência.

Figura 28-Resultado do ensaio de índice de desempenho com cimento aos 28 dias



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Baseando-se nos resultados obtidos e comparando-se com os requisitos da NBR 12653 - Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014), infere-se que o pó de vidro não está em conformidade com os requisitos físicos para o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, o qual deveria ser superior ou igual a 90%. A granulometria do vidro pode ter sido um dos fatores que contribuiu para a menor reatividade do subproduto. Patel *et al.* (2019), ao compararem a reatividade de pó de vidro com partículas 75 μ e 63 μ , evidenciaram que partículas com maior dimensão (75 μ) restringem em até 10% a atividade pozolânica.

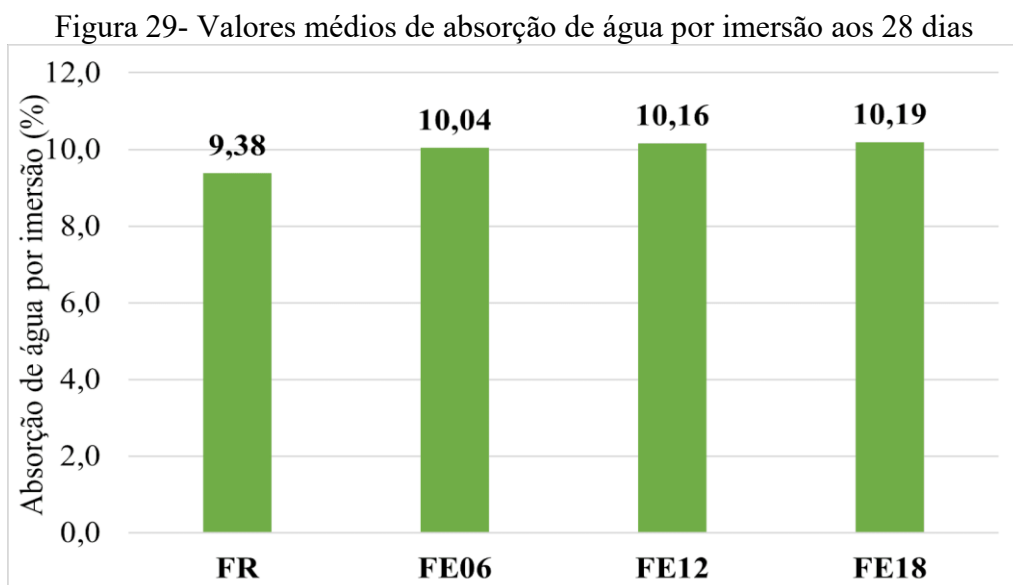
Convém destacar, que estudos presentes na literatura, como o de Borges (2021), apresentaram resultados mecânicos favoráveis de inserção do pó de vidro em substituição parcial ao cimento Portland em até 20%, resultando em aumento de 24% na resistência à compressão, quando comparado ao corpo de prova de referência. Segundo Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016) teores superiores a 20% ocasionam queda na resistência, fato este verificado ao submeter argamassas com 25% de subproduto em relação à argamassa controle ao ensaio de resistência à compressão, conforme estabelecido pela NBR 12653 - Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014).

No estudo desenvolvido por Moreira (2022), foram obtidos resultados semelhantes aos apresentados neste trabalho. Ao avaliar o comportamento da inserção de diferentes tipos de vidro (âmbar, verde e branco), o autor identificou índice de atividade máxima de 74,3% aos 28 dias, com vidro na coloração âmbar. O experimento também foi realizado aos 91 dias, idade em que o autor registrou índice de atividade de 98,2%, já que de acordo com Khan, Saha e Sarker (2020) a idade de cura influencia significativamente os valores de resistência à compressão.

4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

4.2.1 Absorção de água por imersão

Os corpos de prova prismáticos foram submetidos ao ensaio de absorção de água por imersão, cujos valores médios obtidos podem ser observados na Figura 29.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Os resultados obtidos em todas as formulações foram analisados estatisticamente por meio do *software Rbio*, e não foi observada diferença significativa ($P > 0,05$) entre os corpos de prova de referência e as formulações experimentais. Dessa maneira, evidencia-se que a incorporação de pó de vidro não proporcionou alterações significativas de absorção de água, embora os valores médios tenham apresentado pequeno acréscimo de 7,03%, 8,31%, 8,63%, em relação à FE06, FE12 e FE18, respectivamente.

Segundo Sharifi *et al.* (2016), o índice de absorção de água está diretamente relacionado à durabilidade dos materiais. No estudo realizado pelos autores, a substituição parcial do cimento Portland por partículas de vidro em até 20% na produção de concreto demonstrou resultados semelhantes aos observados no corpo de prova de referência, corroborando com os resultados encontrados neste estudo.

Shoaei *et al.* (2020) destacaram a divergência observada na literatura quanto aos resultados do ensaio de absorção de água. Os autores identificaram aumento progressivo nos índices de absorção à medida que o teor de substituição do cimento pelo pó de vidro era elevado, mostrando-se contraditório a outros trabalhos, como o de Patel *et al.* (2019), em que houve redução no percentual de AA com a incorporação de pó de vidro passante na peneira de 0,075mm, fato este atribuído ao efeito de micropreenchimento dos poros.

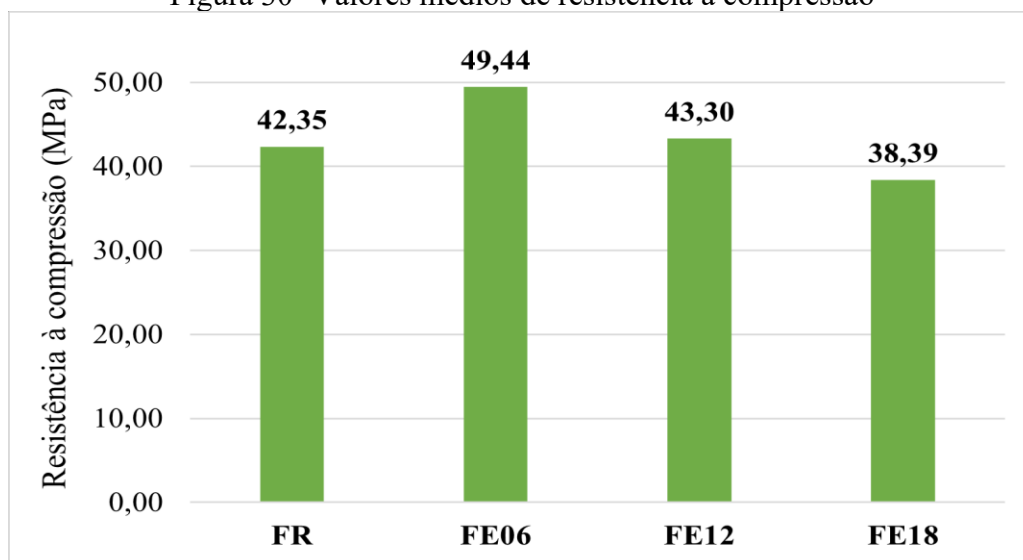
A divergência pode ser atribuída a diversos fatores, como a granulometria do subproduto, uma vez que as partículas de vidro podem ser maiores que as do cimento, criando maiores vazios na mistura. Ademais, as propriedades químicas, como o percentual de sílica amorfa, também exercem influência direta nas propriedades nas características da matriz cimentícia e conseqüentemente nos resultados de AA (Shoaei *et al.*, 2020).

Diante dos resultados obtidos, observou-se que, neste estudo, a inserção de até 20% do pó de vidro, não ocasionou acréscimos significativos nos percentuais de absorção de água, não interferindo, assim, nas propriedades da argamassa, especialmente em relação à durabilidade, conforme destacado anteriormente.

4.2.2 Resistência à compressão

Os valores médios de resistência à compressão obtidos a partir dos corpos de prova prismáticos, tanto da formulação de referência quanto das experimentais com incorporação de pó de vidro, podem ser observados na Figura 30, a seguir.

Figura 30- Valores médios de resistência à compressão



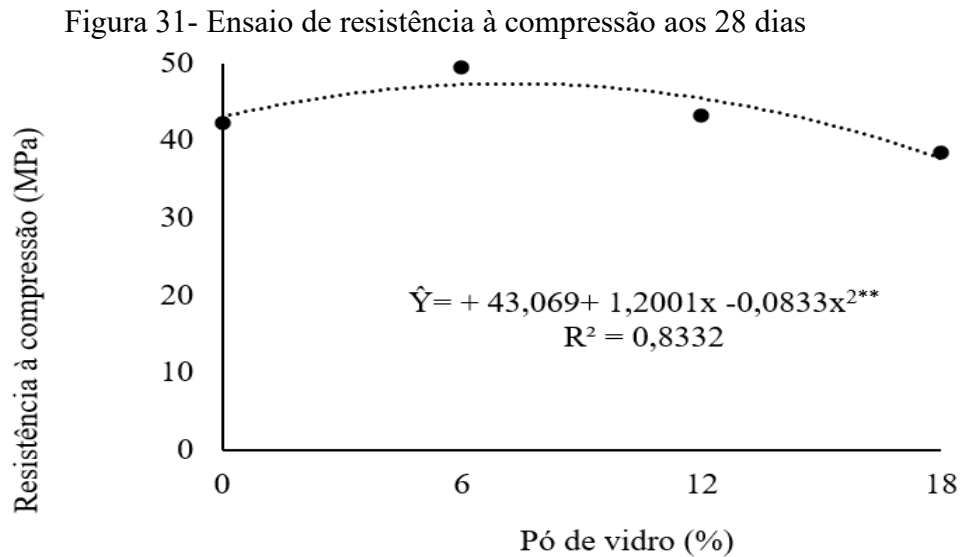
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Observou-se que os resultados de resistência à compressão para as formulações FE06 e FE12 foram superiores à formulação de referência, com acréscimos de 16,74% e 2,24%, respectivamente. No entanto, para a formulação FE18, detectou-se redução de 9,35%, a qual pode ser atribuída à maior quantidade de partículas de vidro que não participaram da reação de hidratação com o cimento, impactando diretamente as propriedades da matriz cimentícia, conforme destacado por Shoaie *et al.* (2020). Borges (2021) ao substituir 20% de cimento por pó de vidro identificou valor de resistência à compressão de 36,87 MPa aos 28 dias, valor similar ao encontrado neste estudo.

Por outro lado, os teores de substituição de até 12% de pó de vidro promoveram a formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), por meio da reação química entre a sílica amorfa, presente no pó de vidro, e o hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento. Em seu estudo Morais *et al.* (2022a) atribuíram esse fato à atividade pozolânica desenvolvida pelo subproduto, que contribui para a maior densificação de argamassas e consequentemente melhores resultados de resistência à compressão.

Kruger, Oliveira e Braga (2002), ao substituir 10% do aglomerante por pó de vidro passante 100% na peneira de 0,075 mm, observaram, aos 28 dias, uma resistência à compressão de 49,63 MPa, valor análogo ao encontrado neste trabalho. Ressalta-se que os valores evidenciados neste estudo podem ser maximizados em idades superiores, já que a atividade pozolânica desempenhada pelo subproduto é lenta nas primeiras idades (Khan; Saha e Sarker, 2020).

Submetendo os resultados encontrados à análise estatística por meio do *software Rbio*, observou-se que houve acréscimo na resistência à compressão para os corpos de prova prismáticos até o percentual de substituição de 7,20%, que representou compressão máxima de 47,39 MPa. A partir desse ponto, a inserção de pó de vidro refletiu em queda da resistência, conforme destacado na Figura 31. Este resultado foi ajustado a um modelo quadrático, com nível de significância ($P < 0,01$) e a confiabilidade obtida foi de $R^2 = 0,8332$.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Observou-se correlação positiva e significativa ($P < 0,05$) entre as variáveis, resistência à compressão e resistência à tração na flexão, indicando que, à medida que se aumenta a resistência à compressão nos corpos de prova prismáticos, também ocorrerá acréscimo nos valores de resistência à tração na flexão. No entanto, trata-se de correlação de baixa magnitude 0,45 (Tabela 7).

Tabela 7-Correlação de Pearson entre as variáveis tecnológicas

	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão
Resistência à compressão	---	0,45*

*: Significativo a 5%, respectivamente, pelo teste T.

Na perspectiva de Khan, Saha e Sarker (2020) a aplicação do pó de vidro como material cimentício suplementar influencia significativamente as propriedades mecânicas de argamassas e concretos, mas para isso diversos fatores devem ser observados como o tipo, a cor do vidro, a dimensão das partículas e a idade de cura. Os autores, destacaram a influência da cor para o ensaio de resistência à compressão, já que vidros na cor âmbar, por exemplo, apresentam menor desempenho quando comparados ao vidro verde e transparente.

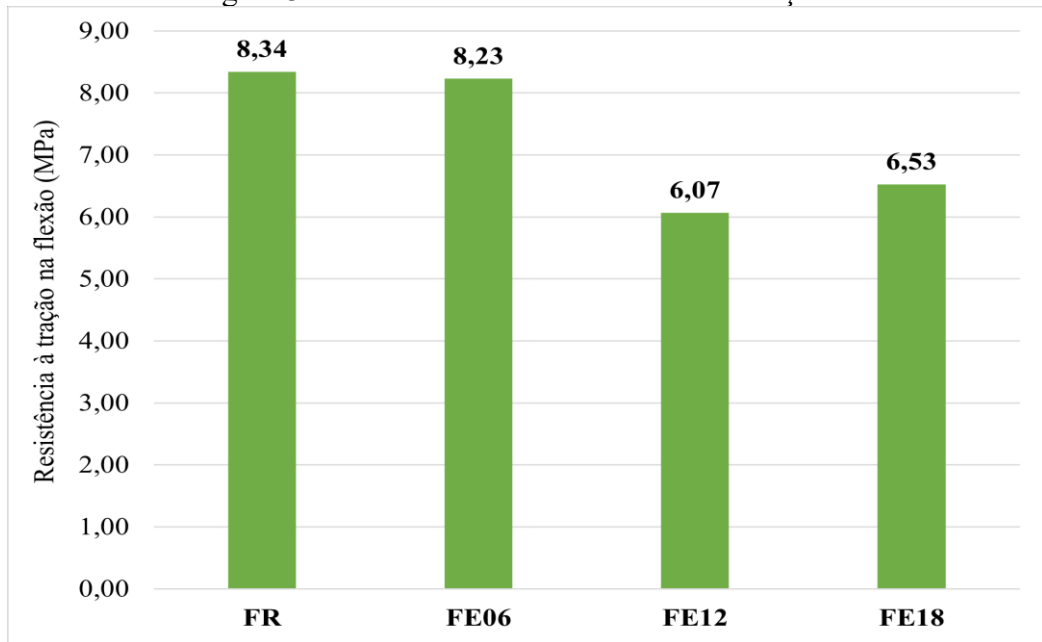
Santos *et al.* (2024) produziram argamassa a partir da incorporação de resíduo de lapidação de vidro e obtiveram resultados favoráveis com até 10% de substituição parcial do cimento Portland. Os autores enfatizaram o efeito filler e o potencial pozolânico do subproduto em relação ao ganho de resistência à compressão, devido à melhor densificação da microestrutura.

4.2.3 Resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos

Na Figura 32, a seguir, evidenciam-se os valores médios de resistência à tração na flexão obtidos ao submeter os corpos de prova prismáticos ao ensaio, aos 28 dias. Observa-se redução nos valores de resistência à tração na flexão em comparação ao corpo de prova de referência. Verificou-se que, nas formulações FE06, FE12 e FE18, houve queda de 1,32%, 27,22% e 21,70%, respectivamente. Taha e Nounu (2008) também identificaram resultados inferiores de resistência a flexão, aos 28 dias, com teor de substituição de até 20% de pó de vidro e atribuíram como um dos fatores a contaminação do vidro moído. Tal hipótese pode ser assimilada por este trabalho, já que o vidro foi coletado triturado sem a realização de nenhuma etapa de limpeza.

Gomes (2019), ao avaliar o desempenho mecânico de argamassa de revestimento a partir da incorporação de pó de vidro passante na peneira de 0,075 mm em substituição ao cimento Portland, também identificou queda na resistência à tração na flexão em relação à argamassa controle, que não possuía a incorporação do subproduto. O autor atribuiu esse resultado ao aumento do fator água/cimento, que ocasionou maior porosidade e queda da resistência nos corpos de prova produzidos.

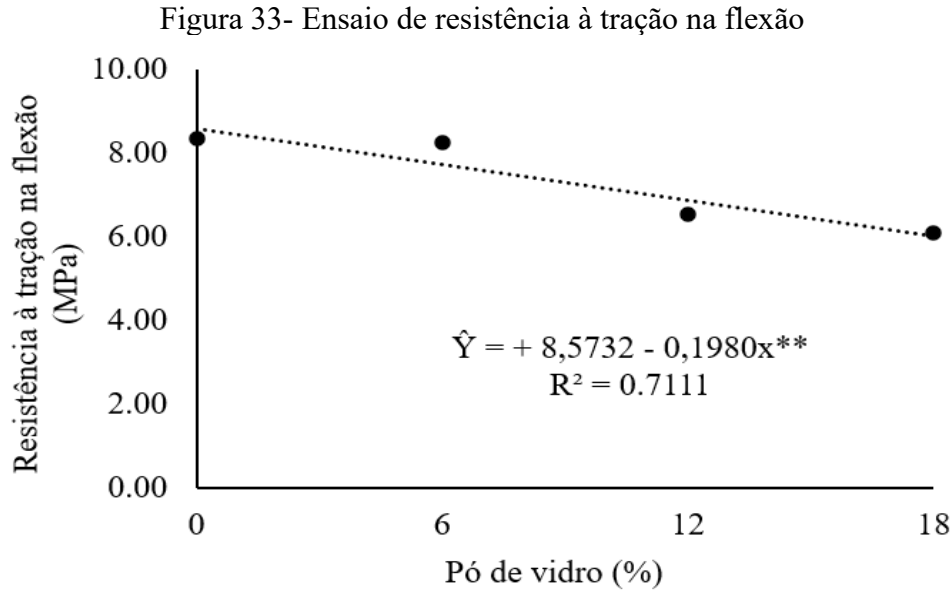
Figura 32- Valores médios de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No estudo desenvolvido por Oliveira Júnior (2020) também se observou redução de resistência à tração na flexão ao aumentar o teor de pó de vidro na produção de compósito cimentício de alto desempenho. O autor correlacionou tal fenômeno à baixa reatividade pozolânica do pó de vidro aos 28 dias, motivo assimilável, já que a reação pozolânica ocorre de maneira lenta, principalmente nas idades iniciais (Khan; Saha e Sarker, 2020).

Submetendo os resultados encontrados a tratamentos estatísticos evidenciou-se que houve diferença significativa entre os tratamentos para o ensaio de resistência à tração na flexão realizado nos corpos de prova prismáticos. Para isso adotou-se a regressão linear para avaliar os resultados obtidos. Este resultado pode ser evidenciado na Figura 33 e foi ajustado a um modelo linear, com nível de significância ($P < 0,01$) e a confiabilidade obtida foi de $R^2 = 0,7111$.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Os ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova prismáticos sendo eles, absorção de água por imersão, resistência à compressão e resistência à tração na flexão, apontaram viabilidade técnica para produção do ladrilho hidráulico a partir da incorporação do pó de vidro passante na peneira de 0,075mm. Para isso, optou-se por produzir e avaliar as características mecânicas e físicas do ladrilho hidráulico fabricado com 7,20% de subproduto, por se tratar do percentual mais expressivo no ensaio de resistência à compressão. Os resultados encontrados serão apresentados na seção subsequente.

4.2.4 Índice de consistência

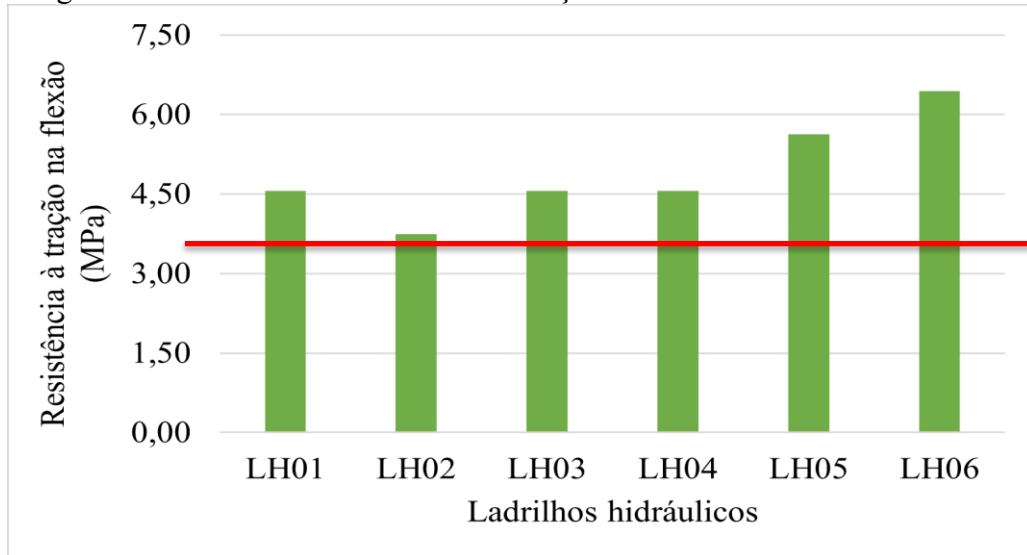
A argamassa empregada para produção do ladrilho hidráulico foi submetida ao ensaio de consistência, com o intuito de verificar sua trabalhabilidade (Destefani, 2013). Após a execução do ensaio obteve-se índice de consistência igual a 285mm, como média entre as três dimensões coletadas. Ressalta-se que o índice de consistência similar foi evidenciado por Golinhaki (2021) ao produzir placas cimentícias com resíduo de *Pinus*.

4.2.5 Resistência à tração na flexão do ladrilho hidráulico

Na Figura 34, evidenciam-se os resultados obtidos ao submeter os ladrilhos hidráulicos produzidos com 7,20% de pó de vidro ao ensaio de resistência à tração na flexão. Esse ensaio é de fundamental importância, pois avalia um dos principais requisitos para a aceitação do

material, garantindo sua conformidade com os padrões estabelecidos pela NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

Figura 34- Resultados de resistência à tração na flexão do ladrilho hidráulico



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

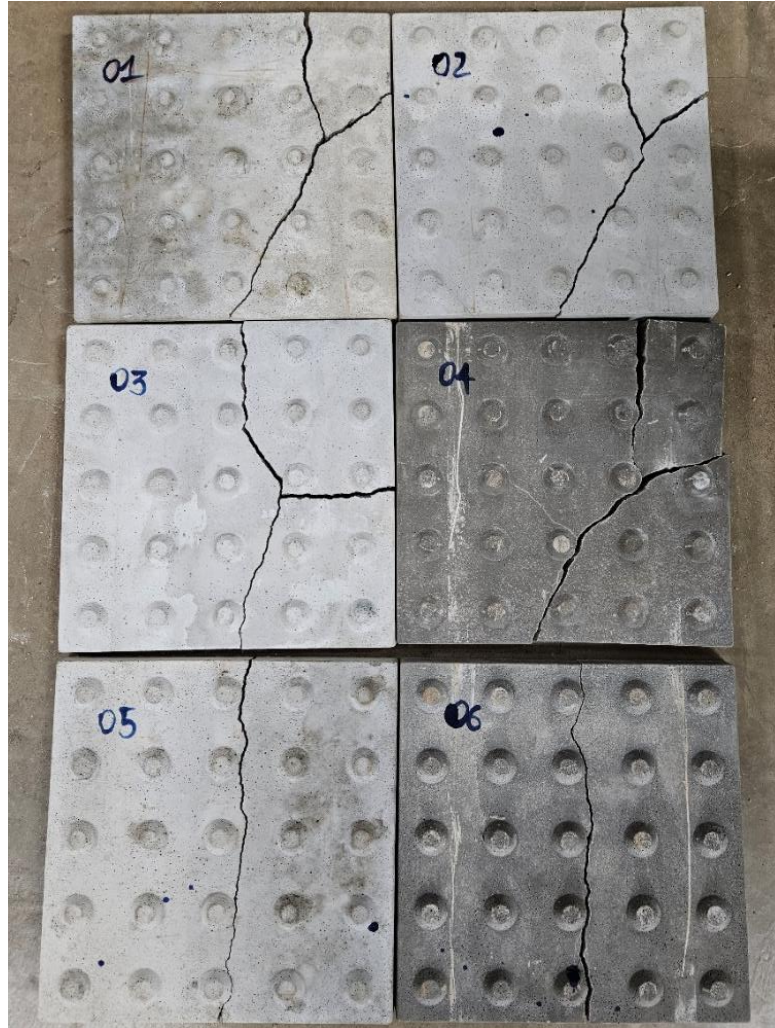
Os ladrilhos hidráulicos apresentaram resultados de resistência à tração na flexão superiores a 3,5 MPa atendendo aos requisitos mínimos solicitados pela NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013). Ressalta-se que os ladrilhos LH01, LH02, LH03 e LH04 apresentaram resultados similares com média de 4,35 MPa e Coeficiente de Variação (CV) de 12,30%. No entanto, LH05 e LH06 apresentaram resultados de resistência à tração na flexão superiores aos demais de 5,63MPa e 6,44MPa, respectivamente, e CV entre eles de 16,4%. Resultados similares foram obtidos por Oliveira e Costa (2023), que produziram ladrilhos hidráulicos a partir da incorporação de cinza do caroço de açaí em substituição ao teor de cimento.

Na perspectiva de Faria Filho, Jaruche e Leal (2016), o coeficiente de variação é uma medida de dispersão utilizada para expressar o desvio padrão em porcentagem. Valores menores de CV representam maior precisão dos resultados e, conseqüentemente, maior confiabilidade. Pimentel-Gomes (2023), classifica o CV como baixo quando inferior a 10%, médio entre 10% e 20%, alto entre 20% e 30% e muito alto acima de 30%.

Ressalta-se que a execução do ensaio pode ter sido um fator que interferiu na obtenção dos resultados, ocasionando em um maior coeficiente de variação. Essa situação decorre da ausência de aparelhagem específica no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto

Federal de Alagoas, *campus* Maceió, exigindo a realização de adaptações para a execução do ensaio. A Figura 35 apresenta os corpos de prova após a fratura.

Figura 35- Corpos de prova fraturados após execução do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Notou-se que os corpos de prova LH01, LH02, LH03 e LH04 apresentaram comportamento semelhante em relação à ruptura, o que justificou os resultados mecânicos semelhantes, entre os ladrilhos citados. Por outro lado, os ladrilhos LH05 e LH06 apresentaram linha de ruptura posicionada no centro do corpo de prova, o que resultou em valores de resistência mais elevados, conforme esperado.

4.2.6 Avaliação dimensional do ladrilho hidráulico

Após coleta das dimensões do ladrilho hidráulico (Tabela 8) evidenciou-se que o material atendeu aos requisitos da norma NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013), quanto a largura, comprimento e espessura.

Tabela 8-Dimensões coletadas no ladrilho hidráulico

Dimensões avaliadas	Requisitos dimensionais	Dimensões coletadas(mm)
Largura	Mínimo 100mm com tolerância de ± 3 mm	248,5
Comprimento	Mínimo 100mm com tolerância de ± 3 mm	248,5
Espessura	18 a 20 mm com tolerância de ± 1 mm	194,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Ressalta-se que foi utilizado o mesmo molde para a produção dos ladrilhos hidráulicos. Após a verificação das dimensões, constatou-se que os seis corpos de prova apresentaram as mesmas medidas. Por esse motivo, na Tabela 8 é apresentado um único valor para cada variável analisada (largura, comprimento e espessura).

Além dos requisitos dimensionais mencionados anteriormente, também se avaliou as características dos relevos presentes no piso tátil alerta, conforme preconizado pela NBR 16537 - Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação (ABNT, 2024). Na Tabela 9 a seguir é possível evidenciar as dimensões coletadas.

Tabela 9- Dimensões coletadas dos relevos presentes no piso tátil alerta

Dimensões Avaliadas	Requisitos dimensionais	Dimensões coletadas(mm)
Diâmetro da base do relevo	Máximo 25mm e mínimo 24mm	23,5
Distância horizontal entre centros do relevo	Máximo 50mm e mínimo 42mm	49,7
Distância diagonal entre centros do relevo	Máximo 72mm e mínimo 60mm	72
Altura do relevo	Máximo 4mm e mínimo de 3mm	6

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Observou-se que o molde utilizado para a produção dos ladrilhos hidráulicos atende parcialmente aos requisitos estabelecidos pela norma, no que diz respeito aos relevos presentes no piso tátil de alerta. O diâmetro da base do relevo não cumpre à especificação mínima de

24mm, uma vez que a dimensão registrada para o ladrilho em questão foi de 23,5mm. Ressalta-se que a altura do relevo também não cumpriu os requisitos determinados, conforme Tabela 9.

Destaca-se que os parâmetros de avaliação dimensional podem ser ajustados pela seleção novos moldes plásticos, desde que o fabricante observe os limites estabelecidos tanto pela norma NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013) e NBR 16537 - Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação (ABNT, 2024).

4.2.7 Ficha técnica

Baseando-se nos resultados mecânicos apresentados, verifica-se a viabilidade técnica para a produção dos ladrilhos hidráulicos a partir da incorporação de 7,20% de pó de vidro como substituição parcial a massa de cimento Portland. Esse percentual de adição promove não apenas o aprimoramento das características mecânicas, mas também a melhoria da durabilidade do material.

A ficha técnica do ladrilho hidráulico, evidenciada no Quadro 5, apresenta descrição detalhada acerca das principais informações do material, abrangendo sua aplicação, dimensões, matérias-primas utilizadas (composição); características físico-químicas e mineralógicas do pó de vidro; especificações técnicas; normas regulamentadoras empregadas e orientações quanto ao processo de aplicação do ladrilho hidráulico.

Quadro 5 - Ficha Técnica do ladrilho hidráulico

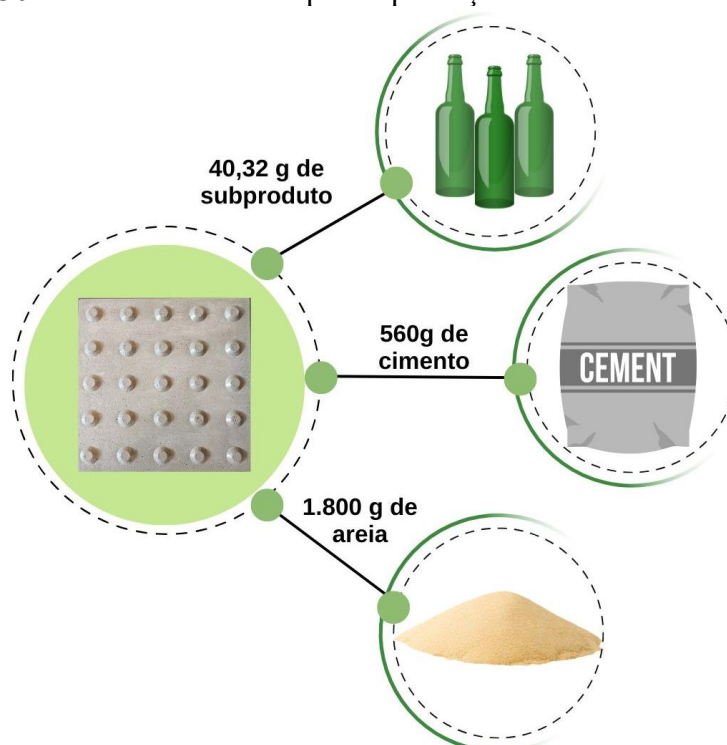
Nome do Produto	Ladrilho hidráulico
Descrição	Material de construção destinado à aplicação em passeios públicos (calçadas) como sinalização tátil de alerta, facilitando o deslocamento de pessoas com baixa visão ao proporcionar contraste com o piso adjacente.
Composição	Cimento Portland CP V ARI, agregado miúdo, pó de vidro e água.
Dimensões	Comprimento: 248,5 mm
	Largura: 248,5 mm
	Espessura: 194 mm
Características Físico-Químicas e Mineralógicas do Pó de Vidro	Composição química: majoritariamente por óxido de silício (69,63%), óxido de cálcio (17,43%) e óxido de sódio (3,64%);
	Mineral: Amorfo;

	<p>Análise térmica: Foram evidenciados três eventos distintos: o primeiro até 85,16 °C, com perda de 1,07%. O segundo evento a 365,35 °C (0,86% de perda). Por fim, o terceiro evento ocorreu a 599,29 °C com perda correspondente a 0,43%;</p> <p>Características morfológicas: Partículas de com formato angular e irregular.</p>
Normas Regulamentadoras de Referência	NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013);
	NBR 9050 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos (ABNT, 2020).
Especificações Técnicas	<p>Resistência à tração na flexão: Superior a 3,5MPa;</p> <p>Absorção de água por imersão: Não houve diferença significativa entre os diferentes teores de subproduto em relação ao traço de referência;</p> <p>Resistência à compressão: Formulações com 6% e 12% de pó de vidro foram superiores à formulação de referência, com acréscimos de 16,74% e 2,124%, respectivamente;</p>
Processo de Aplicação do Ladrilho Hidráulico	Realizar levantamento da área para aplicação do ladrilho hidráulico; calcular a quantidade de peças; preparação da base; assentamento, cura e liberação para tráfego.

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Os insumos utilizados para produção de 1 (um) ladrilho hidráulico pode ser observado na Figura 36. Vale ressaltar que a quantidade de subproduto empregada foi calculada com base no percentual considerado mais promissor, determinado a partir do desempenho mecânico dos corpos de prova, que foi de 7,20% em relação à massa de cimento.

Figura 36 - Insumos utilizados para a produção de um ladrilho hidráulico



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

As informações apresentadas no Quadro 5 e na Figura 36, proporcionam visão abrangente das propriedades do material, com ênfase nas características físico-químicas e no desempenho mecânico. Além disso, foi realizado levantamento dos custos da energia elétrica utilizado pela máquina de desgaste de Los Angeles para redução das partículas de vidro no laboratório.

Considerando a ausência de informações referentes ao contrato de demanda junto à concessionária de energia elétrica, bem como da modalidade tarifária aplicada à unidade consumidora do Instituto Federal de Alagoas, foi realizada simulação considerando exclusivamente a carga do equipamento analisado. Para tal, adotou-se o seguinte cenário: demanda mínima aplicada pela distribuidora de 15kW, modalidade tarifária verde, ligado em alta tensão.

Com base nas premissas adotadas, o custo da energia consumida durante o período de funcionamento do equipamento foi de R\$ 2,67. Esse valor foi calculado considerando a carga do equipamento de 2 CV (1,471 kW), tempo de operação de 5 horas e tarifa de 0,36256 por kWh no horário fora de ponta. No que se refere à demanda contratada, estimou-se custo de R\$ 378,00, calculado a partir da tarifa de R\$ 25,20 por kW aplicada a demanda mínima de 15 kW. Portanto, o custo total estimado para funcionamento do equipamento foi de R\$ 380,67.

Convém destacar os aspectos ambientais desse material, uma vez que se configura como alternativa sustentável para o aproveitamento em espaços públicos urbanos e acessíveis. Além da eficiência técnica demonstrada, a produção do ladrilho hidráulico com a incorporação de pó de vidro reforça o compromisso com práticas ambientalmente responsáveis. A utilização do subproduto oriundo de resíduos pós-consumo representa ação concreta no sentido da redução da pressão sobre recursos naturais, promovendo a circularidade de materiais dentro da cadeia produtiva da construção civil.

A adoção de insumos reciclados contribui diretamente para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção de cimento, notoriamente um dos maiores emissores de gases de efeito estufa (Farias *et al.*, 2021). Nesse contexto, o emprego do pó de vidro em substituição parcial ao cimento Portland não apenas reduz essas emissões, como também colabora para o reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos que, de outra forma, teriam como destino os aterros sanitários.

Dessa forma, os dados apresentados não apenas atestam a viabilidade técnica do composto desenvolvido, mas também evidenciam seu potencial para integrar políticas públicas voltadas à sustentabilidade urbana, à gestão de resíduos e à acessibilidade, conforme preconizado nas normas técnicas vigentes e nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

4.2.8 Contribuições ambientais da aplicação de pó de vidro em ladrilho hidráulico piso tátil

A aplicação de pó de vidro oriundo de garrafas pós-consumo na produção de ladrilhos hidráulicos representa estratégia eficiente de revalorização de resíduos sólidos urbanos, alinhada aos princípios da economia circular. Esta abordagem promove a reinserção desse passivo ambiental no ciclo produtivo da construção civil, reduzindo sua destinação inadequada aos aterros sanitários e prolongando a vida útil desses espaços (Abrelpe, 2023).

Ao substituir parcialmente o cimento Portland, cuja produção é altamente emissora de gases de efeito estufa, especialmente CO₂, o presente estudo contribui para a mitigação das mudanças climáticas, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, notadamente o ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, e o ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima (ONU, 2015). Segundo o *Global Cement and Concrete Association* (GCCA, 2023), a indústria cimenteira é responsável por

cerca de 7% das emissões globais de CO₂, o que reforça a importância de estratégias que reduzam a dependência do cimento convencional.

Além disso, a metodologia desenvolvida adota lógica de baixo custo, com possibilidade de replicação em contextos locais, promovendo alternativas técnicas e ambientalmente viáveis para comunidades e pequenas indústrias. A reutilização do vidro como material cimentício suplementar não apenas reduz a exploração de recursos naturais, como também fortalece práticas produtivas mais responsáveis, fomentando a inovação no uso de materiais sustentáveis (ISWA, 2022).

Conforme o *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023*, publicado pela Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), apenas 17% do vidro coletado no país é reciclado, sendo as regiões Norte e Nordeste as que apresentam os menores índices. Essa realidade evidencia a urgência da implementação de tecnologias e soluções aplicadas que incentivem o reaproveitamento desse tipo de resíduo na cadeia produtiva.

Assim, o estudo apresentado reafirma a importância da pesquisa aplicada no desenvolvimento de soluções tecnológicas voltadas à sustentabilidade, contribuindo para a transformação de passivos ambientais em produtos de valor agregado, com impacto positivo para o meio ambiente e a sociedade. Essa estratégia está alinhada às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que prioriza a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos, além da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

5 CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto, verifica-se que o pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo possui características técnicas favoráveis à sua utilização como substituto parcial do cimento Portland na fabricação de ladrilhos hidráulicos. Essa incorporação contribui tanto para a melhoria das características finais do material, quanto promove a circularidade ao passivo ambiental, mitigando o descarte inadequado de embalagens de vidro e o percentual de cimento na composição, considerado grande emissor de CO₂ para atmosfera durante seu ciclo produtivo.

O ensaio de análise granulométrica realizado no agregado miúdo demonstrou módulo de finura de 2,12 e diâmetro máximo característico de 2,36mm, características semelhantes foram evidenciadas em estudos presentes na literatura para produção de ladrilho hidráulico. O pó de vidro apresentou módulo de finura igual a 2,38, não foi possível determinar a dimensão máxima característica, devido ao elevado percentual de finos, já que o material passou pelo processo de moagem.

O ensaio de MEV acoplado ao EDS realizado na superfície do pó de vidro revelou a presença de partículas com menores dimensões, corroborando os resultados da análise granulométrica. Observou-se que o subproduto possui partículas de formato angular, irregular e com baixa rugosidade. Esses aspectos morfológicos são característicos de materiais submetidos ao processo de moagem e semelhantes aos do cimento e de adições minerais, que podem ser incorporadas a materiais cimentícios, como concretos. Ademais, nos espectros gerados por meio da EDS identificaram-se elevados teores de silício, sódio e cálcio, corroborando com os resultados da análise de FRX, como os elementos presentes em maior concentração.

A Análise de Fluorescência de Raios X do subproduto revelou uma composição majoritária de óxido de silício (69,63%), seguida por óxido de cálcio (17,43%) e pelo óxido de sódio (3,64%). No ensaio de Difração de Raios X, verificou-se que o óxido de silício, componente predominante na FRX, apresentou estrutura desordenada e capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio durante o processo de hidratação do cimento, contribuindo para o aprimoramento das propriedades mecânicas do material.

A curva termogravimétrica e derivada (TG/DTG) do pó de vidro indicou três eventos de perda mássica distintos: o primeiro ocorreu até 85,16 °C, com perda de 1,07%. O segundo evento foi identificado com 365,35 °C, com perda de massa equivalente a 0,86%. Por fim, o terceiro evento ocorreu a 599,29 °C com perda correspondente a 0,43%. A partir desse último

evento, verificou-se que a perda de massa permaneceu constante, indicando estabilidade térmica do pó de vidro em temperaturas mais elevadas.

A ação pozolânica do subproduto foi avaliada por meio do ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, que revelou baixa reatividade do pó de vidro. O material não atendeu aos requisitos físicos estabelecidos pela norma, apresentando índice de atividade médio de 73,77%, abaixo do mínimo exigido de 90%. Fatores como a granulometria do vidro e o percentual de substituição de 25% na composição dos corpos de prova podem ter influenciado esse resultado, uma vez que estudos indicam maior eficácia e ganho de resistência à compressão com teores de substituição de até 20%.

No que diz respeito, aos ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova prismáticos a partir da incorporação do subproduto evidenciou-se no ensaio de absorção de água por imersão, que não houve diferença significativa ($P > 0,05$) entre as formulações em relação ao corpo de prova de referência. Para o ensaio de resistência à compressão, os resultados foram ajustados a um modelo quadrático, com nível de significância ($P < 0,01$) e confiabilidade do $R^2 = 0,8332$. Observou-se ganho de resistência até o percentual de substituição de 7,20%, correspondente a compressão máxima de 47,39 MPa. A partir desse ponto, o aumento de pó de vidro refletiu em queda da resistência à compressão.

O ensaio de resistência à tração na flexão realizado nos corpos de prova prismáticos, revelou redução nos valores em relação ao corpo de prova de referência. Verificou-se que, nas formulações com 6%, 12% e 18% de subproduto, houve uma queda de 1,32%, 27,22% e 21,70%, respectivamente. Além disso, a análise estatística indicou diferença significativa entre os tratamentos, ajustando-se a um modelo linear, com nível de significância ($P < 0,01$) e confiabilidade de $R^2 = 0,711$.

A formulação mais promissora, em relação aos ensaios executados nos corpos de prova prismáticos, foi utilizada para produção do ladrilho hidráulico, sendo o teor escolhido de 7,20%. O ladrilho produzido foi submetido ao ensaio de resistência à tração na flexão, conforme principal requisito da NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013). Todos os corpos de prova apresentaram resistência superior a 3,5 MPa, conforme parâmetro solicitado.

A avaliação dimensional realizada no ladrilho hidráulico revelou que o material atendeu aos parâmetros de largura, altura e comprimento. No entanto, no que se refere aos relevos presentes no piso tátil os requisitos foram atendidos parcialmente, já que o diâmetro da base e altura do relevo não cumpriram à especificação mínima evidenciada na norma

regulamentadora. Ressalta-se que esses parâmetros podem ser ajustados pela seleção novos moldes plásticos, desde que o fabricante observe os limites estabelecidos.

Sendo assim, a utilização do pó de vidro revelou-se como alternativa viável para produção do ladrilho hidráulico, por meio da substituição parcial do cimento Portland. Essa abordagem se configura como alternativa benéfica, já que promove circularidade ao passivo ambiental através do seu reprocessamento, transformando-o em matéria-prima secundária para a cadeia produtiva da construção civil.

REFERÊNCIAS

Adame, A. **Análise direta de folhas de soja por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) e por fluorescência de raios X dispersiva em energia (EDXRF)**. Tese de Doutorado—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2018.

Aliabdo, A. A.; Abd Elmoaty, A. E. M.; Aboshama, A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 866–877, out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>. Acesso em: 20 fevereiro 2024

Alves, J. G. S.; Mazzaro, F. S.; Almeida, F. C. R. O resíduo de nióbio e suas potenciais aplicações na construção civil: uma revisão da literatura. Em: **7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**. [s.l.] Atena Editora, 2021. p. 373–379.

Al-Zubaid, A. B.; Shabeeb, K. M.; Ali, A. I. Study The Effect of Recycled Glass on The Mechanical Properties of Green Concrete. **Energy Procedia**, v. 119, p. 680–692, jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.095>. Acesso em: 17 janeiro 2024.

Amorim, F. M. de S. **Modelos matemáticos para planejamento da produção em indústrias de embalagens de vidro**. Tese de Doutorado—São Carlos-SP: Universidade de São Paulo - *Campus* São Carlos, 19 jun. 2019.

Andrade, J. M. de. **Caracterização mecânica e dinâmica dos óxidos constituintes do cimento Portland e do silicato de cálcio hidratado através da teoria do funcional da densidade**. Tese de Doutorado- Universidade Federal da Paraíba (Programa de Pós-Graduação do Centro de Tecnologia), João Pessoa, set. 2024.

Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABRAVIDRO). **Vidro e Sustentabilidade**. Portal Abravidro, São Paulo. Disponível em: <https://abravidro.org.br/mercado/sustentabilidade>. Acesso em: 10 março 2024.

Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABRAVIDRO). **Vidro no Brasil**. Portal Abravidro, São Paulo, 23 mar. 2015. Disponível em: <https://abravidro.org.br/vidro-no-brasil/>. Acesso em: 20 janeiro 2023.

Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABRELPE, 2023.

Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_Abrelpe_2022.pdf. Acesso em: 10 setembro 2023.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2023**. Disponível em: <https://abrema.org.br>. Acesso em: 21 maio 2025.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro. 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7215**. Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 9050**. Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro. 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 9457**. Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 9776**. Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro. 1987.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos – Requisito. 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 16537**. Acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação. Rio de Janeiro. 2024.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 16738**. Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro. 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 16790**. Pisos assentados de placa de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro. 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 248**. Agregados- Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

Associação Brasileira De Bebidas (Abrabe). *Glass is good*. Disponível em: <https://www.abrabe.org.br/glass-is-good/>. Acesso em: 10 março 2023.

Associação dos Industriais de Vidro de Embalagens (AIVE). *Fornos do futuro*. Disponível em: <https://aive.pt/embalagens-de-vidro/fornos-do-futuro/>. Acesso em: 6 março 2025.

Assunção, G. M. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 2, p. 223–231, 30 jun. 2019. Disponível em: 10.20985/1980-5160.2019.v14n2.1543. Acesso em: 13 fevereiro 2023.

Azevedo, A. R. G. de. **Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com incorporação do lodo primário da indústria de papel de celulose**. Tese de Doutorado—Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 24 jan. 2018.

Bauer, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2008. v. 1

Bezur, A. *et al.* **Handheld XRF in cultural heritage: a practical workbook for conservators**. [s.l.] The Getty Conservation Institute, 2020.

Bhering, L. L. **Rbio: A Tool For Biometric And Statistical Analysis Using The R Platform**. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2017.

Borges, A. L. **Efeitos filler e pozolânico do pó de vidro em argamassas**. Dissertação de Mestrado—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 10 jun. 2021.

Borges, A. L. *et al.* Filler effect and pozzolanic effect of glass powder in mortar. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 25, e144814, jan./dez. 2025. ISSN 1678-862. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100869>. Acesso em: 28 abril 2025.

Bostanci, L. Effect of waste glass powder addition on properties of alkali-activated silica fume mortars. *Journal of Building Engineering*, v. 29, p. 101154, maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101154>. Acesso em: 19 janeiro 2024.

Brandão, D. L. **Comportamento mecânico de um solo siltoso de Curitiba-Paraná melhorado com cimento e pó de vidro**. Dissertação de Mestrado—Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 15 ago. 2023.

Brasil. Ministério Do Meio Ambiente. **Governo Federal institui o sistema de logística reversa para embalagens de vidro**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/presidente-da-republica-institui-o-sistema-de-logistica-reversa-para-embalagens-de-vidro-1>>. Acesso em: 14 fevereiro 2024.

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: 19 janeiro 2024.

Brasil. **Decreto n.º 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. Dispõe sobre a regulamentação da logística reversa e outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-

2022/2022/decreto/d10936.htm . Acesso em: fevereiro de 2024.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **DNIT 412/2019-ME**: Determinação da granulometria de solos, agregados e outros materiais pétreos por peneiramento. Rio de Janeiro. 2019.

Brito, A. N. dos S. L. de. **Aproveitamento de resíduo de vermiculita em argamassa alternativa para a produção de ladrilho hidráulico**. Mestrado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambiente—Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 28 jul. 2021a.

Brito, R. de. **Efeito da incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia**. Dissertação de Mestrado—Presidente Prudente, São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 9 jun. 2021b.

Bueno, E. T. *et al.* A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120180, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120180>. Acesso em: 10 setembro 2024.

Carvalho, J. L. B. DE. **Análise do Desempenho de Argamassa de Assentamento com Substituição Parcial do Agregado Miúdo por Embalagens Cartonadas Trituradas** . Dissertação de Mestrado—Marechal Deodoro: Instituto Federal de Alagoas, 20 out. 2022.

Carvalho, M. N. **Incorporação de resíduos de vidro do tipo “garrafas long neck” em blocos de concreto**. Dissertação de Mestrado—Mato Grosso: Universidade Federal de Mato Grosso, Câmpus Universitário de Sinop, 24 fev. 2021.

Castro, J. A. de. **Investigação de Ladrilhos Hidráulicos sob a Perspectiva Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida e Contaminação Ambiental**. Dissertação de Mestrado—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 21 dez. 2022.

Circula Vidro. Manual operacional básico da logística reversa do vidro: Circula Vidro, 2023. Disponível em: https://circulavidro.org/wp-content/uploads/2024/05/Manual-Operacional-Basico_vf.pdf. Acesso em: 20 maio 2024.

Chaparro, M. A. C. *et al.* A importância da reciclagem do vidro para a natureza/ The importance of glass recycling for nature. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 50239–50246, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30037>. Acesso em: 15 agosto 2024.

Croce, F. F. **Análise da viabilidade financeira da logística reversa do vidro no Brasil: uma modelagem de rede de logística**. Dissertação de Mestrado- Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, abril. 2023.

Delaqua, G. C. G. **Incorporação de pó de vidro de embalagens múltiplo-uso em cerâmica vermelha**. Tese de Doutorado—Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 26 ago. 2022.

Destefani, A. Z. **Desenvolvimento de ladrilho hidráulico piso tátil pelo processo de vibração usando resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. Tese de Doutorado—Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 5 set. 2013.

Dias, L. V. *et al.* Avaliação da migração de cloretos em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 61–75, 1 maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.512>. Acesso em: 21 agosto 2024.

Euromonitor International. *Glass and glass products in Brazil: ISIC 261*. Disponível em: <https://www.euromonitor.com/glass-and-glass-products-in-brazil-isic-261/report>. Acesso em: 18 maio 2023.

Faria Filho, D. E. de; Jaruche, Y. de G.; Leal, D. H. V. Classificação de coeficientes de variação na experimentação com coelhos no Brasil. **Ciência Animal Brasileira**, v. 17, n. 4, p. 519–526, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1089-6891v17i424460>. Acesso em: 10 setembro 2024.

Farias, L. N. *et al.* Avaliação dos impactos ambientais de concretos e argamassas contendo materiais cimentícios suplementares (mcs) e agregados reciclados (ar) por meio da avaliação do ciclo de vida (acv): uma revisão da literatura. In: Encontro Latino Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 4., 2021. **Anais [...]. [S. l.]**, 2021. p. 290–303. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/2521>. Acesso em: 26 maio 2025.

Farias, M. M.; Farias, C. L. de R.; Picanço, M. de S. Escória de Alto Forno como substituição parcial ao cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0120>. Acesso em: 25 setembro 2024.

Ferreira, C. de O.; Campos, M. A. N.; Barros, S. S. Aproveitamento do resíduo do beneficiamento de rocha ornamental em ladrilho hidráulico piso tátil. **Delos: Desarrollo Local Sostenible**, v. 16, n. 42, p. 1–11, 4 jan. 2023. DOI: 10.55905/rdelosv16.n42-001. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/732>. Acesso em: 10 janeiro 2025.

Fontes, W. C. *et al.* Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 395–412, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400312>. Acesso em: 27 agosto 2024.

Freitas, E. M. DA S. G. *et al.* **Produção de placas cimentícias com borracha de pneu inservível para uso em forros de habitações**. In: WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS. **Anais...Porto Alegre: ANTAC**, 2019.

Galvão, M. C. B.; Ricarte, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57–73, 15 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>. Acesso em: 18 dezembro 2024.

Garanito, V. M. G. **O vidro na indústria da construção**. Dissertação de Mestrado— Funchal – Portugal: Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, dez. 2018.

Global Cement and Concrete Association (GCCA). Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. 2023. Disponível em: <https://gccassociation.org>. Acesso em: 21 maio 2025.

Golinhaki, S. **Estudo de placas cimento-madeira não prensadas produzidas em resíduo de pinus spp: Dosagem, propriedades físicas, mecânicas e de reação inicial ao fogo**. Dissertação de Mestrado—Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 19 ago. 2021.

Gomes, F. A. **Avaliação do comportamento mecânico das argamassas de revestimento com a substituição parcial do cimento por pó de vidro como material pozolânico**. Trabalho de conclusão de curso—Mossoró, Rio Grande do Norte: Universidade Federal Rural do SemiÁrido - UFRS, 2019.

Guerra, A. de L. E R. Metodologia da pesquisa científica e acadêmica. **Revista OWL (OWL Journal) - Revista Interdisciplinar de Ensino e Educação**, v. 1, p. 149–159, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8240361>. Acesso em: 19 fevereiro 2025.

Guo, P. *et al.* New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. **Construction and Building Materials**, v. 257, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>.

Henrique, Y. F. **Análise de viabilidade técnica da incorporação de resíduo de vidro em um solo argiloso laterítico para pavimentação rodoviária**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, maio 2023.

Hilton, B. *et al.* The functional and environmental performance of mixed cathode ray tubes and recycled glass as partial replacement for cement in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, p. 104451, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.10445>. Acesso em: 02 agosto 2024.

Huang, B. *et al.* A life cycle thinking framework to mitigate the environmental impact of building materials. **One Earth**, v. 3, n. 5, p. 564–573, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>. Acesso em: 30 agosto 2024.

Instituto Pragma. **Anuário da reciclagem 2022**. Brasília, DF: Instituto Pragma, 2022. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/609063d326f8d4cb6e852de0/63ac4964a8bd71442db83ded_Anu%C3%A1rio%20da%20Reciclagem%202022.pdf. Acesso em: 22 março 2024.

International Solid Waste Association (ISWA). **O futuro do setor de gestão de resíduos: tendências, oportunidades e desafios para a década (2021-2030)**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/wp-content/uploads/2022/08/O-futuro-do-setor-de-gestao-de-residuos-ISWA-2022.pdf>. Acesso em: 9 fevereiro 2024.

International Solid Waste Association (ISWA). Global Waste Management Outlook 2022. Disponível em: <https://www.iswa.org>. Acesso em: 21 maio 2025.

Ionashiro, M.; Giolito, I. **Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial.** [s.l: s.n.].

Jativa, F.W; Dalton, L.E; Pourghaz, M. Gas CO₂ foaming and intermixing in Portland cement paste to sequester CO₂. **Cement**, v. 16, p.100099, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2024.100099>. Acesso em: 10 abril 2025.

Khan, Md. N. N.; Saha, A. K.; Sarker, P. K. Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101052, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101052>. Acesso em: 10 outubro 2024.

Kruger, F. R.; Oliveira, D. L. do A.; Braga, S. R. O. Q. **Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto.** 25a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química - SBQ. **Anais...2002.**

Lamas, M. L.; Longo, O. C.; Souza, V. C. de. A produção de ladrilho e o ofício de ladrilhar: método de produção de ladrilhos do século XVIII aos nossos dias. **Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material**, v. 26, n. 0, 25 jun. 2018.

Lira, J.; Assis, A. **Inventário de ciclo de vida do cimento brasileiro: meta-análise de dados nacionais.** 4 nov. 2020.

Liu, G.; Florea, M. V. A.; Brouwers, H. J. H. Characterization and performance of high volume recycled waste glass and ground granulated blast furnace slag or fly ash blended mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 461–472, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.334>. Acesso em: 08 novembro 2024.

Lutti, G. D. **A indústria do vidro e seu empenho pela sustentabilidade. É Puro É Vidro.** Disponível em: https://epuroevidro.com/wp-content/uploads/2021/06/E-book_Porque-o-vidro-e-a-melhor-opcao-para-reciclar-1.pdf. Acesso em: 14 janeiro 2024.

Medeiros, A. T. T.; Silva, F. P. da. Design, digitalização tridimensional & ladrilho hidráulico. **Revista Arquitetura e Lugar**, v. 1, p. 32–49, 2023. Disponível em: <https://revistas.editora.ufcg.edu.br/index.php/arql/article/view/362>. Acesso em dezembro de 2024. Acesso em: 16 novembro 2024.

Montano, P. F.; Bastos, H. Bertha. **A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas.** BNDES Setorial 38 p. 265-290, 2013.

Morais, A. *et al.* Argamassa cimentícia: Uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial. **Cerâmica industrial**, v. 27, n. 1, p. 1–11, 2022a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2022.008>. Acesso em: 17 setembro 2024.

Morais, C. *et al.* (EDS.). Guia Técnico de Reciclagem do Vidro. Em: **Abividro**. 1. ed. São Paulo: [s.n.]. p. 1–44, 2022b.

Moreira, B. A. DA S. **Incorporação de resíduo de vidro moído em argamassas como substituto parcial do cimento**. Dissertação de Mestrado—Guimarães, Portugal: Universidade do Minho - Escola de Engenharia, ago. 2022.

Moser, N. J. **Avaliação da resistência mecânica em compósitos de argamassa com adição de pó de vidro após exposição a elevadas temperaturas**. Dissertação de Mestrado- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, *Campus Farroupilha*, 2019.

Nascimento, M. L. F.; Zanotto, E. D. On the first patents, key inventions and research manuscripts about glass Science & technology. **World Patent Information**, v.47, p. 54-6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2016.10.002>. Acesso em: 05 agosto 2024.

Nociti, D. M. **Obtenção de rochas sintéticas a partir de resíduos de vidro comercial e pó de granito**. Tese de Doutorado—Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Oliveira, I. R. B. R. de. **Materiais Compósitos à Base de Cimento com Adições De Vidro Cominuído como Agregado Fino para Aplicação na Construção Civil**. Dissertação de Mestrado—Poços de Caldas-Minas Gerais: Universidade Federal de Alfenas, *Campus Poços de Caldas*, fev. 2022.

Oliveira, J. M. de. **A responsabilidade compartilhada como fator de logística reversa: o caso de garrafas de vidro modelo Long Neck na cidade de Montes Claros**. Dissertação de Mestrado—Montes Claros, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 25 out. 2021.

Oliveira, S. F. M. de; Tenório, T. M.; Marques, S. K. J. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0088>. Acesso em: 10 fevereiro 2024.

Oliveira, G. H. S. de O.; Costa, N. C. da S. **Avaliação mecânica de placas cimentícias com substituição do cimento por cinza do caroço de açaí**. [s.l.] Instituto Federal do Amapá, 18 dez. 2023.

Oliveira Júnior, A. de. **Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos a altas temperaturas**. Dissertação de Mestrado—São Carlos-SP: Universidade Federal de São Carlos, 3 fev. 2020.

Parsifal. *About*. Disponível em: <https://parsif.al/about/>. Acesso em: 10 dezembro 2023.

Patel, D. *et al.* Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 406–415, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.017>. Acesso em: 08 maio 2024.

Pimentel-Gomes, F. **Curso de Estatística Experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luís de Queiroz, 2023.

Pio, I. *et al.* Caracterização dos materiais aplicada às suas propriedades, microestrutura e seu processamento. **Concilium**, v. 22, n. 3, p. 684–696, 10 maio 2022.

Porto Junior, D. R. **Caracterização do resíduo de vidro blindex para substituição parcial do cimento na mistura solo-cimento**. Dissertação de Mestrado—Campo Grande, Mato Grosso do Sul: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul -UFMS, dez. 2024.

Prado, J. E. A. *et al.* Análise das emissões de gases do efeito estufa pelo coprocessamento de resíduos sólidos em indústria cimenteira. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 18, n. 53, p. 154, 15 set. 2022. Disponível em: [10.3895/rts.v18n53.15684](https://doi.org/10.3895/rts.v18n53.15684). Acesso em: 25 agosto 2024.

Ramos, K. da S.; Luz, J. A. M. da; Milhomem, F. de O. Da viabilidade de fabrico de vidro com resíduos de mineração. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, 5 jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.29828>. Acesso em: 03 junho 2024.

Saadatkah, N. *et al.* Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis—TGA. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 98, n. 1, p. 34–43, 5 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cjce.23673>. Acesso em: 17 julho 2024.

Samarakoon, M. H.; Ranjith, P. G.; Silva, V. R. S. de. Effect of soda-lime glass powder on alkali-activated binders: Rheology, strength and microstructure characterization. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 118013, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118013>. Acesso em: 07 agosto 2024.

Santana, A. L.; Lange, L. C.; Magalhães, A. S. O impacto do instrumento econômico Bolsa Reciclagem orientado aos catadores de materiais recicláveis sobre o mercado da reciclagem do vidro no estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 737–747, ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210258>. Acesso em: 06 março 2024.

Santos, J. M. Lemos dos; Reis, N. G. dos; Rodrigues, J. C. Análise da argamassa de revestimento com a adição de pó de vidro. Em: **Arquitetura e Engenharia Civil contemporânea: inovação, tecnologia e sustentabilidade 2**. [s.l.] AYA Editora, 2022. p. 58–69.

Santos, E. A. *et al.* Influência da incorporação de resíduo de lapidação de vidro nas propriedades da argamassa de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0330>. Acesso em: 22 outubro 2024.

Savazzini-Reis, A.; Fagundes, A. F. Incorporação De Resíduo De Madeira Em Ladrilho Hidráulico Vibrado. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 16, n. Especial, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20201923>. Acesso em: 05 janeiro 2024.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). **Relatório anual 2022**. 2022. Disponível em: https://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2022.pdf. Acesso em março de 2023. Acesso em: 12 dezembro 2023.

Scalize, P. S. *et al.* **Aplicação de Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTG) em materiais orgânicos usados como adsorventes.** XIX SILUBESA-ABES. *Anais...*Recife: 29 abr. 2020.

Scharnberg, A. R. A. *et al.* Avaliação da adição de resíduos de vidro sodo-cálcico e erva-mate em matriz cerâmica. *Cerâmica*, v. 65, n. 373, p. 63–69, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653732466>. Acesso em: 20 junho 2024.

Scheuermann Filho, H. C. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto.** Dissertação de Mestrado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 15 fev. 2019.

Sharifi, Y. *et al.* Utilization of waste glass micro-particles in producing self-consolidating concrete mixtures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 10, n. 3, p. 337–353, 25 set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0141-z>. Acesso em: 08 setembro 2024.

Shoaei, P. *et al.* Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: A comprehensive comparative study. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 118991, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118991>. Acesso em: 11 novembro 2024.

Silva, W.; Filgueiras, C. da O vidro e sua importância na vida e na química. *Química Nova*, v.46, No. 5, 491-501, 2023.

Silva, L. C. d A *et al.* Análise do uso de resíduo da siderurgia para aplicação em cerâmica vermelha através da caracterização química e mineralógica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 4, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1308>. Acesso em: 04 fevereiro 2024.

Silva, M. W. M. da; Cordeiro, L. de N. P. Potencial uso de pérolas de EPS em argamassas para a produção de placas cimentícias. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1394>. Acesso em: 29 agosto 2024.

Souza, J. P. de. **Estudo da Sinterização de Vidros Aluminossilicatos por Calorimetria Exploratória Diferencial.** Dissertação de Mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 5 fev. 2015.

Taha, B.; Nounu, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 5, p. 713–720, maio 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>. Acesso em: 17 fevereiro 2025.

Torres, R. A. M. **Reciclagem de resíduos da bauxita em ladrilhos hidráulicos.** Dissertação de Mestrado—São Luís, Maranhão: Universidade Federal do Maranhão, 27 mar. 2020.

United Nations Environment Programme (UNEP); Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). *Beyond foundations: mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi: UNEP, 2024. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/45095>. Acesso em: 22 abril 2025.

Venâncio, A. A. M. *et al.* Estudo de caso: reciclagem e reuso de vidro em Belo Horizonte-MG. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 32123–32161, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-602>. Acesso em: 03 outubro 2024.

Vieira, M. E. M. *et al.* Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e262101018622, 10 ago. 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18622>. Acesso em: 20 outubro 2024.

Warnphen, H.; Supakata, N.; Kanokkantapong, V. The reuse of waste glass as aggregate replacement for producing concrete bricks as an alternative for waste glass management on sichang island. **Engineering Journal**, v. 23, n. 5, p. 43–58, 30 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4186/ej.2019.23.5.43>. Acesso em: 21 março 2025.

Yurt, Ü.; Çelikten, S.; Atabey, İ. İ. Post-fire residual mechanical and microstructural properties of waste basalt and glass powder-based geopolymer mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 94, p. 109941, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109941>. Acesso em: 20 janeiro 2025.

Zhu, W. *et al.* Alkali-activated waste glass as an alternative cement for preparation of potential low-carbon concrete. **Ceramics International**, v. 50, n. 15, p. 26997–27005, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.432>. Acesso em: 25 agosto 2024.

APÊNDICE 2 - PRODUTO TÉCNICO/TECNOLOGIO- CATÁLOGO
TÉCNICO



**Sustentabilidade e inovação:
Ladrilho hidráulico com pó de vidro
oriundo de garrafas pós-consumo**

Taísa Menezes Tenório
Sheyla Karolina Justino Marques

Instituto Federal de Alagoas
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais
Mestrado Profissional

Sustentabilidade e inovação: Ladrilho hidráulico com pó de vidro oriundo de garrafas pós-consumo

Taísa Menezes Tenório
Sheyla Karolina Justino Marques

Tipo de Produto Técnico ou Tecnológico
Catálogo Técnico

Linha de Pesquisa
Tecnologias e Inovações Ambientais





Ministério da Educação
Instituto Federal de Alagoas

Reitor

Carlos Guedes de Lacerda

Pró-Reitora de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação

Eunice Palmeira da Silva

Coordenadora do Mestrado em Tecnologias Ambientais

Sheyla Karolina Justino Marques

Autores:

Taísa Menezes Tenório

Sheyla Karolina Justino Marques

Projeto Gráfico:

Camila Karoline Justino Marques

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS

A reprodução não autorizada desta publicação,
no todo ou em parte, constitui violação dos
direitos autorais (Lei nº 9.610)

Índice

Apresentação	06
Descritivo do produto técnico e tecnológico	07
Metodologia	08
Resultados	11
Considerações Finais	13
Referências	14



Apresentação

Este catálogo reúne as principais informações sobre a tecnologia desenvolvida para a produção de ladrilhos hidráulicos com a incorporação de pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo. Essa solução inovadora contribui para a valorização de um Resíduo Sólido Urbano (RSU), promovendo sua reutilização como matéria-prima secundária na cadeia produtiva da construção civil.

A introdução do pó de vidro no processo produtivo não apenas reduz o descarte irregular desse material, mas também minimiza a necessidade de cimento Portland na composição dos ladrilhos. Considerado um dos principais emissores de CO₂ na indústria da construção, o cimento Portland tem sua pegada de carbono diretamente associada à alta demanda energética gerada pela queima de combustíveis fósseis.

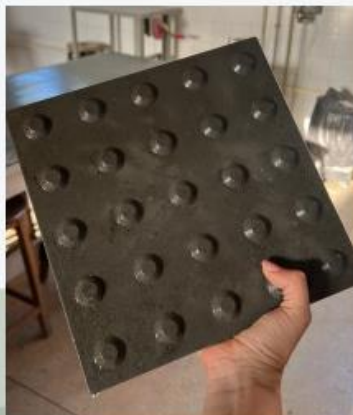
O uso do pó de vidro é sustentado pelo seu elevado teor de sílica amorfa, que o caracteriza como um material cimentício suplementar. Sua adição melhora significativamente as propriedades mecânicas do ladrilho, promovendo maior densificação e, conseqüentemente, melhor desempenho em resistência à compressão e durabilidade. Além disso, a incorporação desse subproduto agrega valor ao ciclo produtivo, reduzindo impactos ambientais e promovendo a economia circular.

O processo produtivo do ladrilho hidráulico com pó de vidro pode ser facilmente implementado na indústria, garantindo sua replicabilidade. Sua produção não exige equipamentos sofisticados, e as matérias-primas utilizadas são amplamente disponíveis no mercado, facilitando a adoção da tecnologia por diferentes segmentos do setor da construção civil.

Essa inovação está alinhada à linha de pesquisa Tecnologias e Inovações Ambientais do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTEC). O desenvolvimento desse material de construção de menor impacto ambiental atende à crescente demanda por soluções sustentáveis no mercado, contribuindo para práticas construtivas mais responsáveis e ambientalmente conscientes.

Com essa tecnologia, promovemos não apenas a redução da geração de resíduos, mas também o desenvolvimento de um material competitivo e ecologicamente viável para a construção civil do futuro.

Descritivo do produto técnico e tecnológico



Os ladrilhos hidráulicos são placas cimentícias fabricadas a partir de argamassa composta por cimento Portland, agregados e água. Amplamente utilizados na construção civil, esses materiais desempenham papel fundamental na pavimentação de calçadas e na sinalização tátil, conforme os requisitos da NBR 9050 - Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos (ABNT, 2020).

A inovação tecnológica presente neste produto reside na substituição parcial do cimento Portland pelo pó de vidro, proporcionando maior circularidade ao resíduo pós-consumo. Essa substituição não apenas reduz o passivo ambiental associado ao descarte inadequado de vidro, mas também contribui para a diminuição da dependência de cimento Portland, tornando o setor produtivo mais sustentável e promovendo a gestão eficiente dos recursos naturais.

O desenvolvimento dessa inovação envolveu diversas etapas, incluindo a seleção criteriosa das matérias-primas, a homogeneização da mistura, a moldagem dos ladrilhos, o processo de cura e a realização de ensaios físicos, mecânicos e dimensionais. Essas etapas foram essenciais para validar a conformidade do material com as normas técnicas brasileiras.

Destaca-se que a definição do percentual de substituição do cimento pelo pó de vidro foi fundamentada em testes rigorosos, como a absorção de água por imersão, a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão.

Esses ensaios foram conduzidos em corpos de prova prismáticos fabricados com a mesma argamassa utilizada na produção dos ladrilhos hidráulicos, assegurando a viabilidade técnica da inovação.

Metodologia

Para o desenvolvimento do ladrilho hidráulico, foram empregados procedimentos experimentais em laboratório, conforme fluxograma da Figura 1, seguindo as normas vigentes pertinentes a cada etapa, com o intuito de garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados.



Figura 1 - Fluxograma do procedimento experimental

Para isso, inicialmente, foram realizadas a cominuição e o peneiramento das partículas de vidro, seguidos pelo processo de homogeneização das matérias-primas. Após esse processo, foram produzidos os corpos de prova prismáticos utilizando-se formas metálicas com três compartimentos horizontais, com 160mm de comprimento e 40mm de largura e altura. Esses corpos de prova foram utilizados para avaliar o comportamento da incorporação do pó de vidro em diferentes teores em substituição parcial ao cimento Portland.

A formulação mais promissora foi escolhida para produção do ladrilho hidráulico, que foi submetido ao ensaio de resistência à tração na flexão, a fim de verificar a adequação da inovação à NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013). A referida normativa exige que os valores de resistências seja iguais ou superiores a 3,5 MPa.

O procedimento de fabricação dos corpos de prova prismáticos e dos ladrilhos hidráulicos foi bastante similar, uma vez que foram utilizadas as mesmas matérias-primas e parâmetros, com diferença apenas na etapa final de moldagem. As etapas de produção de ambos os materiais podem ser evidenciadas nas figuras a seguir.

Processo de fabricação dos corpos de prova prismáticos e ladrilhos hidráulicos

O vidro foi submetido ao processo de cominuição por meio da máquina de desgaste de Los Angeles (Figura 2a) e, posteriormente, submetido ao processo de peneiramento em malha de 0,075mm, conforme Figura 2b.

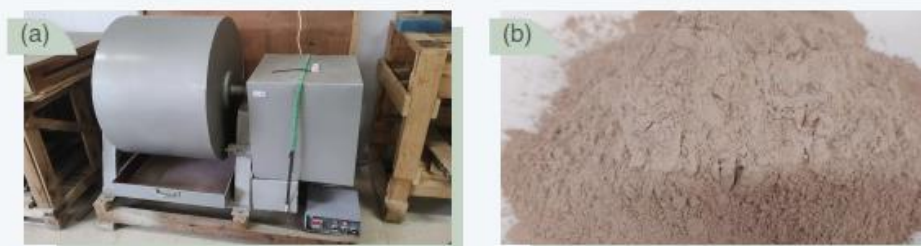


Figura 2 - (a) Máquina de desgaste de Los Angeles e (b) pó de vidro após processo de peneiramento

Em seguida foi realizado o processo de homogeneização das matérias-primas secas (Figura 3a) através de processo manual e inserida água, conforme fator água/cimento definido (Figura 3b).

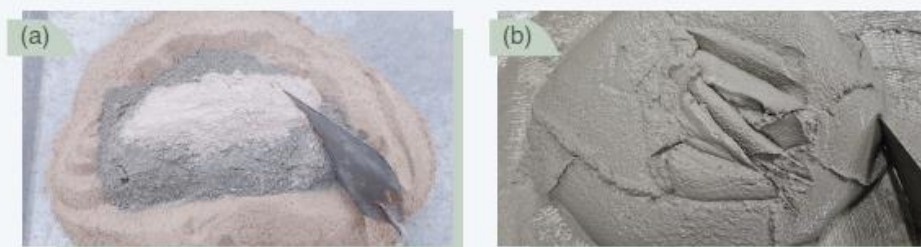


Figura 3 - (a) Homogeneização das matérias-primas secas e (b) úmidas

A moldagem dos corpos de prova prismáticos ocorreu por meio do emprego de moldes metálicos (Figura 4a) e dos ladrilhos hidráulicos através de moldes plásticos do tipo alerta (Figura 4b), ambos os corpos de prova foram submetidos a golpes na mesa de consistência para eliminar bolhas de ar presentes na mistura.

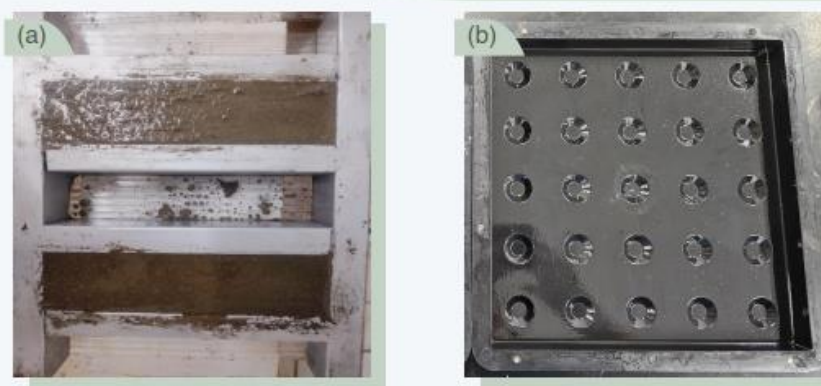


Figura 4 - (a) moldes prismáticos e (b) moldes plásticos do tipos alerta para produção de ladrilho hidráulico

Após 24h os corpos de prova prismáticos (Figura 5a) e os ladrilhos hidráulicos (Figura 5b) foram desmoldados e encaminhados para cura úmida até o momento de realização dos ensaios mecânicos.

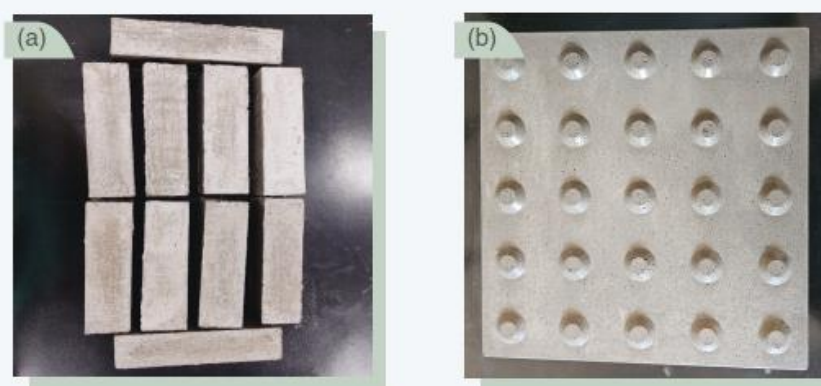


Figura 5 - (a) corpos de prova prismáticos e (b) ladrilho hidráulico após desmoldagem

Resultados

Os corpos de prova prismáticos foram submetidos ao ensaio de **resistência à compressão**, no qual foram observados acréscimos de **16,74%** e **2,24%** em relação à formulação de referência. No entanto, para a formulação com maior teor de subproduto, verificou-se redução de **9,35%**, possivelmente atribuída ao aumento da quantidade de partículas de vidro que não participaram da reação de hidratação com o cimento (Shoaei *et al.*, 2020).

A incorporação de pó de vidro não proporcionou alterações significativas de **absorção de água**, embora os valores médios tenham apresentado pequeno acréscimo de **7,03%**, **8,31%**, **8,63%**, para os traços experimentais em relação ao traço de referência.

O ensaio de resistência à tração na flexão realizado nos corpos de prova prismáticos acarretaram em redução da resistência em relação a formulação referência de **1,32%**, **27,22%** e **21,70%** para os traços experimentais utilizados.

Os ensaios mecânicos citados anteriormente realizados nos corpos de prova prismáticos, apontaram viabilidade técnica para produção do ladrilho hidráulico a partir da incorporação do subproduto.

Nesse sentido, os ladrilhos hidráulicos produzidos apresentaram resultados de resistência à tração na flexão **superiores a 3,5MPa** atendendo aos requisitos mínimos solicitados pela NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

Além disso, a avaliação dimensional dos ladrilhos hidráulicos em relação aos requisitos de largura, comprimento e espessura demonstrou conformidade com a norma vigente.

As características dos relevos presentes no piso tátil de alerta também foram analisadas, indicando sua viabilidade. No entanto, o diâmetro da base do relevo e a altura não atenderam à especificação mínima.

Destaca-se que os parâmetros de avaliação dimensional podem ser ajustados pela seleção novos moldes plásticos, desde que o fabricante observe os limites estabelecidos tanto pela norma vigente.

As características dos relevos presentes no piso tátil de alerta também foram analisadas, indicando sua viabilidade. No entanto, o diâmetro da base do relevo e a altura não atenderam à especificação mínima. Ressalta-se que esses parâmetros podem ser ajustados pela seleção novos moldes plásticos, desde que o fabricante observe os limites estabelecidos pela norma regulamentadora.

PANORAMA GERAL DOS RESULTADOS TECNOLÓGICOS

Em termos comparativos, a incorporação do pó de vidro acarretou aumento nos índices de resistência à compressão em relação ao traço de referência.

Resistência à compressão



+16,74%
Em relação ao
traço de referência



+2,24%
Em relação ao
traço de referência

Absorção de água por imersão

Não houve diferença significativa entre os diferentes teores de subproduto em relação ao traço de referência.

Resistência à tração na flexão para os ladrilhos hidráulicos



Resultados superiores a 3,5 MPa evidenciando viabilidade técnica. ✓

Considerações Finais

Diante das informações apresentadas neste catálogo, fica evidente que o pó de vidro proveniente de garrafas pós-consumo possui propriedades técnicas favoráveis para sua aplicação como substituto parcial do cimento Portland na fabricação de ladrilhos hidráulicos. Sua incorporação não apenas aprimora as características mecânicas e de durabilidade do material, mas também contribui para a redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado de embalagens de vidro e à elevada emissão de CO₂ do cimento Portland durante seu ciclo produtivo.

Em termos comparativos, a incorporação do pó de vidro resultou em um aumento nos índices de resistência à compressão em relação ao traço de referência. Não houve diferença significativa entre os diferentes teores de subproduto quando comparados ao traço de referência, com valores superiores a 3,5 MPa, evidenciando a viabilidade técnica do material.

Além disso, a avaliação dimensional dos ladrilhos hidráulicos quanto aos requisitos de largura, comprimento e espessura demonstrou conformidade com a norma vigente, reforçando sua adequação para aplicação na construção civil.

Esses resultados comprovam que a tecnologia desenvolvida pode ser aplicada de forma eficiente e segura, garantindo um produto sustentável, tecnicamente viável e alinhado às necessidades do mercado.

Portanto, essa tecnologia se apresenta como uma solução viável e sustentável para a construção civil, promovendo a economia circular e incentivando a adoção de práticas mais ecológicas no setor.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9050 - Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos. Rio de Janeiro, 2020.

Shoaei, P. *et al.* *Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: A comprehensive comparative study.* *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 118991, ago. 2020.

