

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**AMANDA PEREIRA CORREIA**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE *PAVERS* COM SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL DO AGLOMERANTE POR RESÍDUOS VÍTREOS**

**TOLEDO**

**2022**

**AMANDA PEREIRA CORREIA**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE *PAVERS* COM SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL DO AGLOMERANTE POR RESÍDUOS VÍTREOS**

**Physical and mechanical characterization of *pavers* with partial replacement of  
binding by vitreous waste**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Schneider.

**TOLEDO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**AMANDA PEREIRA CORREIA**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE *PAVERS* COM SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL DO AGLOMERANTE POR RESÍDUOS VÍTREOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel do Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 25/novembro/2022

---

Ricardo Schneider (Orientador)  
Doutor em Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Gustavo Savaris  
Doutor em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Fabiano Bisinella Scheufele  
Doutor em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**TOLEDO**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Palavras não são suficientes para agradecer a todos que fizeram parte dessa jornada, que não seria possível sem a presença de pessoas tão especiais que vou levar para sempre em meu coração.

Gostaria de inicialmente de agradecer à minha mãe, Marilda, meu exemplo de pessoa que nunca mediu esforços para que eu alcançasse meus objetivos, serei eternamente grata por todo suporte.

Aos meus irmãos, Luís e Bianca, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando, obrigada pelas palavras nas horas mais difíceis.

Ao meu parceiro de vida que eu tanto admiro, Luiz Felipe, que esteve presente em todas as etapas desse processo, obrigada pelo carinho, apoio, paciência e confiança.

Aos meus amigos que me acompanharam nessa trajetória, especialmente Eduarda e Rafaela, que contribuíram muito para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> Dr. Ricardo Schneider, por todos os ensinamentos passados, pela dedicação e por acreditar no meu potencial. Também à minha amiga, Eng<sup>a</sup> Isabelle Costa, por me auxiliar sempre que precisei, toda a minha admiração por esses dois profissionais.

Por fim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Devido à grande demanda diária dos aterros sanitários, tornam-se necessárias a reutilização e a reciclagem sempre que possível. O vidro, que ainda não possui uma reciclagem definida, é um material com grande disponibilidade nesses aterros, sendo relevante a realização de estudos que viabilizem sua aplicação em diversas áreas, como na construção civil. No contexto mundial, a quantidade de vidro descartado é cerca de 105 milhões de toneladas por ano. No Brasil, estima-se que mais de um milhão de toneladas de resíduos vítreos sejam depositadas em aterros e lixões. Na cidade de Toledo, Paraná, são produzidas mensalmente em torno de 30 toneladas de resíduos vítreos. Isso posto, o trabalho em questão tem o intuito de contribuir para solucionar um problema ambiental ocasionado por essa grande quantidade de vidro descartada, além de disponibilizar uma aplicação acessível para os resíduos vítreos produzidos por empresas de outras cidades, conforme exigido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Para isso, foram calculados dois traços (rico e pobre) para execução de *pavers* e comparados ao traço de uma empresa de artefatos cimentícios sediada em Toledo-PR. O traço pobre que obteve resultados mais satisfatórios foi escolhido para realização de ensaios de resistência à compressão e absorção de água com diferentes porcentagens (0%, 10%, 20%, 25%, 30% e 35%) de substituição parcial do aglomerante hidráulico pelo pó de vidro. No ensaio de resistência à compressão somente os traços 0% e 10% atingiram 35 MPa, requisito mínimo exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013). No ensaio de absorção de água, os traços 25% e 30% não atenderam limite máximo de 6%. Na análise dos constituintes do concreto verificou-se a evolução da resistência das peças conforme o processo das reações de hidratação dos silicatos dicálcico e tricálcico ( $C_2S$  e  $C_3S$ ). Ao executar a inspeção visual foi verificada grande semelhança entre as peças, não houveram poros aparentes e as superfícies ficaram marmorizadas. A análise financeira foi realizada relacionando os traços 0% e 10% e foi constatada uma economia significativa na produção (R\$ 4.748,28/ano). Assim, além do fator financeiro, a produção é sustentavelmente viável por utilizar resíduos vítreos e colaborar para a solução de um problema ambiental.

Palavras-chave: pavimentos; sustentabilidade; resíduos de vidro; absorção.

## ABSTRACT

Due to the great daily demand of landfills, reuse and recycling are necessary whenever possible. Glass, which still does not have a defined recycling, is a material with great availability in these landfills, and it is important to carry out studies that enable its application in several areas, such as civil construction. In the global context, the amount of discarded glass is about 105 million tons per year. In Brazil, it is estimated that more than one million tons of glassy waste are deposited in landfills and dumps. In the city of Toledo, Paraná, around 30 tons of glassy waste are produced monthly. For this, two traits (rich and poor) were calculated for the execution of pavers and compared to the trait of a cement artifacts company based in Toledo-PR. The poor mix that obtained the most satisfactory results was chosen to carry out compressive strength and water absorption tests with different percentages (0%, 10%, 20%, 25%, 30% and 35%) of partial replacement of the hydraulic binder by glass powder. In the compressive strength test, only the 0% and 10% traces reached 35 MPa, the minimum requirement required by NBR 9781 (ABNT, 2013). In the water absorption test, the 25% and 30% traits did not meet the maximum limit of 6%. In the analysis of the constituents of the concrete, the evolution of the resistance of the pieces was verified according to the process of the hydration reactions of the dicalcium and tricalcium silicates ( $C_2S$  and  $C_3S$ ). When carrying out the visual inspection, it was verified great similarity between the pieces, there were no apparent pores and the surfaces were marbled. The financial analysis was carried out relating the traits 0% and 10% and a significant economy in production was verified (R\$ 4,748.28/year). Thus, in addition to the financial factor, production is sustainably viable because it uses vitreous waste and collaborates to solve an environmental problem.

Keywords: floors; sustainability; glass waste; absorption.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação dos <i>pavers</i> .....	16
Figura 2: Fluxograma de fabricação de <i>pavers</i> prensados .....	17
Figura 3: Estrutura típica dos pavimentos intertravados de concreto.....	19
Figura 4: Etapas de execução do pavimento intertravado de concreto e vistas .....	19
Figura 5: Composição do vidro comum.....	21
Figura 6: Ciclo do vidro .....	22
Figura 7: Pó de vidro.....	27
Figura 8: Formas sobre mesa vibratória .....	29
Figura 9: Superfícies das peças retificadas.....	30
Figura 10: Ensaio de resistência à compressão.....	31
Figura 11: Fluxograma da metodologia aplicada neste estudo .....	33
Figura 12: Material retido na peneira 2,38 mm.....	35
Figura 13: Difratoograma do pó do vidro e areia.....	36
Figura 14: Difratoograma de raios-x das peças sem vidro com 7 dias .....	39
Figura 15: Difratoograma de raios-x das peças sem vidro com 28 dias .....	39
Figura 16: Amostras das peças rompidas aos 14 dias .....	41
Figura 17: Difratoograma de raios-x das peças com vidro com 7 dias .....	42
Figura 18: Difratoograma de raios-x das peças com vidro com 14 dias .....	42
Figura 19: Peças para inspeção visual.....	43
Gráfico 1: Resultados de resistência à compressão por López, de Azevedo e Neto (2005).....	23
Gráfico 2: Resultados da análise de resistência à compressão por Wicznovski (2019).....	24
Gráfico 3: Resultados da análise de absorção de água por Wicznovski (2019) .....	24
Gráfico 4: Resultados de absorção de água por Silva (2020) .....	24
Gráfico 5: Resultados alcançados de resistência à compressão por Silva (2020) .....	25
Gráfico 6: Análise Geral da Amostragem por Costa e Schneider (2021) .....	25
Gráfico 7: Resultados obtidos no ensaio de granulometria do agregado graúdo .....	34
Gráfico 8: Resultados obtidos no ensaio de granulometria do agregado miúdo .....	35
Gráfico 9: Granulometria do vidro .....	37
Gráfico 10: Resultados do ensaio de resistência à compressão nos traços iniciais .....	37
Gráfico 11: Resultados do ensaio de absorção de água nos traços iniciais .....	38
Gráfico 12: Resultados do ensaio de resistência à compressão nos traços com vidro .....	40
Gráfico 13: Resultados do ensaio de absorção de água .....	41
Gráfico 14: Correlação resistência x custo.....	45
Quadro 1: Descrição dos requisitos exigidos pela NBR 9781.....	20

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica por López, de Azevedo e Neto (2005) .....	23
Tabela 2: Traços iniciais .....	29
Tabela 3: Resultados obtidos para os agregados .....	36
Tabela 4: Traços produzidos com pó de vidro .....	40
Tabela 5: Custo dos materiais .....	43
Tabela 6: Custo da produção .....	44
Tabela 7: Valores considerados.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
NBR	Normas Brasileiras
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Pavimento Intertravado de Concreto</b> .....	<b>15</b>
3.1.1	Definição e composição .....	15
3.1.2	Processo de fabricação .....	16
3.1.3	Execução dos pavimentos intertravados de concreto .....	18
<b>3.2</b>	<b>Vidro</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Uso de resíduos vítreos na construção civil</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Sustentabilidade na construção civil</b> .....	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Material</b> .....	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>27</b>
4.2.1	Caracterização dos materiais .....	27
4.2.2	Cálculo do traço.....	28
4.2.3	Produção dos <i>pavers</i> .....	29
4.2.4	Substituição parcial do aglomerante hidráulico por resíduos vítreos .....	29
4.2.5	Análise dos corpos de prova .....	30
<u>4.2.5.1</u>	<u>Ensaio de resistência à compressão</u> .....	<u>30</u>
<u>4.2.5.2</u>	<u>Inspeção visual</u> .....	<u>31</u>
<u>4.2.5.3</u>	<u>Ensaio de absorção de água</u> .....	<u>31</u>
<u>4.2.5.4</u>	<u>Análise da evolução dos constituintes do concreto</u> .....	<u>32</u>
4.2.6	Resumo da metodologia.....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados da caracterização dos materiais</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Traços iniciais</b> .....	<b>37</b>
5.2.1	Resistência à compressão .....	37
5.2.2	Absorção de água .....	38
5.2.3	Análise da evolução dos constituintes dos <i>pavers</i> sem vidro .....	38
<b>5.3</b>	<b>Traços com resíduos vítreos</b> .....	<b>39</b>

5.3.1	Resistência à compressão .....	40
5.3.2	Absorção de água .....	41
5.3.3	Análise da evolução dos constituintes dos <i>pavers</i> com vidro .....	42
5.3.4	Inspeção visual.....	43
5.3.5	Análise financeira .....	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca pela sustentabilidade passou a ser crescente nos últimos anos, tendo como objetivo a preservação da natureza, a reciclagem dos produtos sempre que possível e a utilização de materiais e processos que não causem danos ao meio ambiente, ou que sejam mínimos.

Os aterros sanitários possuem uma alta demanda diária, sendo assim, soluções que viabilizem a reutilização do que é descartado são sempre significativas. O vidro, que ainda não possui uma reciclagem definida, é um material com grande disponibilidade em aterros por não ser muito valorizado, logo, torna-se acessível economicamente estudar a viabilidade da aplicação de resíduos vítreos em várias áreas, como na construção civil. Vale ressaltar que no contexto mundial, o vidro descartado é aproximadamente 7,5% do peso total do lixo doméstico produzido, o que resulta em cerca de 105 milhões de toneladas por ano. No Brasil, calcula-se que são consumidos cerca de 5,57 kg de embalagens de vidro per capita anualmente, que representam mais de um milhão de toneladas de vidro depositadas em aterros e lixões (ASSIS, 2006).

Diferentes granulometrias do vidro moído já foram empregadas em estudos na engenharia civil com o intuito de desenvolver novos produtos, aprimorá-los ou reduzir custos. Geralmente esse processo é feito utilizando os resíduos vítreos em substituição ao agregado miúdo, entretanto, como a areia é um material com valor de comercialização relativamente baixo, substituí-la parcialmente por vidro não é a alternativa mais viável economicamente em muitas localidades. Tendo em vista que o pó de vidro pode entrar em substituição ao aglomerante hidráulico, material de maior valor agregado na composição do concreto, e fornecer um melhor custo-benefício, destaca-se que, ao realizar esse processo, grande porcentagem do pó de vidro terá um destino definido.

Uma possibilidade é a aplicação de resíduos vítreos em artefatos de concreto, que são peças em ascensão no mercado de materiais de construção. Usualmente conhecidos como *pavers*, os pavimentos intertravados de concreto são um exemplo desses artefatos, e segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9781, podem ser destinados ao tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha ou veículos especiais e solicitações capazes de gerar efeitos de abrasão, em conformidade com a resistência à compressão atingida pelo lote aos 28 dias.

Estudos demonstraram resultados satisfatórios quanto à utilização do pó de vidro para substituição parcial do aglomerante hidráulico (cimento) em concreto. Posto isso, o presente trabalho visa analisar a viabilidade de substituir parcialmente o cimento por resíduos vítreos em pó em peças de pavimento intertravado de concreto. O trabalho se diferencia pela aplicação em escala na linha de produção da empresa de artefatos.

### **1.1 Justificativa**

A reciclagem e reutilização de materiais descartados tornou-se fundamental na área da construção civil por ser um dos setores que mais utiliza recursos naturais e que produz alta quantidade de resíduos. Em consequência disso, estudos que analisem a viabilidade da implementação destes materiais e a redução do uso de matérias primas estão em constante crescimento.

O governo federal assinou o decreto referente ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos, previsto pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criada pela Lei 12.305/2010. O Plano determina que empresas fabricantes, importadoras, distribuidoras e comerciantes de vários tipos de produtos têm que destinar seus resíduos - resultantes das suas mercadorias vendidas (AGÊNCIA BRASIL, 2022).

Progressivamente busca-se por alternativas viáveis para a destinação dos resíduos sólidos. O vidro, por ser inerte e conseqüentemente uma decomposição extremamente lenta, é um dos principais materiais que necessita ser reciclado e reutilizado. Costa (2020) afirma que em Toledo, no Paraná, são produzidas mensalmente cerca de 30 toneladas de resíduos vítreos, e parte destes poderia ser aplicada em setores como a construção civil.

O presente estudo visa colaborar para solucionar em partes o problema ambiental gerado pela grande quantidade de vidro descartada diariamente em Toledo, além de disponibilizar uma aplicação viável para os resíduos vítreos produzidos por empresas de outras cidades, conforme exigido pela PNRS.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar a resistência à compressão em pavimentos intertravados de concreto com diferentes porcentagens de resíduos vítreos em substituição parcial ao aglomerante hidráulico.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Reduzir a porosidade para alcançar aspecto visual positivo em relação ao *paver* de referência;
- Observar o desempenho de resistência à compressão das peças aos 7 e 14 dias de idade;
- Correlacionar os valores de resistência mecânica e a absorção de água das peças;
- Estabelecer a relação entre o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) com a resistência das peças;
- Analisar financeiramente o impacto da substituição do cimento por vidro.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de possibilitar melhor compreensão sobre o tema, no presente tópico expor-se-á os conceitos relevantes abordados no estudo em questão, como as principais características do pavimento intertravado de concreto e as propriedades dos materiais vítreos.

#### 3.1 Pavimento Intertravado de Concreto

##### 3.1.1 Definição e composição

Popularmente conhecidos como *pavers*, os pavimentos intertravados de concreto são normatizados pela NBR 9781 (ABNT, 2013), e podem ser descritos como blocos maciços de concreto pré-fabricados, com a função de revestimento ao serem justapostos sobre o assentamento e o intertravamento ocorre por meio da contenção. Sua estrutura é composta por cimento Portland, agregados e água, havendo a possibilidade de acréscimo de aditivos e pigmentos (ABNT, 2013).

Conforme a NBR 15953 (ABNT, 2011), o sistema de intertravamento citado, pode ser descrito como a capacidade das peças de resistir a deslocamentos individuais relacionados às peças anexas. O intertravamento pode ser:

- Vertical: Capacidade das peças de resistir a esforços de cisalhamento entre elas quando aplicada uma carga central;
- Horizontal: Capacidade das peças de resistir a esforços gerados por solicitações de aceleração ou frenagem;
- Rotacional: Capacidade das peças de resistir a forças perpendiculares excêntricas aos seus eixos;
- Contra o giro: Capacidade das peças de resistir a solicitações pontuais no eixo delas.

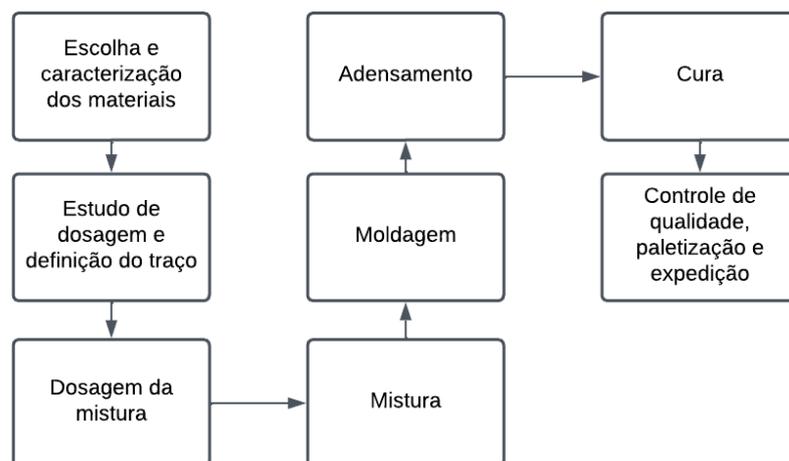
A vida útil desses blocos pode ser de até 25 anos, com a condição de que sejam feitos projetos específicos adequados para a sub-base, boa qualidade nos materiais e no processo de execução do assentamento (FIORITI, 2007). Leal (2018) aponta que para que o pavimento alcance um bom desempenho e tenha maior durabilidade, duas exigências devem ser atendidas: presença de contenção lateral, para impedir o deslocamento lateral das peças, e juntas preenchidas com areia, pois esta possui a atribuição de transferir os esforços entre as peças.

Simieli *et. al.* (2007) afirmam que, com o passar dos anos, a utilização dos *pavers* está em constante ascensão em diversas cidades, principalmente em virtude da substituição de antigos calçamentos. Esse fato provém das diversas vantagens que essas peças podem proporcionar, como facilidade e eficiência na execução, resistência ao tráfego de pessoas e veículos, durabilidade, conforto térmico, estética diferenciada, simples manutenção, microdrenagem (não impermeabiliza o solo), entre outros (BRAGA; BRAMUSSE, 2015).

### 3.1.2 Processo de fabricação

O processo de produção dessas peças pode ser descrito a partir das etapas presentes na Figura 1:

**Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação dos *pavers***

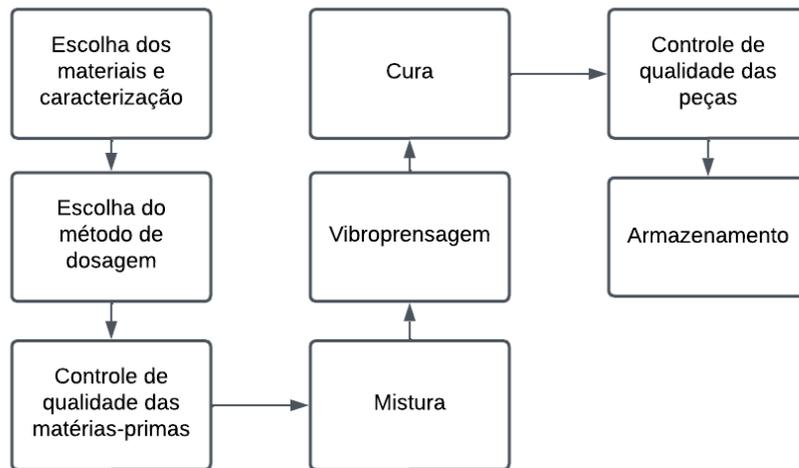


**Fonte: Adaptado de SILVA (2019)**

Segundo Vieira (2021) e Silva (2019), existem três formas de fabricação para os *pavers*, conforme descrito abaixo:

- Vibroprensada (*paver* prensado): produção mecânica, as peças são feitas com concreto seco e a utilização de vibroprensas mecânicas ou hidráulicas para moldagem, adensamento e retirada das formas antecipadamente - o processo pode ser visualizado na Figura 2:

**Figura 2: Fluxograma de fabricação de *pavers* prensados**



**Fonte: Adaptado de VIEIRA (2021)**

- Peças dormidas: produção manual, os *pavers* são confeccionados com concreto convencional sem plasticidade e adensado com mesas vibratórias. As peças ficam nas formas de um dia para o outro, e a desmoldagem ocorre após as 24 horas. Seu acabamento é liso, possui alta quantidade de agregado graúdo, e nesse procedimento há um menor consumo de cimento pelo baixo teor de argamassa (cerca de 30%).
- Peças viradas: produção manual, as peças são fabricadas com concreto convencional (com trabalhabilidade plástica), empregando formas individuais ou conjuntas e adensadas com mesas vibratórias. Quando as formas estiverem preenchidas, são viradas com a abertura para baixo sobre uma superfície plana, lisa e untada. Este *paver* é fabricado em umidade ótima e demanda um baixo consumo de cimento também. Seu custo é inferior aos outros, entretanto, seu acabamento não é excelente em razão da desforma e a produtividade é menor.

No presente trabalho a forma de execução pré-determinada foi o *paver* dormido, por ser o processo utilizado na empresa de artefatos cimentícios fornecedora dos materiais e equipamentos necessários. Esse processo se diferencia do prensado pela ausência de vibroprensagem, além da presença de adensamento na mesa vibratória e desforma após 24 horas.

### 3.1.3 Execução dos pavimentos intertravados de concreto

De acordo com Fioriti (2007), para a execução dos *pavers*, devem ser atendidas às especificações para cada etapa, conforme segue:

- Subleito: precisa estar regularizado e compactado, na cota de projeto;
- Sub-base: pode ser granular, solo-brita, ou tratado com aditivos, sua função é o tráfego e fornecer condições de suporte de subleito (CARVALHO, 1998 *apud* FIORITI, 2007);
- Base: componente estrutural, onde são aplicadas as tensões distribuídas pela camada de revestimento; protege o subleito de cargas externas, assim, impedindo deformações permanentes e possíveis deteriorações (CRUZ, 2003 *apud* FIORITI, 2007);
- Camada de assentamento: sua atribuição é funcionar como base para o assentamento das peças, além de fornecer uma superfície regular de forma que comporte as possíveis alterações superficiais (CRUZ, 2003 *apud* FIORITI, 2007);
- Camada de rolamento: sua execução contém 3 etapas, sendo elas: assentamento de *pavers* (manual ou mecânico), acabamento rente às bordas e meios fios ou quaisquer outros trechos necessários, e vibração sobre as peças já instaladas. Através de uma execução eficiente, pode-se impedir a movimentação dos blocos e instabilidades na camada inferior (FIORITI, 2007);
- Contenção lateral: quando é feita de forma satisfatória, garante-se o travamento dos *pavers* lateral, interna e externamente. Para o confinamento externo deve-se antecipadamente instalar os meios fios, sarjetas ou travões, com o intuito de fornecer a resistência aos esforços horizontais (MADRID, 1999 *apud* FIORITI, 2007).

Vieira (2014) afirma que os *pavers* podem ser classificados como ecologicamente corretos, tendo em vista sua permeabilidade e sua função de induzir a percolação da água até a sarjeta, assim, proporcionando menores riscos de enchentes e restabelecendo reservas subterrâneas de água.

A Figura 3 ilustra como deve ser a execução dos pavimentos intertravados de concreto:

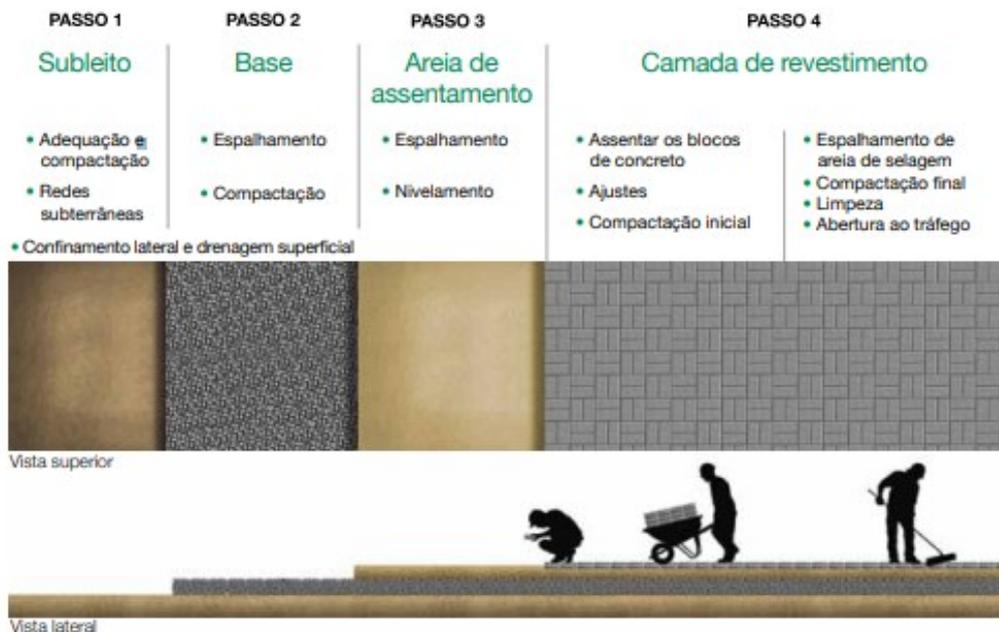
**Figura 3: Estrutura típica dos pavimentos intertravados de concreto**



Fonte: ABCP (2010)

Figura 4 pode ser visualizado o resumo das etapas da execução do pavimento e suas vistas (superior e lateral):

**Figura 4: Etapas de execução do pavimento intertravado de concreto e vistas**



Fonte: ABCP (2010)

Os *pavers* devem atender aos requisitos específicos e os aspectos gerais determinados pela NBR 9781 (ABNT, 2013), sendo eles: o formato, as dimensões e tolerâncias, espaçador de juntas, chanfro, arestas, ângulo de inclinação, resistência característica à compressão, absorção de água, resistência à abrasão e inspeção visual (ABNT, 2013). O Quadro 1 apresenta a descrição dos principais requisitos exigidos pela norma:

**Quadro 1: Descrição dos requisitos exigidos pela NBR 9781**

<b>Requisitos exigidos</b>	<b>Descrição</b>
1. Formato	Podem ser de vários formatos.
2. Espessura	Há uma padronização quanto à espessura em 60, 80 e 100 mm.
3. Dimensões	São admitidas variações dimensionais inferiores a 3 mm.
4. Resistência à compressão	A resistência à compressão mínima ( $f_{ck}$ ) aos 28 dias estabelecida é de 35 MPa para o tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha. Para o tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos abrasivos intensos é de 50 MPa.
5. Absorção de água	As peças devem apresentar no máximo 6% de absorção de água, não sendo aceito nenhum valor individual acima de 7%.
6. Resistência à abrasão (facultativa)	A cavidade máxima é de 23 mm para o tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha. Para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados é de 20 mm.
7. Inspeção visual	Identificar defeitos que possam prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

**Fonte: ABNT (2013)**

A dosagem deste bloco de concreto possui alta influência no alcance deste  $f_{ck}$ , e a metodologia utilizada para essa dosagem varia conforme o procedimento empregado (FIORITI, 2007). No caso do concreto, a resistência é fornecida por meio da hidratação dos silicatos dicálcico e tricálcico ( $C_2S$  e  $C_3S$ ), resultando no silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Nota-se a importância da definição do traço (proporção entre as quantidades dos materiais que constituem o concreto) ser aplicado para que o  $f_{ck}$  requerido seja atingido. À vista disso, vale ressaltar que o traço deve ser fixado após um estudo de dosagem (HELENE; THERZIAN, 1999), baseando-se na NBR 9781 (ABNT, 2013) e a partir da caracterização dos materiais a serem aplicados.

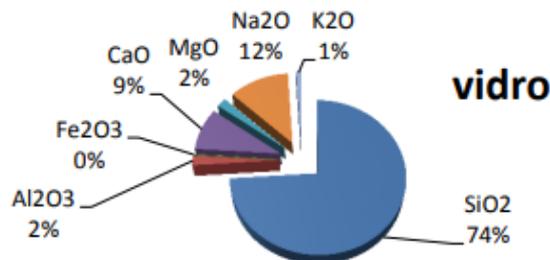
Diversos estudos já foram realizados objetivando a análise da incorporação de adições em pavimentos intertravados de concreto, como resíduos de construção (LEAL, 2018), resíduo de PVC (SANTOS; FERRARI, 2019), resíduos de pneus (FIORITI, 2007) e areias descartadas de fundição (TOLEDO, 2017). Neste contexto,

torna-se relevante também a análise da adição de resíduos vítreos em *pavers*, que é o foco do presente trabalho.

### 3.2 Vidro

O vidro é composto por uma mistura de areia, barrilha, calcário, alumina e aditivos (DIAS; CRUZ, 2009), que pode ser descrito como um material amorfo com temperatura de transição vítrea, produto da fusão e consecutiva solidificação de uma solução de materiais inorgânicos (WICZNOVSKI, 2019). Segundo Souza *et. al.* (2017), o vidro pode ser considerado um material 100% reciclável, e acerca de suas propriedades mecânicas podem ser citados: alta resistência à compressão, à tração, à flexão e desgaste. Mais de 70% de sua composição é de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), ocasionando boas propriedades pozolânicas e sendo um potencial componente para a base de cimento. Na Figura 5 está a composição básica detalhada do vidro comum:

**Figura 5: Composição do vidro comum**



Fonte: Adaptado de BARROS (2010)

O Brasil produz cerca de 800 mil toneladas de vidro por ano, e somente a quantia de 27,6% (220 mil toneladas) é reciclada. Sua reutilização não pode ser considerada totalmente viável, uma vez que o aterro é uma opção economicamente mais acessível (LÓPEZ; DE AZEVEDO; NETO, 2005). Ressalta-se a importância da reciclagem principalmente pelo grande período de tempo que o material leva para sua decomposição na natureza (LODI; GAMBIN; WEIT, 2014). Wicznovski (2019) afirma que a reutilização do vidro consome menor quantidade de energia, emite menos ruídos e partículas de  $\text{CO}_2$ , assim, sendo uma atividade sustentável. A Figura 6 apresenta o ciclo do vidro:

**Figura 6: Ciclo do vidro**

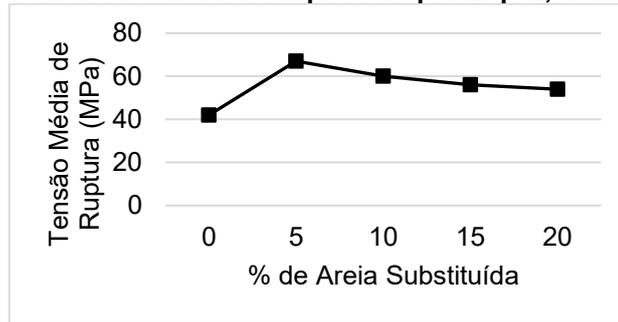
**Fonte: RECICLOTECA (2017)**

Na atualidade, os resíduos originados da reciclagem do vidro, ainda não dispõem de finalidade adequada, além de evidenciarem problemas econômicos, logísticos e operacionais para sua alocação (COSTA; SCHNEIDER, 2021). À vista disso, torná-los integrantes de elementos presentes na construção civil, faz-se pertinente por ser uma destinação viável e sustentável.

O pó de vidro que surge a partir de sua moagem em indústrias beneficiadoras de vidro é classificado como uma impureza. É considerado um resíduo industrial inerte, mas se for levado aos rios pode aumentar o pH e a turbidez da água (LUZ; RIBEIRO, 2008).

### **3.3 Uso de resíduos vítreos na construção civil**

A análise da incorporação de resíduos vítreos na construção civil já foi alvo de estudos. López, de Azevedo e Neto (2005) produziram concreto com vidro moído em substituição parcial ao agregado fino. Com 5% de substituição alcançaram um aumento de aproximadamente 60% na resistência à compressão, o maior em relação às outras substituições, mas todas as porcentagens utilizadas resultaram em aumentos notáveis quando comparadas ao corpo de prova de referência, assim como pode ser visto no Gráfico 1:

**Gráfico 1: Resultados de resistência à compressão por López, de Azevedo e Neto (2005)**

Fonte: Adaptado de LÓPEZ; DE AZEVEDO; NETO (2005)

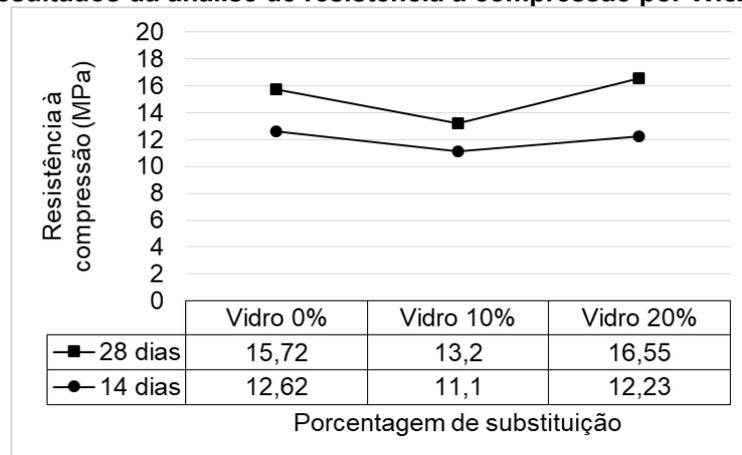
Acerca da absorção de água e do índice de vazios, as porcentagens foram decrescentes ao aumentar a quantidade de areia substituída por vidro, de acordo com a Tabela 1:

**Tabela 1: Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica por López, de Azevedo e Neto (2005)**

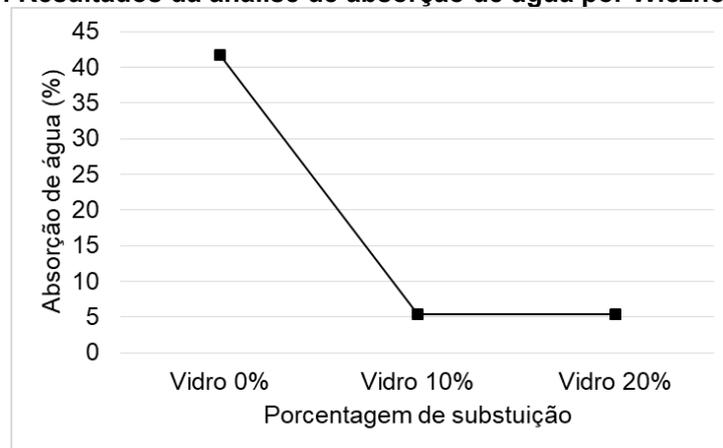
% de areia substituída	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )
0 (Referência)	11,35	23,10	2,03
5	11,32	22,90	2,15
10	8,86	19,25	2,37
15	8,80	18,04	2,47
20	7,69	17,10	2,56

Fonte: Adaptado de LÓPEZ; DE AZEVEDO; NETO (2005)

Wicznovski (2019) aplicou resíduos de vidro em blocos de concreto como alternativa à areia, com substituições de 10% e 20%, e posteriormente comparou com um bloco convencional. Em seus resultados foi atingida maior resistência à compressão no bloco com 20%, porém não foi alcançada a resistência prevista em norma como pode ser visualizado no Gráfico 2. Os dois blocos com pó de vidro atenderam à norma quanto à absorção de água - em média 5,3%, conforme segue no Gráfico 3.

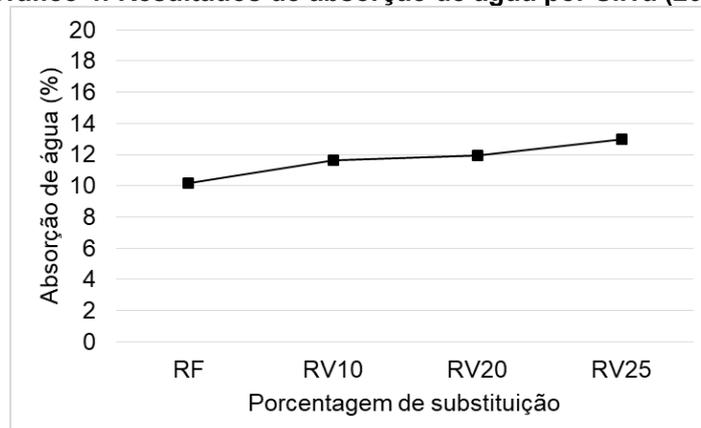
**Gráfico 2: Resultados da análise de resistência à compressão por Wicznovski (2019)**

Fonte: Adaptado de WICZNOVSKI (2019)

**Gráfico 3: Resultados da análise de absorção de água por Wicznovski (2019)**

Fonte: Adaptado de WICZNOVSKI (2019)

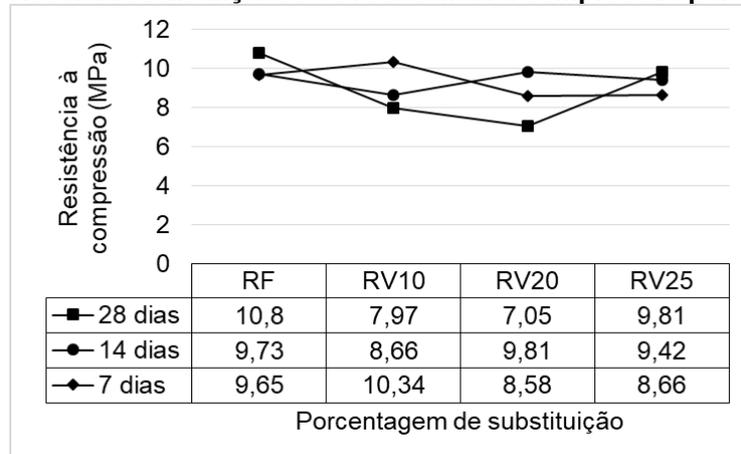
Silva (2020) estudou a viabilidade da incorporação de resíduos vítreos em argamassa, com substituições de 10%, 20% e 25% em relação ao agregado miúdo. Observou-se que todos atenderam quanto a absorção de água e índice de vazios de norma (Gráfico 4).

**Gráfico 4: Resultados de absorção de água por Silva (2020)**

Fonte: Adaptado de SILVA (2020)

Com relação à resistência à compressão os resultados foram satisfatórios, com valores superiores ao da argamassa de referência, com pode-se observar no Gráfico 5:

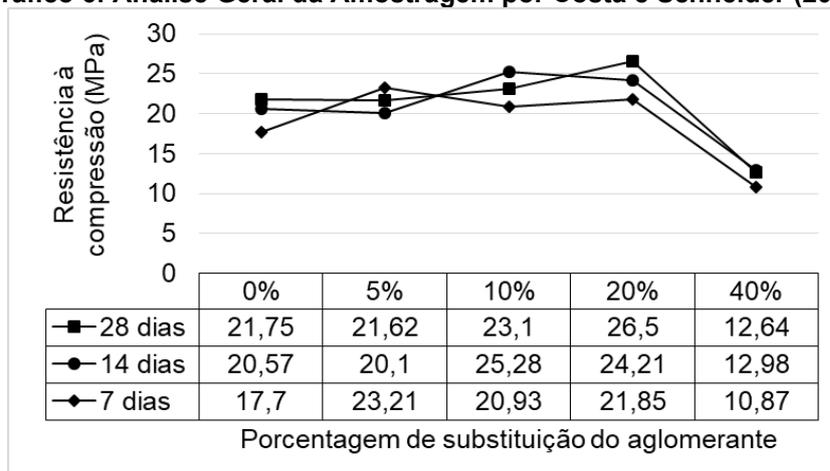
**Gráfico 5: Resultados alcançados de resistência à compressão por Silva (2020)**



Fonte: Adaptado de SILVA (2020)

Costa e Schneider (2021) realizaram ensaios em *pavers* com substituições de diferentes porcentagens de resíduos vítreos em relação ao cimento. As porcentagens a serem empregadas no presente trabalho foram definidas com base neste estudo, onde foi possível constatar um aumento significativo da resistência à compressão em 20% de substituição, e ao aplicar 40% houve uma vasta queda nos resultados, assim como pode-se analisar no Gráfico 6.

**Gráfico 6: Análise Geral da Amostragem por Costa e Schneider (2021)**



Fonte: Adaptado de COSTA; SCHNEIDER (2021)

### 3.4 Sustentabilidade na construção civil

A palavra sustentabilidade pode ser definida como grupo de ações, técnicas e manipulação correta dos recursos disponíveis, com o intuito de preservar o meio ambiente. Quando a reciclagem é feita, há a redução de custos e objetiva-se a economia de matéria-prima (BENATTI; AZAMBUJA, 2016).

A apreensão relacionada aos impactos ambientais e aos resíduos descartados é crescente, dado que um dos maiores obstáculos da população atual é balancear o consumo e a utilização de recursos naturais com a vasta geração e distribuição de resíduos sólidos. Um impacto expressivo gerado pela construção civil que deve ser considerado é a aplicação de recursos naturais, desde sua extração e fabricação de insumos, até a realização e operação das edificações (SANTOS; FERRARI, 2019).

Fioriti (2007) ressalta que uma meta fundamental é a redução da emissão de resíduos, porém, existem diversos procedimentos da produção industrial que não podem ser inteiramente eliminados. Na construção civil destaca-se a possibilidade de reutilização ou reciclagem, em virtude do alto consumo de recursos naturais proveniente desse setor.

Oliveira (2007) afirma que a motivação para os estudos que objetivam a incorporação de materiais alternativos na construção civil é resultado de inúmeras dificuldades para o aproveitamento de elementos naturais, como restrições ambientais, inviabilidade econômica e a grande disponibilidade de materiais descartados que podem ser reciclados e reutilizados.

O emprego de resíduos vítreos em estudos na construção civil é crescente, como pôde ser observado no tópico anterior, e espera-se que esse progresso seja contínuo em virtude da grande dificuldade existente para sua alocação e reutilização.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos aplicados nos ensaios realizados para o presente estudo.

### 4.1 Material

Para a produção dos blocos intertravados de concreto foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland CP V-ARI (Cimento Itambé), areia, pedrisco, água e resíduos vítreos em pó (Figura 7).

A água, os agregados, o aglomerante hidráulico e o pó de vidro foram disponibilizados por uma empresa sediada na cidade de Toledo - PR que produz e comercializa artefatos cimentícios, incluindo pavimentos intertravados de concreto.

Figura 7: Pó de vidro



Fonte: Autoria própria (2022)

### 4.2 Métodos

#### 4.2.1 Caracterização dos materiais

Para a avaliação dos pavimentos intertravados de concreto com adição parcial de resíduos vítreos, inicialmente, foi realizada uma caracterização dos materiais visando obter a maior quantidade de informações possível para a definição do traço. Para tanto, foram seguidos os procedimentos descritos nas normas a seguir:

- a. ABNT NBR 16915: Agregados - Amostragem;
- b. ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica;

- c. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- d. NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água;
- e. NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água;
- f. NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.

#### 4.2.2 Cálculo do traço

Após a caracterização dos materiais, foram definidos três traços diferentes para os *pavers*, objetivando-se selecionar o mais adequado, que atenda às exigências descritas na NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio, para adicionar os resíduos vítreos (ABNT, 2013).

O primeiro traço selecionado (referência) foi o que é atualmente aplicado na empresa fornecedora dos materiais, com a finalidade de compará-lo aos outros. O segundo traço foi estipulado conforme o Método de Dosagem de Concreto da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, considerando uma resistência à compressão requerida aos 28 dias de 46,55 MPa - definida pela condição C devido à condição de preparo e tendo em vista a resistência à compressão mínima requerida para os *pavers* de 35 MPa - e a resistência normal do cimento aos 28 dias de 50 MPa, o valor mínimo obtido em ensaios feitos com o cimento CP V-ARI pela empresa Itambé. O terceiro foi determinado baseando-se no segundo, com maior quantidade de agregados. Os traços (cimento : areia : pedrisco : a/c) escolhidos para a análise foram:

- a. Traço utilizado pela empresa (1 : 2,87 : 2,07 : 0,7);
- b. Traço ABCP - Rico (1 : 1,27 : 1,7 : 0,46);
- c. Traço ABCP - Pobre (1 : 1,91 : 2,55 : 0,46).

Baseando-se nas dimensões das peças (20 cm x 10 cm x 6 cm) e na produtividade da empresa (50 kg de cimento para 100 peças), foi calculada a devida quantidade dos materiais para realização dos ensaios de resistência à compressão (7 e 28 dias de idade) e absorção de água, conforme normatizado pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Na Tabela 2 estão as quantias utilizadas para a produção de 25 peças (foram consideradas peças extras para o caso de eventualidades).

Tabela 2: Traços iniciais

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Pedrisco (kg)	Água (kg)
Referência	12,50	35,88	25,84	8,52
Rico	12,50	23,84	31,88	5,75
Pobre	12,50	15,89	21,25	5,75

Fonte: A autoria própria (2022)

#### 4.2.3 Produção dos *pavers*

O processo de produção foi do tipo “*paver* dormido”, que é utilizado pela empresa de materiais cimentícios. Após adicionar e rodar os materiais na betoneira, a mistura foi despejada sobre as formas em uma mesa vibratória (Figura 8), onde foi vibrada por aproximadamente cinco minutos. Em seguida, as formas preenchidas foram armazenadas e a desforma ocorreu após 24 horas. Esse processo foi repetido para todos os traços iniciais e posteriormente para os traços com adição de resíduos vítreos.

Figura 8: Formas sobre mesa vibratória



Fonte: A autoria própria (2022)

#### 4.2.4 Substituição parcial do aglomerante hidráulico por resíduos vítreos

Foi escolhido um dos traços que satisfaz às especificações da NBR 9781 (resistência à compressão mínima de 35 MPa e absorção de água de no máximo 6%) e foi feita a análise com diferentes porcentagens de adição de pó de vidro, em substituição ao aglomerante hidráulico (cimento). Seguem as porcentagens que foram estudadas e comparadas ao traço sem vidro: 10%, 20%, 25%, 30% e 35%.

#### 4.2.5 Análise dos corpos de prova

Após a realização do procedimento citado no item 4.2.4, foram feitos os seguintes ensaios: resistência à compressão (aos 7 e 14 dias), inspeção visual e absorção de água - todos os ensaios normatizados pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Ao concluir os ensaios foi determinado qual o traço mais benéfico com relação às suas propriedades.

##### 4.2.5.1 Ensaio de resistência à compressão

O anexo A da NBR 9781 cita os equipamentos que devem ser utilizados e descreve como tem que ser feita a determinação da resistência à compressão. A máquina precisa atender os valores máximos admissíveis definidos pela ABNT NBR NM ISO 7500-1, e as placas auxiliares devem ser circulares, com diâmetro de  $(85 \pm 0,5)$  mm e espessura de 20 mm, feitas de aço. Para o ensaio (Figura 10), as peças representativas do lote amostrado devem estar nas condições abaixo:

- Saturadas em água  $(23 \pm 5)$  °C, por no mínimo 24 horas antes do ensaio;
- As superfícies de carregamento devem estar retificadas (Figura 9).

**Figura 9: Superfícies das peças retificadas**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

As peças devem ser colocadas sobre as placas auxiliares de ensaio, com sua face superior em contato com a placa auxiliar superior, para que o eixo vertical que passa pelo centro da peça coincida com o eixo vertical das placas. O carregamento deve ser feito ininterruptamente, com velocidade de 550 kPa/s, variando aproximadamente 200 kPa/s, o procedimento é finalizado quando a peça chega à ruptura.

**Figura 10: Ensaio de resistência à compressão**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

#### 4.2.5.2 Inspeção visual

Para a inspeção visual, segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), devem ser identificadas peças com defeitos que possivelmente podem prejudicar o assentamento, o desempenho ou a estética do pavimento. Logo, espera-se um aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos, sem a existência de rebarbas ou descamações. Podem ser consideradas pequenas variações de coloração.

#### 4.2.5.3 Ensaio de absorção de água

O anexo B da NBR 9781 apresenta os equipamentos necessários e descreve como deve ser feita a determinação da absorção de água. Os equipamentos são: estufa ventilada com temperatura de  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , termômetro com resolução de  $1^\circ\text{C}$ , tanque de água, balança com resolução de 0,1 g, escova com cerdas suaves, tela metálica com suporte e pano. Para iniciar o ensaio, deve-se remover todo o pó dos corpos de prova com a escova.

As peças devem ser submergidas em água à temperatura de  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , por 24 horas. Após esse período, cada uma deve ser pesada individualmente na condição saturada com superfície seca ( $m_2$ ), depois de serem drenadas sobre a tela metálica por 1 minuto e de removida a água superficial visível com um pano. O processo deve ser repetido a cada 2 horas, até que em duas marcações seguidas não haja diferença de massa superior a 0,5% em relação ao anterior. Em seguida, os corpos de prova saturados devem ser levados à estufa por 24 horas, e a massa de cada um deve ser

obtida ( $m_1$ ) para os cálculos. O valor da absorção de água destes é calculado a partir da Equação 1 abaixo:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

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

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

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

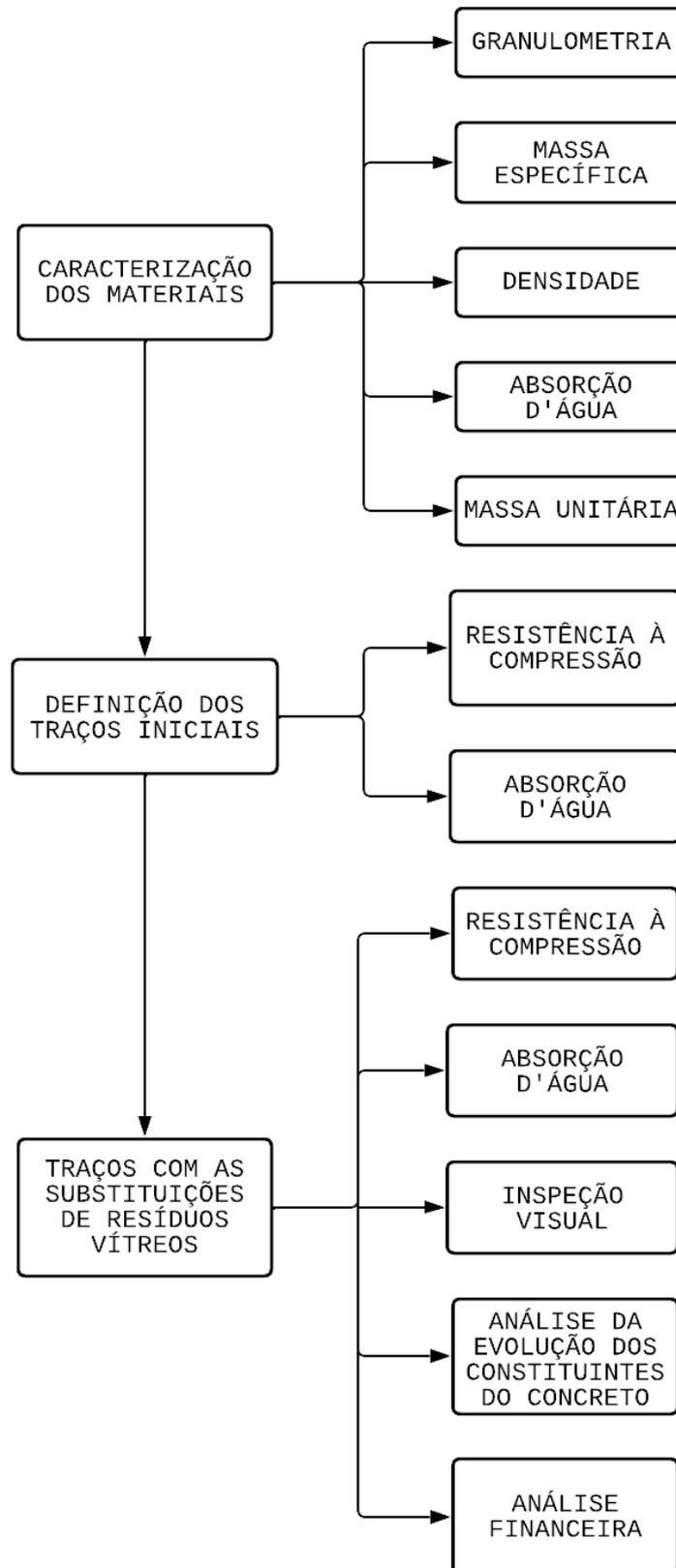
#### 4.2.5.4 Análise da evolução dos constituintes do concreto

A técnica de difração de raios-X em pó (PXRD) foi aplicada para acompanhar a evolução dos constituintes cristalinos presentes no concreto. Um difratômetro Rigaku modelo Smart LabSE 3 kW foi utilizado para determinar as fases cristalinas presentes no concreto sem vidro com 7 e 28 dias e com vidro aos 7 e 14 dias. Os corpos de prova foram furados com auxílio de uma furadeira e broca 8 para obtenção de uma porção homogênea da parte transversal de cada. Os dados obtidos foram lançados no *software* SciDAVis para obtenção dos difratogramas, e esses foram analisados baseando-se no trabalho de Siddique *et. al.* (2016).

#### 4.2.6 Resumo da metodologia

O fluxograma da Figura 11 apresenta os processos citados para a análise dos *pavers*.

Figura 11: Fluxograma da metodologia aplicada neste estudo



Fonte: Autoria própria (2022)

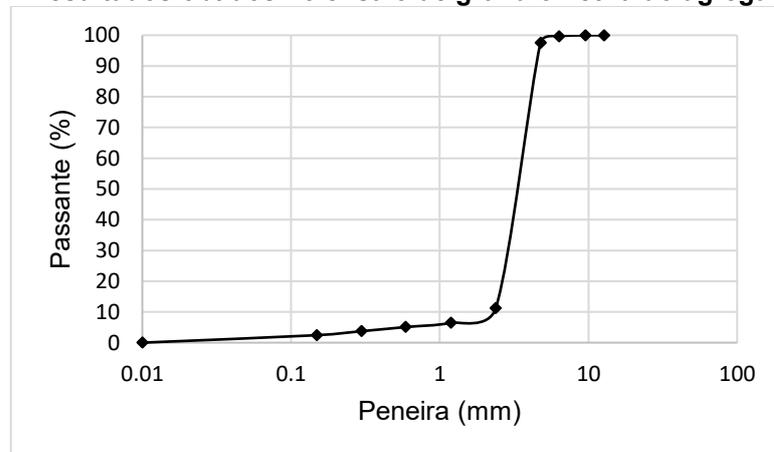
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos itens a seguir estão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados no estudo em questão.

### 5.1 Resultados da caracterização dos materiais

Para o cálculo da dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo foram aplicados os processos conforme a NBR NM 248, e os resultados obtidos podem ser visualizados no Gráfico 7:

**Gráfico 7: Resultados obtidos no ensaio de granulometria do agregado graúdo**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Com base na análise dos dados, foi constatado que o DMC do agregado é de 2,38 mm. Esse DMC não se enquadra na classificação dos agregados graúdos, porém como o material é consideravelmente maior que a areia utilizada na empresa em questão, e a mesma tem como objetivo um melhor acabamento das peças, foi categorizado como brita 0 ou pedrisco para os cálculos. A parcela do agregado que ficou retida na peneira 2,38 mm pode ser vista na Figura 12.

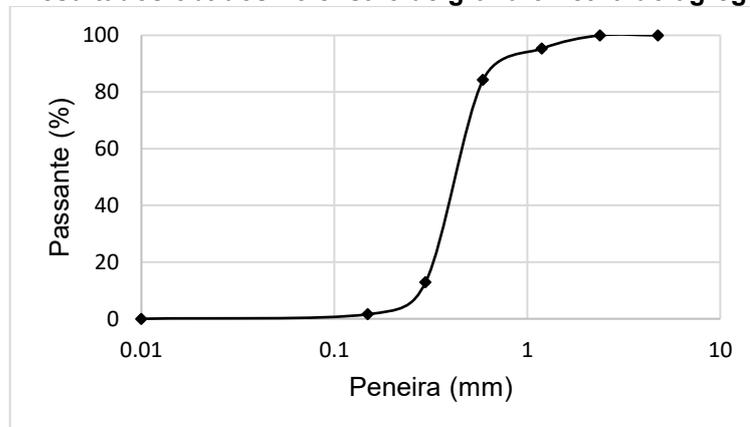
**Figura 12: Material retido na peneira 2,38 mm**



Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 8 apresenta a granulometria do agregado miúdo, necessária para a definição de seu módulo de finura (MF).

**Gráfico 8: Resultados obtidos no ensaio de granulometria do agregado miúdo**



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a determinação do módulo de finura deve-se dividir o somatório das porcentagens retidas acumuladas por 100, assim, foi encontrado que  $MF = 2,08$ . Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), com MF entre 1,55 e 2,20 o agregado é classificado como areia fina.

As massas específicas, massas unitárias e absorção de água dos materiais foram calculadas conforme as normas citadas, e obteve-se os resultados apresentados na Tabela 3:

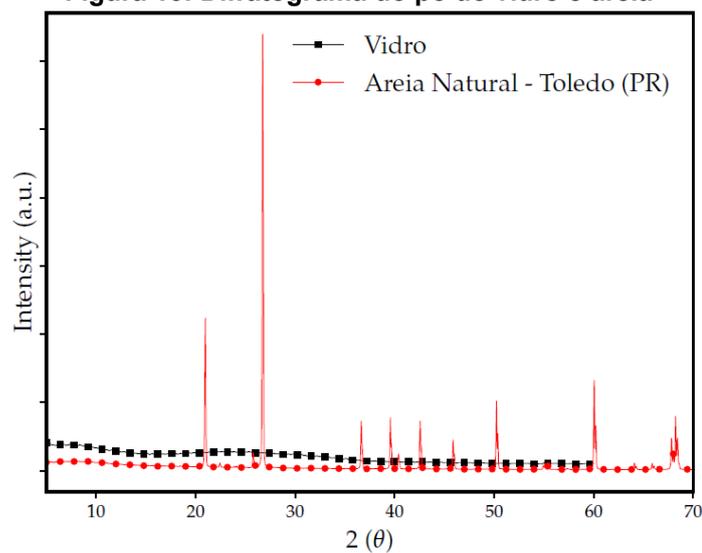
**Tabela 3: Resultados obtidos para os agregados**

Material	Massa específica SSS (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Agregado graúdo	2.896,0	3.168,0	2.771,0	4,527
Agregado miúdo	2.131,0	-	2.126,1	0,230

Fonte: Autoria própria (2022)

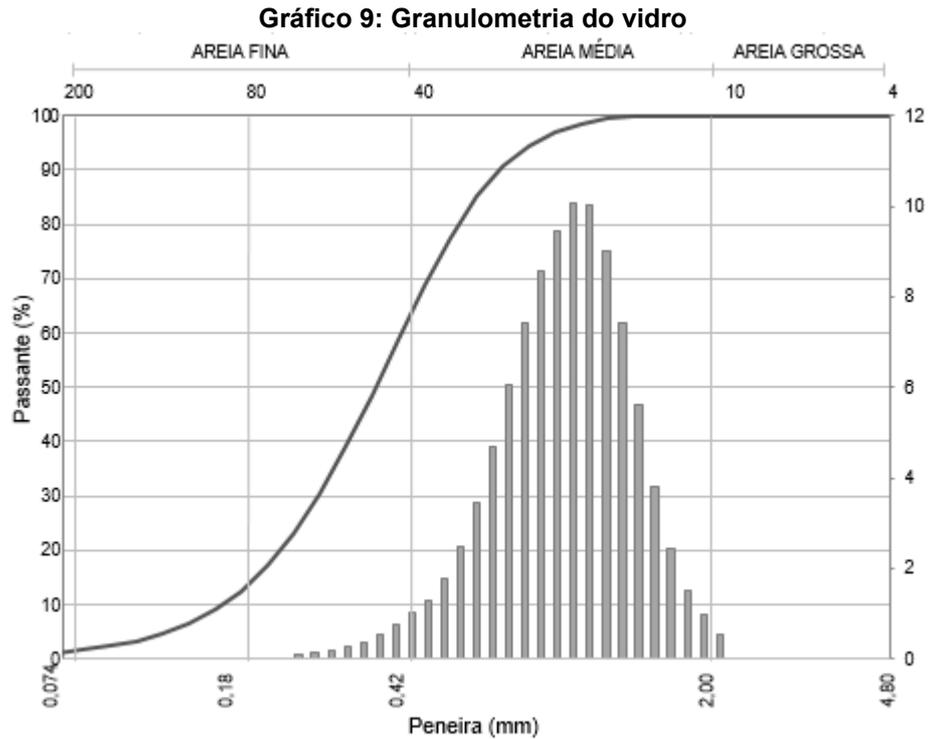
A massa específica do cimento Itambé CP V-ARI foi definida após realizado do ensaio descrito pela ABNT NBR 16605, e o valor encontrado foi de 3.045,7 kg/m<sup>3</sup>.

Na Figura 13 está apresentado um difratograma obtido por meio de raios-x e é possível analisar que o perfil do vidro é semelhante ao da areia natural de Toledo (PR). Assim, ao acrescentar pó de vidro nas peças, a porcentagem de areia aumenta.

**Figura 13: Difratograma do pó do vidro e areia**

Fonte: Autoria própria (2022)

Foi feita a granulometria do vidro e observou-se que ele se enquadra quase integralmente como areia média (Gráfico 9) e seu tamanho médio foi de 358,1596 μm.



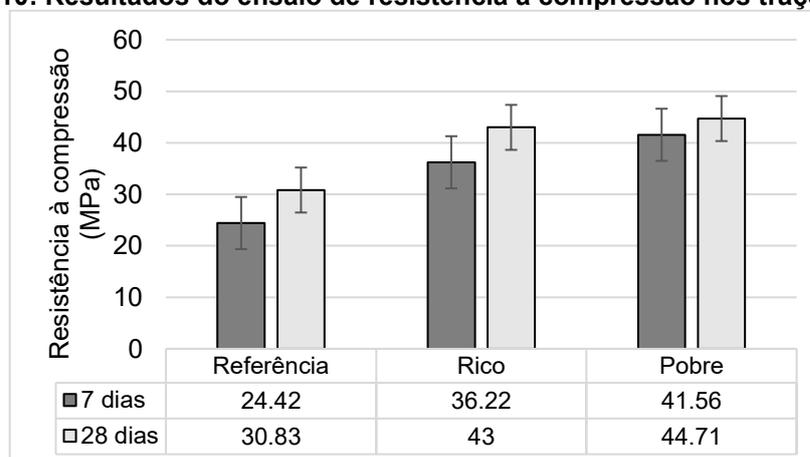
## 5.2 Traços iniciais

Como citado na metodologia, foram feitos ensaios com traços sem adição de vidro para definição do melhor, e posteriormente, utilizá-lo com substituições de diferentes porcentagens de pó de vidro.

### 5.2.1 Resistência à compressão

No Gráfico 10 pode-se visualizar os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

**Gráfico 10: Resultados do ensaio de resistência à compressão nos traços iniciais**



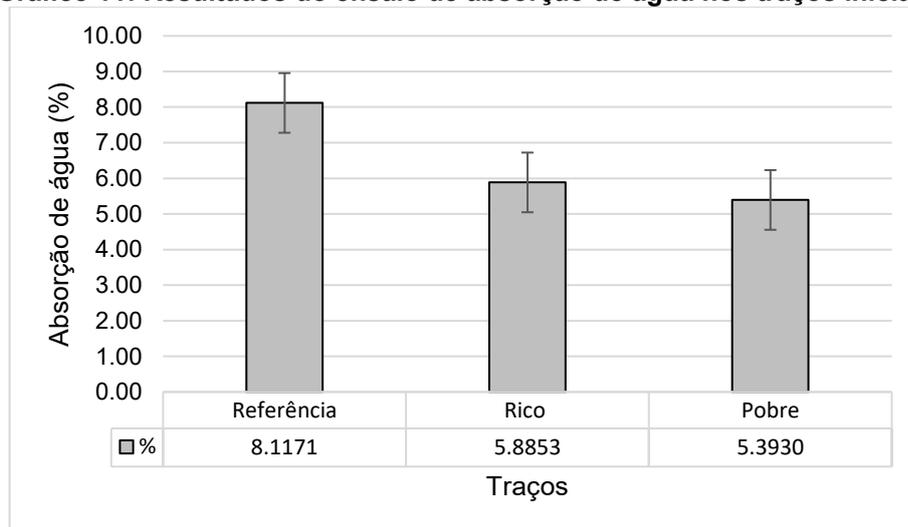
**Fonte: Autoria própria (2022)**

O traço referência utilizado pela empresa de materiais cimentícios não alcançou a resistência mínima de 35 MPa requerida pela NBR 9781, indicando uma necessidade de correção. Os dois traços calculados pelo método ABCP atenderam à norma, sendo que o traço pobre foi o escolhido para substituição parcial do aglomerante hidráulico por ter apresentado resultados mais favoráveis.

### 5.2.2 Absorção de água

Tendo em vista que o valor máximo previsto na NBR 9781 para a absorção de água é de 6%, é possível verificar no Gráfico 11 que o traço referência também não atende a esse pré-requisito. Para os outros traços os resultados foram satisfatórios.

**Gráfico 11: Resultados do ensaio de absorção de água nos traços iniciais**

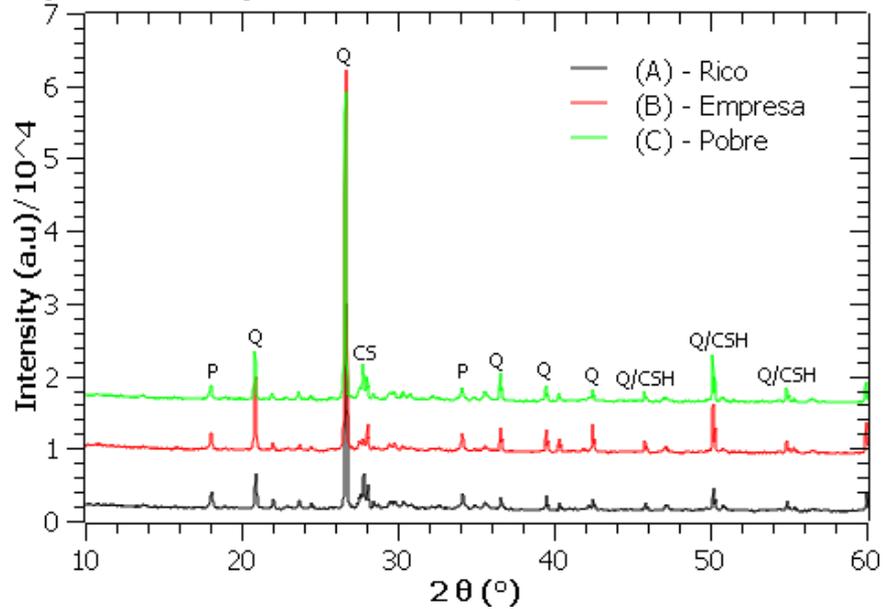


Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.2.3 Análise da evolução dos constituintes dos *pavers* sem vidro

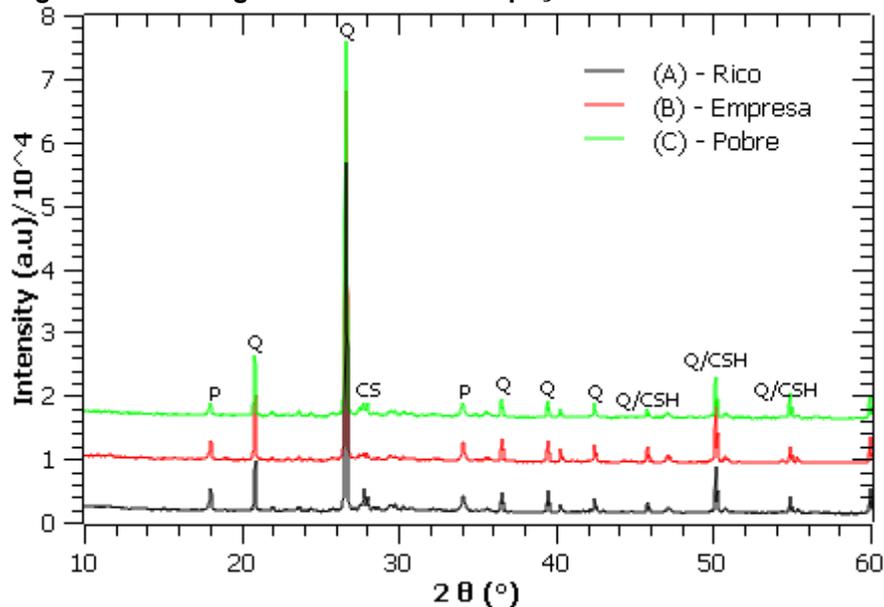
Após a aplicação da técnica de difração de raios-X em pó (PXRD), foram determinadas as fases cristalinas das peças aos 7 e 28 dias e os difratogramas obtidos estão nas Figuras 14 e 15, respectivamente. Ao compará-las pôde-se observar que houve uma redução de silicatos de cálcio (CS) e aumento no componente C-S-H, resultado da hidratação dos silicatos dicálcico e tricálcico ( $C_2S$  e  $C_3S$ ), indicando ganho de resistência.

**Figura 14: Difratograma de raios-x das peças sem vidro com 7 dias**



Em que: P = Portlandita, Q = Quartzo, CS = Silicatos de cálcio, CSH = Silicatos de Cálcio Hidratados  
**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Figura 15: Difratograma de raios-x das peças sem vidro com 28 dias**



Em que: P = Portlandita, Q = Quartzo, CS = Silicatos de cálcio, CSH = Silicatos de Cálcio Hidratados  
**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 5.3 Traços com resíduos vítreos

Na Tabela 4 está a quantidade necessária para a produção de 25 peças de *pavers* com pó de vidro, suficientes para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

Tabela 4: Traços produzidos com pó de vidro

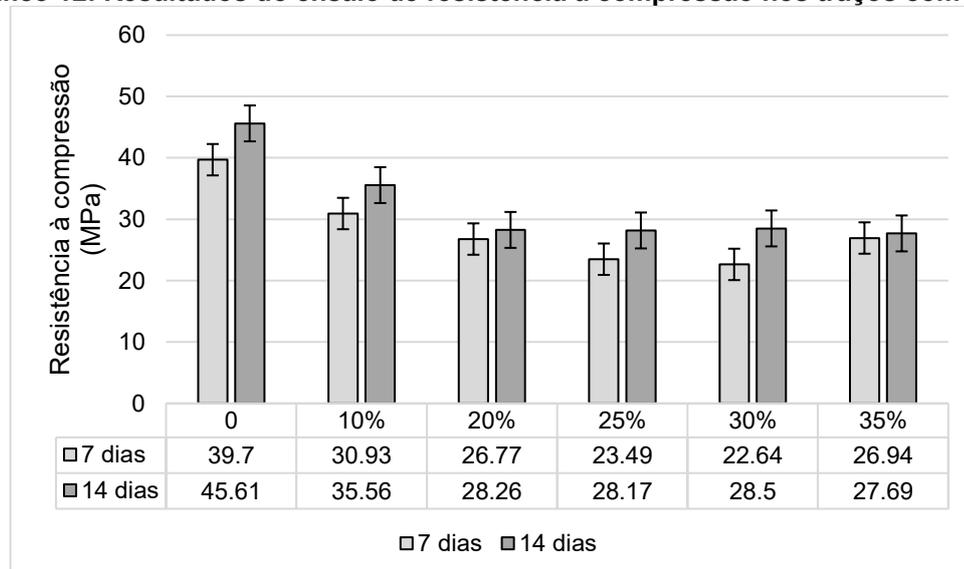
Traço	Cimento (kg)	Pó de vidro (kg)	Areia (kg)	Pedrisco (kg)	Água (kg)
10%	11,25	1,250	23,84	31,88	5,75
20%	10,00	2,50	23,84	31,88	5,75
25%	9,38	3,12	23,84	31,88	5,75
30%	8,75	3,75	23,84	31,88	5,75
35%	8,12	4,38	23,84	31,88	5,75

Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.3.1 Resistência à compressão

Ao submeter as peças ao ensaio de resistência a compressão aos 7 dias averiguou-se que somente o traço sem vidro ultrapassou a resistência mínima de 35 MPa, no entanto, aos 14 dias foi verificado que o traço com 10% de substituição também atendeu a esse pré-requisito. Logo, dentre as porcentagens utilizadas, conclui-se que é possível substituir 10% do cimento por pó de vidro e atender à norma. Os resultados estão dispostos no Gráfico 12.

Gráfico 12: Resultados do ensaio de resistência à compressão nos traços com vidro

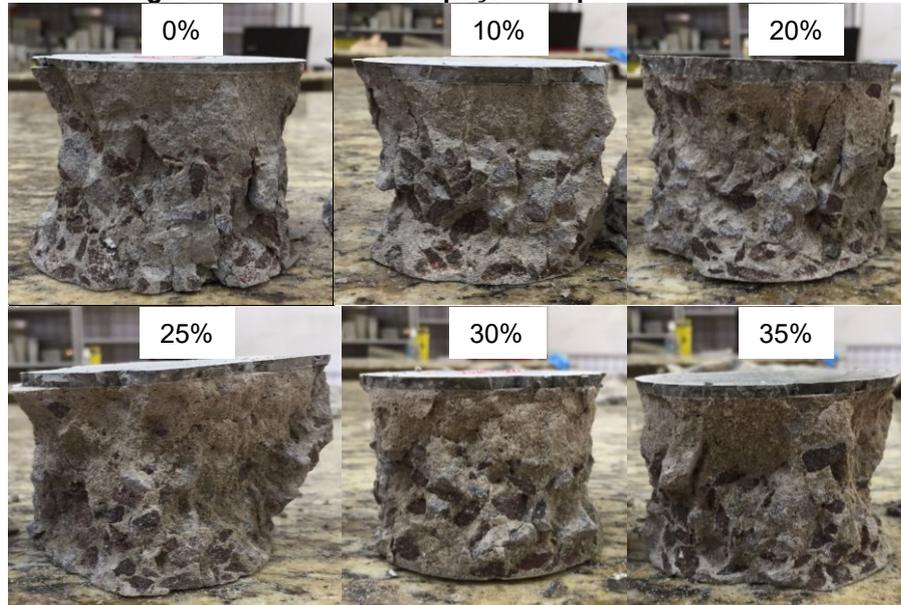


Fonte: Autoria própria (2022)

Após a realização do ensaio de resistência à compressão aos 14 dias foram separadas pequenas amostras das peças rompidas para análise (Figura 16). Verificou-se nelas que parte significativa do pedrisco segregou, possivelmente

consequência de um tempo de vibração maior que o necessário. Como todo o processo foi realizado conforme a empresa executa, após análise dos resultados, foi recomendado que esse tempo seja revisto pela equipe da produção para que não interfira no desempenho das peças futuramente.

**Figura 16: Amostras das peças rompidas aos 14 dias**

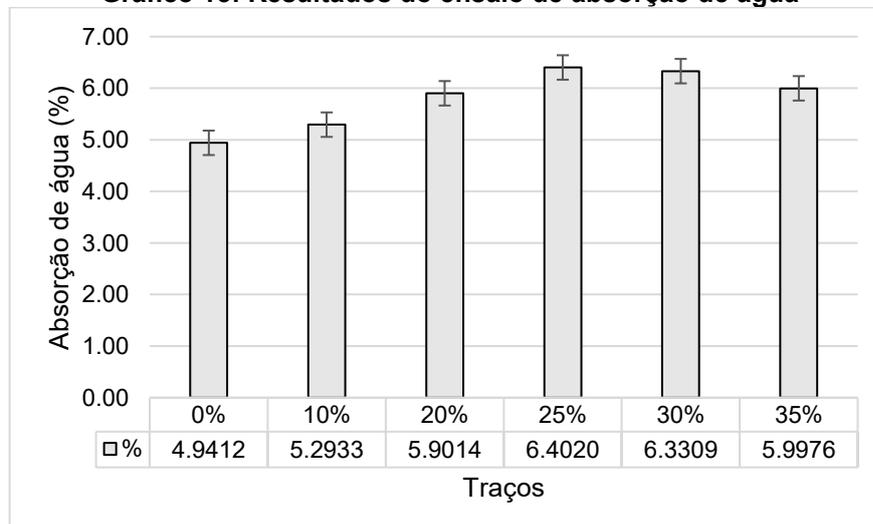


Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.3.2 Absorção de água

Foi realizado o ensaio de absorção de água e verificou-se que os traços de 0%, 10%, 20% e 35% atenderam à norma sendo menor que 6%. Ressalta-se que ao relacionar a resistência das peças com a absorção, verifica-se que quanto maior a absorção, menor a resistência. Os resultados podem ser observados no Gráfico 13.

**Gráfico 13: Resultados do ensaio de absorção de água**

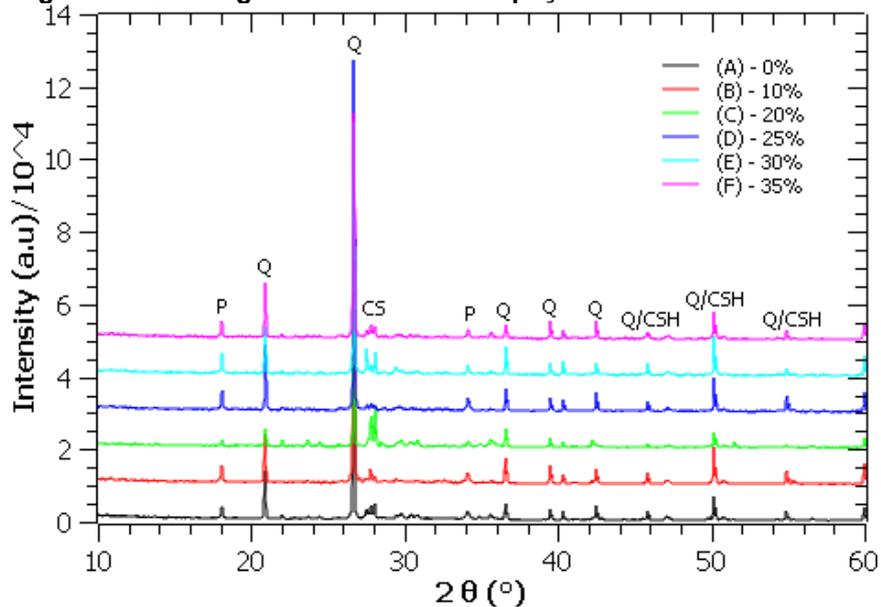


Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.3.3 Análise da evolução dos constituintes dos *pavers* com vidro

As fases cristalinas das peças com 7 e 14 dias foram determinadas e os difratogramas obtidos estão nas Figuras 17 e 18, respectivamente. Ao compará-las pôde-se observar que houve um aumento no componente C-S-H, resultado da hidratação dos silicatos dicálcico e tricálcico ( $C_2S$  e  $C_3S$ ), indicando ganho de resistência.

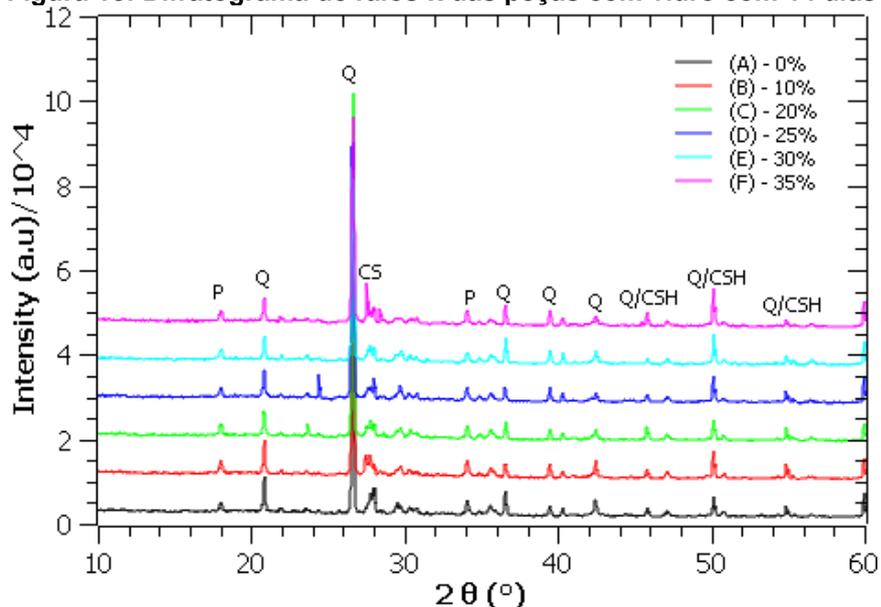
**Figura 17: Difratograma de raios-x das peças com vidro com 7 dias**



Em que: P = Portlandita, Q = Quartzo, CS = Silicatos de cálcio, CSH = Silicatos de Cálcio Hidratados

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Figura 18: Difratograma de raios-x das peças com vidro com 14 dias**

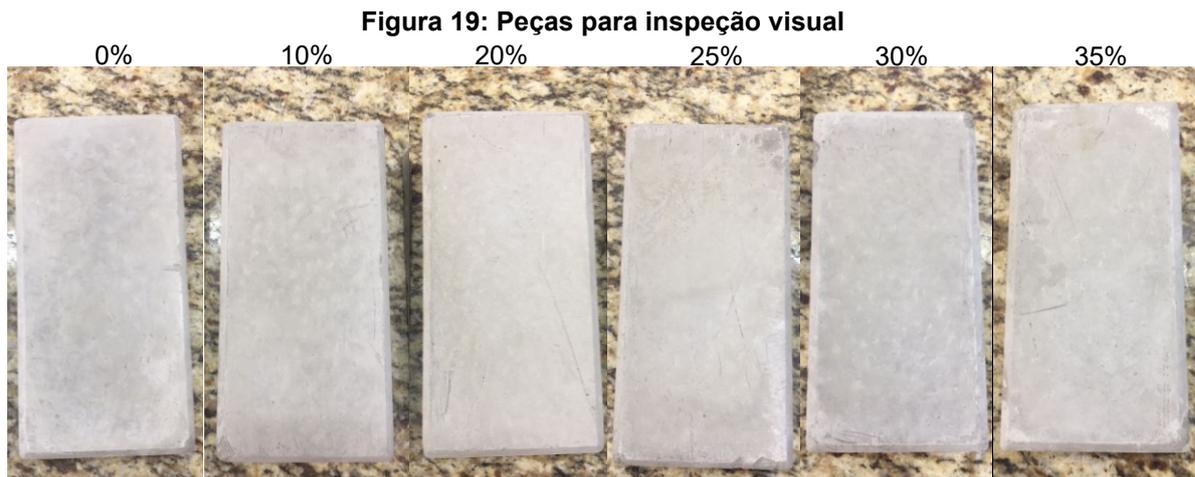


Em que: P = Portlandita, Q = Quartzo, CS = Silicatos de cálcio, CSH = Silicatos de Cálcio Hidratados

**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 5.3.4 Inspeção visual

A partir da inspeção visual feita em todos os exemplares, não foi possível constatar discrepância entre eles. Na Figura 19 pode-se observar essa semelhança entre as peças produzidas. Em todas obteve-se um preenchimento dos poros e uma aparência marmorizada.



Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.3.5 Análise financeira

A partir de informações fornecidas pela empresa (Tabela 5) foi possível realizar uma análise de custo para verificar a viabilidade da produção das peças com pó de vidro.

**Tabela 5: Custo dos materiais**

Cimento (50 kg)	Areia (1 m <sup>3</sup> )	Pedrisco (1 m <sup>3</sup> )
R\$ 32,00	R\$ 82,00	R\$ 92,00

Fonte: Autoria própria (2022)

Com ciência que o traço atual da empresa não atende à normativa brasileira quanto à resistência à compressão e absorção de água, o comparativo de valores foi realizado em relação ao traço sem vidro que foi atestado no estudo de dosagem e atende à resistência mínima de 35 MPa.

Para o cálculo do custo mensal foi considerado que a produção deste artefato é cerca de 400 m<sup>2</sup>/mês (COSTA; SCHNEIDER, 2021). Assim, pode-se concluir que a utilização do traço ótimo (10%) gera uma economia mensal de R\$ 600,00. Nesse valor deve-se descontar o gasto com a máquina para moer os resíduos vítreos, além do

colaborador necessário para o processo (o vidro é doado à empresa). Na Tabela 6 estão os valores calculados para todas as peças.

**Tabela 6: Custo da produção**

<b>Traço</b>	<b>Rendimento (traço)</b>	<b>Custo (peça)</b>	<b>Custo (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo (mensal)</b>
0%	100 peças	R\$ 0,40	R\$ 20,00	R\$ 8.000,00
10%	100 peças	R\$ 0,37	R\$ 18,50	R\$ 7.400,00
20%	100 peças	R\$ 0,33	R\$ 16,50	R\$ 6.600,00
25%	100 peças	R\$ 0,32	R\$ 16,00	R\$ 6.400,00
30%	100 peças	R\$ 0,30	R\$ 15,00	R\$ 6.000,00
35%	100 peças	R\$ 0,29	R\$ 14,50	R\$ 5.800,00

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Foram estimados os valores presentes na Tabela 7, sendo a tarifa de aplicação de kWh para o subgrupo B3 (Comercial, Industrial e Outros) e modalidade convencional conforme Resolução Homologatória nº 2.971 (ANEEL, 2021).

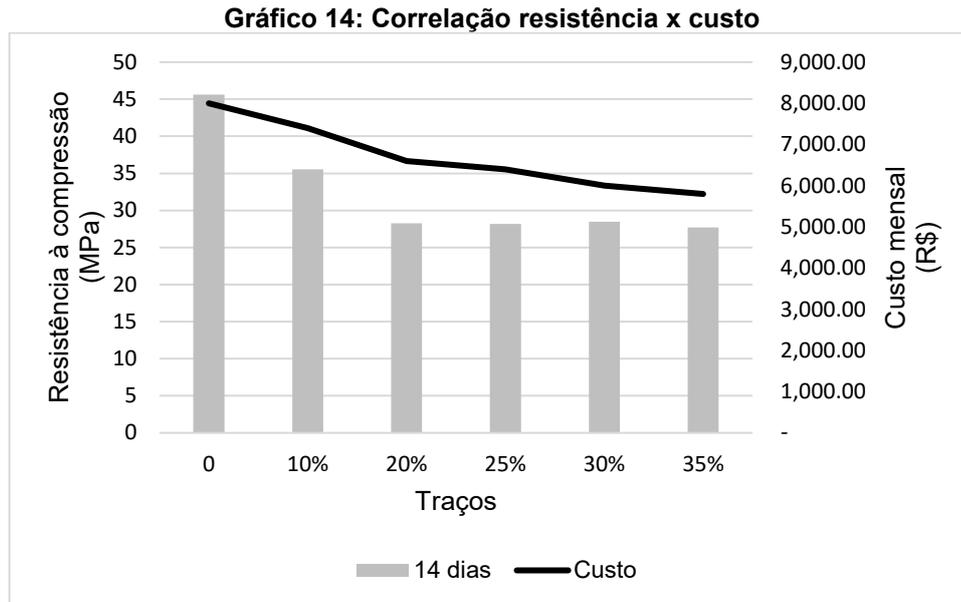
**Tabela 7: Valores considerados**

<b>Potência máquina</b>	<b>Custo máquina (kWh)</b>	<b>Rendimento máquina</b>	<b>Diária colaborador</b>
11 kW	R\$ 0,59266	62,5 kg/h	R\$ 50,00

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para a produção de 1 m<sup>2</sup> (50 peças) do traço 0% são necessários 25 kg de cimento, logo, no traço 10% precisa-se de 2,5 kg de pó de vidro. Mensalmente, o consumo de vidro seria de 1.000 kg, e baseando-se na Tabela 7, é possível calcular o custo dessa produção: R\$ 204,31. Descontando esse valor dos R\$ 600,00, resta uma economia de R\$ 395,69/mês, ou seja, R\$ 4.748,28/ano.

No Gráfico 14, feito com o intuito de relacionar os resultados de resistência à compressão e custo mensal, pode-se verificar que o custo reduz em conformidade com o aumento da porcentagem de substituição e resistência das peças reduziu até o traço 20% e depois se manteve constante.



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Além do fator financeiro, vale ressaltar que a produção pode ser considerada sustentavelmente viável por possibilitar a utilização de resíduos vítreos e colaborar para a solução de um problema ambiental.

## 6 CONCLUSÃO

Verificou-se que o traço da empresa não atingia os requisitos de norma quanto a resistência à compressão e absorção de água, e os dois traços calculados obtiveram resultados satisfatórios. O que mais se destacou foi escolhido para dar seguimento ao estudo.

No ensaio de resistência à compressão somente os traços 0% e 10% atingiram 35 MPa, mínimo exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Para o ensaio de absorção de água, somente os traços 25% e 30% não atenderam limite máximo de 6%. Ao relacionar os dois ensaios concluiu-se que quanto menor a absorção de água, maior a resistência à compressão.

Na análise dos constituintes do concreto foi possível comprovar a evolução da resistência das peças conforme o processo das reações de hidratação dos silicatos dicálcico e tricálcico ( $C_2S$  e  $C_3S$ ). Ao realizar a inspeção visual foi verificada grande semelhança entre as peças, observou-se ausência de poros aparentes e uma superfície marmorizada em todas.

A análise financeira foi realizada comparando os traços 0% e 10% e constatou-se uma grande economia na produção (R\$ 4.748,28/ano). Deste modo, além do custo benefício, a produção é sustentavelmente viável por utilizar resíduos vítreos e colaborar para a solução de um problema ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Resolução Homologatória nº 2.971 de 16 de novembro de 2021.** Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2021, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD referentes à DME Distribuição S.A – DMED, e dá outras providências. 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20212971ti.pdf>>. Acesso em: 18/11/2022.
- ASSIS, O. B. G. O uso de vidro reciclado na confecção de membranas para microfiltração. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, p. 105-113, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916:** Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917:** Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972:** Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15953:** Pavimento intertravado com peças de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:** Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- BARROS, C. **Apostila de vidros.** Materiais de Construção. Edificações. Instituto Federal de Ciências, Educação e Tecnologia Sul-Riograndense. Pelotas - RS, 2010.
- BENATTI, L. B.; AZAMBUJA, M. A. Reciclagem de vidro como alternativa para concreto. **Revista nacional de gerenciamento de cidades**, v. 4, p. 16-27, 2016.

BRAGA, B. J. S.; BRAMUSSE, T. F. **Análise comparativa entre pavimentos urbanos: blocos de concreto intertravado (pavers) x revestimento asfáltico pré-misturado a frio**. 2015. Monografia (Graduação) – Programa de Graduação em Engenharia Civil, Instituto Tecnológico de Caratinga, Caratinga - MG, 2015.

COSTA, I. A. **Produção e caracterização de blocos de espuma vítrea confeccionados com resíduos**. 2020. Monografia (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo - PR, 2020.

COSTA, I. A.; SCHNEIDER, R. Estudo da viabilidade da substituição de aglomerante por resíduos vítreos na produção de pavimento intertravado de concreto. Capítulo 5. **Força, crescimento e qualidade da engenharia civil no Brasil 3**. Editora Atena, p. 52-58, Ponta Grossa - PR, 2021.

DIAS, G. G.; CRUZ, T. M. D. S. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Vítreos, (PGIRV)**. Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/minas\\_sem\\_lixoes/2010/vidros.pdf](http://www.feam.br/images/stories/minas_sem_lixoes/2010/vidros.pdf)>. Acesso em 20/04/2022.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2007.

Governo lança certificado de crédito para estimular reciclagem no país: Medida incentivativa investimentos no reaproveitamento de resíduos. **Agência Brasil**. 2022. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2022-04/governo-lanca-certificado-de-credito-para-estimular-reciclagem-no-pais>>. Acesso em: 20/05/2022.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo, **Pini**, 1993.

LEAL, C. E. F. **Peças para pavimento intertravado de concreto: estudo de viabilidade técnica na incorporação de agregado reciclado**. 2018. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 20/05/2022.

LODI, A. L. G.; GAMBIN, G. R.; WEIT, M. L. **Incorporação de resíduos vítreos na fabricação de blocos de concreto para pavimentação intertravada**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira - PR, 2014.

LÓPEZ, D. A.; DE AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, v. 51, p. 318-324, 2005.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S. Uso de pó de vidro como fundente para produção de grês porcelanato. **Matéria**, Rio de Janeiro - RJ, v. 13, n. 1, p. 96-103, 2008.

Manual de pavimento intertravado. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2016. Disponível em: <<https://abcp.org.br/manual-de-pavimento-intertravado/>>. Acesso em: 25/04/2022.

OLIVEIRA, J. C. D. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília - DF, 2007.

SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 39-51, 2019.

SIDDIQUE, R.; *et al.* Propriedades do concreto de cinza de casca de arroz bacteriana. **Construção e materiais de construção**, v. 121, p. 112-119, 2016.

SILVA, J. G. M. D. **Avaliação da viabilidade de incorporação de resíduos vítreos de garrafas em matrizes cimentícias: argamassa convencional**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Ariquemes - RO, 2020.

SILVA, V. P. **Uso de escória de ferro-níquel na fabricação de pavers**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia - GO, 2019.

SIMIÉLI, D.; *et al.* Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. **Exacta**, São Paulo - SP, v. 5, n. 2, p. 231-242, 2007.

SOUZA, V. B. D.; *et al.* Avaliação de blocos de concreto com adição de resíduo de vidro aplicados em pavimentação. *In: 72º CONGRESSO ANUAL DA ABM*. 2017, São Paulo - SP. **Anais do Congresso Anual da ABM**, v. 72, n. 1, p. 3796-3803.

TOLEDO, J. M. S. **Avaliação físico-química da utilização de areias descartadas de fundição na fabricação de pavimento intertravado de concreto**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2017.

Vidro: história, composição, tipos, produção e reciclagem. **Recicloteca**. 2017. Disponível em: <<https://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/vidro/>>. Acesso em: 25/04/2022.

VIEIRA, A. P. N. B.. **Viabilidade técnica da fabricação de compósito utilizando fibra de pneu na fabricação de blocos intertravados**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2014.

VIEIRA, M. D. O. **Avaliação do emprego de agregado miúdo reciclado na produção de peças pré-moldadas para pavimentação tipo “paver”**. 2021. Dissertação (Pós Graduação) - Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2021.

WICZNOVSKI, D. **Incorporação de resíduos vítreos na fabricação de blocos de concreto**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão - PR, 2019.