



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE (PSU)**  
**MESTRADO ACADÊMICO ASSOCIADO**  
**Universidade Estadual de Maringá**  
**Instituto Federal do Paraná**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO  
DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM USO DE REVESTIMENTO  
PARA PAVIMENTO EM AMBIENTE URBANO**

**TALITA CRISTINA REZENDE**

UMUARAMA/PR

2021

**TALITA CRISTINA REZENDE**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO  
DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM USO DE REVESTIMENTO  
PARA PAVIMENTO EM AMBIENTE URBANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Sustentabilidade.

**Orientador: Dr. Leandro Vanalli**

**Co-orientador: Me. Guilherme Perosso Alves**

UMUARAMA/PR

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

R467a

Rezende, Talita Cristina

Análise das propriedades do concreto permeável com adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em uso de revestimento para pavimento em ambiente urbano / Talita Cristina Rezende. -- Umuarama, PR, 2021.

153 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Vanalli.

Coorientador: Prof. Mr. Guilherme Perosso Alves Alves.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, 2021.

1. Concreto permeável. 2. Concreto - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar - Permeabilidade. 3. Comportamento mecânico. 4. Sustentabilidade. I. Vanalli, Leandro, orient. II. Alves, Guilherme Perosso Alves, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade. IV. Título.

CDD 23.ed. 620.136



## FOLHA DE APROVAÇÃO

TALITA CRISTINA REZENDE

“ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM USO DE REVESTIMENTO PARA PAVIMENTO EM AMBIENTE URBANO”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Curso de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Mestrado Acadêmico Associado entre a Universidade Estadual de Maringá e Instituto Federal do Paraná, formada pela seguinte Banca Examinadora:

Professor Doutor Leandro Vanalli  
Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – UEM)

Professor Doutor Guilherme Perosso Alves  
Co-orientador (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – UEM)

Professor Doutor Everlei Câmara  
Avaliador externo (Universidade Paranaense – UNIPAR)

Professor Doutor Sérgio Trajano Franco Moreiras  
Avaliador Interno (Universidade Estadual de Maringá – UEM)

Umuarama, 29 de outubro de 2021



**DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM SUSTENTABILIDADE**

**DISCENTE:** Talita Cristina Rezende

**TÍTULO:** “ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM USO DE REVESTIMENTO PARA PAVIMENTO EM AMBIENTE URBANO”

Data 29/10/2021

Horário: 14:00

Local: Por via remota – link: <https://meet.google.com/zbr-qdbj-uzs>

APROVADO

VADO ( )

**PARECER CIRCUNSTANCIADO:**

---

---

---

---

---

---

---

---

Umuarama, 29 de outubro de 2021

  
Professor Doutor Guilherme Perosso Alves

*“O que eu faço, é uma gota no meio de um oceano.  
Mas sem ela, o oceano será menor.”  
(Madre Teresa de Calcutá)*

Dedico este trabalho de pesquisa à minha mãe. Sua grande força foi a mola propulsora que permitiu o meu avanço, mesmo durante os momentos mais difíceis.

Agradeço do fundo do meu coração.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus, pela força e coragem durante toda a caminhada.

Ao orientador Professor Dr. Leandro Vanalli por ser uma constante fonte de motivação e incentivo ao longo do projeto. Muito obrigada.

Ao co-orientador Professor Me. Guilherme Perosso Alves por contribuir com seus conhecimentos pontuais e sempre importantes.

Aos membros da banca examinadora, Professor Dr. Everlei Câmara, Professor Sérgio Trajano Franco Moreiras, Professora Dr<sup>a</sup>. Máriam Trierveiler Pereira e Professor Dr. Romel Dias Vanderlei que gentilmente aceitaram participar da avaliação, compartilhando seus conhecimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, pela Universidade Estadual de Maringá e Instituto Federal do Paraná, por toda experiência e aprendizados adquiridos.

Ao Laboratório de Materiais de Construção (UEM), Laboratório de Análises Químicas (UEM) e Laboratório de Ensaio Mecânicos (UNIPAR). Aos técnicos Sidnei Reina Coutinho, Genilson Vieira, Tânia Mara Rizzato e Lucas Mateus Lucena, pelo auxílio e conhecimento compartilhados ao longo da pesquisa.

Aos colegas de trabalho do escritório Folha Arquitetura, em especial a minha sócia e amiga Aline da Silva Dias, por toda ajuda despendida e compressão durante minhas ausências para realização de atividades relativas ao mestrado. Ao Thiago Lopes Carinheno, por toda contribuição nos momentos decisivos com o trabalho.

Ao Me. Juares José Pereira, por todo apoio e incentivo à pesquisa. A Psic. Viviane Teixeira, pelas palavras de acalento e sabedoria ao longo de todo o processo.

Aos meus familiares, de modo especial, minha mãe Vera, irmã Ana Carolina e sobrinho Camilo, tios Luiz Carlos e Claudionor e avô Jacomo, pelo amor incondicional, dando forças e amparo sempre para seguir nos momentos de dificuldade.

A amiga Denise Nassar e sobrinhos Jihad e Yasmin, pelo carinho e amor recebidos.

A todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

A impermeabilização dos solos, resultado da urbanização, vem sendo um dos grandes problemas nos centros urbanos devido a ocorrência de alagamentos e enchentes nessas áreas, tornando-se não só um problema ambiental, mas também social, pois, provoca danos à saúde e à economia local. Em contrapartida, as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), subproduto gerado pela usina sucroalcooleira, se mostram, através dos resultados obtidos nesta pesquisa, como um material alternativo viável à substituição parcial do cimento Portland. Este fato, auxilia na redução do impacto ambiental causado pela extração de calcário e argila, somado ao potencial de diminuição de emissões de CO<sub>2</sub> e de despejos de resíduos nas lavouras ou locais inapropriados. Com o intuito de favorecer a busca de soluções, visando minimizar o impacto ambiental desse resíduo, o estudo de novos materiais é importante, pois contribui com a produção de concretos permeáveis de baixo carbono, utilizando-se da CBC como material constituinte e o dispõe como medida mitigadora às carências dos sistemas de drenagem urbana. Esta pesquisa, dividida em duas etapas, primeira e segunda campanha experimental, busca analisar os desempenhos mecânicos (resistências à compressão e tração na flexão) e hidráulicos (índice de vazios e coeficiente de permeabilidade) do concreto permeável produzido com substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar em uso de revestimento para pavimento urbano. Como parâmetro à dosagem, mistura e adensamento do concreto permeável, utilizou-se do traço 1:3,26 (cimento:brita), com relação a/c igual a 0,34, sem uso de aditivos químicos, conforme o estudo de Sandoval (2014). Na primeira campanha experimental, definiu-se a granulometria do agregado gráudo basalto utilizado (brita zero) no concreto permeável, como controle referencial, sem o uso da CBC. Na segunda campanha experimental, a CBC coletada na usina Melhoramentos Norte do Paraná, foi beneficiada através do peneiramento primário, calcinação e moagem, bem como, caracterizada quanto a sua granulometria, massa específica, superfície específica e propriedades físicas (finura, desempenho com cimento Portland e cal) e químicas (teor de umidade e perda ao fogo). As amostras de concreto permeável foram produzidas com teores de substituição de 3 %, 5 % e 10 % de CBC. Desta forma, em relação ao concreto controle (0 % de CBC), os resultados indicaram que todas as amostras estudadas aumentaram a resistência à compressão, à tração por compressão diametral, índice de vazios e absorção de água por imersão e reduziram a resistência à tração na flexão, tal como, o coeficiente de permeabilidade. Entretanto, todos os teores de substituição apresentaram desempenhos aceitáveis quanto a NBR 16416 (2015), viabilizando o uso do concreto permeável com substituição parcial do cimento Portland por CBC em uso de revestimento para pavimento de tráfego leve e de pedestres moldado no local, agregando valor sustentável ao produto, minimizando os impactos ambientais na região do Arenito Caiuá.

Palavras-chave: concreto permeável, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, comportamento mecânico, permeabilidade, sustentabilidade.

## ABSTRACT

The waterproofing of soils, resulting from urbanization, has been one of the major problems in urban centers due to the occurrence of floods and floods in these areas, becoming not only an environmental problem, but also a social one, as it causes damage to health and the economy. local. On the other hand, sugarcane bagasse ash (CBC), a by-product generated by the sugarcane mill, is shown, through the results obtained in this research, as a viable alternative material to the partial replacement of Portland cement. This fact helps to reduce the environmental impact caused by the extraction of limestone and clay, added to the potential to reduce CO<sub>2</sub> emissions and waste dumping in crops or inappropriate places. In order to favor the search for solutions, aiming to minimize the environmental impact of this waste, the study of new materials is important, as it contributes to the production of permeable low-carbon concrete, using CBC as a constituent material and disposing of it as mitigating measure to the deficiencies of urban drainage systems. This research, divided into two stages, first and second experimental campaign, seeks to analyze the mechanical (compressive and tensile strength in bending) and hydraulic (void index and permeability coefficient) performance of permeable concrete produced with partial replacement of Portland cement by ash from sugarcane bagasse in use as a covering for urban pavement. As a parameter for the dosage, mixing and densification of permeable concrete, the mix 1:3.26 (cement:gravel) was used, with a w/c ratio equal to 0.34, without the use of chemical additives, according to the study by Sandoval (2014). In the first experimental campaign, the granulometry of the coarse basalt aggregate used (zero gravel) in permeable concrete was defined as a reference control, without the use of CBC. In the second experimental campaign, the CBC collected at the Melhoramentos Norte do Parana plant, was processed through primary sieving, calcination and grinding, as well as characterized in terms of its particle size, specific mass, physical properties (fineness, performance with Portland cement and lime) and chemical (moisture content and loss to fire). The permeable concrete samples were produced with substitution contents of 3%, 5% and 10% of CBC. Thus, in relation to the control concrete (0% CBC), the results indicated that all the studied samples increased the compressive strength, tensile strength by diametral compression, void index and water absorption by immersion and reduced the tensile strength in bending, such as the permeability coefficient. However, all replacement grades presented acceptable performances according to NBR 16.416 (2015), enabling the use of permeable concrete with partial replacement of Portland cement by CBC in use of molded-in-place pedestrian and light traffic pavement cladding, adding value sustainable to the product, minimizing the environmental impacts in the Caiua Arenito area.

Keywords: permeable concrete, sugarcane bagasse ash, mechanical behavior, permeability, sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pontos de alagamento da região central de Umuarama-PR: a) Avenida Londrina; b) Avenida Brasil.....	27
Figura 2 – Obra canal de drenagem em Umuarama-PR.....	27
Figura 3 – Calçamento impermeável irregular de propriedades particulares em Umuarama-PR.....	28
Figura 4 – Concreto permeável produzido sem adição de agregado miúdo.....	29
Figura 5 – Tipos de distribuição granulométrica.....	31
Figura 6 – Tipologia de revestimentos de pavimentos de concreto permeável.....	34
Figura 7 – Representação do sistema de infiltração para pavimento permeável.....	35
Figura 8 – Bagaço de cana-de-açúcar e diferentes cinzas residuais geradas após queima do bagaço em caldeira.....	45
Figura 9 – Cimentos Portland CP II-E-32.....	52
Figura 10 – Agregados graúdos no pátio da empresa distribuidora Minerforte.....	53
Figura 11 – Agregados graúdos adquiridos pela empresa Minerforte: a) B0; b) B1a; c) B1b.....	54
Figura 12 – Curvas granulométricas B0, B1a e B1b.....	55
Figura 13 – Agregados graúdos utilizados na primeira campanha experimental: a) B0; b) B0/B1a; c) B1a/B1b.....	56
Figura 14 – Curvas granulométricas B0, B0/B1a e B1a/B1b.....	57
Figura 15 – Processo de produção do concreto permeável.....	61
Figura 16 – Adensamento dos corpos de prova: a) cilíndricos; b) prismáticos.....	62
Figura 17 – Estudo do procedimento de compactação.....	62
Figura 18 – Ensaio de consistência primeira campanha experimental: a) B0; b) B0/B1a; c) B1a/B1b.....	63
Figura 19 – Variação da massa específica dependendo do tipo de agregado (B0, B0/B1a e B1a/B1b).....	64
Figura 20 – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão..	65
Figura 21 – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	66
Figura 22 – Aspecto interno dos corpos de prova após os ensaios de resistência à tração por compressão diametral: a) B0; b) B0/B1a; c) B1a/B1b.....	67

Figura 23 – Marcação, montagem e ruptura do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração na flexão.....	68
Figura 24 – Secagem dos corpos de prova em estufa.....	70
Figura 25 – Pesagem do corpo de prova: a) estado saturado e superfície seca; b) imerso em água.....	70
Figura 26 – Corpo de prova cilíndrico retificado para os ensaios de permeabilidade..	72
Figura 27 – Corpo de prova cilíndrico revestido com cobertura impermeável.....	73
Figura 28 – Parte do processo de montagem e fixação do corpo de prova ao permeâmetro.....	73
Figura 29 – Permeâmetro para ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga constante.....	74
Figura 30 – Permeâmetro para ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga variável.....	75
Figura 31 – Processo do ensaio de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável.....	77
Figura 32 – Ensaio de permeabilidade em revestimento de pavimento permeável....	77
Figura 33 – Comparação da resistência à compressão.....	80
Figura 34 – Comparação da resistência à tração por compressão diametral.....	82
Figura 35 – Comparação da resistência à tração na flexão.....	83
Figura 36 – Comparação da absorção de água por imersão.....	84
Figura 37 – Comparação do índice de vazios.....	85
Figura 38 – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga constante.....	86
Figura 39 – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga variável.....	87
Figura 40 – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável.....	90
Figura 41 – Usina Melhoramentos Norte do Paraná, Jussara/PR.....	92
Figura 42 – Pátio da usina sucroalcooleira, Jussara-PR: a) lagoa de decantação; b) CBC depositada no pátio de fuligem.....	93
Figura 43 – CBC <i>in natura</i> antes do peneiramento primário.....	94
Figura 44 – Impurezas e partículas grosseiras da CBC <i>in natura</i> retida na peneira 2mm.....	94
Figura 45 – Secagem da CBC <i>in natura</i> na estufa.....	95
Figura 46 – CBC após secagem em estufa.....	95
Figura 47 – Bandeja metálica e forno mufla utilizada para requieima da CBC.....	96

Figura 48 – Requeima da CBC no forno mufla, à 600 °C: a) primeira etapa, queima incompleta nas primeiras 4 horas; b) segunda etapa, queima completa com mais 4 horas adicionais.....	97
Figura 49 – Moinho de bolas utilizado na moagem da CBC.....	98
Figura 50 – Carga moedora utilizada no moinho de bolas para moagem da CBC.....	99
Figura 51 – Aspecto da CBC: a) CBC/27h; b) CBC/5h; c) CBC/calcinada; d) CBC/estufa.....	103
Figura 52 – Proveta com a CBC em dispersão para a leitura do ensaio de granulometria por sedimentação.....	104
Figura 53 – CBC retida nas peneiras do ensaio de granulometria por peneiramento fino: a) CBC/27h; b) CBC/5h; c) CBC/calcinada; d) CBC/estufa.....	105
Figura 54 – Curvas granulométricas por sedimentação e peneiramento fino (CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa).....	106
Figura 55 – Frasco volumétrico de Le Chatelier para o ensaio de massa específica.....	107
Figura 56 – Aparelho de permeabilidade Blaine para o ensaio de superfície específica.....	110
Figura 57 – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão para determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	112
Figura 58 – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão para determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.....	115
Figura 59 – Cadinhos em estufa para o ensaio de determinação do teor de umidade.....	116
Figura 60 – Cadinhos em mufla para o ensaio de determinação de perda ao fogo...117	117
Figura 61 – Ensaio de consistência segunda campanha experimental: a) B0/3; b) B0/5a; c) B0/10.....	122
Figura 62 – Variação da massa específica conforme o teor de CBC/5h (B0/3, B0/5 e B0/10).....	123
Figura 63 – Comparação da resistência à compressão.....	125
Figura 64 – Comparação da resistência à tração por compressão diametral.....	127
Figura 65 – Comparação da resistência à tração na flexão.....	128
Figura 66 – Comparação da absorção de água por imersão.....	130
Figura 67 – Comparação do índice de vazios.....	131
Figura 68 – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga constante.....	132

Figura 69 – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável e B0/controle.....	133
Figura 70 – Acabamentos das amostras na primeira campanha experimental: a) B0; b) B0/B1a; c) B1a/B1b.....	134
Figura 71 – Acabamentos das amostras na primeira campanha experimental: a) B0/3; b) B0/5; c) B0/10.....	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável...	36
Tabela 2 – Determinação do coeficiente de permeabilidade.....	37
Tabela 3 – Resultados do primeiro ensaio.....	38
Tabela 4 – Resultados do segundo ensaio.....	39
Tabela 5 – Origem e destino dos principais resíduos gerados pela cana-de-açúcar...	41
Tabela 6 – Requisitos químicos para caracterização como material pozolânico .....	43
Tabela 7 – Requisitos físicos para caracterização como material pozolânico.....	43
Tabela 8 – Nomenclatura e classificação dos agregados graúdos.....	53
Tabela 9 – Análise granulométrica dos agregados graúdos da empresa Minerforte...	55
Tabela 10 – Análise granulométrica dos agregados graúdos e suas combinações utilizadas na primeira campanha experimental (B0, B0/B1a e B1a/B1b).....	57
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo.....	58
Tabela 12 – Planejamento da primeira campanha experimental (B0, B0/B1a e B1a/B1b).....	59
Tabela 13 – Consumo de materiais por m <sup>3</sup> da primeira campanha experimental.....	60
Tabela 14 – Resistência à compressão da primeira campanha experimental.....	79
Tabela 15 – Resistência à tração por compressão diametral da primeira campanha experimental.....	81
Tabela 16 – Resistência à tração na flexão da primeira campanha experimental.....	83
Tabela 17 – Absorção de água por imersão da primeira campanha experimental.....	84
Tabela 18 – Índice de vazios da primeira campanha experimental.....	85
Tabela 19 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante da primeira campanha experimental.....	86
Tabela 20 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável da primeira campanha experimental.....	87
Tabela 21 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável da primeira campanha experimental.....	88
Tabela 22 – Resultados do ensaio de caracterização física da CBC como material pozolânico, quanto ao material retido na peneira 45µm.....	102
Tabela 23 – Análise granulométrica por peneiramento fino das cinzas (CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa).....	105

Tabela 24 – Dimensão dos grãos da CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa.....	107
Tabela 25 – Resultados do ensaio de massa específica do cimento Portland e CBC.....	109
Tabela 26 – Resultados do ensaio de superfície específica da CBC.....	111
Tabela 27 – Resultados do ensaio de caracterização física da CBC, quanto a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	113
Tabela 28 – Resultados do ensaio de caracterização física da CBC, quanto a determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.....	115
Tabela 29 – Resultados do ensaio de caracterização química da CBC como material pozolânico, quanto ao teor de umidade.....	117
Tabela 30 – Resultados do ensaio de caracterização química da CBC como material pozolânico, quanto a perda ao fogo.....	119
Tabela 31 – Planejamento da segunda campanha experimental (B0/3, B0/5 e B0/10).....	120
Tabela 32 – Consumo de materiais por m <sup>3</sup> da segunda campanha experimental.....	122
Tabela 33 – Resistência à compressão da segunda campanha experimental e B0/controle.....	124
Tabela 34 – Resistência à tração por compressão diametral da segunda campanha experimental e B0/controle.....	126
Tabela 35 – Resistência à tração na flexão da segunda campanha experimental e B0/controle.....	128
Tabela 36 – Absorção de água por imersão da segunda campanha experimental e B0/controle.....	129
Tabela 37 – Índice de vazios da segunda campanha experimental e B0/controle.....	130
Tabela 38 – Coeficiente de permeabilidade à carga constante da segunda campanha experimental e B0/controle.....	131
Tabela 39 – Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável da segunda campanha experimental e B0/controle.....	133
Tabela 40 – Resumo das campanhas experimentais.....	135

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 Objetivo geral .....	20
2.2 Objetivos específicos .....	20
<b>3 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>21</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
4.1 Drenagem urbana .....	24
4.2 Concreto permeável .....	29
4.2.1 Pavimento de concreto permeável .....	33
4.2.2 Referencial teórico: dosagem concreto permeável .....	38
4.3 Produção da cana-de-açúcar .....	40
4.3.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) .....	42
4.3.2 Referencial teórico: CBC em substituição ao cimento Portland em concretos .....	48
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS: PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>52</b>
5.1 Materiais constituintes .....	52
5.2 Métodos .....	54
5.2.1 Caracterização dos agregados graúdos .....	54
5.2.2 Planejamento experimental .....	58
5.2.3 Dosagem .....	59
5.2.4 Mistura .....	60
5.2.5 Adensamento .....	61
5.2.6 Ensaios em estado fresco .....	63
5.2.7 Ensaio de resistência à compressão .....	64
5.2.8 Ensaios de resistência à tração por métodos indiretos .....	65
5.2.8.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	66
5.2.8.2 Ensaio de resistência à tração na flexão .....	67
5.2.9 Ensaio de imersão em água para determinação do índice de vazios e absorção de água .....	69
5.2.10 Ensaios do coeficiente de permeabilidade .....	71
5.2.10.1 Ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga constante .....	73
5.2.10.2 Ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga variável .....	75

5.2.10.3 Ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável .....	76
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO: PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>79</b>
6.1 Resistência à compressão.....	79
6.2 Ensaio de resistência à tração por métodos indiretos .....	81
6.2.1 Resistência à tração por compressão diametral .....	81
6.2.2 Resistência à tração na flexão .....	82
6.3 Ensaio de imersão .....	84
6.3.1 Absorção de água por imersão .....	84
6.3.2 Determinação do índice de vazios .....	85
6.4 Ensaio de permeabilidade .....	86
6.4.1 Coeficiente de permeabilidade à carga constante e à carga variável .....	86
6.4.2 Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável .....	88
6.5 Resumo da primeira campanha experimental .....	89
<b>7 MATERIAL E MÉTODOS: PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>91</b>
7.1 Materiais constituintes .....	91
7.2 Métodos .....	91
7.2.1 Caracterização dos agregados graúdos .....	91
7.2.2 Processo para utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) .....	92
7.2.2.1 Coleta .....	92
7.2.2.2 Estocagem .....	93
7.2.2.3 Peneiramento primário .....	93
7.2.2.4 Secagem .....	94
7.2.2.5 Requeima .....	95
7.2.2.6 Moagem e determinação da finura da CBC por meio da peneira 45 µm .....	97
7.2.2.7 Análise granulométrica .....	103
7.2.2.8 Massa específica .....	107
7.2.2.9 Superfície específica .....	109
7.2.2.10 Caracterização física da CBC como material pozolânico .....	111
7.2.2.10.1 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias .....	111
7.2.2.10.2 Atividade pozolânica com cal aos 7 dias .....	113

<b>7.2.2.11 Caracterização química da CBC como material pozolânico .....</b>	<b>116</b>
<b>7.2.2.11.1 Teor de umidade .....</b>	<b>116</b>
<b>7.2.2.11.2 Perda ao fogo .....</b>	<b>118</b>
<b>7.2.3 Planejamento experimental .....</b>	<b>119</b>
<b>7.2.4 Dosagem .....</b>	<b>121</b>
<b>7.2.5 Ensaio em estado fresco .....</b>	<b>122</b>
<b>8 RESULTADOS E DISCUSSÃO: SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>124</b>
<b>8.1 Resistência à compressão.....</b>	<b>124</b>
<b>8.2 Ensaio de resistência à tração por métodos indiretos .....</b>	<b>126</b>
<b>8.2.1 Resistência à tração por compressão diametral .....</b>	<b>126</b>
<b>8.2.2 Resistência à tração na flexão .....</b>	<b>127</b>
<b>8.3 Ensaio de imersão .....</b>	<b>129</b>
<b>8.3.1 Absorção de água por imersão .....</b>	<b>129</b>
<b>8.3.2 Determinação do índice de vazios .....</b>	<b>130</b>
<b>8.4 Ensaio de permeabilidade .....</b>	<b>131</b>
<b>8.4.1 Coeficiente de permeabilidade à carga constante e à carga variável em revestimento de pavimento permeável.....</b>	<b>131</b>
<b>8.5 Resumo das campanhas experimentais .....</b>	<b>134</b>
<b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>136</b>
<b>9.1 Recomendações para pesquisas futuras .....</b>	<b>138</b>
<b>10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>140</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para Tucci (2005), o aumento da quantidade de áreas impermeáveis é um dos principais reflexos do avanço da urbanização. As pavimentações das áreas que anteriormente possuíam infiltração natural resultam em superfícies onde apenas o escoamento superficial das águas é possível. Como consequência ocorrem alterações nos leitos dos rios e dos canais, bem como o aumento no volume e constância das enchentes e alagamentos.

Por sua vez, o meio técnico e científico, preocupado com essa realidade vem se mobilizando na criação de materiais que permitam um escoamento melhorado das águas que incidem sobre as superfícies do meio urbano. De acordo com Batezini (2013), a pavimentação em concreto permeável contribui com a drenagem urbana, pois permite o recarregamento dos aquíferos subterrâneos e a redução da velocidade e quantidade do escoamento superficial das águas pluviais. Além disso, favorece com a utilização mais eficiente do solo, uma vez que, minimiza, ou até dispensa outras obras de microdrenagem local como pontos de acúmulo de água.

Segundo Mazzonetto (2011), o pavimento permeável é caracterizado por possuir elevada porosidade e boa drenabilidade, dependendo da sua composição. Devido a essa capacidade de deixar a água infiltrar através de sua superfície porosa, a utilização dessas estruturas, quando corretamente projetadas e implantadas, pode influenciar significativamente nas vazões de pico que ocorrem durante eventos de chuva em determinado local.

Para Monteiro (2010), o concreto permeável pode ser utilizado em grande parte das superfícies urbanas comunitárias, tais como calçadas, estacionamentos, praças, parques e áreas externas, como vias locais e pequenos acessos. Considerado também uma solução ecologicamente correta e sustentável, vem ganhando destaque e relevância na indústria da construção civil, sobretudo por ser reconhecido pelo Conselho de Construções Ecológicas dos EUA (United States Green Building Council - USGBC), que define o sistema LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) de classificação de construções sustentáveis (BOTTEON, 2017).

Em contrapartida, os materiais constituintes convencionais para a fabricação do concreto permeável aumentam a exploração de recursos naturais e contribui com os problemas ambientais existentes, fazendo com que minimize seu potencial ambiental.

Isto posto, o cimento Portland (material constituinte do concreto permeável) é, depois da água, o produto mais utilizado em todo o mundo (DUXSON; PROVIS, 2008). Cerca de 1,7 bilhões de toneladas deste material são fabricadas por ano no mundo, o suficiente para produzir 6 km<sup>3</sup> de concreto por ano (GARTNER, 2004). Estima-se que esse valor vai superar a casa de 3 bilhões de toneladas/ano em 2020 (KAWABATA, 2008). No Brasil, o acumulado do ano (janeiro a agosto de 2021) registrou um total de 43,4 milhões de toneladas vendidas, aumento de 11,4% comparado ao mesmo período do ano anterior (ABCP, 2021).

Desta forma, com o crescimento do consumo de concreto, tem-se a necessidade do aumento da produção do aglomerante cimento, gerando efeitos danosos ao meio ambiente, representando uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), por tonelada de clínquer produzido (matéria prima básica do cimento Portland, resultante da calcinação de uma mistura de calcário, argila e de componentes químicos como o silício, o alumínio e o ferro), além de outros gases intensificadores do efeito estufa, como CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, em proporções menores (MEHTA, 1999). Para Scrivener *et al.* (2008) a indústria do cimento é responsável por cerca de 5 % a 8 % das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>, contribuindo assim de forma significativa para as mudanças climáticas.

De acordo com Maury e Blumenschein (2012), com os impactos do processo de industrialização se intensificando no século XIX, os problemas ambientais tornaram-se presentes nas discussões sobre as condições sanitárias e de saúde, onde a partir dos anos 1970, houve o aumento dos danos gerados pelos impactos ambientais causados pela produção industrial, seja por emissão de gases poluentes ou em razão do acúmulo de resíduos no meio ambiente.

Para Filho (2012), a busca de estratégias para a reciclagem de grandes volumes de resíduos e dejetos das mais variadas origens, resultado do desenvolvimento da sociedade moderna, é um dos grandes desafios da atualidade. No mundo inteiro estão surgindo iniciativas para regular e controlar a gestão destes subprodutos, a fim de preservar o meio ambiente, lançados sem muito cuidado na natureza. Este problema se agrava, pois, a quantidade de resíduos gerados tem sido crescente, principalmente em países em desenvolvimento, incluindo o Brasil.

Grande parte dos resíduos gerados pode ser reciclada, reutilizada, transformada e incorporada, de modo a produzir novos materiais de construção e

atender à crescente demanda por tecnologia alternativa de construção mais eficiente, econômica e sustentável (SAVASTANO, 2003).

Dentre os resíduos, destacam-se as cinzas oriundas de diferentes atividades agroindustriais, que apresentam altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, podendo ter características pozolânicas. A propriedade da pozolana é a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Neste sentido, a possibilidade de incorporação de produtos oriundos de resíduos minerais e agroindustriais, como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), com enfoque na substituição parcial do cimento nas misturas de concreto, tem contribuído para o desenvolvimento desta tecnologia e despertando interesse de vários pesquisadores, como exemplo, SINGH *et al.*, 2000; VALENCIANO e FREIRE, 2004; CORDEIRO *et al.*, 2006; NUNES *et al.*, 2008; CORDEIRO *et al.*, 2009b; RUKZON e CHINDAPRASIRT, 2012; BAHURUDEEN *et al.*, 2015. Nessas pesquisas, as cinzas CBC foram beneficiadas através de processos de requeima e moagem, para eliminação de material orgânico e aumento da quantidade de finos, com o intuito de aprimorar sua propriedade.

Na tentativa de minimizar os problemas gerados pelo subproduto CBC, muitas vezes despejados em lavouras e lugares inapropriados, se vai de ponto ao encontro de duas vantagens principais referentes aos aspectos econômicos e ambientais; do ponto de vista econômico, reduzindo o consumo de cimento, se estará, na mesma proporção, diminuindo o elevado consumo de energia durante o processo de clinquerização e também agregando valor ao resíduo; do ponto de vista ambiental, além de propiciar um destino correto aos resíduos, diminuindo as possibilidades das mais variadas formas de contaminação, se estará reduzindo os efeitos danosos causados pela emissão de CO<sub>2</sub> na natureza, durante o processo de fabricação do cimento (FILHO, 2012).

Segundo Rezende (2016), a utilização pela construção civil de resíduos gerados, independentemente de quais setores da economia, é vantajosa, não apenas em virtude do aumento da atividade industrial e agroindustrial e, conseqüentemente, de subprodutos, mas, sobretudo, devido à redução da disponibilidade de matérias-primas não renováveis, tão necessárias também às atividades da construção civil convencional.

Sendo assim, a possibilidade de incorporação de resíduos agroindustriais como a CBC ao concreto, merece destaque no Brasil, principalmente em razão de grandes montantes gerados atualmente, onde a produção atual de cana-de-açúcar atinge 665,105 milhões de toneladas por ano (CONAB, 2021), sendo que 0,7% permanecem sob a forma de cinza residual, resultando em aproximados quatro milhões de toneladas.

Diante do exposto, o presente trabalho, em contribuição à pesquisa de materias que contribui para o meio ambiente e ao urbano, analisa o desempenho das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, produzido com substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), oriundo do subproduto gerado pela usina sucroalcooleira Companhia Melhoramentos Norte do Paraná. Por conseguinte, visa a viabilidade da aplicação do concreto permeável estudado como revestimento para pavimento de tráfego leve e de pedestres em ambiente urbano, conforme a NBR 16416 (2015), contribuindo como medida mitigadora às carências dos sistemas de drenagem de forma eficiente e sustentável.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o desempenho das propriedades mecânicas (resistências à compressão e tração na flexão) e hidráulicas (índice de vazios e permeabilidade) do concreto permeável, produzido com substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), como uso para tráfego leve e de pedestres em revestimento para pavimento em ambiente urbano, conforme a NBR 16416 (2015).

### **2.2 Objetivos específicos**

Primeira campanha experimental:

- Analisar diferentes combinações do uso de agregado graúdo comercializado na cidade de Umuarama-PR para a composição granulométrica do concreto permeável;
- Verificar as propriedades mecânicas e hidráulicas que viabilize o uso do concreto permeável como revestimento de pavimento urbano, atendendo os requisitos da NBR 16416 (2015);
- Definir a granulometria do concreto permeável controle, como base de referência da primeira campanha experimental, sem o uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).

Segunda campanha experimental:

- Analisar diferentes processos de beneficiamento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC);
- Identificar determinadas características físico-químicas da CBC e possíveis efeitos pozolânicos;
- Verificar as propriedades mecânicas e hidráulicas que viabilize o uso do concreto permeável como revestimento de pavimento urbano, produzido com substituição parcial do cimento Portland por CBC, atendendo os requisitos mínimos da NBR 16416 (2015).

### 3 JUSTIFICATIVA

A urbanização crescente das cidades brasileiras traz consigo graves problemas de infraestrutura como: a gestão de resíduos, o abastecimento de água, saneamento básico, mobilidade urbana, ocupação desordenada, impermeabilização das superfícies gerando o aumento de alagamentos e inundações (VIDAL, 2014).

De acordo com o IBGE (2019a), dos 5.570 municípios brasileiros, apenas 25% possuem Plano Diretor contemplando prevenção de enchentes e somente 23% destes declararam ter Lei de Uso e Ocupação do Solo prevendo essas situações. Neste contexto, a proporção de municípios afetados pelos desastres naturais é mais alta nas áreas urbanas, devido a construção de moradias, pavimentos e outras obras que interferem na drenagem da água das chuvas.

Para controlar melhor o uso e ocupação dos solos, auxiliando a rede de drenagem das cidades, houve a necessidade de criação do índice de taxa de permeabilidade nos documentos de zoneamento e planejamento urbano, onde a taxa de permeabilidade é a razão entre a área que deve ser deixada permeável e a área do lote privado, indicado em sua maioria superfícies gramadas que possibilitam fácil permeabilidade. O início dessa abordagem pode ser localizado no limiar da década de noventa, e uma iniciativa concreta nesse sentido foi proposta em São Paulo, ao ser feita a revisão de seu Código de Obras e Edificações, através da Lei nº 11.228, de 25 de junho de 1992, que dispôs na seção sobre as condições gerais de implantação e de fechamento de terrenos edificados (SÃO PAULO, 1992).

Entretanto, nem sempre esse tipo de solução para área permeável permite a mobilidade e, por isso, muitas vezes, como identificado visivelmente nos lotes urbanos na cidade de Umuarama-PR, deixa-se de se cumprir a legislação, impermeabilizando o solo para que passe a existir maior facilidade de circulação onde for necessário.

Portanto, um dos passos para contribuir com o sistema de drenagem urbana é o pavimento permeável, desenvolvido como alternativa para assegurar a permeabilidade dos solos e ainda assim possibilitar áreas de circulação e mobilidade, além de reduzir o escoamento superficial, quando comparado aos pavimentos comuns. Desta forma, atentando ao objetivo nº 11 da ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015), o uso do pavimento permeável, de forma consciente e correta, torna as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.

Como segunda contribuição ao urbano e à sustentabilidade, essa pesquisa desenvolve estudos visando a viabilidade da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material substituto parcial do cimento Portland na produção do pavimento de concreto permeável, potencializando-o como material sustentável, inserido em sua composição o subproduto gerado pela indústria sucroalcooleria.

Por conseguinte, para Câmara (2015), a utilização da CBC em substituição parcial ao cimento auxilia na redução do passivo ambiental, quando o resíduo apresenta em sua constituição metais pesados e é descartado em lugares impróprios, podendo acarretar riscos de contaminação do solo e mananciais de água. Bem como, contribui na redução da extração de matérias-primas provenientes de recursos naturais não renováveis, como exemplos, as jazidas de calcário e argila utilizadas da fabricação do cimento.

Visando mitigar os danos causados pela produção do clínquer e minimizar a utilização do cimento Portland, cientistas estão sempre à procura de resíduos de materiais que podem ser utilizados junto ao cimento na confecção de argamassas e concretos (SINGH *et al.*, 2000). Segundo Sales *et al.* (2010), qualquer cinza, seja de origem vegetal ou industrial, tendo em sua composição a predominância do silício, principalmente quando no estado amorfo, e granulometria refinada, pode ser utilizada como adição mineral. Portanto, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar se mostra potencialmente apta para essa função.

Por conseguinte, a construção civil consome recursos extraídos da natureza, com o agravante de que a maior parte destes não são renováveis, trazendo impactos evidentes ao meio ambiente. Neste sentido, deve-se ressaltar a necessidade de se desenvolver a consciência de que é necessário minimizar os danos causados pela exploração. Desta forma, um dos grandes desafios é diminuir o desperdício de materiais, bem como utilizar formas alternativas para o fabrico destes, a fim da diminuição da extração dos recursos naturais, conciliando a atividade da construção civil com as condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável consciente e menos agressivo ao meio ambiente (CÂMARA, 2015).

Neste contexto, a modificação do meio ambiente por meio da atividade humana, gera impactos nem sempre previsíveis. O homem, como integrante do ecossistema, tem a qualidade de vida afetada pela própria ação. Sendo assim, se faz necessário uma política de desenvolvimento sustentável, tanto para a melhoria da qualidade de vida quanto para a própria sobrevivência da raça humana

(VASCONCELLOS *et al.*, 2004). Logo, a busca pelo desenvolvimento de projetos e pesquisas voltados ao uso racional dos recursos naturais e para a recuperação do meio ambiente se mostram extremamente importante (PAULA, 2006).

Contudo, esta pesquisa agrega novas alternativas ao meio científico, pois não se tem registro, até o momento, de estudos já realizados sobre a utilização de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em concreto permeável. Tão pouco, o uso da CBC em substituição parcial ao cimento Portland em concreto permeável, atendendo aos requisitos mínimos da NBR 16416 (2015), aumentando o potencial sustentável do produto.

Desta forma, este estudo incentiva a redução dos impactos ambientais ao meio ambiente, através do favorecimento da drenagem urbana, redução da extração de recursos naturais não renováveis, como o calcário e argila, redução da emissão de CO<sub>2</sub> e diminuição de resíduos industriais, gerado pela usina sucroalcooleira Companhia Melhoramentos Norte do Paraná, descartados em lugares passíveis de contaminação do solo e mananciais na região do Arenito Caiuá.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Drenagem urbana**

A população mundial apresentou um elevado crescimento populacional urbano no planeta. Esse fenômeno gerou modificações que podem ser observadas em países que estão em fase de desenvolvimento, como os países da América Latina, onde o processo de urbanização tornou-se bastante concentrado e expressivo (JUNIOR; SANTOS, 2013).

Segundo Braga (2016), muitas cidades brasileiras registraram, a partir da segunda metade do século XX, um aumento populacional acelerado e tal fato contribuiu para o desencadeamento de situações vinculadas à ausência de planejamento para subsidiar o processo de expansão urbana, trazendo consigo níveis abusivos de degradação ambiental evidentes no cotidiano urbano.

Para Tucci e Collischonn (2002), devido à ausência do planejamento e mau uso da ocupação do solo, impactos frequentes ocorrem nas cidades urbanizadas, como: o aumento das vazões máximas devido ao aumento da capacidade de escoamento através de condutos e canais e impermeabilização das superfícies; o aumento da produção de sedimentos devido a desproteção das superfícies e a produção de resíduos sólidos; a deterioração da qualidade da água, devido a lavagem das ruas, transporte de material sólido e as ligações clandestinas de esgoto e rede pluvial. Processos estes, fortemente interligados quanto aos impactos indesejáveis sobre a sociedade.

Os custos sociais advindos das inundações e alagamentos urbanos, segundo Haddad e Teixeira (2013), variam desde impactos na saúde humana até efeitos nos preços das habitações e na infraestrutura de transportes, além de prejuízos relacionados à perda de tempo de trabalho e de educação, aos danos nas propriedades e ao estresse psicológico.

Por sua vez, a drenagem urbana tem como objetivo minimizar os riscos do qual as populações estão submetidas, a fim de reduzir os prejuízos causados por inundações, enchentes e alagamentos, possibilitando o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável (JUNIOR e SANTOS, 2014).

O sistema de drenagem tem uma particularidade, quando comparado aos outros melhoramentos urbanos: o escoamento de águas pluviais sempre ocorrerá, independentemente da existência ou não de um sistema de drenagem adequado. A

qualidade desse sistema, por sua vez, determina se os benefícios ou prejuízos à população são maiores ou menores (SÃO PAULO, 2012).

Para tanto, de acordo com Junior e Santos (2014), é necessária a atenção com a impermeabilidade do solo no ambiente urbano, pois altera o ciclo hidrológico nas fases de escoamento superficial e de infiltração, contribuindo para o aumento do escoamento superficial e o impedimento da infiltração de água no solo.

Segundo Silva Júnior e Passos (2006), uma cidade sustentável possui mecanismos de gestão que possibilitam o acesso de todos os cidadãos, seja desta geração ou das futuras, aos bens e equipamentos públicos e às riquezas naturais. Neste sentido, o objetivo da política urbana, conforme o Estatuto da Cidade (Lei 10.257/01), é “ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana”, considerando-se que a função social da propriedade urbana está relacionada ao bem-estar geral da coletividade, e não apenas aos interesses do indivíduo proprietário.

Portanto, os municípios devem valer-se das diretrizes e dos instrumentos do Estatuto da Cidade para estabelecer regras que garantam o direito ao usufruto da cidade a todos os que nela vivem (SILVA JÚNIOR; PASSOS, 2006).

O plano diretor, segundo o Estatuto da Cidade (Lei 10.257/01), “é o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana”, de modo que “a propriedade urbana cumpre sua função social quando atende às exigências fundamentais de ordenação da cidade expressas no plano diretor”. Este é obrigatório para cidades com mais de vinte mil habitantes, incluindo Umuarama-PR, com população estimada de 113.416 mil pessoas (IBGE, 2021).

Para Tucci (2002), apesar da existência desse relevante meio de planejamento urbano, poucos planos diretores municipais conferem a devida atenção à ocupação das áreas de risco de inundações e alagamentos, de modo que, recomenda-se que as cidades brasileiras estabelecessem seus planos diretores de drenagem urbana.

No Brasil, a disponibilidade de serviços de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas (DMAPU) adequados à saúde pública, à segurança da vida e do patrimônio público e privado em todas as áreas das cidades, é um dos princípios fundamentais da Lei Nacional de Saneamento Básico (nº 11.445/2007), onde define que os serviços devem ser inseridos juntamente com limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas, incluindo um conjunto de atividades de infraestruturas

e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais e retenção para o amortecimento de vazões de cheias. Dado que, dos 34,7% municípios brasileiros cadastrados no sistema, 19,6% possuem o plano de DMAPU. Destes, somente 54,3% possuem sistema exclusivo para drenagens das águas pluviais (IBGE, 2019b).

Desta forma, de acordo com Carvalho (2016), a ocupação desordenada dos centros urbanos brasileiros e seus consequentes problemas com a drenagem urbana ainda persistem, ocorrendo aumento nos casos de alagamentos e inundações, devido a impermeabilização do território, ocupação das áreas de várzea dos rios, as quais são naturalmente sujeitas a inundações. A mata ciliar cada vez mais suprimida e os córregos, muitas vezes, retificados e canalizados, transferindo para jusante os efeitos deletérios das inundações.

No município de Umuarama, a exemplo de outros municípios do Noroeste Paranaense, vem, desde sua formação em meados do século XX, experimentando um rápido e desorganizado crescimento demográfico. A cobertura vegetal foi sendo retirada ao longo do tempo para que ocorresse a expansão de construções urbanas, da agricultura e da pecuária. Esse avanço da malha urbana impulsionou o mau uso da ocupação do solo em conjunto com a ocupação inadequada das áreas de cabeceira de drenagem, canalização ou retificação de canais fluviais que cortam as áreas urbanas e a má construção destas canalizações. Grande parte desses problemas geraram impactos sobre as drenagens dentro do ambiente urbano (JUNIOR; SANTOS, 2014).

Para os autores Moraes, Pugliesi e Salvestro (2017), o sistema de drenagem na zona central de Umuarama demonstrou uma baixa permeabilidade no solo causada pela quantidade de construções existentes no local, configurando-se como um fator incisivo à retenção de água na superfície, resultando em um volume do escoamento superficial, ora encaminhado para o sistema de drenagem, quatro vezes superior à capacidade de engolimento das bocas de lobo.

Este fato, por sua vez, ressalta o aumento das ocorrências de alagamentos em pontos centrais da cidade, conforme Figura 1.

**Figura 1** – Pontos de alagamento da região central de Umuarama-PR:

a) Avenida Londrina; b) Avenida Brasil



**Fonte:** PORTAL DA CIDADE (2019); ILUSTRADO (2020).

Em virtude da constante ocorrência destes episódios, a prefeitura municipal, mediante processos de licitações, iniciou em 2020 obras de drenagem em alguns pontos determinados críticos da cidade. Destaca-se a execução do canal de drenagem trapezoidal em concreto armado no Bosque do Xetá de Umuarama-PR e avenida de acesso, localizado próximo ao cruzamento da Avenida Governador Parigot de Souza com a Avenida Presidente Castelo Branco (Figura 2), recursos estes do contrato de Financiamento à Infraestrutura e Saneamento (Finisa), no valor de R\$ 1.144.818,24, conforme divulgação da Prefeitura de Umuarama (2020).

**Figura 2** – Obra canal de drenagem em Umuarama-PR



**Fonte:** A autora (2021).

Como apoio à vida útil do sistema de drenagem existente, dentre outras diretrizes, o município de Umuarama-PR dispõe no Plano Diretor Municipal, onde, segundo as leis de uso e ocupação do solo em seus respectivos zoneamentos, ressalta a exigência da preservação das taxas mínimas de área permeável do solo para cada lote urbano.

Contudo, constata-se que o sistema de fiscalização pública municipal não acompanha o comportamento dos usuários dos imóveis após as liberações das certidões de habite-se e conclusão das obras executadas, dando margem a potencial infração da legislação com o calçamento impermeável parcial ou total da área mínima permeável exigida por lei, como demonstrado na Figura 3.

**Figura 3** – Calçamento impermeável irregular de propriedades particulares em Umuarama-PR



**Fonte:** A autora (2021).

Grande parte dos proprietários de imóveis urbanos, por sua vez, usam como subterfúgio a pavimentação impermeável como um melhor aproveitamento da área útil do terreno e conseqüentemente menor manutenção e cuidados com jardins e canteiros.

Desta forma, Tucci (2003) acentua que a queda da qualidade de vida em áreas urbanas é grande, principalmente, devido aos problemas ambientais gerados pela falta de planejamento e manutenção da drenagem, bem como, a falta de conhecimento generalizado da população sobre o assunto. Parte desse problema vem da concepção inadequada dos profissionais de engenharia para com o planejamento e o controle dos sistemas, tendo, na maioria das vezes, uma visão setorializada do planejamento urbano, conjugada com a falta de capacidade gerencial dos municípios.

Diante do exposto, a drenagem urbana sofre fortes alterações devido principalmente à impermeabilização da superfície do solo, obras de drenagem que são realizadas de forma insustentável e ações individuais irregulares à impermeabilização do solo, apresentando desta forma, grande impacto ambiental e social ao contexto urbano.

Percebe-se por fim, que se faz necessário conciliar os interesses da poluição e órgãos públicos atuantes para se obter um planejamento de drenagem urbana

satisfatório e, conseqüentemente, combater de modo eficaz os efeitos adversos das inundações e alagamentos nas cidades.

#### 4.2 Concreto permeável

Para reverter o cenário do impacto ambiental que a impermeabilização urbana acarreta ao meio ambiente, tanto direta como indiretamente, é necessária a adoção de tecnologias mais limpas, que permitam uma maior infiltração da água pluvial, tal como os pavimentos de concreto permeável ou poroso.

A ABCP (2017) define que, independentemente do revestimento, os pavimentos permeáveis são aqueles que permitem a infiltração de água. Para Martins (2014) os pavimentos permeáveis possuem superfícies drenantes que promovem a infiltração, armazenamento e percolação, total ou parcial, da água advinda do escoamento superficial para o interior de uma camada de armazenamento temporário no terreno, na qual é absorvida gradualmente pelo solo.

Neste sentido, o concreto permeável é produzido com os mesmos materiais utilizados na composição do concreto de cimento Portland convencional, com a diferença de que a quantidade de agregados miúdos é muito reduzida, ou na maioria das vezes nula, conforme a Figura 4. (ACI, 2006; TENNIS, LEMING, AKERS, 2004).

**Figura 4** – Concreto permeável produzido sem adição de agregado miúdo



**Fonte:** A autora (2021).

Já National Ready Mixed Concrete Association (2010) menciona que o concreto permeável, por apresentar pouca ou nenhuma quantidade de agregados miúdos, possui uma textura única na superfície, consistindo em uma elevada rugosidade superficial, que faz com que o coeficiente de atrito sofra um aumento considerável

quando comparado ao concreto tradicional. Este, por sua vez, é composto de agregados angulares e circulares, como o cascalho e a brita, e uma vez que os mesmos se encontram expostos, acabam por melhorar o poder de tração do tráfego de pedestres e veículos, prevenindo escorregamentos e derrapagens (BATEZINI, 2013; MARTINS, 2014; SCHWETZ *et al.*, 2015).

Segundo Batezini (2013), as proporções dos materiais variam dependendo dos tipos de insumos disponíveis no local de uso, sendo o correto sempre realizar experimentos e procedimentos de dosagem em laboratório, que servirão de subsídio para a melhor definição de tais proporções (dosagem racional).

As proporções utilizadas nas misturas de concreto permeável são geralmente muito mais restritas com relação às misturas de concreto comum, sendo que normalmente é necessário um controle visual rigoroso na sua produção para que se consigam obter as características desejadas no produto final (TENNIS, LEMING, AKERS, 2004).

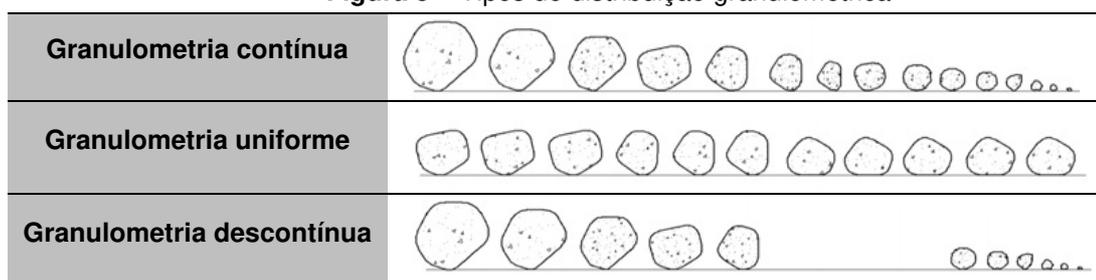
A relação cimento/agregado e o procedimento de compactação ou adensamento a ser utilizado na produção de concretos permeáveis são os dois fatores mais importantes da mistura, que afetam diretamente as características mecânicas do material (ACI, 2006). Os cimentos para a produção de misturas de concreto permeável não apresentam restrição quanto ao tipo (TENNIS, LEMING, AKERS, 2004).

Na elaboração do concreto permeável pode-se trabalhar com agregados graúdos de granulometria contínua, uniforme ou descontínua. Portanto, para permitir a máxima drenagem de água recomenda-se a uniforme e para ter um melhor comportamento mecânico a granulometria contínua. Alguns autores recomendam que o diâmetro máximo nominal seja 10 mm (CASTRO *et al.*, 2009).

Das (2007) ensina que a partir da curva granulométrica pode-se definir a maneira que os grãos estão distribuídos segundo a seguinte classificação (Figura 5):

- Granulometria contínua: os grãos são distribuídos em uma ampla faixa com vários tamanhos;
- Granulometria uniforme: maioria dos grãos com o mesmo tamanho;
- Granulometria descontínua: existe uma faixa incompleta de grãos.

**Figura 5** – Tipos de distribuição granulométrica



**Fonte:** Adaptado de Caputo (1988).

Quanto a água, recomenda-se utilizar água potável, a qual não altera as propriedades em estado fresco e endurecido do material (TENNIS, LEMING, AKERS, 2004). Podem ser utilizadas fibras de vidro, aço, ou poliméricas no intuito de melhorar propriedades como a flexo-tração e o desgaste.

Finalmente, podem ser utilizados aditivos químicos plastificantes e ou redutores de água de elevada efetividade no intuito de melhorar a plasticidade do material e conseguir obter um maior tempo de trabalho para a mistura.

Para a densidade do concreto permeável, depende das propriedades e das proporções dos materiais usados e também dos procedimentos de compactação. Densidades locais na ordem dos 1600 kg/m<sup>3</sup> a 2000 kg/m<sup>3</sup> são comuns e configuram como concretos mais leves (HOLTZ, 2011).

As quantidades de água e de ligante hidráulico empregadas na composição do concreto permeável são cuidadosamente controladas com a finalidade de se obter uma pasta que forme uma capa espessa ao redor das partículas dos agregados. A mistura possuindo pequena ou nula quantidade de agregado miúdo, obtém um material com elevado índice de vazios, que, com auxílio da interconectividade entre seus vazios, apresentará boa permeabilidade (BATEZINI, 2013).

O concreto permeável não é tão afetado quanto o concreto convencional com relação a secagem e retração. Os valores de retração dependem do traço e dos seus materiais constituintes, mas valores da ordem de metade da retração observada nas misturas convencionais foram reportados (National Ready Mixed Concrete Association, 2010). A baixa quantidade de pasta ou argamassa (quando se usa uma pequena parcela de areia na mistura) é a principal explicação para tal fato.

A relação água/cimento tem menor efeito nas propriedades do concreto permeável (HUANG *et al*, 2010). Esta é uma variável que depende da quantidade e tipo de cimento e da granulometria do agregado. Utiliza-se como critério para

determinar esse valor, a quantidade de água em que a pasta adquire brilho metálico. Geralmente esse valor está entre 0,24 e 0,45 (AZAÑEDO; HELARD; MUÑOZ, 2007).

Por conseguinte, Lian e Zhuge (2010) estudaram as relações água/cimento entre 0,30 e 0,38 e concluíram que para relação água/cimento maior que 0,34 a resistência à compressão diminui e a permeabilidade aumenta. Os melhores resultados foram obtidos a 0,32 e não se recomenda relação água-cimento menor que 0,30, pois pode causar fissuras no concreto, devido à retração que ocorre durante o endurecimento do material e dificuldade no processo de adensamento, provocando falhas de concretagem.

Segundo Holtz (2011), o concreto permeável geralmente apresenta uma resistência à compressão na faixa de 3,5 a 28 MPa. No entanto, para Mariano (2014), esse valor pode chegar a 35 MPa.

Para garantir a permeabilidade às águas pluviais, é muito importante que se formem vazios interligados, essencial para a caracterização do concreto permeável. Por essa razão, na maioria das misturas, não se utiliza agregado miúdo (areia), sendo o concreto confeccionado apenas com água, cimento e agregado graúdo, enquadrando-se assim, com brita 0 ou brita 1 (BATEZINI, 2013).

A condutividade hidráulica através de sua estrutura (taxa de percolação ou coeficiente de permeabilidade) é um dos parâmetros mais importantes do concreto permeável, embora os resultados possam variar, a depender principalmente da composição do concreto e da qualidade do processo executivo. Pesquisas apontam que os valores típicos do coeficiente de permeabilidade de concretos permeáveis para revestimento de pavimentos, expresso pelo parâmetro que representa a velocidade com que uma determinada quantidade de água percola um elemento ou estrutura permeável, variam entre 0,1 cm/s e 0,54 cm/s e determinaram valores de condutividade hidráulica no campo entre 0,07 cm/s a 0,77 cm/s. Valores estes superiores a  $10^{-3}$  m/s, onde caracteriza-se a capacidade de infiltração da maioria dos solos (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; BEAN; HUNT; BIDELESPACH, 2007; DELATTE *et al.*, 2009; HOLTZ, 2011).

Dependendo das condicionantes de projeto, o pavimento de concreto permeável e sua sub-base apresentam propriedades de armazenamento de água para uso como equipamento de drenagem urbana. Também se verifica efeito positivo de conforto ambiental, tendo em vista que, quando aplicado como pavimento permeável, o concreto poroso apresenta temperatura menor quando se compara a

temperatura do capeamento betuminoso nas mesmas condições de exposição direta a radiação solar (SCHWETZ *et al.*, 2015).

Entre os benefícios ambientais e econômicos decorrentes da utilização da pavimentação permeável, podem ser citados:

- Redução dos danos ambientais e urbanos decorrentes da impermeabilização dos solos ao permitir a infiltração direta de água para os aquíferos, conforme estudado por Danciguer e Reis (2016) o que gera uma consequência positiva na economia de água tratada pelo aproveitamento da água de chuva acumulada;
- Redução do pico das cheias, apontada por Tucci (2012) e Alencar (2013), que pode possibilitar economia no sistema de drenagem urbana e colaborar na diminuição de ocorrência de enchentes;
- Redução das ilhas de calor pela menor absorção de calor que os pavimentos escuros proporcionam e a contribuição para a oferta de ar e água para as raízes das árvores localizadas nas adjacências do concreto permeável (SCHWETZ *et al.*, 2015).
- Amenização, ou em alguns casos, eliminação do escoamento superficial (ALENCAR, 2013).

Desta forma, os impactos urbanos serão menores com o uso inteligente do concreto permeável de forma a reduzir ou retardar a onda de cheia, visto que, no cenário urbano há um grande volume de água de escoamento superficial que compromete a drenagem e conseqüentemente o bem-estar social.

#### **4.2.1 Pavimento de concreto permeável**

O pavimento permeável, atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura (NBR 16416, 2015). Assim, esse tipo de estrutura visa compensar os efeitos da urbanização na fonte causadora do problema, contribuindo para que a água das chuvas não aumente os níveis das redes de drenagem, sobrecarregando as mesmas.

Neste sentido, os pavimentos permeáveis de concreto permeável podem ser executados conforme as tipologias de revestimentos apresentadas na Figura 6.

**Figura 6** – Tipologia de revestimentos de pavimentos de concreto permeável

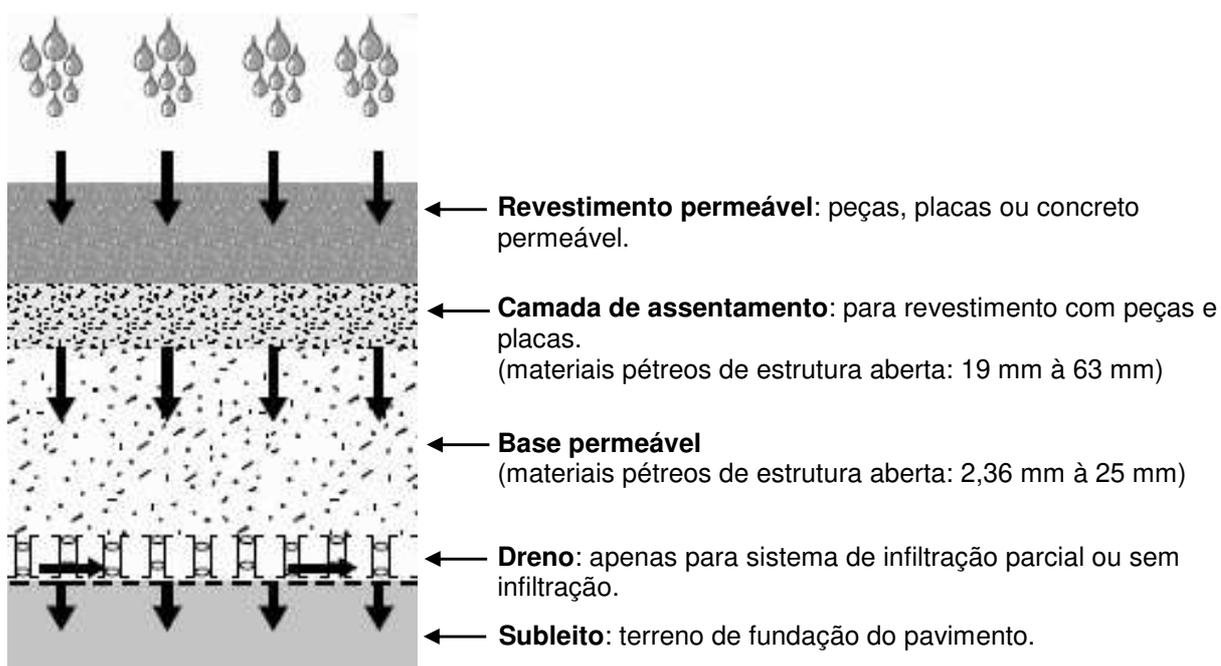
<b>Revestimento de peças de concreto permeável</b>	A percolação de água ocorre por peças de concreto permeável	
<b>Revestimento de pavimento de placas de concreto permeável</b>	A percolação de água ocorre pelo concreto da placa	
<b>Revestimento de pavimento de concreto permeável moldado no local</b>	A percolação de água ocorre pelo concreto	

**Fonte:** Adaptado de NBR 16416 (2015).

O pavimento de concreto permeável, segundo a NBR 16416 (2015), pode ser concebido de três diferentes maneiras em relação à infiltração de água precipitada. A escolha do sistema de infiltração depende das características do solo ou de condicionantes de projeto. Os sistemas de infiltração são classificados a seguir e representados conforme a Figura 7:

- Infiltração total, onde toda a água precipitada alcança o subleito (solo permeável) e se infiltra;
- Infiltração parcial, onde parte da água precipitada alcança o subleito e se infiltra, porém, parte da água fica temporariamente armazenada na estrutura permeável, sendo depois removida por dreno;
- Sem infiltração, onde a água precipitada fica temporariamente armazenada na estrutura permeável e não infiltra no subleito, sendo depois removida pelo dreno.

**Figura 7** – Representação do sistema de infiltração para pavimento permeável



Fonte: Adaptado de NBR 16416 (2015).

Sendo assim, os locais revestidos com pavimentos permeáveis devem permitir a percolação de 100% de água precipitada incidente sobre esta área, bem como 100% da precipitação incidente sobre as áreas de contribuição consideradas no projeto, desde que cumpridas as especificações desta norma (NBR 16416, 2015).

Portando, no caso de pavimentos permeáveis que não possuem reservatório, a água que permeia no pavimento deve infiltrar no solo, sendo que o mesmo deve possuir essa capacidade de infiltração.

Segundo Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), solos com um percentual superior a 30% de argila ou 40% de silte e argila combinados, não são eficientes para servirem de base para esse tipo de pavimento, pois podem não possuir permeabilidade satisfatória.

De acordo com Bigarella e Mazuchowski (1985) e a Organização dos Estados Americanos - OEA (1973), a cidade de Umarama-PR, situada na região do Arenito Caiuá, tem predominância de solos com textura arenosa e média (entre 0,20mm e 0,60mm), conforme a especificação da NBR 6502 (1995), associados à ocorrência de arenitos da formação Caiuá. Estes por sua vez, são caracterizados por predominância de solos argilosos e latossolos, com porcentagem superiores à 30 % e 40% de argila e silte.

Para tanto, a utilização do sistema de pavimentos permeáveis é recomendada também para regiões com solo com pouca permeabilidade, pois contribui com a drenagem da água de chuva diferentemente do uso de pavimentação comum, totalmente impermeável.

Visando contribuir com a eficiência do sistema de pavimento permeável, nos locais onde o solo não possui boa permeabilidade, o uso do sistema de infiltração parcial ou sem infiltração é uma alternativa assertiva. Desta forma, a destinação da água infiltrada, captada por dreno, pode ser armazenada em um reservatório (cisterna) para posterior uso. Esta ação, mantém como medida mitigadora preventiva à drenagem urbana e ressalta a importância do sistema, somada a viabilidade do aproveitamento da água da chuva, consolidando-a de forma eficiente e sustentável.

Sendo assim, o projeto de pavimento permeável, segundo a normativa, deve-se considerar o tipo de uso e o local de implantação, sendo que, a definição dos materiais e espessuras das camadas a serem executadas devem atender concomitantemente aos dimensionamentos mecânico e hidráulico recomendados pela norma.

Para o dimensionamento da camada de revestimento de concreto permeável, deve-se atender os valores mínimos especificados na Tabela 1, apropriado para cada tipo de tráfego.

**Tabela 1** – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

<b>Tipo de revestimento</b>	<b>Tipo de solicitação</b>	<b>Espessura mínima (mm)</b>	<b>Resistência mecânica característica (MPa)</b>	<b>Método de ensaio</b>
Peça de concreto permeável	tráfego de pedestres	60,0	≥ 20,0	NBR 9781 (2013) <b>Resistência à compressão</b>
	tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	tráfego de pedestres	60,0	≥ 2,0	NBR 15805 (2015) <b>Resistência à flexão</b>
	tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	tráfego de pedestres	60,0	≥ 1,0	NBR 12142 (2010) <b>Resistência à tração na flexão</b>
	tráfego leve	100,0	≥ 2,0	

**Fonte:** Adaptado de NBR 16416 (2015).

De acordo com a Tabela 1, entende-se como tráfego de pedestres o uso exclusivo do pavimento por pedestres, sendo vetada a passagem de qualquer veículo

automotor. Já para o tráfego leve, a solicitação do pavimento ao uso preferencial de veículos leves, como ciclomotor, motoneta, motocicleta, triciclo, quadriciclo, automóvel, utilitário, caminhonete e camioneta, com volume médio diário de até 400 veículos, podendo existir ocasionalmente o tráfego de ônibus e caminhões em número não superior a um volume diário médio de 20 veículos.

Seguindo a normativa, o pavimento permeável deve apresentar, quando recém-construído, independentemente do tipo de revestimento adotado, o coeficiente de permeabilidade maior que  $10^{-3}$  m/s. Este pode ser previamente avaliado em laboratório, podendo-se ensaiar apenas a camada de revestimento ou o revestimento juntamente com toda a estrutura do pavimento. Após a execução completa do pavimento, este requisito deve ser avaliado em campo para aprovação final.

A Tabela 2 resume as considerações para a determinação do coeficiente de permeabilidade em campo e em laboratório.

**Tabela 2** – Determinação do coeficiente de permeabilidade

Tipo de revestimento	Método de ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído (m/s)
	Local de avaliação		
	Em laboratório	Em campo	
Peça de concreto permeável	NBR 13292 (1995) <b>Permeabilidade à carga constante</b> ou NBR 16416 (2015) <b>Permeabilidade à carga variável de pavimento permeável</b>	NBR 16416 (2015) <b>Permeabilidade à carga variável de pavimento permeável</b>	$> 10^{-3}$
Placa de concreto permeável			
Concreto permeável moldado no local			

Fonte: Adaptado de NBR 16416 (2015).

Quando o pavimento permeável, após determinado período de utilização, apresentar coeficiente de permeabilidade menor ou igual a  $10^{-5}$  m/s, deve-se executar ações de limpeza com o objetivo de recuperar a capacidade de permeabilidade do pavimento, conforme a NBR 16416 (2015).

Neste sentido, o revestimento que compõe o pavimento permeável deve ser avaliado em laboratório antes de sua aplicação em campo. Para tanto, ensaios mecânicos (resistências à compressão e tração na flexão) e hidráulicas (índice de vazios e permeabilidade) devem ser realizados para verificar em qual categoria quanto ao tipo de solicitação de tráfego se enquadra.

#### 4.2.2 Referencial teórico: dosagem concreto permeável

Destaca-se a pesquisa de Sandoval (2014), realizada na cidade de Londrina, Paraná, onde utilizou-se como referencial a dosagem do concreto permeável estudado por Vélez (2010), na Colômbia.

O traço em massa de Sandoval (2014), 1:3,26 (cimento:brita) com relação água/cimento de 0,34, foi o mesmo utilizado na pesquisa de Veléz (2010).

O trabalho de Veléz (2010) avaliou as propriedades mecânicas, mas não as hidráulicas do concreto permeável. Já Sandoval (2014), no intuito de melhorar e refazer os resultados obtidos por este autor, decidiu trabalhar com o traço em massa fixado por ele. Este por sua vez, não aplicou aditivo químico e adição mineral em sua composição.

Afim de selecionar a granulometria ideal para produção do concreto poroso/permeável, utilizou-se do agregado graúdo basalto de dimensão máxima 9,5 mm (brita 0) e 19 mm (brita 1) da região de Londrina, Paraná. Os resultados para a massa específica dos agregados foram de 2,80 g/cm<sup>3</sup>; massa unitária entre 1,5 g/cm<sup>3</sup> a 1,67 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água entre 1,20 % a 1,42 %.

Para fazer a composição granulométrica, Sandoval (2014) utilizou a brita zero (B0), brita um (B1) e outra amostra com 50 % de brita zero e 50 % de brita um. A resposta média, aos 28 dias de cura, das propriedades mecânicas (resistência à compressão; resistência à flexo-tração) e hidráulica (permeabilidade à carga variável e à constante), bem como, seus respectivos desvios padrão e coeficiente de variação e os resultados de porcentagem de vazios, no primeiro e segundo ensaios realizados pelo autor, podem ser visualizados na Tabela 3 e Tabela 4.

**Tabela 3 – Resultados do primeiro ensaio**

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>B0</b>	<b>B1</b>	<b>50/50</b>
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	9,49	9,96	19,19
Desvio padrão	0,55	3,24	0,57
Coef. De variação (%)	5,79	32,51	2,99
<b>Resistência à flexo-tração (MPa)</b>	1,49	1,28	1,83
Desvio padrão	0,16	0,14	0,26
Coef. De variação (%)	10,50	10,53	14,18
<b>Permeabilidade à carga variável (mm/s)</b>	1,52	2,77	1,56
<b>Porcentagem de vazios (%)</b>	36,44	32,26	31,47

Fonte: Adaptado de Sandoval (2014).

No primeiro ensaio, o concreto permeável (B0) obteve 36,44 % de porcentagem de vazios, enquanto o (B1) atingiu 32,26 %. Na composição (50/50) observa-se uma

redução de vazios para 31,47 %, explicada, segundo o autor, pela sua composição granulométrica mais contínua e pelo arranjo dos grãos depois do processo de compactação.

Conforme Sandoval (2014), a granulometria que apresentou melhor desempenho mecânico no primeiro ensaio, foi o concreto permeável (50/50), porém a amostra (B0) se mostrou melhor quanto ao acabamento mais uniforme e com coeficiente de permeabilidade dentro dos padrões normativos, visando seu uso como revestimento para pavimento.

Em um segundo momento da pesquisa, o autor realizou novamente os ensaios mecânicos e hidráulicos para a composição do concreto permeável (B0), com o agregado basalto de dimensão máxima 9,5 mm e traço 1:3,26. Neste ensaio, obteve a massa específica de 1550 kg/m<sup>3</sup> e medida de consistência (Slump test) zero (0 cm), devido a relação água/cimento ser baixa.

**Tabela 4 – Resultados do segundo ensaio**

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>B0</b>
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	9,56
Desvio padrão	0,51
Coef. De variação (%)	5,30
<b>Resistência à flexo-tração (MPa)</b>	1,57
Desvio padrão	0,06
Coef. De variação (%)	3,82
<b>Permeabilidade à carga variável (mm/s)</b>	1,48
<b>Permeabilidade à carga constante (mm/s)</b>	4,85
<b>Porcentagem de vazios (%)</b>	19,26
Desvio padrão	0,41
Coef. De variação (%)	2,13

**Fonte:** Adaptado de Sandoval (2014).

Conforme as Tabelas 3 e Tabela 4, constata-se que as respostas foram equivalentes, em concordância ao primeiro e segundo ensaios, para as propriedades mecânicas (resistência à compressão; resistência à flexo-tração) e hidráulicas (permeabilidade à carga variável) do concreto permeável (B0). Realizou-se também, no segundo ensaio, a permeabilidade à carga constante, resultando em 4,85 mm/s.

Pode-se observar uma variação importante nas respostas do primeiro para o segundo ensaio, correspondente a porcentagem de vazios no concreto permeável (B0). Enquanto no primeiro ensaio o resultado médio obtido foi de 36,44 %, no segundo ensaio o autor apresentou como resposta 19,26 % de vazios, este com desvio padrão de 0,41 e coeficiente de variação de 2,13. Esta variação entre os

resultados, ocorreu possivelmente, devido ao uso de metodologias distintas na realização dos ensaios, sendo que no primeiro ensaio, com resultados mais dispersos (acima dos encontrados na literatura, entre 10 % a 35 %), aplicou-se cálculo teórico, utilizando a relação entre massa específica e massa unitária das misturas.

### **4.3 Produção da cana-de-açúcar**

Atualmente há uma maior conscientização da população em relação a preservação do meio ambiente, principalmente no que diz respeito aos efeitos danosos do aquecimento global. Tais efeitos são acelerados pela emissão de CO<sup>2</sup> na atmosfera a partir da queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) para geração de energia. Logo, existe a necessidade de gerar energia a partir de fontes renováveis, o que acarreta o aumento da produção de álcool (etanol) oriundo da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é considerada hoje uma das grandes possibilidades para o setor de biocombustíveis devido a sua capacidade de produção de etanol e seus subprodutos. As unidades de produção têm buscado operar com eficiência, inclusive nos setores de geração de energia elétrica, com objetivos econômicos e para contribuir para a sustentabilidade da atividade (CONAB, 2021).

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021) informa, em seu monitoramento agrícola anual e acompanhamento da safra Brasileira da cana-de-açúcar, que o Brasil é o maior produtor mundial da planta, favorecido pelas grandes áreas cultiváveis, condições climáticas, relevo e temperatura do país, tornando-o promissor para a exportação dessa mercadoria. O Paraná ocupa o 5º lugar como maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil. São 29 usinas instaladas, das quais 21 estavam em funcionamento na safra anterior.

Segundo o órgão, as estatísticas estimadas para a produção de cana-de-açúcar para a safra 2020/21 no Brasil deve ser 3,5% maior do que a anterior, atingindo 665,105 milhões de toneladas, segundo dados do terceiro levantamento anual realizado. O volume total é próximo ao recorde histórico, de 665,6 milhões de toneladas, alcançado na safra 2015/16.

Do total de cana, 53,8% devem ser destinados à produção de 29,8 bilhões de litros do biocombustível, sendo o restante utilizado como matéria-prima para a produção de açúcar, estimada em 41,8 milhões de toneladas.

No processo de extração do caldo da cana-de-açúcar a partir da moagem, uma grande quantidade de bagaço é gerada, em torno de 30% da cana moída. No Brasil, cerca de 95% desse bagaço são queimados em caldeiras para geração de vapor, produzindo, como resíduo, a cinza de bagaço da cana-de-açúcar (CBC) (FERNANDES *et al.*,2015).

Freitas (2005) resume na Tabela 5 alguns dos principais resíduos, provenientes da indústria da cana-de-açúcar, sua origem e destino.

**Tabela 5** – Origem e destino dos principais resíduos gerados pela cana-de-açúcar

Resíduo	Origem	Destino
Bagaço	Moagem da cana e extração do caldo.	Co-geração de energia elétrica; Uso como adubo; Produção de aglomerantes; Produção de celulose.
Torta de filtração	Filtração do lodo gerado na clarificação.	Uso como condicionador de solo; Produção de ração animal.
Vinhoto	Resíduo da destilação de melaço fermentado (para obtenção do álcool).	Uso como fertilizante.
Melaço	Fabricação do açúcar.	Praticamente todo usado na produção do álcool.
Ponta da cana	Corte da cana para moagem.	-
Cinza da cana	Queima do bagaço para co-geração de energia.	Adubação do solo.

**Fonte:** Adaptado de Freitas (2005); Torres (2019).

Parte da CBC volta para o solo dos canaviais para ser utilizada como adubo, apesar de ser um componente pobre em nutrientes e de difícil deterioração, ainda possui em sua composição metais pesados, podendo contaminar o solo e lençóis freáticos. A literatura ressalta que esta prática é comum entre os agricultores de cana, chamada de iniciativa ambientalmente correta, eliminada juntamente à torta de filtro e vinhaça, porém, ignora o uso de agrotóxicos nas plantações, fazendo com que estes produtos persistam no solo juntamente com as cinzas (LIMA *et al.*, 2010).

Tais cinzas, quando descartadas de maneira inadequada, podem causar a contaminação dos solos adjacentes, águas subterrâneas e problemas de saúde, ocasionando conseqüentemente graves problemas sociais e ambientais. Dessa forma, não possuindo outro modo de utilização, o correto é que esse resíduo seja destinado aos aterros sanitários (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011).

Coelho (1999) reitera ao bagaço a capacidade de co-geração de energia, definida como geração simultânea de energia térmica e mecânica a partir de um mesmo combustível (gás natural, resíduos de madeira, casca de arroz, bagaço da

cana, palha, ponteiros etc.). Ante o exposto, apesar de o bagaço ser considerado um dos maiores rejeitos da agroindústria nacional, não se pode negar sua vasta serventia, uma vez que sua aplicação industrial transcende desde a fabricação de composto para ração animal, fertilizante e biogás à matéria-prima para indústria química em geral (SAMPAIO, 2013). Neste contexto, o encaminhamento desse resíduo de forma adequada é considerado importante para combater os problemas de poluição do meio ambiente.

#### **4.3.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)**

Para co-geração de energia elétrica é necessário que as caldeiras das usinas passem por um processo de combustão, onde são alimentadas pelo bagaço da cana-de-açúcar. Como resultado dessa queima, é gerado um novo resíduo: a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).

Nas usinas, a produção de energia faz parte do processo de autossuficiência elétrica. Para cada tonelada de bagaço que alimenta o processo de co-geração, aproximadamente 24 kg de cinza residual são geradas (FIESP/CIESP, 2001).

Contudo, para Torres (2019) o reaproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar pela indústria da construção civil pode ser uma alternativa com benefícios ambientais e econômicos interessantes. Dentre as vantagens com o reaproveitamento da cinza na construção civil, estão a diminuição no risco de contaminação do meio ambiente, onde são normalmente utilizados como adubo nas lavouras, o que gera riscos de contaminação do solo e fontes de água, devido em sua composição conter metais pesados, como, o alumínio, chumbo e cádmio.

Para Paula (2006), a possibilidade de redução dos impactos ambientais gerados pela indústria cimentícia se dá devido ao fato do uso da incorporação de resíduos ao cimento acarretar a diminuição da quantidade necessária de clínquer por m<sup>3</sup> de concreto/argamassa, reduzindo as emissões de CO<sup>2</sup> na atmosfera. Desta forma, de acordo com as condições de queima adotadas na CBC é possível obter a sílica em estado amorfo, o que torna possível o uso desse resíduo como pozolana, o que pode reduzir o impacto ambiental e gerar uma economia de cimento ou até mesmo de agregados na produção de compósitos cimentícios, agregando um valor econômico a este resíduo agrícola (PAYA; MONZÓ; BORRACHERO, 2002).

A propriedade de um material pozolânico, é caracterizado pela sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do

cimento, formando compostos estáveis de capacidade aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Estudos mostraram, que os bagaços de cana-de-açúcar podem proporcionar um rendimento de cinza de 10%, com teor de SiO<sub>2</sub> de 84% e 5% de carbono, apresentando tanto fases amorfas quanto fases cristalinas, onde os resultados comprovaram pozolanicidade da CBC, que puderam ser substituídas em até 20% do cimento Portland no preparo de argamassas, sem prejuízo da resistência à compressão (OLIVEIRA *et al.*, 2004; PAULA *et al.*, 2009).

Esse produto, para Medina (2011), contribui para o desenvolvimento das resistências mecânicas como também melhoram a qualidade do concreto pelo adensamento da matriz aglutinante a partir do refinamento dos poros e redução do ataque de agentes externos, aprimorando assim, suas propriedades.

Para classificar os resíduos como um material pozolânico, a norma NBR 12653 (2014) estabelece requisitos químicos e físico-mecânicos, conforme especificados na Tabela 6 e Tabela 7.

**Tabela 6** – Requisitos químicos para caracterização como material pozolânico

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70 %	≥ 70 %	≥ 50 %	ABNT NBR NM 22
SO <sub>3</sub>	≤ 4 %	≤ 5 %	≤ 5 %	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3 %	≤ 3 %	≤ 3 %	ABNT NBR NM 14
Perda ao fogo	≤ 10 %	≤ 6 %	≤ 6 %	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5 %	≤ 1,5 %	≤ 1,5 %	ABNT NBR NM 25

(\*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

**Fonte:** Adaptado de NBR 12653 (2014).

**Tabela 7** – Requisitos físicos para caracterização como material pozolânico

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20%	< 20%	< 20%	ABNT NBR 15894-3 (*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

(\*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico.

**Fonte:** Adaptado de NBR 12653 (2014).

Onde:

- Classe N: Pozolanas naturais e artificiais que obedeçam aos requisitos desta norma, como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;

- Classe C: Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedeçam aos requisitos desta norma;
- Classe E: Quaisquer pozolonas, não contempladas nas classes N e C, que obedeçam aos requisitos desta norma.

Por sua vez, conforme Cordeiro (2006), estudos têm demonstrado que a cinza obtida pela combustão do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) nas usinas sucroalcooleiras é tratada como um material pozolânico, contendo alto teor de sílica e óxido de alumínio. Sendo assim, tem um grande potencial de incorporação como adição mineral, podendo então ser utilizada como material alternativo na substituição parcial do cimento Portland para produção de argamassas e concretos.

Segundo a NBR 11172 (1990), o termo “adição” é utilizado para produtos de origem mineral incorporado aos cimentos, argamassas e concretos, com a intenção de modificar suas propriedades. Aspectos como a redução do calor de hidratação, o incremento de resistência mecânica, a melhoria na coesão, a diminuição da exsudação, a redução da permeabilidade, o aumento da resistência química e o aumento da durabilidade, são funções possíveis quanto ao tipo de adição e do teor de dosagem (NEVILLE, 1997).

Para Guerra (2012), adições minerais, são materiais incorporados aos cimentos Portland ou aos concretos e argamassas em quantidades variáveis, que podem interferir no desempenho da pasta e melhorar algumas de suas propriedades. Além disso, as adições minerais são, em geral, subprodutos industriais, como a CBC, e faz com que seu custo seja reduzido quando comparado ao custo do clínquer do cimento.

Paula (2006) cita que as propriedades da CBC dependem das condições de queima. Algumas das modificações que ocorrem no bagaço com o aumento da temperatura durante o tratamento térmico são:

- A temperaturas de até 100 °C há uma diminuição inicial de massa devido à perda de água;
- A 350° inicia a combustão do material mais volátil, dando início à queima da CBC;
- Entre 400 e 500° C, todo o carbono é eliminado. Neste estágio é observada a perda de massa mais substancial. Após esta etapa a cinza torna-se rica em sílica amorfa;

- Acima de 700° pode levar a formação de quartzo e a níveis mais elevados de temperatura, capaz de acarretar na formação de outras formas cristalinas;
- Acima de 800°C, a sílica presente na cinza é essencialmente cristalina.

Já Cordeiro (2006), estudou as diferentes colorações das cinzas residuais oriundas da temperatura no interior das caldeiras (600 °C à 800 °C) e do tempo de exposição ao calor. A coloração é um bom indicativo do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e, conseqüentemente, do seu teor de carbono.

Na Figura 8 podem ser vistas as cinzas com cores distintas, produzidas nas caldeiras, além do bagaço de cana *in natura* (Figura 8a). A cinza escura é proveniente de um processo de combustão incompleto, com alto teor de carbono (Figura 8b). Com maior temperatura e/ou tempo de exposição ao calor, a cinza possui menor teor de carbono e adquire cor que varia entre tons de vermelho (Figura 8c). A cinza após combustão completa, com a cor mais clara (Figura 8d).

**Figura 8** – Bagaço de cana-de-açúcar e diferentes cinzas residuais geradas após queima do bagaço em caldeira



**Fonte:** Adaptado de Cordeiro (2006).

Cordeiro *et al.* (2009a) em suas pesquisas com a queima da CBC, constatou que a temperatura mais eficiente para atividade pozzolânica foi a de 600 °C. Portanto, é possível manter a sílica contida no bagaço em estado amorfo e utilizar destas condições de queima adotada. Essa característica pode proporcionar a aplicação desse resíduo como pozzolana.

Embora não tenha um consenso sobre a temperatura e o tempo ideal da queima do bagaço para se obter um material amorfo, os estudos mostram a importância do controle de queima das cinzas para otimizar a sua reatividade (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 2000; NEHDI *et al.*, 2003; POGGIALI, 2010).

Outra forma de melhorar a reatividade da cinza é através de tratamentos físicos, em especial a moagem. Quanto mais fina for a cinza, maior será a área de contato com a pasta de cimento gerando grande número de pontos de nucleação para a reação pozolânica, logo, mais reativa ela será (VASCONCELOS, 2013).

Para Poggiali (2010), o processo de moagem é aplicado quando se deseja obter produtos com tamanhos de partículas muito reduzidos. Este processo, mesmo sem padronização, consiste na combinação dos efeitos de compressão, impacto e abrasão realizados em moinhos compostos com corpos moedores.

Diversas propriedades dos materiais estão fortemente associadas a reatividade e ao empacotamento das partículas que o constituem. O estudo do empacotamento de partículas está intimamente relacionado à definição do problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de tal forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Por sua vez, em contribuição ao empacotamento das partículas em concretos e argamassas, o filler (diâmetro abaixo de 0,075mm) é empregado como adição mineral, somadas ou substituídas parcialmente ao cimento, devido à semelhança de suas propriedades finamente dividida, sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico, elevando a compacidade através da melhor distribuição granulométrica das partículas (MARANGON, 2006).

Segundo Petrucci (1979), filler é todo material passante na peneira de 0,075 mm definida pela NBR NM ISO 3310-2 (2010). Soares (2010) considera adições minerais com efeito filler, ou simplesmente filler, como material finamente moído, de diâmetro médio próximo ao do cimento, que possui característica física capaz de beneficiar algumas propriedades de argamassas e concretos, quando em teores menores que 15% em relação à massa de cimento (MOTTA e LEITE, 2000; BARDINI, 2008).

Para Mehta e Monteiro (2008) e Macedo (2009), o teor de adições ou substituições de minerais em cimentos são bem variados, dependendo das características e granulometria do material. Quando os minerais, são materiais silicosos finamente divididos, com propriedades pozolânicas ou de preenchimento de poros (efeito filler), diminuem o volume de vazios, conseqüentemente diminuem a

porosidade, reduzindo a permeabilidade e melhora a resistência mecânica e a durabilidade, promovendo efeitos permanentes no material.

Desta forma, as dimensões das partículas das adições em materiais cimentícios influenciam na reatividade da mistura (DAL MOLIN, 2011; LOTHENBACH, SCRIVENER, HOOTON, 2011).

Wellenkamp (1999), em seu trabalho de revisão sobre a moagem fina e ultrafina de minerais industriais, classifica como materiais finos os de granulometria menor que 100  $\mu\text{m}$  (0,1 mm) e os materiais ultrafinos os de granulometria menor que 10  $\mu\text{m}$  (0,001 mm). Em sua tese, Cordeiro (2006) também descreve as partículas finas e ultrafinas desta maneira.

De acordo com Cordeiro (2006), estudos desenvolvidos indicam que a cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar apresenta composição química adequada ao emprego como aditivo mineral, principalmente no que se refere aos teores de dióxido de silício e perda ao fogo. Entretanto, a distribuição granulométrica variável da cinza, própria de um sistema de obtenção sem qualquer classificação, aponta para a necessidade de moagem para elevar a reatividade, pelo aumento da superfície específica das partículas, e conferir maior homogeneidade ao material.

Com o aumento da superfície específica proporciona-se menor tensão de escoamento e maior viscosidade da mistura, decorrente do aumento da quantidade de partículas em contato com a água, diminuindo a distância entre os grãos e aumentando a frequência de colisão entre os mesmos (MARANGON, 2006).

A granulometria dos aditivos minerais desempenha um importante papel com relação à sua reatividade química. Uma vez que a reação pozolânica ocorre com um dos componentes em estado sólido (pozolana), aumenta-se a taxa de reação satisfatoriamente através do processo de moagem da cinza, aumentando a superfície de contato com o hidróxido de cálcio. A reatividade entre a sílica presente nas cinzas e os produtos de hidratação do cimento pode proporcionar melhorias nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas e concretos (PAULA, 2006).

Segundo Cordeiro (2006), o processo de cominuição de materiais cimentícios e aditivos minerais, mesmo sendo uma operação dispendiosa, é extremamente necessário para ativar as reações químicas, cujas taxas são diretamente proporcionais à superfície específica do material que, por sua vez, é inversamente proporcional ao tamanho das partículas. O aumento desta superfície específica está

diretamente relacionado à cinética das reações pozolânicas (CORDEIRO *et al.*, 2009b).

No entanto, para Mehta e Monteiro (2008), os mecanismos pelos quais os aditivos minerais influenciam as propriedades de concretos, argamassas e pastas são mais dependentes do tamanho, forma e textura das partículas do que de sua composição química.

Sendo assim, para Paula (2006), o processo de perda ao fogo nas adições minerais é atribuído à quantidade de matéria orgânica (carbono livre) presente no material, uma vez que a umidade e os materiais voláteis foram eliminados no processo de queima. A quantidade de carbono presente na cinza, utilizada como adição mineral na confecção de argamassas ou concretos, influencia as propriedades mecânicas desses materiais cimentícios. Valores de até 20% de carbono na cinza não afetam significativamente a resistência à compressão, o que já não é verdadeiro para valores superiores a 30%, onde a queda de resistência é consequência da diminuição na quantidade de sílica.

Com isso, a atividade pozolânica é evidenciada através de um material pela sua resistência combinada com sua durabilidade. As altas temperaturas das caldeiras, a combustão incompleta do bagaço, a presença de substâncias cristalinas e impurezas (como o carbono) influenciam negativamente na reatividade da cinza. Recomenda-se, portanto, fazer ensaios mecânicos sempre que possível para avaliar estas propriedades, mesmo que as pozolanas não passem com êxito pelos ensaios de pozolanicidade (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 2000).

Com a utilização das cinzas reduz-se um passivo ambiental da agroindústria sucroalcooleira, fechando o ciclo de CO<sub>2</sub> zero da cogeração em termoelétrica de bagaço de cana-de-açúcar e ainda contribui diretamente para a diminuição da emissão de poluentes (POGGIALI, 2010). Neste contexto, o uso ambientalmente correto das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, se dá de forma que a produção de energia em termoelétrica de bagaço possa ser considerada um processo sustentável na sua totalidade.

#### **4.3.2 Referencial teórico: CBC em substituição ao cimento Portland em concretos**

Singh *et al.* (2000) analisaram a influência de diferentes porcentagens (10%, 20% e 30%) de substituição do cimento pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar

(CBC), além do traço de referência, nas propriedades do concreto. A resistência à compressão foi significativa principalmente para a substituição de 10% do cimento. Além disso, verificou-se que a utilização da cinza diminui a permeabilidade do material e, conseqüentemente, o torna mais resistente a ambientes agressivos.

Valenciano e Freire (2004) analisaram a influência de concretos produzidos com solo, cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, obtendo bons resultados de resistência à compressão de concretos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em substituições de até 20% do cimento. As amostras de cinzas foram submetidas a tratamento prévio de peneiramento e moagem e em seguida analisadas por ensaios de compactação, compressão simples e absorção de água.

Cordeiro (2006) estudou a utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como adições minerais em concretos. Através de diferentes configurações de moagem, uma cinza ultrafina do bagaço da cana foi selecionada para aplicação em concreto. A adição possibilitou a manutenção das propriedades mecânicas, com menor consumo de cimento Portland e com reduzido desprendimento de calor. Ainda melhorou as propriedades do concreto fresco, em relação às misturas de referência, aumentando os valores de abatimento do tronco de cone e reduzindo a tensão cisalhante de escoamento. Proporcionou ainda a redução na absorção de água por capilaridade e na penetração acelerada de íons cloreto no concreto para uma substituição de 20% do cimento. Tal característica é promovida pela cinza ultrafina devido a sua atividade pozolânica e ao refinamento da estrutura de poros dos concretos.

Cordeiro *et al.* (2006) estudaram a influência do emprego de cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar, nas porcentagens de 10%, 15% e 20% em substituição ao cimento Portland, em concretos de alto desempenho. A utilização da cinza melhorou o desempenho dos concretos, uma vez que reduziu a necessidade do consumo de superplastificantes (traço com 20% de cinza). O concreto não apresentou redução da resistência à compressão e não houve um aumento da absorção capilar em concretos com a cinza em sua composição.

No estudo realizado por Ganesan *et al.* (2007), foi verificado que até 20% do cimento Portland comum pode ser substituído de forma ideal por CBC submetidas a um processo adequado de queima, sem qualquer efeito adverso nas propriedades desejáveis do concreto. Os resultados demonstraram uma alta resistência inicial,

redução da permeabilidade e sensível resistência a cloretos, constatando melhoria na durabilidade das estruturas de concreto.

Nunes *et al.* (2008) estudaram concretos com adição de CBC em substituição ao cimento Portland nas proporções de 0% (referência), 3%, 5%, 7%, 10%, 13%, 15% e 20% em massa. Onde houve substituição de até 13% de cimento pelas cinzas, gerou-se um grande aumento na resistência, onde o maior valor foi indicado pela substituição de 7% de cinza.

Cordeiro *et al.* (2009b) avaliaram a influência do processo de moagem da CBC na sua pozolanicidade, onde verificaram que valores de granulometria abaixo de 60  $\mu\text{m}$  e área de superfície específica Blaine acima de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  fornecem produtos que podem ser considerados como pozolânicos, independente do moinho utilizado no processo de cominuição. Além disso, a cinza moída através de moinhos vibratórios, quando utilizada em até 20% de substituição ao cimento Portland na confecção do concreto, apresentou as mesmas respostas mecânicas que o concreto referência, sem o resíduo.

Fairbairn *et al.* (2010) estudaram a influência da substituição de parte do cimento Portland pela CBC em escala industrial na diminuição das emissões de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Os resultados mostram que a substituição do cimento pela cinza reduz a emissão do dióxido de carbono da ordem de 519,3 mil toneladas por ano.

Castaldelli *et al.* (2010) utilizaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* na confecção de concretos, substituindo o cimento em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Quanto maior o teor de cinza nos corpos de prova, menor foi a resistência à compressão, mas melhorou o material quanto à absorção de água.

Rukzon e Chindaprasirt (2012) utilizaram a CBC moída em moinho de rolos e peneirada com abertura de 45  $\mu\text{m}$ , na substituição de 10%, 20% e 30% do cimento em misturas de concreto. A incorporação de até 30% de CBC diminui a penetração de cloreto e aumentou a resistência à compressão em até 5%.

Bahurudeen *et al.* (2015) avaliaram a remoção das partículas fibrosas ricas em carbono por peneiramento com abertura de 300  $\mu\text{m}$  e moagem em moinho de bolas até finura de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Utilizaram a CBC em substituição ao cimento nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% para produção de concretos. As substituições de até 25% apresentaram resistência à compressão igual ou ligeiramente melhor. Menor calor de hidratação para substituições de 10 e 20% estudadas. Aumento de resistência à penetração de cloretos e gases e diminuição de absorção de água.

Aumento de resistência à penetração de íons de cloreto devido ao desempenho pozolânico.

Na pesquisa de Torres (2019), a cinza coletada foi beneficiada, por meio de moagem e calcinação, para em seguida ser estudada como adição pozolânica. Os ensaios foram realizados com 8 amostras, das quais, 4 foram calcinadas e 4 mantidas in natura, com diferentes faixas de finura: bruta, 1000 m<sup>2</sup>/kg, 1300 m<sup>2</sup>/kg e 1600 m<sup>2</sup>/kg. A CBC calcinada 1600 m<sup>2</sup>/kg, foi a cinza que passou pelo maior processo de beneficiamento: calcinação à 600 °C durante 4 horas seguida de um período de 27 horas moagem até ser obtida a finura de 1600 ± 50 m<sup>2</sup>/kg. A massa específica média das cinzas in natura foi de 2,21 g/cm<sup>3</sup> e das cinzas calcinadas de 2,54 g/cm<sup>3</sup>, indicando que a calcinação promove um aumento na massa específica, provavelmente devido a eliminação do carbono por meio desse processo, restando mais silício, cuja massa específica é em torno de 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Todas as amostras moídas atenderam aos requisitos físicos para material pozolânico, conforme a NBR 12653 (2014), por possuir porcentagem de material retido na peneira 45 µm inferior a 20%. Por sua vez, as cinzas calcinadas 1300 m<sup>2</sup>/kg e 1600 m<sup>2</sup>/kg atenderam a todos os requisitos químicos e físicos propostos por esta mesma norma.

Conforme Vasconcelos (2013), a partir dos resultados apresentados por diferentes autores, verifica-se a relevância, tanto do processo de queima do bagaço, como da moagem da CBC para obtenção de uma cinza reativa. Na maioria dos casos, a CBC demonstra potencial como adição pozolânica, geralmente quando produzida em laboratório, sob condições controladas de queima. Dessa forma, vários estudos apresentam vantagens no uso da cinza quanto ao efeito pozolânico ou adição mineral.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS: PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A metodologia empregada na pesquisa é de caráter exploratório experimental de abordagem quantitativa, onde durante a primeira campanha experimental serão apresentados os materiais e métodos empregados com o propósito de fixar a granulometria a ser utilizada no trabalho. Sendo a segunda campanha experimental, baseada na análise da viabilidade do uso da CBC (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) em substituição parcial ao cimento Portland para a produção do concreto permeável como uso de revestimento para pavimento em ambiente urbano.

### 5.1 Materiais constituintes

O objetivo desta campanha foi selecionar a granulometria ideal para produzir o concreto permeável levando em conta tanto as propriedades mecânicas, hidráulicas e finalmente o acabamento.

Diante disso, os materiais utilizados ao longo desta campanha foram:

- Cimento Portland CP II-E-32, das marcas CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) e Cimento Nacional (Figura 9), produzidos segundo a norma NBR 16697 (2018), compostos de 51% à 94% de clínquer + sulfatos de cálcio e 6% à 34% de escória granulada de alto-forno.

Dentre as diversas vantagens deste cimento, pode-se destacar a fácil aceitação e versatilidade de seu uso desde a fundação até os acabamentos, secagem rápida com resistências iniciais superiores, além de ser considerado um produto potencialmente sustentável, pois melhora certas características do concreto e preserva o meio ambiente ao aproveitar resíduos, diminuindo as emissões de gases e a extração de matéria-prima (ABCP, 2021).

Figura 9 – Cimentos Portland CP II-E-32



Fonte: CSN; Cimento Nacional (2021).

- Agregado graúdo de basalto, comercializado na cidade e região de Umuarama-PR, com dimensão máxima de 9,5 mm (brita zero - B0) e 19 mm (brita um - B1), aos quais foram caracterizadas segundo as normas específicas NBR NM 248 (2003) e NBR 7211 (2019).

Os agregados utilizados na pesquisa foram adquiridos na cidade de Umuarama-PR, através da empresa e distribuidora de materiais de construção Minerforte (Figura 10).

**Figura 10** – Agregados graúdos no pátio da empresa distribuidora Minerforte



**Fonte:** A autora (2020).

Na Tabela 8 apresentam-se as localidades de cada pedreira fornecedora dos agregados e suas respectivas nomenclaturas comercialmente utilizadas na região de Umuarama-PR e a classificação aplicada à pesquisa.

**Tabela 8** – Nomenclatura e classificação dos agregados graúdos

Pedreira	Tipo de agregado (nome comercial)	NBR 7211 (2019)	NBR NM 248 (2003)
		Tipo de agregado (classificação para pesquisa)	Dimensão predominante retida (mm)
Cianorte Cascalho (Cianorte-PR)	pedrisco	brita zero (B0)	6,3
Cianorte Cascalho (Cianorte-PR)	pedra meia	brita um (B1a)	9,5
Itaipu e Comércio de Britas (Campo Mourão-PR)	brita um	brita um (B1b)	12,5

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

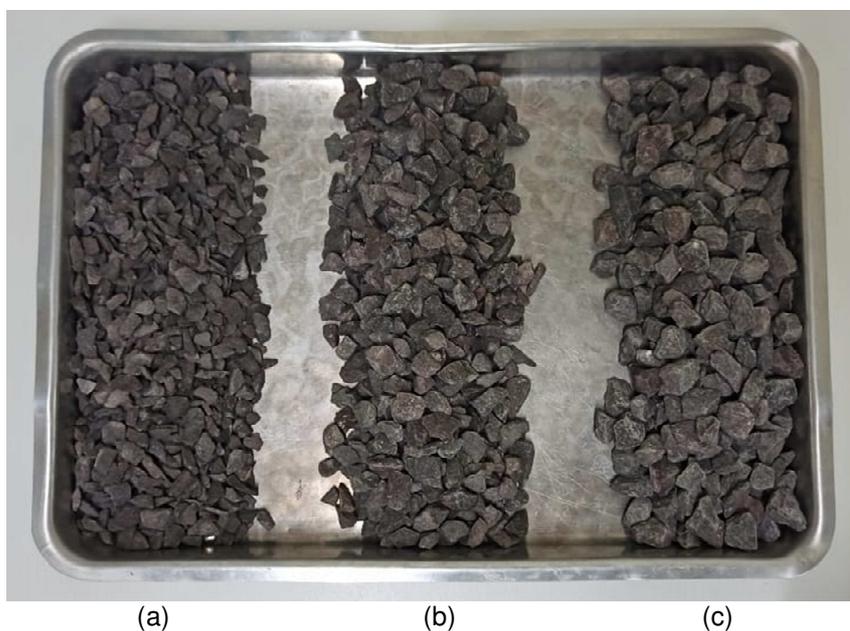
- Água potável, proveniente da empresa abastecedora da cidade de Umuarama-PR, obedecendo às recomendações da NBR 15900-1 (2009).

## 5.2 Métodos

### 5.2.1 Caracterização dos agregados graúdos

Os agregados graúdos utilizados nesta campanha, adquiridos pela distribuidora Minerfote, são apresentados da Figura 11.

**Figura 11** – Agregados graúdos adquiridos pela empresa Minerfote: a) B0; b) B1a; c) B1b



**Fonte:** A Autora (2020).

Na Tabela 9 apresenta-se a análise granulométrica dos agregados graúdos B0, B1a e B1b, realizada mediante a norma NBR NM 248 (2003).

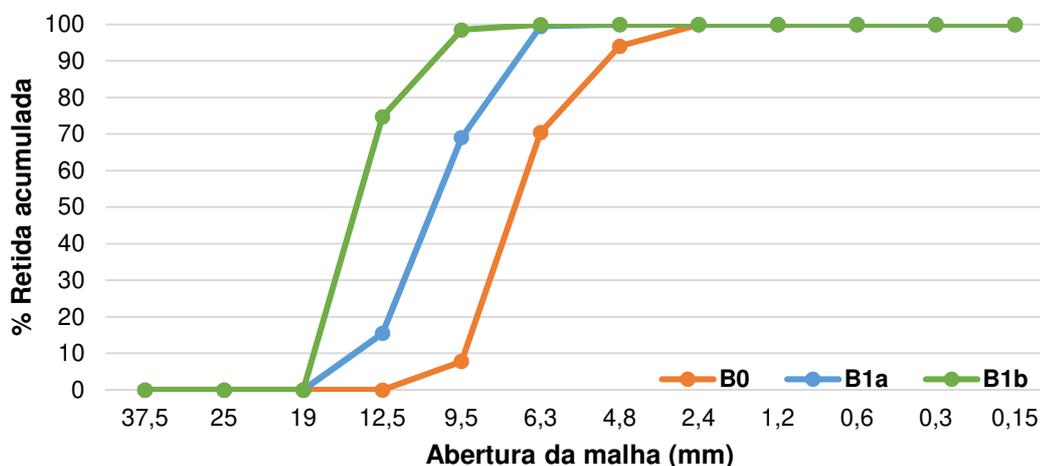
**Tabela 9 – Análise granulométrica dos agregados graúdos da empresa Minerforte**

Tipo de agregado	B0		B1a		B1b	
Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
37,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
12,5	0	0	15,50	15,50	74,78	74,78
9,5	7,78	7,78	53,54	69,04	23,76	98,54
6,3	62,64	70,42	30,43	99,47	1,44	99,98
4,8	23,64	94,06	0,51	99,98	0	99,98
2,4	5,92	99,98	0,01	99,99	0	99,98
1,2	0,01	99,99	0	99,99	0	99,98
0,6	0	99,99	0	99,99	0	99,98
0,3	0	99,99	0	99,99	0	99,98
0,15	0	99,99	0	99,99	0	99,98
FUNDO	0,01	100	0,01	100	0,02	100
Dimensão máxima característica (mm)	9,5		12,5		12,5	
Módulo de finura	6,02		6,69		6,98	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Figura 12 é possível observar a curva granulométrica das britas mencionadas na Tabela 8. Destaca-se, conforme a pesquisa de Sandoval (2014), que a brita zero (B0) empregada no estudo, obteve a mesma dimensão máxima característica de 9,5 mm, diferente da (B1) de sua pesquisa, onde a dimensão máxima característica foi de 19 mm.

**Figura 12 – Curvas granulométricas B0, B1a e B1b**

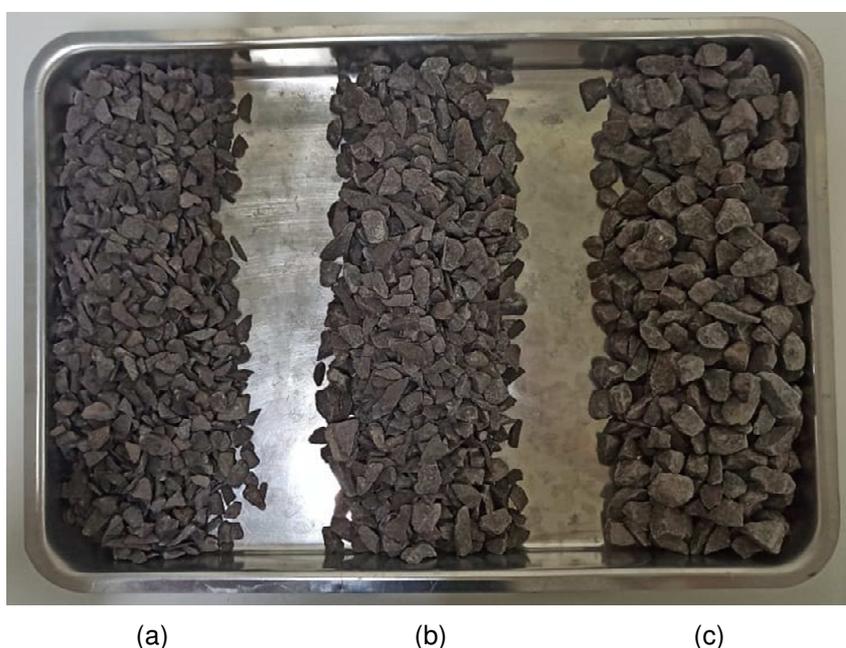


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Já na Figura 13 apresentam os agregados graúdos e suas combinações utilizadas nas dosagens experimentais desta campanha. Tais combinações foram escolhidas no intuito de melhorar a distribuição dos grãos de forma contínua.

Neville (2013) por sua vez, destaca que para se obter o melhor empacotamento das partículas é necessário agregados com granulometria contínua, pois vazios gerados por partículas do mesmo tamanho só podem ser preenchidos por grãos de tamanho inferior, suficientemente pequenos para o espaço gerado.

**Figura 13** – Agregados graúdos utilizados na primeira campanha experimental: a) B0; b) B0/B1a; c) B1a/B1b



**Fonte:** A autora (2021).

Na Tabela 10, de acordo com NBR NM 248 (2003), se apresenta o comparativo da análise granulométrica da brita (B0) e mais duas combinações das britas divididas em partes iguais de 50% (B0/B1a e B1a/B1b), utilizadas para a dosagem na primeira campanha experimental.

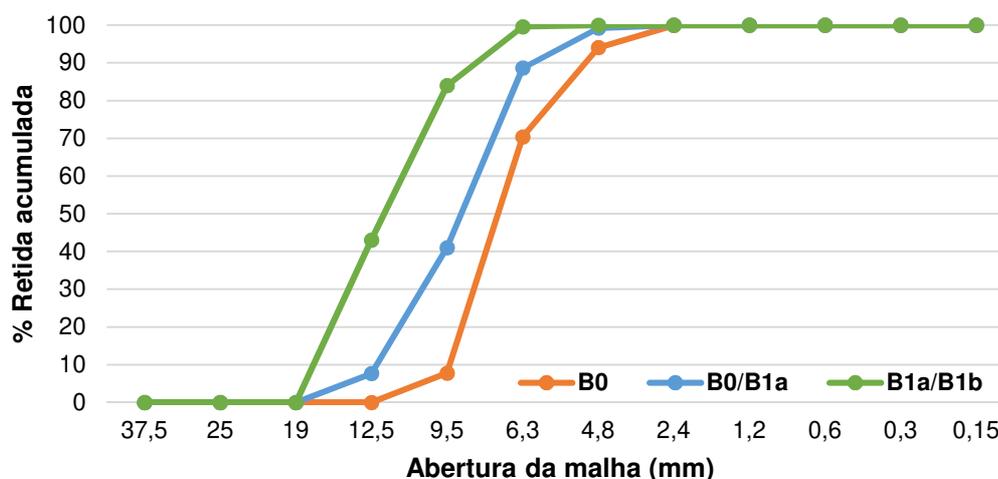
**Tabela 10** – Análise granulométrica dos agregados graúdos e suas combinações utilizadas na primeira campanha experimental (B0, B0/B1a e B1a/B1b)

Tipo de agregado	B0		B0/B1a		B1a/B1b	
Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
37,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
12,5	0	0	7,66	7,66	43,08	43,08
9,5	7,78	7,78	33,40	41,06	40,90	83,98
6,3	62,64	70,42	47,61	88,67	15,64	99,62
4,8	23,64	94,06	10,58	99,25	0,36	99,98
2,4	5,92	99,98	0,74	99,99	0,01	99,99
1,2	0,01	99,99	0	99,99	0	99,99
0,6	0	99,99	0	99,99	0	99,99
0,3	0	99,99	0	99,99	0	99,99
0,15	0	99,99	0	99,99	0	99,99
FUNDO	0,01	100	0,01	100	0,01	100
Dimensão máxima característica (mm)	9,5		12,5		12,5	
Módulo de finura	6,02		6,40		6,84	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Figura 14 é possível observar a curva granulométrica da brita zero (B0) e as combinações das britas (B0/B1a) e (B1a/B1b).

**Figura 14** – Curvas granulométricas B0, B0/B1a e B1a/B1b



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que agregados de granulometria descontínua produzem misturas de concreto menos trabalháveis. Para os autores, a

granulometria tem influência na trabalhabilidade do concreto, no seu custo, e no consumo de materiais.

Sendo assim, pode-se observar um aumento da proporção granulométrica de forma contínua em relação às Tabelas 9 e 10, contribuindo para um melhor desempenho dos experimentos de concreto permeável executado nesta campanha.

Os resultados dos demais ensaios de caracterização realizados no agregado graúdo, assim como suas respectivas normas, se encontram na Tabela 11.

**Tabela 11** – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo

Tipo de Agregado	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 45 (2006)	NBR NM 45 (2006)
	Massa específica do estado seco (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica aparente do estado seco (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)
B0	3,02	2,94	2,89	1,50	1310,0	56,62
B1a	2,98	2,92	2,89	1,10	1452,5	51,34
B1b	3,00	2,94	2,91	1,00	1557,5	48,33
B0/B1a	3,00	2,92	2,88	1,40	1381,2	54,00
B1a/B1b	3,00	2,94	2,90	1,20	1505,0	50,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Da Tabela 11 pode-se concluir que não teve muita variação entre os ensaios realizados devido as granulometrias utilizadas serem do mesmo material, o basalto.

### 5.2.2 Planejamento experimental

Para alcançar os objetivos propostos na primeira campanha experimental, foram identificados os comportamentos mecânicos e hidráulicos do concreto permeável através de sete tipos de ensaios para as três granulometrias estudadas (B0, B0/B1a e B1a/B1b), como podem ser visualizados na Tabela 12.

**Tabela 12** – Planejamento da primeira campanha experimental (B0, B0/B1a e B1a/B1b)

Tipo de ensaio	Ensaio	Tipo de corpo de prova	Dimensão corpo de prova (mm)	Amostras por idade		
				7 dias	14 dias	28 dias
Ensaio mecânicos	NBR 5739 (2018) <b>Resistência à compressão</b>	Cilíndrico	100 x 200	7	7	7
	NBR 7222 (2011) <b>Resistência à tração por compressão diametral</b>	Cilíndrico	100 x 200	7	7	7
	NBR 12142 (2010) <b>Resistência à tração na flexão</b>	Prismático	100 x 100 x 400	7	7	7
Ensaio hidráulicos	NBR 9778 (1987) <b>Índice de vazios e absorção de água</b>	Cilíndrico	100 x 200	-	-	6
	NBR 13292 (1995) <b>Permeabilidade à carga constante</b>					
	NBR 14545 (2000) <b>Permeabilidade à carga variável</b>					
	NBR 16416 (2015) <b>Permeabilidade à carga variável de pavimento permeável</b>	Placa	400 x 400 x 80	-	-	1
				<b>Total 70 amostras</b>		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Como apresentado na Tabela 12, foram realizados para cada granulometria estudada 70 amostras, totalizando 210 corpos de prova. Destes, 144 unidades foram moldadas no formato cilíndrico, 63 no formato prismático e 3 em placa.

### 5.2.3 Dosagem

Neste projeto, além da resistência, típica de um estudo de concreto, a permeabilidade tem sua importância. Portanto, para preservar os vazios necessários à permeabilidade do concreto, optou-se por não utilizar o agregado miúdo (areia) em sua mistura.

Segundo Cabral (2007), a permeabilidade também está relacionada ao montante de água total da massa, que dependendo da quantidade pode gerar mais poros por evaporação e microfissuras por retração. Em relação ao consumo elevado de cimento nem sempre é garantia de grandes resistências, já que no caso do concreto permeável a resistência está muito ligada a composição granulométrica dos agregados e ao sistema de compactação.

Visto isto, para a definição da dosagem do concreto permeável foi considerado o fator água/cimento (a/c) para suprir as exigências de ativação das ligações químicas do cimento, porém, sem fazer o “mingau” que é o estado cremoso que pode reduzir a presença dos vazios (FERNANDES, 2018).

Desta maneira, para esta campanha experimental foi utilizado o traço em massa, 1:3,26 (cimento:brita) com uma relação água/cimento (a/c) de 0,34, sem a incorporação de aditivos químicos, o mesmo utilizado de Sandoval (2014).

Seguindo esta linha de pesquisa, um dos pontos importantes também levantados para definição da referência da dosagem adotada para esta campanha, foi a proximidade da localização do trabalho realizado por Sandoval (2014), ser na cidade de Londrina-PR, distante aproximadamente 262 Km de Umuarama-PR. Desta forma, contribui como parâmetro entre as pesquisas a utilização dos materiais constituintes semelhantes para o concreto permeável, como por exemplo, os agregados graúdos de basalto.

Esta campanha, por sua vez, apresentou um consumo médio de cimento de 366,13 kg/m<sup>3</sup> e destaca-se, como Sandoval (2014), pela não utilização de aditivo químico na realização do traço. O consumo de materiais, conforme os cálculos de referência a NBR 9833 (2008), pode ser observado na Tabela 13.

**Tabela 13** – Consumo de materiais por m<sup>3</sup> da primeira campanha experimental

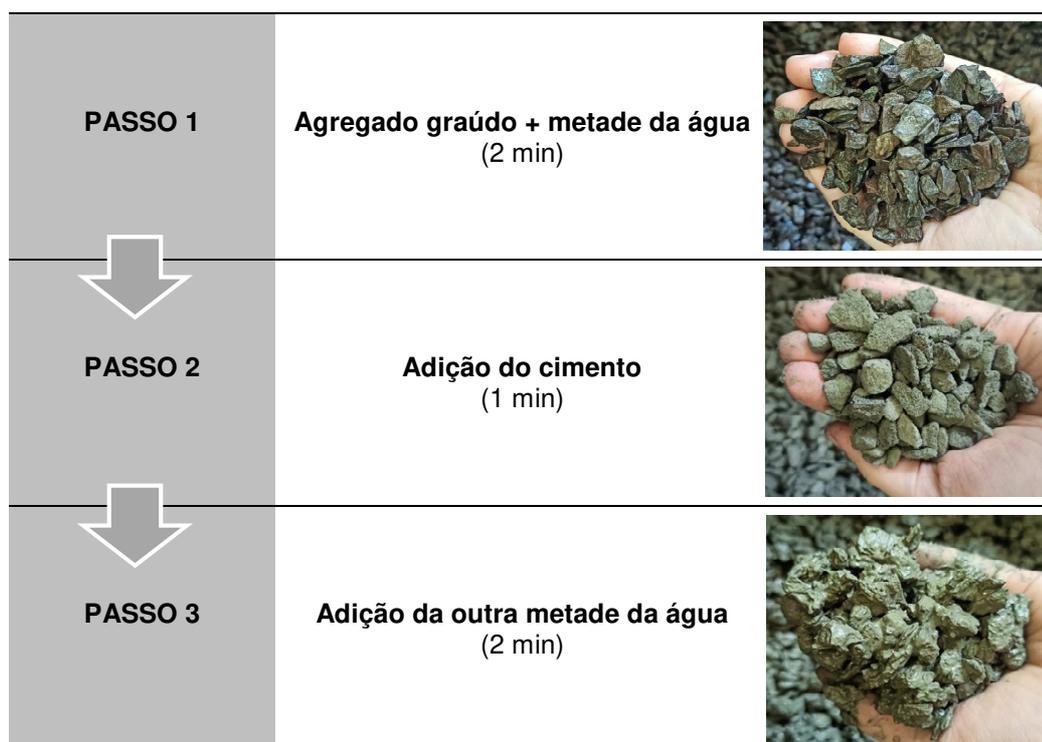
Tipo de agregado	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de agregado (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de água (l/m <sup>3</sup> )	Rendimento do concreto (m <sup>3</sup> )
B0	346,43	1129,36	117,78	0,28
B0/B1a	361,04	1177,00	123,92	0,24
B1a/B1b	390,91	1274,36	132,91	0,22

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

#### 5.2.4 Mistura

Referindo-se a Sandoval (2014), a primeira campanha experimental deste estudo tem o processo de produção com tempo final de mistura de cinco minutos, mostrado em sequência na Figura 15.

**Figura 15** – Processo de produção do concreto permeável



**Fonte:** Adaptado de Sandoval (2014); a autora (2020).

O tempo de 5 minutos utilizados na mistura foram identificados nas pesquisas de Sandoval (2014) e pela empresa PROMSA (2014), em Barcelona, como suficiente para obter a consistência adequada, homogeneidade e boa trabalhabilidade para moldagem dos corpos de prova.

### 5.2.5 Adensamento

Para o concreto permeável, não existe uma metodologia padronizada para fazer o adensamento dos corpos de prova utilizados na medição das propriedades mecânicas e hidráulicas do material. Nesta pesquisa as amostras foram elaboradas de acordo com a NBR 5738 (2015) e procurou-se um método de adensamento que tivesse a menor influência do erro humano.

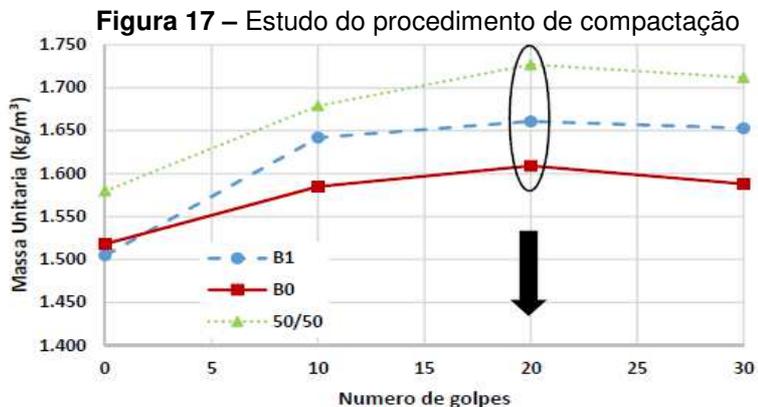
Desta forma, seguindo o método de Sandoval (2014), os adensamentos foram executados na mesa de consistência, sendo fixado um número de 20 golpes por camada (duas camadas), como mostra a Figura 16.

**Figura 16** – Adensamento dos corpos de prova: a) cilíndricos; b) prismáticos



**Fonte:** A autora (2021).

Para chegar ao número de 20 golpes no processo de compactação, foi realizado por Sandoval (2014) um estudo onde se obteve a maior massa unitária, independente do diâmetro máximo do agregado e da distribuição granulométrica. Tal procedimento de compactação, representado na Figura 17, foi escolhido por garantir uma altura, força e tempo constante de compactação diminuindo a influência do erro humano.



**Fonte:** Sandoval (2014).

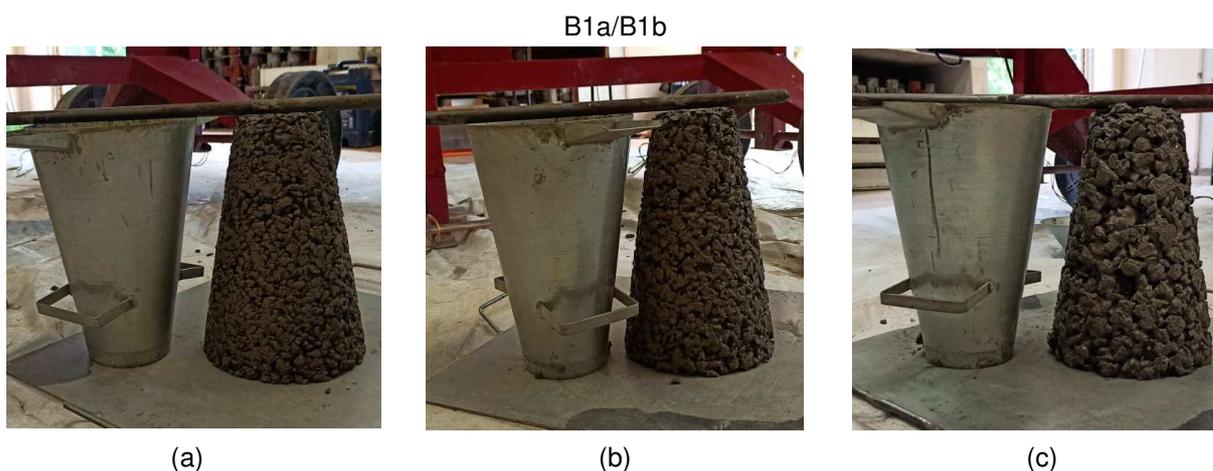
Todas as amostras permaneceram nos moldes, cobertos com lona plástica e protegidos de intempéries pelo período de 72 horas, uma vez que, diferentemente do concreto convencional, as amostras de concreto permeável moldadas não apresentaram estrutura suficientemente estável para serem desmoldadas após 24 horas, conforme preconiza a norma.

### 5.2.6 Ensaio em estado fresco

Segundo Batezini (2013), a proporção de cada material na constituição do concreto permeável, assim como sua compactação e abatimento, implica na variação do índice de vazios e sua massa específica, características estas que se relacionam diretamente no seu comportamento mecânico.

Neste sentido, em estado fresco foram medidas as seguintes propriedades: consistência (*Slump test*) e massa específica. A consistência foi medida pela norma NBR 16889 (2020), simplesmente para verificação, visto que no concreto permeável esta propriedade não é determinante, pois em sua maioria o resultado é zero por ter em sua mistura a relação água/cimento baixa. Na Figura 18 pode ser observada a realização dos ensaios.

**Figura 18** – Ensaio de consistência primeira campanha experimental: a) B0; b) B0/B1a; c)

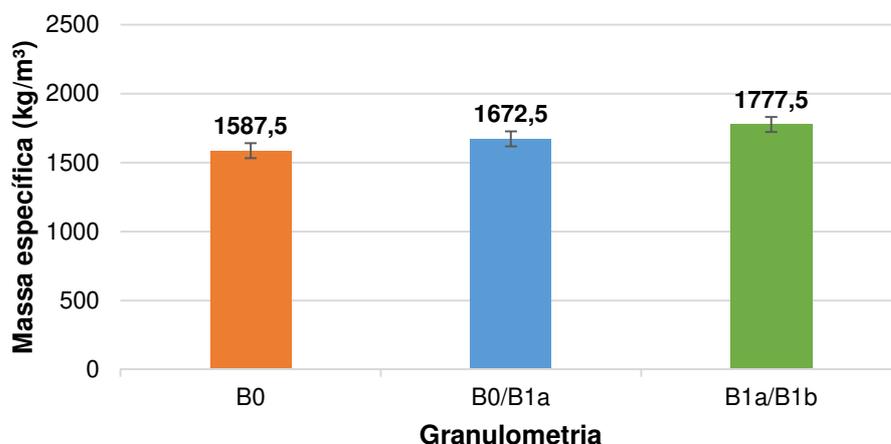


**Fonte:** A autora (2021).

Identificou-se que todas as misturas apresentaram o abatimento zero (0 cm). Mesmo sem a adição do agregado miúdo (areia) em suas composições, foi possível formar argamassas eficientes que mantivessem os entrelaces entre os grãos.

A massa específica, conforme a NBR 9833 (2008), foi realizada também em todas as combinações de misturas estudadas, sendo possível verificar a variação com relação ao tipo de agregado utilizado (Figura 19).

**Figura 19** – Variação da massa específica dependendo do tipo de agregado (B0, B0/B1a e B1a/B1b)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pode-se analisar na Figura 19 que a massa específica variou dependendo do tipo de agregado e a composição granulométrica do mesmo, esta última leva a formação de uma maior ou menor quantidade de vazios em cada mistura.

Sendo assim, o concreto composto com combinações de agregados B1a/B1b teve a massa específica maior pela natureza das combinações dos agregados, seguida pela B0/B1a e finalmente B0. Tendo como massa específica mínima 1587,50 kg/m<sup>3</sup> e máxima 1777,50 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.7 Ensaio de resistência à compressão

Muitos autores afirmam que a resistência à compressão está relacionada com a granulometria do agregado, a dosagem, ao método de compactação, aos aditivos utilizados e as possíveis adições que possam contribuir para melhorar o comportamento do concreto (TENNIS, LEMING, AKERS, 2004; GHAFoori & DUTTA, 1995; HUANG *et al.*, 2010; CHOPRA, WANIELISTA, MULLIGAN, 2007).

Para Neptune *et al.* (2010), com relação a influência da granulometria no desempenho do concreto permeável, quanto mais uniforme e menor o tamanho dos grãos, o material pode alcançar uma resistência maior.

Por possuir um alto índice de vazios fica evidente o paradigma de que o concreto permeável não possa atingir resistências elevadas, porém Tennis *et al.* (2004) afirmam que o mesmo pode chegar a resistências superiores a 20,5 MPa à compressão e 3,5 MPa à flexão.

Contudo, como o concreto permeável é um material poroso, há a necessidade de verificar a resistência mecânica para definir suas possíveis aplicações. Para tanto, com os corpos de prova preparados e capeados com enxofre fundido, usou-se do ensaio de resistência à compressão, conforme a NBR 5739 (2018), onde as amostras foram ensaiadas em uma prensa digital, representada na Figura 20.

**Figura 20** – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão



**Fonte:** A autora (2021).

Após os ensaios de resistência à compressão, foram analisados se os concretos permeáveis executados atendem as exigências quanto a tipologia para uso como revestimento de peça de concreto permeável, conforme a NBR 16416 (2015), onde a resistência mecânica característica mínima para esta propriedade é de 20,0 MPa para tráfego de pedestres e tráfego leve.

### **5.2.8 Ensaio de resistência à tração por métodos indiretos**

Um dos parâmetros mecânicos importantes para usar o material em calçadas ou em pavimentação é a resistência à tração, que finalmente vai ser suportada pelas ligações entre os grãos do material.

Segundo Oluokun (1991), em geral, as fissuras só podem ocorrer depois que a capacidade de tração do concreto tiver sido esgotada, o que faz dessa uma importante propriedade no que diz respeito à durabilidade de membros estruturais.

Castro *et al.* (2009), verificaram que na resistência à tração as relações  $a/c$  inferiores a 0,32 não são recomendadas, devido à diminuição da resistência mecânica no concreto permeável. Essa observação é contrária ao comportamento do concreto

convencional, onde a diminuição da relação a/c leva a um aumento na resistência final do material.

Para Neville (1997), a correlação amplamente utilizada de que a resistência à tração do concreto corresponde a 10% da sua resistência à compressão não pode ser feita livremente. Não há uma proporcionalidade direta entre esses dois tipos de resistência, sendo ambos dependentes do nível de resistência do concreto.

Desta forma, as resistências à tração por métodos indiretos no concreto permeável foram dadas através do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (2011) e do ensaio de resistência à tração na flexão, conforme a NBR 12142 (2010).

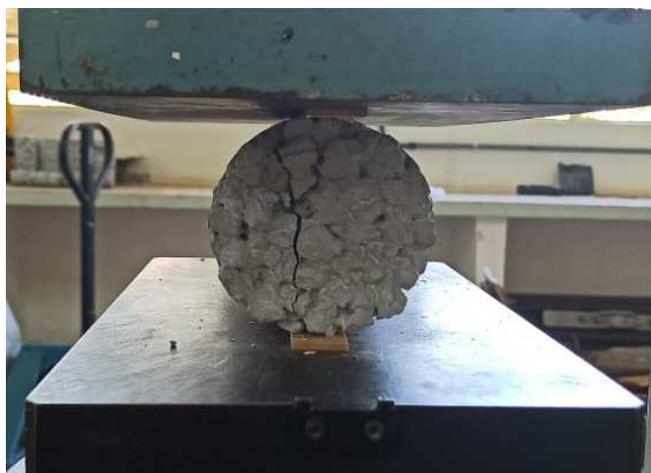
#### **5.2.8.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral**

No ensaio de tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222 (2011), foi aplicada uma tensão de compressão na geratriz do cilindro, que é apoiado em duas taliscas de madeira em contato com os pratos da prensa.

O corpo de prova fratura após o ensaio devido à tração desenvolvida em planos diametralmente opostos, como representada na Figura 21.

Na Figura 22 são apresentados o aspecto interno dos corpos de prova da primeira campanha experimental após a realização das rupturas no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

**Figura 21** – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral



**Fonte:** A autora (2021).

**Figura 22** – Aspecto interno dos corpos de prova após os ensaios de resistência à tração por compressão diametral: a) B0; b) B0/B1a; c) B1a/B1b



**Fonte:** A autora (2021).

A grande vantagem de se realizar esse ensaio é a necessidade de somente um equipamento de compressão para obtenção da resistência à tração. Esse tipo de equipamento está disponível, em praticamente, todos os laboratórios de ensaios de materiais em todo o mundo (MIER e VLIET, 2002).

Além disso, através de vários estudos avaliados por Oluokun, Burdette e Deatherage (1991), foi possível constatar que a tração por compressão diametral é uma medida confiável da resistência à tração do concreto. Isso se deve ao fato de conseguir uma relativa uniformidade nas tensões de tração na seção longitudinal do corpo de prova.

#### **5.2.8.2 Ensaio de resistência à tração na flexão**

Para os ensaios de determinação da resistência à tração na flexão do concreto permeável, segundo a NBR 12142 (2010), realizados no laboratório de ensaios mecânicos da Universidade Paranaense (campus de Umuarama), os corpos de prova foram posicionados sobre elementos de apoio de forma que a carga fosse aplicada no terço médio. Os cutelos de aplicação de carga são instalados na face oposta, com seu ajuste nos extremos do terço médio da distância entre os cutelos de apoio.

Todos os corpos de prova foram marcados e montados no equipamento para o ensaio, conforme a Figura 23.

**Figura 23** – Marcação, montagem e ruptura do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração na flexão



**Fonte:** A autora (2021).

Após a ruptura, as amostras foram medidas em sua seção de ruptura e aplicados às equações.

Quando o rompimento ocorreu no terço médio utilizou-se a Equação 1. Onde a ruptura nas amostras ocorreu fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5%, a resistência à tração na flexão foi calculada pela Equação 2.

**Equação 1** – Cálculo de resistência à tração na flexão

$$f_{ct,f} = F \cdot l / b \cdot d^2$$

**Equação 2** – Cálculo de resistência à tração na flexão fora do terço médio, a uma distância não superior a 5%

$$f_{ct,f} = 3 \cdot F \cdot a / b \cdot d^2$$

Onde:

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

F: força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

l: dimensão do vão entre apoios (mm);

b: largura média do corpo de prova (mm);

d: altura média do corpo de prova (mm);

a: distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

Nos casos onde o rompimento do corpo de prova ocorrer além do limite de 5% do terço médio, este foi descartado.

Após os ensaios e cálculos de resistência à tração na flexão realizados, foram identificados se os concretos permeáveis executados atendem as exigências quanto a tipologia para uso como revestimento de pavimento de concreto permeável moldado no local, conforme a NBR 16416 (2015), onde a resistência mecânica característica mínima para esta propriedade é de 1,0 MPa para tráfego de pedestres e 2,0 MPa para tráfego leve.

### **5.2.9 Ensaio de imersão em água para determinação do índice de vazios e absorção de água**

Sabe-se que a porosidade do concreto é a relação entre o volume de espaços e seu volume total e a permeabilidade é a medida da capacidade de circulação de um fluido através deste material, sem alterar a sua estrutura interna.

Neste sentido, uma das propriedades principais do concreto permeável é a porcentagem de vazios interna, já que está interligada com a porosidade do concreto e com as resistências mecânicas do material. Assim, saber o valor da mesma é de fundamental importância para compreender o comportamento do material.

Para Aoki (2009) o concreto permeável tem três tipos de vazios: os vazios próprios da pasta de cimento, que existem tanto em concreto permeável quanto em concreto convencional; os vazios dos agregados; e os vazios de ar (bolhas de ar) formados entre os pontos de contato dos grãos dos agregados, sendo estes os mais importantes na permeabilidade. Este tipo de vazios está diretamente ligado a granulometria, compactação e a forma do agregado.

Dependendo da granulometria do agregado, a porosidade pode variar, isto é, quando se possui uma granulometria uniforme, que só tem um tamanho de grãos, é possível obter uma maior porcentagem de vazios de maior dimensão. Vazios de maior tamanho podem facilitar o surgimento de conexões pontuais entre os agregados, o que leva a valores mais altos de permeabilidade (MARTIN; KAYE; PUTMAN, 2014).

Segundo Yang e Jiang (2002) os vazios de ar no concreto permeável têm um tamanho representativo, portanto sua medição é indispensável para avaliar a permeabilidade e a porcentagem de vazios do concreto.

Para esta pesquisa, a determinação do índice de vazios e absorção de água em estado endurecido, foi recorrido como referência a NBR 9778 (1987). Foram

utilizados os mesmos corpos de prova dos ensaios de permeabilidade, estes em estado saturado e superfície seca para garantir a não absorção da água.

Iniciou-se o processo dos ensaios com a secagem das amostras em uma estufa a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , por um período de 72h, conforme a Figura 24 e logo após deu-se a pesagem dos corpos de prova secos em uma balança de precisão.

**Figura 24** – Secagem dos corpos de prova em estufa



**Fonte:** A autora (2021).

Após a secagem iniciou-se a saturação dos corpos de prova em tanque de água com temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 72h. Após esse período foi realizada a pesagem das amostras em estado saturado e superfície seca e a pesagem dos corpos de prova imersos, representado na Figura 25.

**Figura 25** – Pesagem do corpo de prova: a) estado saturado e superfície seca; b) imerso em água



(a)



(b)

**Fonte:** A autora (2021).

Dadas todas essas etapas, foram realizados os cálculos para determinação do índice de vazios e absorção de água. Foi utilizada a Equação 3 para determinação da absorção de água por imersão e a Equação 4 para determinação do índice de vazios.

**Equação 3** – Cálculo de absorção de água por imersão

$$A_{ag} = \left( \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100$$

**Equação 4** – Cálculo do índice de vazios

$$I_v = \left( \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \right) \cdot 100$$

Onde:

$A_{ag}$ : absorção de água por imersão (%);

$M_{sat}$ : massa do corpo de prova saturado (g);

$M_s$ : massa do corpo de prova seco em estufa (g);

$I_v$ : índice de vazios (%);

$M_i$ : massa do corpo de prova saturado imerso em água (g).

### 5.2.10 Ensaio do coeficiente de permeabilidade

A permeabilidade do concreto está correlacionada, segundo Virgillis (2009), com o índice de vazios que o mesmo apresenta, sendo que, quanto maior o índice de vazios, maior a sua permeabilidade. Tais vazios são dispostos de maneira heterogênea na massa de concreto e através de sua interligação é possível escoar a água.

Para Sandoval (2014), a função principal do concreto permeável é facilitar o escoamento da água através de sua estrutura. Logo, esta propriedade depende da granulometria dos agregados utilizados e da compactação do material. Neste sentido, o intuito do ensaio é verificar a influência da granulometria dos agregados na variação da condutividade hidráulica entre estas misturas.

Muitas pesquisas têm implementado ensaios de permeabilidade em laboratório à carga constante e à carga variável para medição do concreto permeável, estes por sua vez, com diferenças quanto aos seus valores finais dependendo do método e

condições de testes utilizados (TENNIS, *et al.*, 2004; LI, *et al.*, 2012; RANIERI *et al.*, 2012).

As opções de ensaios indicados pela NBR 16416 (2015), para determinação do coeficiente de permeabilidade para concretos permeáveis, são os ensaios à carga constante e à carga variável de permeabilidade de pavimento permeável, pois atendem as recomendações dos experimentos como materiais de elevada permeabilidade. Logo, para efeito comparativo, foi realizado também nesta campanha experimental o ensaio de permeabilidade à carga variável, como referência a NBR 14545 (2000).

Após a realização dos ensaios, serão avaliados se os concretos permeáveis executados atendem as exigências para uso como revestimento de pavimento de concreto permeável, conforme a NBR 16416 (2015), onde o coeficiente de permeabilidade mínima é de  $10^{-3}$  m/s.

Nesta campanha experimental, os ensaios à carga constante e à carga variável, empregados normalmente em laboratório para determinação de permeabilidade do solo, foram adaptados da NBR 13292 (1995) e NBR 14545 (2000) respectivamente, para o uso de permeabilidade dos corpos de prova em concreto permeável, onde os permeômetros construídos artesanalmente com tubos de PVC foram utilizados para essa finalidade.

Para tais ensaios, os corpos de prova cilíndricos foram retificados em suas extremidades com a utilização do equipamento rebolo diamantado, como apresentado na Figura 26, somente para garantir o nivelamento da montagem dos permeômetros e a limpeza superficial das amostras, evitando a obstrução do fluxo de água a ser percolado.

**Figura 26** – Corpo de prova cilíndrico retificado para os ensaios de permeabilidade



**Fonte:** A autora (2021).

Com o objetivo de evitar a perda de água por sua superfície lateral, as amostras saturadas com superfície seca, foram envoltas em filme de PVC esticável e recobertos com fita adesiva impermeável, conforme a Figura 27.

**Figura 27** – Corpo de prova cilíndrico revestido com cobertura impermeável



Fonte: A autora (2021).

Ademais, os corpos de prova foram encamisados por um anel de borracha de mesmo diâmetro e pressionados por um conjunto de braçadeiras metálicas para garantir a percolação da água através do corpo de prova e não em sua superfície lateral. Parte do processo da montagem e fixação desta etapa junto aos permeômetros pode ser visualizado na Figura 28.

**Figura 28** – Parte do processo de montagem e fixação do corpo de prova ao permeômetro



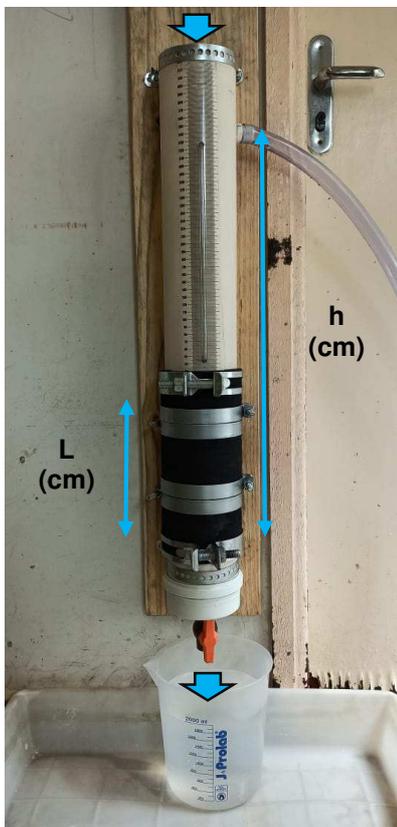
Fonte: A autora (2021).

#### **5.2.10.1 Ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga constante**

O ensaio de permeabilidade à carga constante consistiu em um procedimento adaptado a NBR 13292 (1995). As amostras cilíndricas envoltas com cobertura impermeável, conforme as Figura 27 e Figura 28, conectadas a tubos de PVC,

emprega-se em sua execução um permeâmetro que direciona o fluxo de água ao longo do comprimento do corpo de prova, como apresentado na Figura 29.

**Figura 29** – Permeâmetro para ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga constante



Fonte: A autora (2021).

O ensaio começa logo que é saturado totalmente o sistema, e o nível da água se mantém constante na altura do extravasor. Após inicia-se a coleta do volume de água e vai-se tomando o tempo. Para este ensaio foi coletado o volume de água de aproximadamente 2 litros, confirmado posteriormente em balança de precisão, e aferido o tempo sincronicamente.

Por fim, os resultados são obtidos através dos dados coletados de quantidade de água infiltrada e tempo necessário para a infiltração. O ensaio é realizado com a reposição da água no reservatório abastecedor, o que garante uma carga hidráulica constante, seguindo o princípio da Lei de Darcy, expresso na Equação 5.

**Equação 5** – Cálculo de permeabilidade à carga constante

$$K = \frac{\Delta v \cdot L}{\Delta t \cdot A \cdot h}$$

Onde:

K: coeficiente de permeabilidade à carga constante (cm/s);

v: volume de água coletado (N);

L: comprimento da amostra (cm);

t: tempo para coletar o volume de água (s);

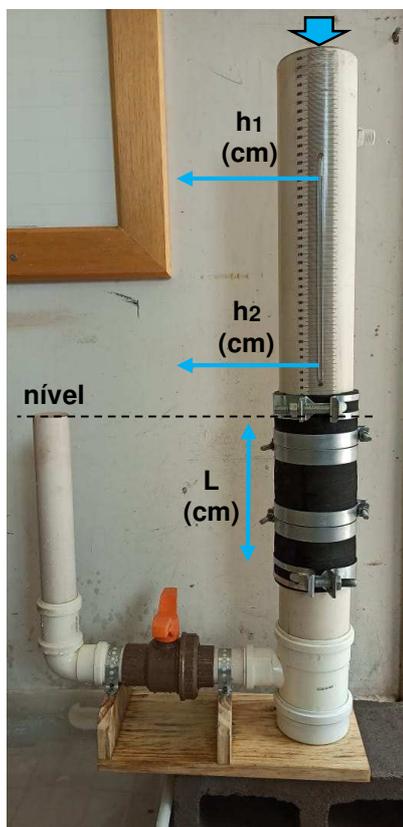
A: área da seção transversal da amostra (cm<sup>2</sup>);

h: altura da lâmina d'água ou carga hidráulica (cm).

### 5.2.10.2 Ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga variável

O ensaio de permeabilidade à carga variável foi medido pela adaptação do ensaio para solos finos, de acordo com a NBR 14545 (2000). Para tanto, utilizou-se de um permeômetro construído em PVC, munido de um registro para fechamento da circulação de água, bem como um nível externo para verificação da altura de coluna d'água conforme a Figura 30.

**Figura 30** – Permeômetro para ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga variável



Fonte: A autora (2021).

Com os corpos de prova devidamente envoltos com cobertura impermeável, conforme as Figura 27 e Figura 28, iniciou-se o ensaio adicionando a água pelo tubo de saída do permeâmetro até as proximidades de seu nível máximo, que condiz com o nível do topo da amostra, garantindo que não houvesse presença de ar em sua estrutura interna. Após imersão completa da amostra, fechou-se o registro existente no centro do permeâmetro. Na sequência, a água foi adicionada ao tubo graduado até atingir uma altura de coluna d'água de 30 cm. Por fim, o registro foi aberto e cronometrado o tempo necessário até a água atingir o nível de 7 cm.

De posse dos dados obtidos no ensaio, a determinação da condutividade hidráulica foi realizada pelo emprego da Equação 6.

**Equação 6** – Cálculo de permeabilidade à carga variável

$$K = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Onde:

K: coeficiente de permeabilidade à carga variável (cm/s);

a: seção transversal do tubo de alimentação (cm<sup>2</sup>);

L: comprimento da amostra (cm);

A: área da seção transversal da amostra (cm<sup>2</sup>);

t: tempo disperso na infiltração (s);

h<sub>1</sub>: nível inicial da água (cm);

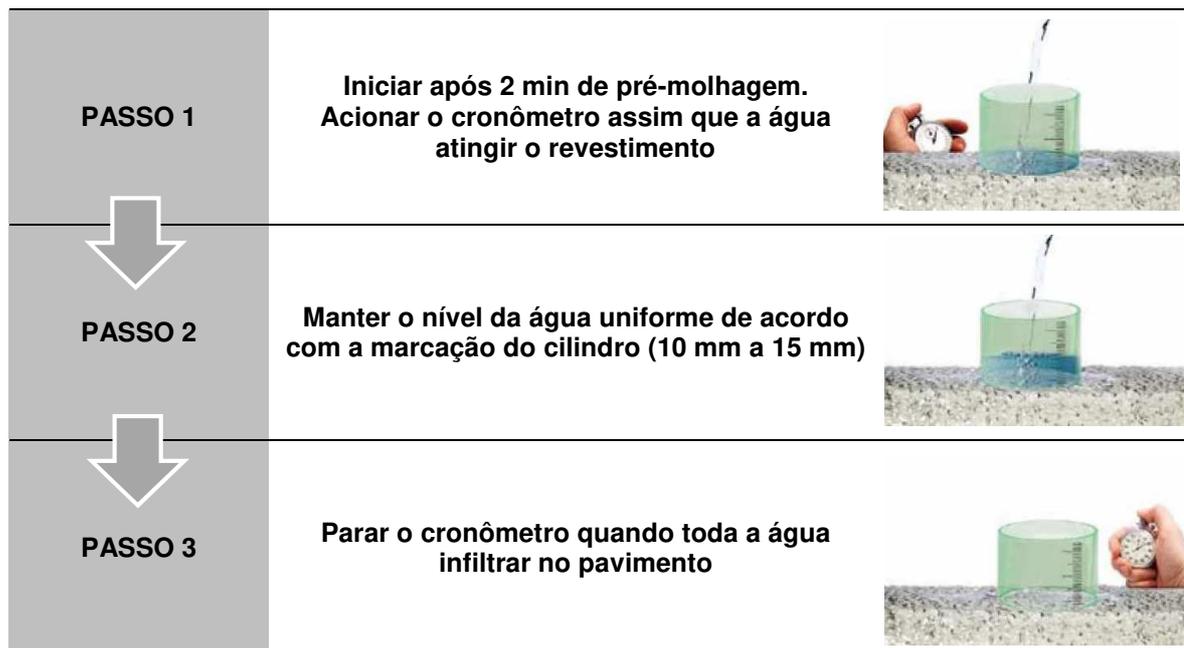
h<sub>2</sub>: nível final da água (cm).

### **5.2.10.3 Ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável**

O coeficiente de permeabilidade do concreto para pavimento permeável foi realizado em laboratório, conforme a NBR 16416 (2015). Para a sua determinação, preparou-se o corpo de prova de concreto permeável em placa (revestimento do pavimento permeável) e um cilindro vazado com diâmetro interno de 290 mm e altura de 100 mm, de material impermeável e rígido, colado ao corpo de prova com massa de calafetar para não permitir vazamentos.

Internamente ao cilindro foram demarcadas linhas de referência com distâncias de 10 mm e 15 mm em relação à face inferior do anel, para medir o nível da água durante o ensaio. O volume de água do ensaio é determinado em função do tempo de pré-molhagem, utilizando 18 kg para tempo inferior a 30 segundos e 3,6 kg para tempos superiores. Os ensaios foram realizados conforme a Figura 31 e Figura 32.

**Figura 31** – Processo do ensaio de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável



**Fonte:** Adaptado de NBR 16416 (2015); solucoesparacidades.com.br (2020)

**Figura 32** – Ensaio de permeabilidade em revestimento de pavimento permeável



**Fonte:** A autora (2021).

Dado todo o processo, foram realizados os cálculos para determinação do coeficiente de permeabilidade, expresso na Equação 7.

**Equação 7** – Cálculo de permeabilidade à carga variável de pavimento permeável

$$k = \left( \frac{C \cdot m}{d^2 \cdot t} \right)$$

Onde:

k: coeficiente de permeabilidade (mm/h);

m: massa de água infiltrada expressa em quilogramas (Kg);

d: diâmetro interno do cilindro de infiltração (mm);

t: tempo necessário para toda a água percolar (s);

C: fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4 583 666 000.

Para fins práticos e de controle do material, a utilização do ensaio de carga variável pode ser realizada de maneira simples em campo, facilitando a comparação entre os resultados de campo e laboratório.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO: PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Em um primeiro momento, se mostram os resultados da primeira campanha experimental, onde o objeto do estudo foi a influência da granulometria no desempenho do concreto permeável como revestimento de pavimento urbano, afim de determinar o concreto permeável controle para continuidade à segunda campanha experimental.

Foram utilizadas nesta campanha, duas dimensões máximas de agregado graúdo. Sendo estas, a brita zero (B0), com dimensão máxima de 9,5 mm e brita um (B1) com dimensão máxima de 12,5 mm.

A brita um foi segmentada em duas granulometrias distintas, por ser comercializada separadamente na cidade de Umuarama-PR (pedra meia e brita um), bem como por possuir duas dimensões predominantes retidas, onde a brita (B1a) obtém a dimensão predominante de 9,5 mm e a brita (B1b) a dimensão predominante de 12,5 mm.

Sendo assim, para formar a composição granulométrica desta campanha foram utilizadas a (B0) e mais duas combinações das britas divididas em partes iguais de 50% (B0/B1a e B1a/B1b). Para as propriedades mecânicas e hidráulicas foram analisadas a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação presente na medição de cada ensaio realizado.

### 6.1 Resistência à compressão

Os concretos para esta propriedade foram ensaiados aos 7, 14 e 28 dias respectivamente. A Tabela 14 e a Figura 33 apresentam os valores da medição desta propriedade.

**Tabela 14** – Resistência à compressão da primeira campanha experimental

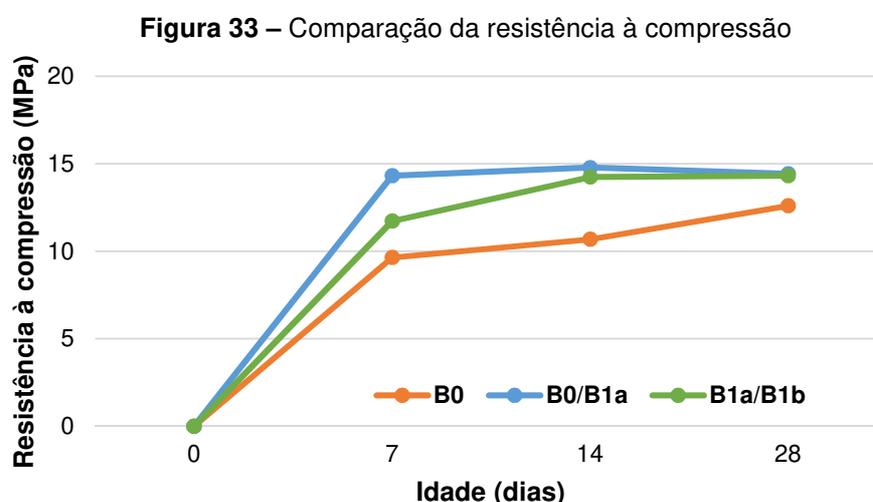
Tipo de Agregado	B0			B0/B1a			B1a/B1b		
	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Idade (dias)	9,73	11,69	12,01	14,91	15,07	11,75	11,27	13,96	11,38
	9,65	12,58	13,13	14,64	12,54	17,74	11,31	11,32	14,45
	9,66	9,06	14,77	15,83	15,14	16,40	11,69	11,89	19,44
	8,66	9,72	12,05	13,02	14,67	12,64	10,28	11,90	12,10
	10,48	10,41	13,06	13,40	18,92	14,19	13,15	12,88	16,10
	9,22	11,31	11,64	13,29	13,23	13,85	11,45	15,28	12,14
Média (MPa)	9,64	10,68	12,60	14,31	14,78	14,42	11,72	14,24	14,31
Desvio padrão	0,59	1,23	1,15	1,07	2,06	2,07	0,99	3,88	2,82
Coef. de variação (%)	6,09	11,57	9,15	7,50	13,96	14,34	8,49	27,24	19,74

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Tabela 14, pode ser observado que o concreto com B1a/B1b apresentou os maiores coeficientes de variação quando comparado com as outras combinações de agregados. Este fato pode estar relacionado por uma maior heterogeneidade do material, dificultando a trabalhabilidade do concreto.

Constata-se nas amostras de concreto B0/B1a e B1a/B1b a diminuição da resistência à compressão de 14 para 28 dias de cura. Tal redução pode ser devido à característica física do concreto permeável, que por definição, contém muitos vazios conectados e distribuídos de forma aleatória, corroborado com a presença do coeficiente de variação elevado, está sujeito a não apresentar a mesma tendência de resultados esperados como o concreto convencional ao longo das idades.

Logo, observa-se que o concreto com B0 apresentou o menor coeficiente de variação, o que indica uma maior homogeneidade entre os corpos de prova analisados. Outro fator que contribuiu positivamente na diminuição do coeficiente de variação foi o fato de ter grãos de menor tamanho, resultando em mais pontos de contato quando comparada com a B1a/B1b.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Em comparação ao índice de vazios se relacionam de maneira diretamente proporcional, em destaque aos corpos de prova B0 que por apresentar maior quantidade de vazios obteve uma menor resistência à compressão axial.

Portanto, na melhora granulométrica apresentada na composição B0/B1a se aumenta a continuidade da granulometria, a densidade e o empacotamento dos grãos. Assim, maiores pontos de contato e menores vazios vão garantir uma melhor distribuição de esforços diante a aplicação de carga, e como consequência um

aumento na resistência à compressão. Já na composição com B1a/B1b o ganho na resistência a compressão é avaliado por obter a maior dimensão de agregado e pela pasta (mistura de cimento e água) que faz a ponte de união entre os grãos.

Conforme a pesquisa de Sandoval (2014), apresentou respostas aproximadas a média da compressão, aos 28 dias, para a amostra de concreto permeável com agregado graúdo B0 (dimensão máxima característica de 9,5mm), atingindo 9,56 MPa, com diferença de 3,04 MPa em relação a presente pesquisa. Houve também conformidade com a evolução da resistência, conforme o aumento da continuidade granulométrica entre os grãos.

Por fim, de acordo com a NBR 16416 (2015), as respostas obtidas neste ensaio não qualificam o uso dos concretos estudados como revestimento de peça de concreto permeável, onde a resistência mecânica à compressão mínima é de 20,0 MPa.

## 6.2 Ensaios de resistência à tração por métodos indiretos

### 6.2.1 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi avaliada aos 7, 14 e 28 dias e os resultados estão apresentados na Tabela 15 e na Figura 34.

**Tabela 15** – Resistência à tração por compressão diametral da primeira campanha experimental

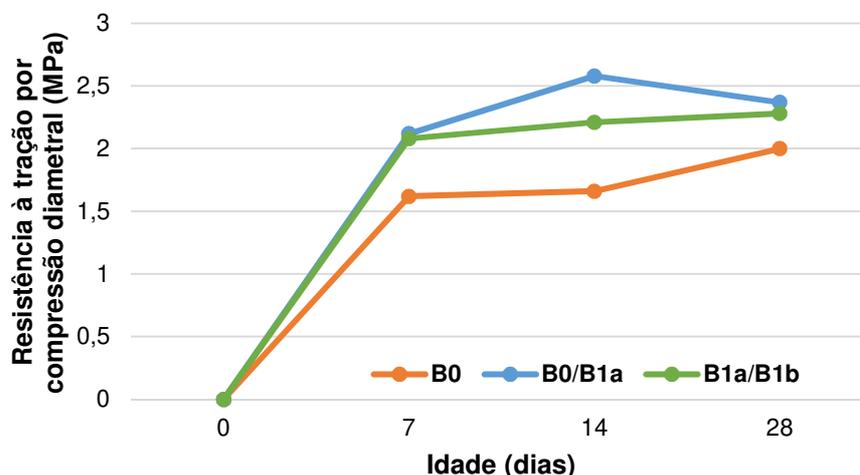
Tipo de Agregado	B0			B0/B1a			B1a/B1b		
	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Idade (dias)	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Resistência à tração por compressão diametral (Mpa)	1,57	1,86	2,24	2,43	3,02	2,42	2,27	2,66	2,65
	1,62	2,07	2,11	2,24	2,84	2,81	1,98	1,64	2,06
	1,68	1,70	2,12	1,91	3,03	2,34	1,26	1,88	1,91
	1,38	1,42	2,07	2,26	2,42	2,43	1,85	1,64	3,19
	1,59	1,41	1,73	2,20	2,22	2,54	2,09	2,02	2,31
	1,83	1,78	1,97	1,68	2,44	1,81	2,20	3,42	1,92
	1,66	1,41	1,74	2,15	2,12	2,27	2,90	2,22	1,97
Média (Mpa)	1,62	1,66	2,00	2,12	2,58	2,37	2,08	2,21	2,28
Desvio padrão	0,13	0,07	0,26	0,25	0,38	0,30	0,49	0,64	0,48
Coef. de variação (%)	8,02	4,22	13	11,79	14,73	12,66	23,56	28,96	21,05

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

No caso da resistência à tração por compressão diametral, o travamento dos grãos é um parâmetro importante, pois onde encontram-se predominância com só um tamanho de grão não vai gerar o melhor travamento e conseqüentemente serão mais frágeis nos contatos entre os grãos. Portanto as amostras B0 atingem a menor

resistência neste ensaio quando comparado com as outras duas granulometrias, demonstrada na Figura 34.

**Figura 34** – Comparação da resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Desta forma, no caso da combinação B0/B1a a melhora granulométrica confirma que existe um travamento real, onde os vazios dos grãos de maior tamanho são preenchidos pelos grãos menores, atingindo melhor resistência quando comparado com as outras duas granulometrias utilizadas.

### 6.2.2 Resistência à tração na flexão

Os valores encontrados para resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela 16 e na Figura 35. Para determinação dos cálculos, foi utilizada a Equação 3, apresentada no capítulo 5, pois não foram obtidas rupturas nas amostras fora do terço médio.

Conforme a Tabela 16, os resultados para resistência à tração na flexão foram considerados satisfatórios, onde a média das amostras em 7 dias resultaram entre 4,37 MPa a 5,44 MPa e em 28 dias entre 4,96 MPa a 6,14 MPa, uma vez que outros estudos como Gonçalves (2002), obtiveram valores próximos a 4 MPa.

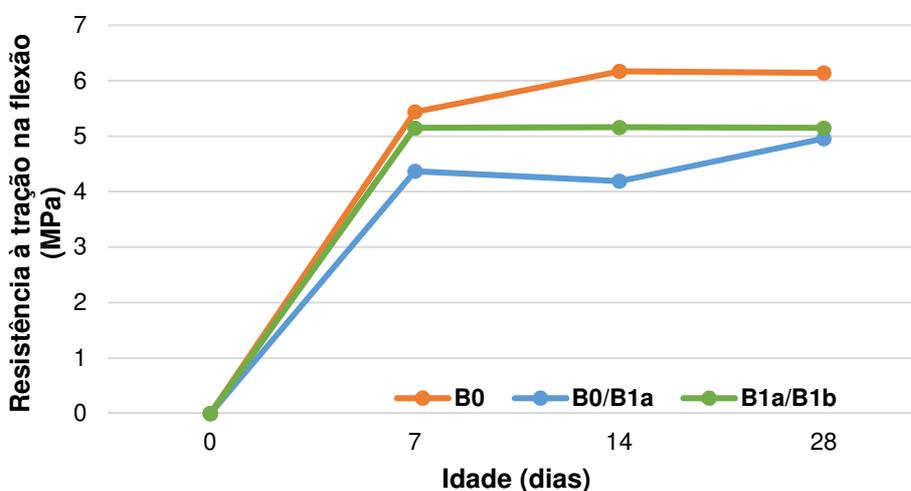
**Tabela 16 – Resistência à tração na flexão da primeira campanha experimental**

Tipo de Agregado	B0			B0/B1a			B1a/B1b		
Idade (dias)	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Resistência à tração na flexão (Mpa)	6,80	6,09	4,88	4,59	3,09	4,97	5,62	2,56	3,65
	6,65	4,79	7,21	4,85	4,03	5,18	5,74	6,12	6,50
	4,15	6,97	7,30	4,94	3,97	6,27	6,29	4,12	5,12
	5,15	6,12	6,32	3,65	5,74	4,79	5,82	6,74	3,79
	4,88	6,27	6,27	4,88	4,00	4,44	5,44	5,82	5,65
	6,27	5,21	6,35	3,94	4,09	5,12	3,65	5,03	5,50
	4,18	7,74	4,65	3,76	4,41	3,97	3,54	5,77	5,85
Média (Mpa)	5,44	6,17	6,14	4,37	4,19	4,96	5,15	5,16	5,15
Desvio padrão	1,13	0,99	1,03	0,57	0,79	0,71	1,21	1,42	1,06
Coef. de variação (%)	20,77	16,04	16,77	13,04	18,85	14,31	23,49	27,52	20,58

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Neste ensaio, pode-se observar que todos os resultados obtidos nas três granulometrias trabalhadas foram superiores ao estabelecido pela NBR 16416 (2015), onde determina que a resistência à tração na flexão para revestimentos de concreto permeável moldado no local seja superior a 1,0 MPa.

**Figura 35 – Comparação da resistência à tração na flexão**



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Este ensaio, propriedade importante para determinação do concreto permeável como revestimento permeável, diferente dos anteriormente apresentados, demonstrou que o concreto com o agregado B0 obteve o melhor desempenho, na sequência a composição com B1a/B1b e B0/B1a, conforme indicado na Figura 35. Este fato indica que a granulometria mais uniforme entre as três estudadas prevalece em resultado para a resistência à tração na flexão.

Em concordância com a pesquisa de Raphael (1984), após realizar análise com um grande número de resultados de resistência à tração, observou-se que a resistência à tração na flexão é, em geral, 15% da resistência à compressão, cenário este, semelhante obtido nesta primeira campanha experimental.

### 6.3 Ensaios de imersão

#### 6.3.1 Absorção de água por imersão

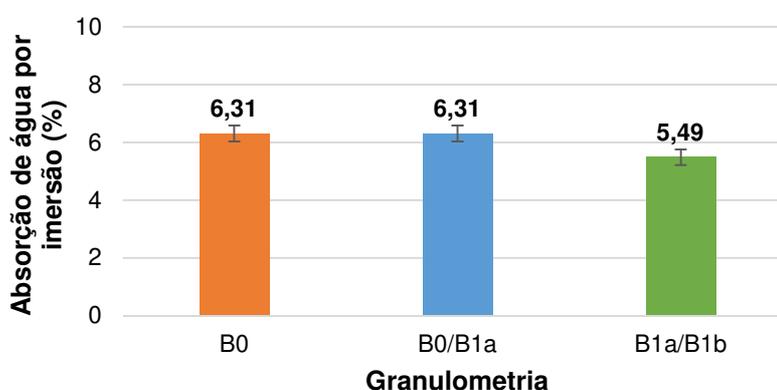
A Tabela 17 e Figura 36 trazem os resultados encontrados no ensaio de absorção de água por imersão, onde verificou-se que em todas as amostras analisadas foram encontrados resultados dentro do limite pré-estabelecido por Neville (1997). Este autor determinou ainda que, as análises de absorção de água não podem ser caracterizadas como uma medida a fim de determinar a qualidade do concreto, porém, ressalta que concretos tidos como de boa qualidade apresentam resultados de absorção inferiores a 10%, índice esse dentro do limite em todos resultados encontrados.

**Tabela 17** – Absorção de água por imersão da primeira campanha experimental

Tipo de Agregado	Absorção de água por imersão (%)						Média (%)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
	28 dias								
B0	6,66	6,37	6,22	6,09	6,27	6,24	6,31	0,19	3,01
B0/B1a	5,94	6,41	6,42	5,73	5,57	7,78	6,31	0,80	12,68
B1a/B1b	5,40	5,27	5,46	5,04	5,36	6,44	5,49	1,07	19,49

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

**Figura 36** – Comparação da absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 6.3.2 Determinação do índice de vazios

A Tabela 18 organiza todos os dados obtidos com o ensaio de imersão para obtenção do índice de vazios, esta realizada em estado endurecido aos 28 dias.

Analisa-se que a granulometria composta pela B1a/B1b é o material que apresentou maior coeficiente de variação da medição de porcentagem de vazios, explicada pelo arranjo dos grãos depois do processo de compactação.

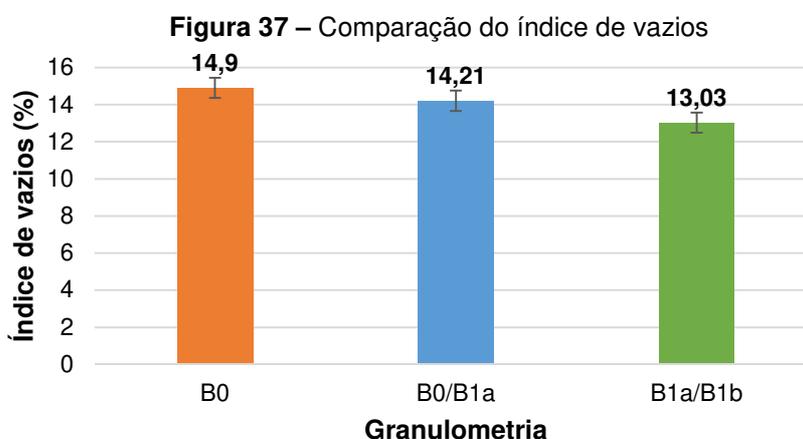
**Tabela 18** – Índice de vazios da primeira campanha experimental

Tipo de Agregado	Índice de vazios (%)						Média (%)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
	28 dias								
B0	15,64	14,87	14,78	14,44	14,89	14,81	14,90	0,39	2,62
B0/B1a	13,97	14,86	14,86	13,62	13,31	14,63	14,21	0,69	4,85
B1a/B1b	12,74	12,55	12,81	12,25	12,91	14,93	13,03	0,96	7,37

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tennis, Leming e Akers (2004) em seu estudo aponta que índices de vazios na ordem de 20% garantem boas características quanto a resistência e também permeabilidade. O concreto tido como permeável é considerado um compósito com baixa porosidade quando apresentarem índices de vazios abaixo de 15%, e com porosidade elevada se esses índices forem superiores a 30% (BATEZINI, 2013).

Os corpos de prova que foram analisados são considerados com baixa porosidade, conforme identificado na Figura 37, o que pode demonstrar que, apesar da ausência do agregado miúdo no concreto para obter uma mistura homogênea, houve um bom adensamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quanto maior o número de golpes para o adensamento, menor será o índice

de vazios. Como foram mantidas as quantidades de golpes para conformação das amostras, observou-se que esse índice pouco se alterou em relação as diferentes granulometrias, destacando com o maior valor a composição com o agregado B0 atingindo 14,9 % e menor índice de vazios com o agregado B1a/B1b de 13,03 %. Este resultado obtido direciona a visão do comportamento do concreto permeável em todas as demais propriedades estudadas.

No estudo de Sandoval (2014), a porcentagem de vazios no concreto permeável, com agregado graúdo B0 (dimensão máxima característica de 19 mm) atingiu 19,29 %, diferença de 4,39 %, em relação ao maior de valor encontrado no concreto B0 desta pesquisa.

## 6.4 Ensaios de permeabilidade

### 6.4.1 Coeficiente de permeabilidade à carga constante e à carga variável

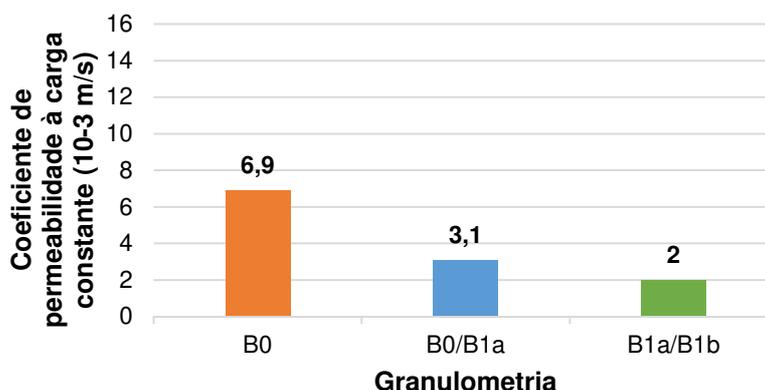
Nas Tabela 19 e 20 e nas Figura 38 e Figura 39, encontram-se os resultados do coeficiente de permeabilidade à carga constante e à carga variável avaliados mediante a adaptação dos ensaios de permeabilidade para solos finos.

**Tabela 19** – Coeficiente de permeabilidade à carga constante da primeira campanha experimental

Tipo de Agregado	Coeficiente de permeabilidade à carga constante ( $10^{-3}$ m/s)						Média ( $10^{-3}$ m/s)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
	28 dias								
B0	7	5,4	7,4	6,9	7,9	6,6	6,9	0,08	11,59
B0/B1a	2,4	0,3	0,7	6,4	5,5	3,4	3,1	0,25	80,64
B1a/B1b	2	1	1,8	1,9	4,9	0,6	2	0,15	75

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

**Figura 38** – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga constante



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

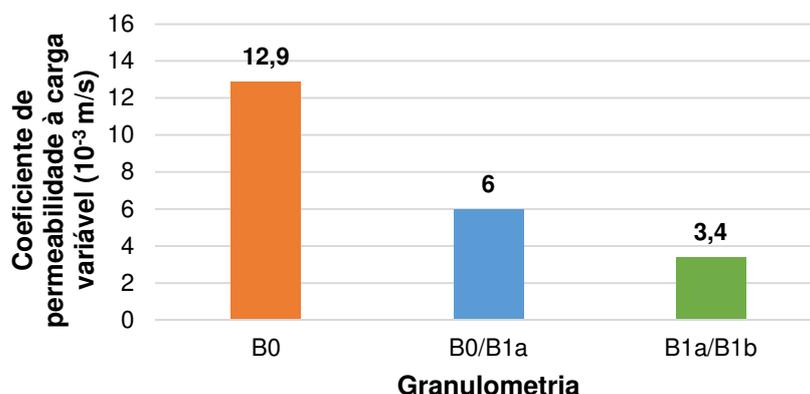
Segundo os resultados apresentados na Figura 38, o coeficiente de permeabilidade à carga constante, apresenta seu maior valor no concreto permeável com a granulometria B0, na sequência, a B0/B1a e B1a/B1b.

**Tabela 20** – Coeficiente de permeabilidade à carga variável da primeira campanha experimental

Tipo de Agregado	Coeficiente de permeabilidade à carga variável ( $10^{-3}$ m/s)						Média ( $10^{-3}$ m/s)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
	28 dias								
B0	12,9	10,3	13,8	12,2	15,9	12,2	12,9	0,19	14,73
B0/B1a	4,2	0,4	1,6	12,8	10,7	6,4	6	0,49	81,66
B1a/B1b	3,6	1,6	3	2,7	8,4	1,2	3,4	0,26	76,47

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

**Figura 39** – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga variável



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O coeficiente de permeabilidade à carga variável, de acordo com a Figura 39, também como os resultados à carga constante, apresenta seu maior valor no concreto permeável com a granulometria B0, B0/B1a e B1a/B1b, consecutivamente, porém, obteve uma grande dispersão nos valores encontrados comparando ao ensaio à carga constante.

Tais ensaios acima apresentados cumprem com o valor mínimo estipulado pela NBR 16416 (2015) a qual fixa a permeabilidade mínima para o revestimento de concreto permeável em  $10^{-3}$  m/s.

De acordo com Sandoval (2014), estes ensaios permitem medir o coeficiente de permeabilidade, onde concordam com a porcentagem de vazios. Desta forma, pode-se dizer que neste caso a permeabilidade apresentou-se diretamente ligada à porcentagem de vazios do material, da mesma forma, foi influenciada pela distribuição granulométrica e a compactação.

#### 6.4.2 Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável

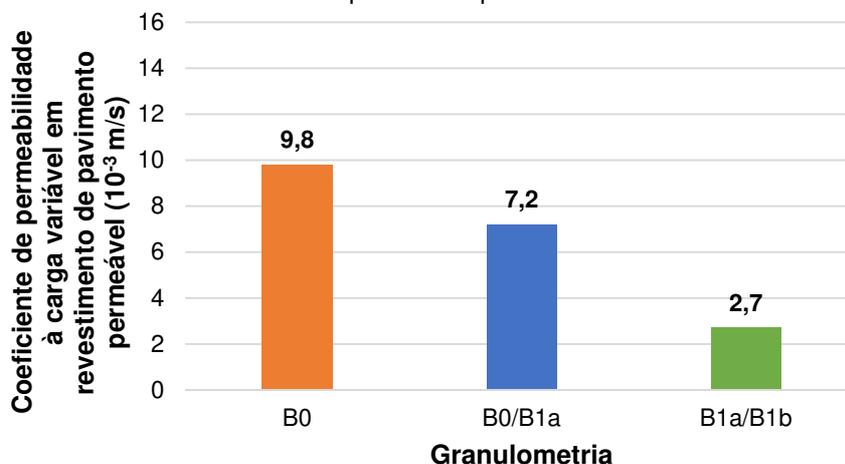
Os resultados do ensaio de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável, realizados em placas, conforme prescreve a NBR 16416 (2015), estão apresentados na Tabela 21 e na Figura 40, obtidos através das três granulometrias estudadas.

**Tabela 21** – Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável da primeira campanha experimental

Tipo de Agregado	Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável ( $10^{-3}$ m/s)
	28 dias
B0	9,8
B0/B1a	7,2
B1a/B1b	2,7

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

**Figura 40** – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os resultados apresentados na Figura 40, em conformidade com os ensaios realizados do coeficiente de permeabilidade à carga constante e à carga variável, cumpriram o requisito da NBR 16416 (2015), no qual o coeficiente de permeabilidade mínima para o revestimento de concreto permeável é de  $10^{-3}$  m/s.

As respostas deste ensaio, também como os obtidos no ensaio à carga constante e à carga variável, apresentaram seu maior resultado no concreto permeável com a granulometria B0, B0/B1a e B1a/B1b, consecutivamente.

Por conseguinte, como resposta referencial a normativa NBR 16416 (2015), pode-se observar que os resultados apresentados neste ensaio obtiveram maior proximidade com as respostas alcançadas no ensaio de permeabilidade à carga variável em relação aos apresentados no ensaio à carga constante.

Desta forma, pode-se validar este presente ensaio como referencial normativo para a segunda campanha experimental, em substituição ao ensaio de coeficiente de permeabilidade à carga variável, mantendo como parâmetro diferencial em relação a dispersão dos resultados, somente o ensaio do coeficiente de permeabilidade à constante.

Contudo, as amostras analisadas se mostraram superiores aos valores encontrados em outros estudos e aproximadamente dez vezes mais ao estabelecido em norma, para o ensaio à carga variável em revestimento de pavimento permeável. Batezini (2013), por sua vez, alcançou valores do coeficiente permeabilidade entre  $1,30$  e  $1,50 \cdot 10^{-3}$  m/s e Sandoval (2014) entre  $1,52$  e  $2,77 \cdot 10^{-3}$  m/s.

## **6.5 Resumo da primeira campanha experimental**

De acordo com os ensaios realizados no decorrer desta campanha, em relação as diferentes composições granulométricas de agregados graúdos estudadas (B0, B0/B1a e B1a/B1b), pode-se observar variações nos resultados na média final aos 28 dias.

Os resultados obtidos nas amostras com a granulometria B0 apresentaram as melhores respostas em condutividade hidráulica, mostrando que amplia a capacidade de percolação das precipitações para o solo, tornando-se a opção mais eficaz para esta propriedade.

Pode-se observar também, que o concreto permeável com agregado B0/B1a, apresentou melhor desempenho mecânico nos ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Porém, o concreto permeável com o agregado B0 obteve maior resistência mecânica à tração na flexão, propriedade importante para definição quanto ao uso do concreto permeável como revestimento para pavimento moldado no local, de acordo com a NBR 16416 (2015).

Por fim, diante do exposto, para dar andamento a segunda campanha experimental, fica determinado como concreto permeável controle desta campanha, a amostra B0 (com dimensão máxima de 9,5 mm), por obter além do melhor resultado à tração na flexão, também um melhor acabamento uniforme, garantindo mais

segurança e conforto ao usuário, visando a utilização como revestimento de concreto permeável para tráfegos leve e de pedestre.

## **7 MATERIAIS E MÉTODOS: SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL**

### **7.1 Materiais constituintes**

O objetivo desta campanha será viabilizar o reaproveitamento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como elemento sustentável, em substituição parcial ao cimento, para produção de concreto permeável. O intuito é tornar o concreto permeável ainda mais sustentável, possibilitando seu uso como revestimento de pavimento permeável em ambientes urbanos, considerando como referencial as propriedades mecânicas e hidráulicas.

Os materiais utilizados ao longo desta campanha serão:

- Cimento Portland CP II-E-32, da marca Cimento Nacional, composto de 51% à 94% de clínquer + sulfatos de cálcio e 6% à 34% de escória granulada de alto-forno.
- Agregado graúdo de basalto, caracterizado na primeira campanha experimental, conforme a Tabela 10, com dimensão prevista máxima de 9,5 mm (brita zero - B0).
- Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), fornecida pela Usina Melhoramentos do Norte do Paraná, localizada na cidade de Jussara-PR.
- Água potável, proveniente da empresa abastecedora da cidade de Umuarama-PR, conforme recomendações normativas.

### **7.2 Métodos**

#### **7.2.1 Caracterização dos agregados graúdos**

Para dar continuidade a segunda campanha experimental, foram identificados inicialmente a seleção de um concreto permeável controle como base de referência da primeira campanha. A granulometria do concreto permeável escolhido obteve uma melhor resposta aos resultados mecânicos, hidráulicos e de acabamentos em relação as combinações granulométricas estudadas.

Neste sentido, conforme os resultados apresentados na primeira campanha experimental, a granulometria definida para esta segunda campanha será a B0 (brita 0). Esta, por sua vez, cumpre as respostas mecânicas e hidráulicas mínimas para uso do concreto permeável como revestimento de pavimento permeável moldado no local,

de acordo com a NBR 16416 (2015), além de ser uma melhor alternativa quanto ao acabamento, atendendo o máximo de conforto na caminhabilidade do usuário.

### **7.2.2 Processo para utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)**

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) foi coletada na indústria sucroalcooleira denominada Usina Melhoramentos do Norte do Paraná (Figura 41), localizada na cidade de Jussara, na região Noroeste do Paraná, distante 108 Km de Umuarama.

O uso da CBC no trabalho visa a redução da utilização de recursos naturais com menor consumo do cimento Portland e uma destinação mais adequada ao subproduto, agregando valor sustentável ao concreto permeável, minimizando os impactos ambientais na região do Arenito Caiuá.

**Figura 41** – Usina Melhoramentos Norte do Paraná, Jussara/PR



**Fonte:** cmnp.com.br (2021).

#### **7.2.2.1 Coleta**

A coleta da cinza foi realizada diretamente do pátio de fuligem da usina. Este material é procedente da lagoa de decantação, processado a vácuo por meio de um filtro, onde a cinza em forma de lodo é direcionada a uma esteira e transferida em caminhões de transporte, por fim, depositada em campo aberto (pátio de fuligem) para posterior descarte e destinação externa, conforme Figura 42.

Este material destinado da lagoa de decantação é constituído de uma fração de cinza misturada a uma fração de solo, em decorrência da colheita ser mecanizada. No processo de decantação a fração de solo se precipita e a fração de cinza permanece na superfície, facilitando a sua remoção.

**Figura 42** – Pátio da usina sucroalcooleira, Jussara-PR: a) lagoa de decantação; b) CBC depositada no pátio de fuligem



**Fonte:** A autora (2021).

Para obter-se uma amostra mais representativa, foi realizada a coleta da CBC depositada no pátio de fuligem, diretamente do topo do monte. Desta forma, contribuiu com a redução de contaminação de solo presente na base monte.

### **7.2.2.2 Estocagem**

A cinza *in natura* foi estocada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá (campus Umuarama) em saco industrial tipo “big bag” utilizado para a coleta na usina. Após peneiramento primário, secagem e resfriamento em estufa, a CBC foi armazenada em sacos plásticos vedados e posteriormente em tambores devidamente fechados para evitar contaminações e absorção de umidade.

### **7.2.2.3 Peneiramento primário**

A CBC *in natura* (Figura 43), sem umidade aparente, depois de armazenada em laboratório pelo período de aproximadamente seis meses, foi peneirada, conforme Costa (2017), em uma peneira de malha 2 mm para reter possíveis impurezas oriundas da própria lagoa de decantação devido à exposição de intempéries, frações de bagaço e partículas grosseiras de cinza.

**Figura 43** – CBC *in natura* antes do peneiramento primário



**Fonte:** A autora (2021).

Foi identificado após a finalização do processo de peneiramento primário (peneira 2 mm), a massa retida média de 11,06 % de impurezas e partículas grosseiras de cinza, conforme apresentado na Figura 44.

**Figura 44** – Impurezas e partículas grosseiras da CBC *in natura* retida na peneira 2 mm



**Fonte:** A autora (2021).

#### **7.2.2.4 Secagem**

Posterior ao peneiramento primário, a CBC *in natura* passou por processo de secagem em estufa à temperatura de 100°C, durante um período de 48 horas, conforme Filho (2012). Foram dispostas 2,5 kg de cinza, em cada bandeja de alumínio, para a secagem, como apresentada na Figura 45.

**Figura 45** – Secagem da CBC *in natura* na estufa



**Fonte:** A autora (2021).

Em seguida, a CBC foi resfriada naturalmente dentro da estufa, por no máximo 30 minutos e armazenada diretamente em sacos plásticos e tambores vedados para evitar absorção de umidade. Ao término do processo de secagem, foi possível verificar a redução média em massa de 12 % do material, decorrente da perda de umidade ainda presente na CBC coletada na usina.

#### **7.2.2.5 Requeima**

A CBC, após seca em estufa (Figura 46), apresenta cor escura, indicando conforme Cordeiro (2006), que a queima na usina se deu em temperaturas inadequadas, uma vez que apresenta elevado teor de carbono.

**Figura 46** – CBC após secagem em estufa



**Fonte:** A autora (2021).

Desse modo, a CBC foi submetida a uma queima adicional, a fim de obter a eliminação da matéria orgânica residual, maior grau de amorficidade e, conseqüentemente, reatividade.

Seguindo os estudos de Cordeiro (2006) e Torres (2019), a temperatura estipulada para a calcinação nesta campanha foi de 600 °C por 4 horas de permanência no patamar de queima com taxa de aquecimento de 15°C/min. Este método, segundo os autores, foi considerado eficiente para a atividade pozolânica, mantendo a sílica contida no bagaço em estado amorfo.

Sendo assim, para garantir melhor aproveitamento do espaço interno do forno mufla J100, da marca JUNG, utilizado no Laboratório de Materiais de Construção (UEM) para a calcinação, em relação a quantidade de material submetido ao ensaio, fabricou-se sob medida uma bandeja metálica (Figura 43 e Figura 46), com espessura da chapa de 0,63 cm e dimensões externas de 35 cm de largura, por 40 cm de comprimento e altura de 10 cm, pelo qual, foi possível dispor 8,50 kg de CBC para cada processo de requeima (Figura 47).

**Figura 47** – Bandeja metálica e forno mufla utilizada para requeima da CBC



**Fonte:** A autora (2021).

Posterior ao período de 4 horas em forno mufla, observou-se que a requeima da cinza não foi completa, aproximadamente 50% do material calcinado, possivelmente devido ao volume de cinza empregado no processo. Desta forma, para manter a referência aos estudos de Cordeiro (2006) e Torres (2019), preservou-se a temperatura do ensaio à 600 °C (com taxa de aquecimento de 15°C/min), misturou-se a amostra de forma homogeneia na bandeja e repetiu-se o processo por mais 4 horas adicionais, resultando na queima completa de todo material, conforme a Figura 48.

**Figura 48** – Requeima da CBC no forno mufla, à 600 °C: a) primeira etapa, queima incompleta nas primeiras 4 horas; b) segunda etapa, queima completa com mais 4 horas adicionais



**Fonte:** A autora (2021).

A partir da secagem da CBC em estufa e calcinação em mufla, em duas etapas de 4 horas à 600 °C, observou-se a perda média em massa de 5,29 %, correspondente à redução na quantidade de carbono e matéria orgânica, e conseqüentemente, o possível aumento da quantidade de sílica amorfa, obtendo uma cor mais clara, para o vermelho, diferente da cor do material coletado *in natura*.

Por fim, ao término de cada etapa de requeima, a CBC foi resfriada naturalmente dentro do forno, por aproximadamente 24 horas. O emprego do resfriamento lento adotado para este ensaio, se deu em função dos resultados obtidos por Vasconcelos (2013), onde a autora concluiu que a adoção do resfriamento brusco provocou resultados insatisfatórios para a CBC, por provocar aumento da cristalinidade.

#### **7.2.2.6 Moagem e determinação da finura da CBC por meio da peneira 45 µm**

Pode-se observar em diversas pesquisas, que os processos de moagem da cinza da cana-de-açúcar não seguem classificação e padronização (CORDEIRO, 2006; POGGIALI; 2010). Há diferenças quanto aos modelos dos moinhos, entre eles: rotativo, vibratório, periquito com jarras de porcelana e planetário; capacidade de rotação dos moinhos; tipos dos corpos moedores, como: aço, alumina e porcelana; e quantidade em massa do material empregado com relação ao tempo de moagem (CORDEIRO, 2006; FILHO, 2012; TORRES, 2019).

Desta forma, como referência as pesquisas já realizadas, a falta de normativa para este ensaio prejudica o efeito comparativo final da cinza beneficiada após a

moagem. Tal fato, direciona muitas vezes à várias tentativas para chegar a solução requerida. Ou ainda, após não obter o resultado estimado com a moagem, leva-se muitas vezes, a seleção deste material por meio do peneiramento, como realizado na pesquisa de Rukzon; Chindaprasirt (2012), onde a seleção foi por peneiramento fino (45  $\mu\text{m}$ ), contribuindo para maior eficiência ao efeito filler e característica pozolânica da CBC, quanto a substituição do cimento em misturas de concreto.

Na presente pesquisa, foi utilizado para moagem da CBC o moinho de bolas rotativo (tipo “sonnex”, modelo I-4205) da marca PAVITEST, fabricada pela CONTENCO, presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Paranaense (UNIPAR), campus Umuarama, conforme Figura 49.

**Figura 49** – Moinho de bolas utilizado na moagem da CBC



**Fonte:** A autora (2021).

De acordo com o manual do usuário, este equipamento é utilizado para moagem de materiais diversos, com utilização de esferas de aço, possibilitando a obtenção de granulometria até 0,045 mm (a obtenção da finura é dada pela função do produto e tempo de moagem). Possui 1,5 cv de potência do motor e  $\pm 70$  rpm de rotação. Conta com tambor em chapa dupla de aço 1045, isolada por lençol de borracha a fim de diminuir o ruído durante a operação. Contém diâmetro interno de 380x420 mm e volume de 47 litros. Trabalha com material a ser moído, respeitando o limite máximo de 5 kg, e agregados de até  $\frac{1}{2}$ " de diâmetro (CONTENCO, 2016).

Neste experimento, para otimizar o tempo de moagem em relação ao volume de CBC resultante do processo final do ensaio, foram utilizados 5 kg em massa de CBC calcinada (limite máximo de material a ser moído por moagem para este

equipamento), com 25 kg de esferas de aço (carga moedora). A variação dos diâmetros e quantidades das esferas utilizadas no processo de moagem foram de:  $4,5 \pm 0,15$  cm (9 unidades);  $4,0 \pm 0,22$  cm (16 unidades);  $3,0 \pm 0,30$  cm (180 unidades) e  $2,0 \pm 0,40$  cm (221 unidades), totalizando-se 426 unidades de esferas, como mostra a Figura 50.

**Figura 50** – Carga moedora utilizada no moinho de bolas para moagem da CBC



**Fonte:** A autora (2021).

Considera-se que o tempo de moagem no moinho de bolas estipulado para esta campanha, influenciará na dimensão das partículas, pois consiste na fragmentação dos grãos. Desta forma, optou-se como referência inicial a pesquisa de Torres (2019), onde, com o tempo de moagem de 27 horas da CBC no moinho de bolas conseguiu alcançar todos os requisitos químicos e físicos como material pozolânico, de acordo com a NBR 12653 (2014).

Na pesquisa de Torres (2019), as cinzas calcinadas e moídas com finura de  $1300 \text{ m}^2/\text{kg}$  e  $1600 \text{ m}^2/\text{kg}$ , a partir do método Blaine, conforme NBR 16372 (2015), foram retidas menos que 20% na peneira  $45 \mu\text{m}$  ( $0,045 \text{ mm}$ ), de acordo com verificação pela distribuição granulométrica a laser, atendendo a NBR 12653 (2014), quanto a característica física pozolânica. A porcentagem retida na peneira  $45 \mu\text{m}$  para cinza com finura de  $1300 \text{ m}^2/\text{kg}$  foi de 2,46%, enquanto a cinza com finura de  $1600 \text{ m}^2/\text{kg}$  foi de 7,51%.

Torres (2019) utilizou um moinho cilíndrico de bolas com dimensões de  $300 \times 260 \text{ mm}$  e volume de 15,9 litros. Os corpos moedores foram esferas de porcelanas com três diâmetros diferentes: 3,5 cm; 2,0 cm e 1,3 cm, que totalizaram 8 kg. Durante o processo, foi colocado 1 kg de cinza por moagem, com a velocidade do moinho de 50 rpm.

Neste contexto, mesmo não obtendo a mesma padronização do moinho de bolas utilizado por Torres (2019), estabeleceu-se no primeiro experimento deste ensaio, 5 kg de CBC calcinada por moagem, no tempo de 27 horas. Utilizou-se a CBC calcinada à 600 °C, em duas etapas de 4 horas, denominada como CBC/27h.

Como método inicial norteador após a moagem da CBC, foi aplicado o ensaio de determinação da finura por meio da peneira 45 µm, conforme a NBR 15894-3 (2010), para continuidade aos demais ensaios da CBC em substituição parcial ao cimento Portland no concreto permeável.

Para tal ensaio, pesou-se 20,0 g ± 0,1 g da amostra de CBC, transferiu-se em um recipiente com aproximadamente 400 ml da solução de hexametáfosfato de sódio na concentração de 12,5 g/l e agitou-se até a dispersão total do material. Logo, colocou-se a peneira, com abertura de malha 45 µm, sob o fluxo de água, verteu-se os 400 ml da solução com a CBC sobre a malha. Para a retirada de todo o material, lavou-se o recipiente, simultaneamente ao fluxo da água, durante pelo menos 10 minutos. Após este processo, transferiu-se o material retido com o auxílio de uma pisseta com água para um recipiente e secou-se em temperatura de 105 °C ± 5 °C, até a massa constante. A finura da CBC foi calculada, conforme a Equação 8.

**Equação 8** – Cálculo da finura por meio da peneira 45 µm

$$F_{45\mu m} = \frac{m_f \cdot c}{m_i} \cdot 100$$

Onde:

$F_{45\mu m}$ : finura representada pelo teor de resíduo retido na malha de 45 µm (%);

$M_i$ : massa inicial da amostra de CBC (g);

$M_r$ : massa de resíduo retido na malha 45 µm após peneiramento via úmida e secagem em estufa (g).

O resultado deste primeiro experimento, com a CBC/27h, foi de 50 % de material retido na peneira 45 µm, não atendo a NBR 12653 (2014), onde estipula como requisito físico mínimo para propriedade pozolânica, menos de 20 % de material retido nesta peneira. Resultado este, bem aquém a resposta obtida por Torres (2019), onde conseguiu resultado positivo a esta normativa, de 2,46 % de material retido.

Constatou-se a importante diferença de finura por meio da peneira 45  $\mu\text{m}$ , em comparação ao primeiro experimento obtido em laboratório, com a CBC/27h e a pesquisa de Torres (2019). Desta forma, fez-se um segundo experimento de moagem, como efeito comparativo ao primeiro realizado em laboratório (CBC/27h).

Neste experimento, por sua vez, reduziu-se o tempo de moagem para 5 horas, em atenção conjunta a redução do gasto energético e otimização de tempo de execução do ensaio. Utilizou-se do mesmo moinho de bolas, cinza calcinada (à 600  $^{\circ}\text{C}$ , em duas etapas de 4 horas) e quantidade de cinza por moagem (5 kg), denominada, desta forma, como CBC/5h. O resultado deste segundo experimento foi de 65 % de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ , não atendo ao requisito físico mínimo da NBR 12653 (2014).

Isto posto, constatou-se que o método de moagem utilizado em laboratório, com a CBC/27h e CBC/5h, não foi compatível à pesquisa de Torres (2019) e a NBR 12653 (2014), para caracterização como material pozolânico, quanto ao requisito físico de finura por meio da peneira 45  $\mu\text{m}$ . Desse modo, foram realizados mais dois experimentos como verificação a esta característica, neste caso, por meio de seleção por peneiramento (material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$ ) após a moagem da CBC calcinada no moinho de bolas, afim de garantir maior redução das partículas de cinza.

Portanto, no terceiro e quarto experimento, consecutivamente, utilizou-se do material CBC/27h e CBC/5h, selecionados e passantes na peneira 75  $\mu\text{m}$  (0,075 mm), para após determinação do ensaio de finura por meio da peneira 45  $\mu\text{m}$ , conforme a NBR 15894-3 (2010). O material resultante do terceiro experimento foi denominado como CBC/27h-P75 e do quarto experimento, como CBC/5h-P75.

Pode-se verificar que ao final de cada período de tempo contínuo de moagem, houve perda de aproximadamente 20 % da massa inicial total (5 kg) utilizada no moinho. Este fato, contribuiu para o aumento da quantidade de vezes do uso do moinho, aumentando conseqüentemente, o tempo de execução para finalização do ensaio, a fim de atingir o volume necessário da CBC beneficiada para a pesquisa.

Como análise comparativa, foram realizados também o ensaio de finura por meio da peneira 45  $\mu\text{m}$ , nos materiais: CBC calcinada à 600  $^{\circ}\text{C}$ , em duas etapas de 4 horas, sem moagem (CBC/calcinada) e na CBC seca em estufa com temperatura de 100  $^{\circ}\text{C}$ , por 48 horas, sem calcinação e moagem (CBC/estufa).

Os resultados do ensaio estão representados na Tabela 22.

**Tabela 22** – Resultados do ensaio de caracterização física da CBC como material pozolânico, quanto ao material retido na peneira 45µm

Material	NBR 15894-3 (2010)	NBR 12653 (2014)
	Material retido na peneira 45 µm (%)	Conformidade como material pozolânico (requisito mínimo: < 20%)
CBC/27h-P75	15 %	sim
CBC/5h-P75	30 %	não
CBC/27h	50 %	não
CBC/5h	65 %	não
CBC/calcinada	80 %	não
CBC/estufa	85 %	não

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

Observa-se que, conforme o grau de beneficiamento por calcinação, moagem e seleção do material por peneiramento, a porcentagem de material retido na peneira 45 µm (NBR 15894-3, 2010) diminui. Fato este, decorrente da redução de matéria orgânica no processo de calcinação e diminuição das partículas pelo processo de moagem e seleção por peneiramento.

A cinza CBC/27h-P75 foi o único material que atingiu ao requisito físico mínimo como característica pozolânica, quanto ao material retido na peneira 45 µm, conforme NBR 12653 (2014). Por conseguinte, foi o material mais beneficiado, passando pelos processos sequenciais de: peneiramento na peneira 2 mm; secagem em estufa; calcinação; moagem a 27 horas e seleção por peneiramento (passante na peneira 75 µm). Este processo contribuiu significativamente com a redução das partículas, chegando a 15 % de material retido na peneira 45 µm, atendendo a normativa.

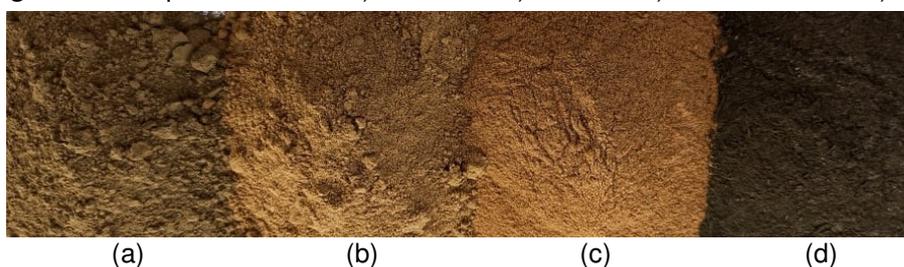
Entre as cinzas CBC/27h e CBC/5h beneficiadas, a diferença foi de 15 % do material retido na peneira 45 µm. Esta diferença contribuiu para a determinação do processo de beneficiamento da CBC para andamento desta pesquisa.

Contudo, optou-se pela moagem da CBC em moinho de bolas no tempo de 5 horas e sem seleção por peneiramento para andamento dos demais ensaios desta campanha experimental, objetivando o atendimento à NBR 16416 (2015), quanto a utilização da CBC/5h em substituição parcial do cimento Portland para revestimento de concreto permeável moldado no local. Circunstância esta, devido ao tempo limitado de execução dos experimentos nos laboratórios, subsequente ao momento pandêmico atual, visando juntamente, a redução do gasto energético para obtenção do volume necessário de CBC beneficiada para utilização total na pesquisa.

### 7.2.2.7 Análise granulométrica

A determinação granulométrica é de grande importância, principalmente quanto a identificação e comparação dos tamanhos das partículas das diferentes CBC obtidas em processos laboratoriais. As CBC foram submetidas à análise granulométrica, de acordo com a NBR 7181 (2016), por meio de sedimentação e peneiramento fino. Essa análise foi realizada para a obtenção de um resultado mais específico do comportamento dos grãos das cinzas CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa, conforme representas na Figura 51.

**Figura 51** – Aspecto da CBC: a) CBC/27h; b) CBC/5h; c) CBC/calcinada; d) CBC/estufa



Fonte: A autora (2021).

Constatou-se que a CBC/estufa possui coloração escura por conter alto teor de carbono não eliminado do processo de secagem e a CBC/calcinada, após o período de requeima em duas etapas à 600 °C, apresenta coloração avermelhada, mais clara que a CBC/estufa, pois reduziu o teor de carbono e matéria orgânica, corroborando com Cordeiro (2006). Nas CBC/5h e CBC/27h observou-se o aumento do escurecimento das cinzas e a presença da formação de grumos, atribuído à aglomeração das partículas, devido ao período longo de moagem, de acordo com o que cita Cordeiro (2006) em sua tese.

Iniciou-se o ensaio de granulometria por meio de sedimentação a partir das amostras de CBC passantes na peneira 2,0 mm e tomou-se cerca de 100 g das amostras para determinação da umidade hidrocópica, de acordo com a NBR 6457 (2016).

Cada CBC estudada foi transferida para um béquer e submerso à uma solução de hexametáfosfato de sódio, mantida em repouso por no mínimo 12 horas. Em seguida, verteu-se a mistura no copo de dispersão e submeteu-se à ação do aparelho dispersor durante 15 minutos. Após este processo, foi transferida a dispersão para a proveta e adicionado água destilada até 1000 cm<sup>3</sup> e realizando na sequência

movimentos de rotação, durante 1 minuto. Imediatamente após a agitação, colocou-se a proveta sobre a mesa e anotou-se a hora exata do início da sedimentação, mergulhando cuidadosamente o densímetro na dispersão. Efetuou-se as leituras iniciais do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação de 0,5 min, 1 min e 2 min e leituras subsequentes à 4 min, 8 min, 15 min e 30 min e 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h, a contar do início da sedimentação. Após cada leitura, mediu-se a temperatura da dispersão, conforme demonstrado na Figura 52.

**Figura 52** – Proveta com a CBC em dispersão para a leitura do ensaio de granulometria por sedimentação



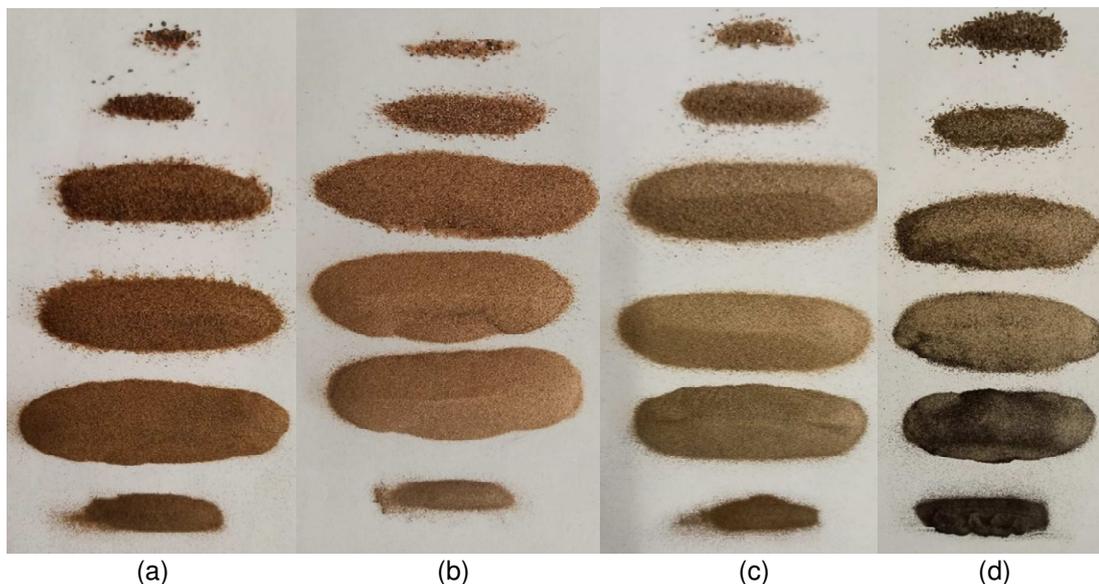
**Fonte:** A autora (2021).

Realizada a última leitura, verteu-se a dispersão da proveta na peneira de 0,075 mm e efetuou-se a lavagem do material empregando-se água potável à baixa pressão.

Para o início do ensaio granulométrico por peneiramento fino, após a lavagem, secou-se o material retido na peneira 0,075 mm em estufa à temperatura de 105 °C a 110 °C e peneirou-se a CBC através das peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm, 0,075 mm, anotando as massas retidas acumuladas.

As massas das cinzas estudadas, CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa, retidas em cada peneira, foram dispostas em sequência para melhor identificação visual (Figura 53), de cima para baixo, sendo a primeira (de cima) a massa retida na peneira 0,6 mm e a última (de baixo), o material resultante do peneiramento passante na peneira 0,075 mm, retida do fundo do jogo de peneiras.

**Figura 53** – CBC retida nas peneiras do ensaio de granulometria por peneiramento fino: a) CBC/27h; b) CBC/5h; c) CBC/calcinada; d) CBC/estufa



Fonte: A autora (2021).

O resultado da granulometria por peneiramento fino é mostrado na Tabela 23. Pode-se observar a variação do tamanho das partículas e a porcentagem total em massa da parcela de finos, partículas minerais com dimensão menor que 0,1 mm (WELLENKAMP, 1999; CORDEIRO, 2006), das cinzas utilizadas nos ensaios de sedimentação e peneiramento fino.

**Tabela 23** – Análise granulométrica por peneiramento fino das cinzas (CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa)

Tipo de agregado	CBC/27h	CBC/5h	CBC/calcinada	CBC/estufa
Abertura (mm)	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada
1,2	0	0	0	0
0,6	0,23	0,46	0,79	0,84
0,42	1,26	3,41	5,37	5,28
0,25	18,95	29,26	38,61	39,32
0,15	50,62	64,26	73,21	74,86
0,075	96,83	98,71	98,95	99,18
FUNDO	100	100	100	100
Dimensão máx. característica (mm)	0,6	0,6	0,6	0,6
Módulo de finura	1,68	1,96	2,17	2,19
Material fino (%)	58,24	42,12	30,21	27,53

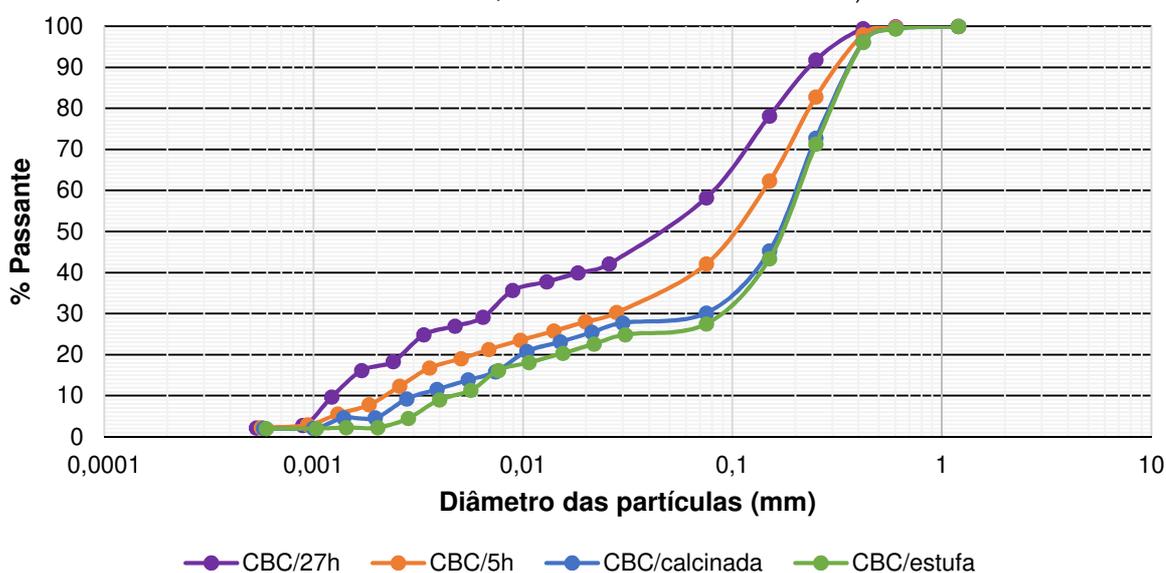
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No parâmetro granulométrico, os processos de moagem (5 e 27 horas) tornaram-se as cinzas com dimensão de partículas próxima à parcela de finos dos agregados miúdos, mas se enquadraram como areia média, conforme a NBR 6502 (1995) e semelhantes aos relatados de Filho (2012), onde obteve amostras com resultados de 0,6 mm para a dimensão máxima característica da CBC e módulo de finura entre 0,97 e 1,16. Observou-se ainda, o aumento das porcentagens de partículas de finos (< 1mm) total da amostra de CBC, quanto maior foi o tempo de moagem.

Contudo, as amostras de cinzas (CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa) não se caracterizaram como material fino, onde cerca de 80% do material é passante na peneira 75 µm, reduzindo seu potencial como efeito filler. A CBC/27h atingiu 58,24 % de material fino, enquanto a CBC/5h chegou a 42,13 %. Este resultado foi contribuído devido a ineficiência no processo de moagem para tal objetivo e a falta do beneficiamento de seleção por peneiramento, na peneira 0,075 mm, decisão tomada devido a disponibilidade de tempo restrito para a execução dos ensaios após o processo de moagem.

Para visualização dos aspectos comparativos referentes à granulometria, por sedimentação e peneiramento fino, de acordo com a NBR 7181 (2016) e com base nos dados obtidos em ensaio, foram construídas curvas granulométricas das cinzas, conforme a Figura 54.

**Figura 54** – Curvas granulométricas por sedimentação e peneiramento fino (CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A curva granulométrica permitiu representar os diferentes diâmetros das partículas em relação a porcentagem do material em suspensão (ensaio de sedimentação) e as partículas que passam nas peneiras (ensaio de peneiramento fino), bem como, identificar a distribuição dos grãos de cada CBC estudada.

Observa-se que a CBC/27h apresentou granulometria mais fina e na sequência a CBC/5h, resultado corroborado pelo módulo de finura e diminuição das partículas pelo tempo de moagem. Como previsto, a CBC/estufa mostrou-se com as maiores dimensões das partículas.

A Tabela 24 apresenta as dimensões média dos grãos obtidos após análise granulometria por sedimentação e peneiramento fino.

**Tabela 24** – Dimensão dos grãos da CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa

Tamanho	CBC/27h	CBC/5h	CBC/calcinada	CBC/estufa
D90 (mm)	0,237	0,330	0,375	0,401
D50 (mm)	0,050	0,104	0,168	0,172
D10 (mm)	0,001	0,002	0,003	0,004

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Desta forma, constata-se conforme Torres (2019), que a partir do tamanho médio das partículas, no geral, as amostras de cinzas calcinadas, após passarem pelo processo de moagem apresentam-se mais finas que as amostras *in natura*.

Com isso, verificou-se que as dimensões médias da CBC/estufa são maiores em relação as cinzas que passaram pelo processo de calcinação e moagem. As dimensões médias, que a princípio eram de aproximadamente 0,401 mm para a CBC/estufa (passante na peneira 2 mm), foram para 0,001 mm na CBC/27h e 0,002 mm na CBC/5h, reduzindo em 99,75 % e 99,50%, respectivamente, a dimensão média das partículas.

#### 7.2.2.8 Massa específica

A determinação da massa específica do cimento Portland e da cinza do bagaço da cana-de-açúcar se faz necessária, uma vez que a substituição do cimento pela CBC, com valores distintos de massa específica, deve ser realizada em volume. Esta, por sua vez, foi determinada com a utilização do frasco volumétrico de Le Chatelier e querosene, de acordo com a NBR 16605 (2017).

Para início do ensaio, encheu-se o frasco até o querosene atingir as marcas correspondentes entre o zero e 1 cm<sup>3</sup>. Colocou-se o frasco no banho de água, em

posição vertical durante 30 minutos, para a equalização da temperatura e registrou-se a primeira leitura ( $V_1$ ), com aproximação de  $0,1 \text{ cm}^3$ .

Tomou-se a massa de 60 g de cimento Portland e das cinzas de bagaço da cana-de-açúcar para cada ensaio e introduziu-se em pequenas porções no frasco até o deslocamento do líquido, entre as marcas de  $18 \text{ cm}^3$  e  $24 \text{ cm}^3$ . Logo, tampou-se e girou-se o frasco em posição inclinada, até não subir mais borbulhas de ar para a superfície do líquido, conforme a Figura 55.

**Figura 55** – Frasco volumétrico de Le Chatelier para o ensaio de massa específica



**Fonte:** A autora (2021).

Colocou-se novamente o frasco no banho de água (30 minutos), registrou-se a leitura final ( $V_2$ ), com aproximação de  $0,1 \text{ cm}^3$  e calculou-se a massa específica do material, conforme a Equação 9.

**Equação 9** – Cálculo da massa específica

$$\rho = m/V$$

Onde:

$\rho$ : massa específica do material ensaiado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$ : massa do material ensaiado (g);

$V$ : volume deslocado pela massa do material ensaiado ( $V_2 - V_1$ ) ( $\text{cm}^3$ ).

Para efeito comparativo, foram realizados o ensaio de massa específica, do cimento Portland e das cinzas CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa, conforme expresso na Tabela 25.

**Tabela 25** – Resultados do ensaio de massa específica do cimento Portland e CBC

Material	NBR 16605 (2017)
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento Portland CP II-E-32 (Cimento Nacional)	3,12
CBC/27h	2,95
CBC/5h	2,75
CBC/calcinada	2,71
CBC/estufa	2,61

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

Como demonstrado, as cinzas apresentaram massas específicas inferiores ao cimento Portland. Isto significa que para um mesmo volume, a massa das cinzas será menor que a de cimento, indicando que a substituição do cimento pelas cinzas deva ser feita por volume equivalente. Observa-se também, que o processo de moagem das partículas de cinza influencia diretamente no aumento do valor da massa específica. Contudo, foi verificado valor semelhante à CBC/5h, na pesquisa de Castro e Martins (2016), onde a massa específica da cinza da cana-de-açúcar foi de 2,75 g/cm<sup>3</sup>.

#### 7.2.2.9 Superfície específica

Para a avaliação de um processo de moagem é importante a determinação da superfície específica, pois materiais com a mesma granulometria podem apresentar superfícies específicas diferentes em decorrência de vazios interiores e da forma e rugosidade das partículas (CORDEIRO, 2006).

A superfície específica é definida como a área superficial por unidade de massa, expressa em normativa em centímetros quadrados por grama. Uma das formas mais utilizadas para a obtenção da superfície específica é o método desenvolvido por Blaine, normalizada pela NBR 16372 (2015), representada na Figura 56.

**Figura 56** – Aparelho de permeabilidade Blaine para o ensaio de superfície específica



**Fonte:** A autora (2021).

Neste método, a superfície específica do material granular é proporcional ao tempo no qual certa quantidade de ar atravessa a camada de material compactado com porosidade padrão, expressa pela Equação 10.

**Equação 10** – Cálculo da superfície específica

$$S = K \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{0,1n}}$$

Onde:

S: superfície específica em massa (cm<sup>2</sup>/g);

K: constante do aparelho;

ε: porosidade da camada;

t: tempo medido (s);

ρ: massa específica do material ensaiado (g/cm<sup>3</sup>);

n: viscosidade do ar à temperatura do ensaio (Pa<sup>1/2</sup>.cm<sup>-1</sup>).

Os resultados do ensaio de superfície específica das amostras de CBC estudadas, encontram-se na Tabela 26.

**Tabela 26** – Resultados do ensaio de superfície específica da CBC

<b>Material</b>	<b>NBR 16372 (2015) Superfície específica (cm<sup>2</sup>/g)</b>
CBC/27h	9.976
CBC/5h	5.324
CBC/calcinada	2.822
CBC/estufa	1.285

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

Na pesquisa de Chindaprasirt, Homwuttiwong e Sirivivatnanom (2004), as CBC chegaram ao valor de 4.900 cm<sup>2</sup>/g e 9.300 cm<sup>2</sup>/g para a superfície específica, valores aproximados foram encontrados para a CBC/5h e CBC/27h deste ensaio.

#### **7.2.2.10 Caracterização física da CBC como material pozolânico**

A caracterização das adições minerais ativas do tipo pozolana está baseada, na prática, em métodos indiretos de quantificação do seu potencial reativo, por meio dos ensaios de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e da determinação da atividade pozolânica com cal aos setes dias, conforme preconizam as normas NBR 5752 (2014) e NBR 5751 (2015), respectivamente.

##### **7.2.2.10.1 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**

Conforme Cordeiro (2006), o índice de atividade pozolânica com cimento Portland é um importante parâmetro para a avaliação da reatividade de um material a ser empregado como aditivo mineral por simular uma situação real de aplicação.

Portanto, o emprego do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, conforme a NBR 5752 (2014), é calculado através da relação entre as resistências à compressão da argamassa com material pozolânico e da argamassa composta apenas por cimento, areia e água, expressa pela Equação 11.

**Equação 11** – Cálculo da determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100$$

Onde:

I: índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%);

$f_{cB}$ : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova (argamassa B) moldados com cimento Portland e 25 % e material pozolânico (MPa);

$f_{cA}$ : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova (argamassa A) moldados com cimento Portland (MPa).

Conforme a normativa, foram preparadas argamassas com duas dosagens diferentes. Argamassa A, contendo cimento Portland, areia normal, de acordo com a NBR 7214 (2015) e água e argamassa B, contendo 25 % em massa de material pozolânico, em substituição à igual porcentagem do cimento Portland, areia normal e água. Para cada dosagem de argamassa estabelecida, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de (50 x 100) mm. Como material pozolânico, utilizou-se as cinzas CBC/27h e CBC/5h para efeito comparativo ao resultado do ensaio.

Utilizou-se para a moldagem dos corpos de prova das argamassas A,  $624 \pm 0,4$  g de cimento CP II-F-32;  $468,0 \pm 0,3$  g das quatro frações de areia normal e  $300 \pm 0,2$  ml de água. Para a argamassa B, utilizou-se  $468 \pm 0,4$  g de cimento CP II-F-32;  $156 \pm 0,2$  g de CBC/27h e CBC/5h (para cada ensaio);  $468,0 \pm 0,3$  g das quatro frações de areia normal e  $300 \pm 0,2$  ml de água.

Os corpos de prova, após o período inicial de cura de 24 horas, foram retirados das formas e imersos em tanque de água saturado com cal durante 27 dias. Posteriormente foram capeamentos com enxofre fundido e rompeu-se os corpos de prova, conforme a NBR 7215 (2019), demonstrado na Figura 57.

**Figura 57** – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão para determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias



**Fonte:** A autora (2021).

As argamassas para esta propriedade foram ensaiadas aos 28 dias e apresentam os valores de medição para as cinzas CBC/27h e CBC/5h e argamassa composta somente com cimento, apresentados na Tabela 27.

**Tabela 27** – Resultados do ensaio de caracterização física da CBC, quanto a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

<b>Material</b>	<b>Argamassa A (cimento)</b>	<b>CBC27/h</b>	<b>CBC5/h</b>
NBR 7215 (2019) <b>Resistência à compressão (MPa)</b>	20,92	22,40	21,07
	24,06	22,75	19,67
	23,44	18,46	21,91
	28,77	19,74	15,18
	25,89	19,93	24,52
	30,15	17,23	18,10
<b>Média (MPa)</b>	25,54	20,09	20,08
<b>Desvio padrão</b>	3,46	2,16	3,23
<b>Coef. de variação</b>	13,54	10,77	16,09
NBR 5752 (2014) <b>Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%)</b>	-	78,66	78,62
NBR 12653 (2014) <b>Conformidade como material pozolânico (requisito mínimo: ≥ 90 %)</b>	-	não	não

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

De acordo com a Tabela 27, foi possível observar que as CBC/27h e CBC/5h apresentaram o valor do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, próximo ao 78,00 %, inferior ao mínimo estabelecido (90%) pela NBR 12653 (2014), verificando a redução da reatividade das cinzas estudadas.

#### **7.2.2.10.2 Atividade pozolânica com cal aos sete dias**

No ensaio de determinação de atividade pozolânica com cal aos sete dias, são eliminadas as variações decorrentes dos desempenhos diferenciados dos cimentos Portland. A uniformidade e pureza do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  são mais facilmente controladas e os resultados obtidos não teriam um entendimento tão restrito quanto aqueles obtidos com um cimento específico (ZAMPIERI, 1989).

Para tanto, a determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias, como prescrita na NBR 5751 (2015), foi obtida a partir do valor médio de resistência à compressão de uma argamassa, moldada em três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, composta em massa, por 104 g de hidróxido de

cálcio P.A. (teor mínimo de 95%); 234 g de cada uma das quatro frações de areia normal, conforme a NBR 7214 (2015), e mais uma quantidade de material pozolânico, determinado pela Equação 12.

**Equação 12** – Cálculo da quantidade de CBC para o ensaio de atividade pozolânica com cal aos sete dias

$$m = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104g$$

Onde:

$\delta_{poz}$ : massa específica do material pozolânico, utilizado no ensaio (g/cm<sup>3</sup>);

$\delta_{cal}$ : massa específica do hidróxido de cálcio P.A. (g/cm<sup>3</sup>).

Como material pozolânico, utilizou-se as cinzas CBC/27h e CBC/5h, para efeito comparativo a esta pesquisa. De acordo com a Equação 12, obteve-se o resultado em massa para a quantidade de material pozolânico utilizado no ensaio, de 273,93 g para a CBC/27h e 255,36 g para a CBC/5h.

A quantidade de água da mistura deve corresponder a um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm, obtido pelo ensaio de abatimento, conforme prescreve a NBR 7215 (2019). Como resposta ao ensaio de abatimento, chegou-se ao valor de 208 ml para a CBC/27h e 198 ml para a CBC/5h, determinando a quantidade de água utilizada nas misturas.

A cura dos corpos de prova foi realizada nos próprios moldes, no período de sete dias, sendo que, durante as primeiras  $24 \pm 1$  horas, os corpos de prova permaneceram em ambiente à temperatura de  $23 \pm 2$  °C. Durante as  $144 \pm 1$  horas posteriores, foram mantidos em estufa à temperatura de  $55 \pm 2$  °C.

Após o período de cura térmica em estufa, as amostras foram armazenadas ainda dentro dos moldes, em ambiente à temperatura de  $23 \pm 2$  °C, durante 2 horas. Decorrido este tempo, até 4 horas após retirada da estufa, fez-se os desmoldes, capeamentos com enxofre fundido e rompeu-se os corpos de prova, conforme a NBR 7215 (2019), conforme demonstrado na Figura 58 e Tabela 28.

**Figura 58** – Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão para determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias



Fonte: A autora (2021).

**Tabela 28** – Resultados do ensaio de caracterização física da CBC, quanto a determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias

Material	CBC/27h	CBC5/h
NBR 7215 (2019) <b>Resistência à compressão (MPa)</b>	4,99	3,28
	4,99	3,50
	4,87	3,97
<b>Média (MPa)</b>	4,95	3,58
<b>Desvio padrão</b>	0,07	0,35
<b>Coef. de variação</b>	1,42	9,90
NBR 12653 (2014) <b>Conformidade como material pozolânico (requisito mínimo: <math>\geq 6</math> MPa)</b>	não	não

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Segundo Cordeiro (2006), a resistência à compressão no ensaio de atividade pozolânica com cal, é garantida pela coesão mecânica proporcionada pelas reações pozolânicas do material.

Contudo, pode-se observar que a CBC/5h, com resultado médio de compressão de 3,58 MPa, demonstrou-se menos reativa que a CBC/27h, com resultado de 4,95 MPa, visando a diferença do tempo de moagem entre as amostras. Estas, por sua vez, não desenvolveram coesões necessárias para garantir a resistência mecânica mínima esperada em conformidade como material pozolânico, estipulado pela NBR 12653 (2014).

### 7.2.2.11 Caracterização química da CBC como material pozolânico

Seguindo os princípios da NBR 12653 (2014), para que um material possa ser caracterizado como pozolânico, este deve ser avaliado e atender a todos os requisitos químicos e físico-mecânicos da normativa, conforme identificados nas Tabela 4 e Tabela 5 desta pesquisa. Dentre os requisitos químicos, em virtude da indisponibilidade de equipamentos e materiais, foi possível realizar exclusivamente os ensaios de determinação do teor de umidade e determinação de perda ao fogo, conforme as normativas NBR NM 24 (2003) e NBR NM 18 (2012), respectivamente. Tais ensaios foram executados no Laboratório de Análises Químicas da Universidade Estadual de Maringá (UEM), campus Umuarama.

Para efeito comparativo, realizou-se os ensaios de teor de umidade e perda ao fogo das cinzas CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada, CBC/estufa e da cinza *in natura* que passou somente pelo peneiramento primário (peneirada 2 mm), denominada como CBC/natural.

#### 7.2.2.11.1 Teor de umidade

Para a execução do ensaio de determinação do teor de umidade, de acordo com a NBR NM 24 (2003), pesou-se 1 g de amostra, em um cadinho de massa conhecida, registrando a massa utilizada com aproximação de 0,001 g. Logo, colocou-se o cadinho com a amostra na estufa (Figura 59), a temperatura de  $105 \pm 5$  °C, até que a diferença entre duas determinações sucessivas de massa atingisse o valor menor que 0,001 g. Antes de cada determinação da massa, resfriou-se o cadinho à temperatura ambiente em um dessecador. O período inicial de secagem foi de no mínimo 30 minutos e os períodos subsequentes de pelo menos 10 minutos.

**Figura 59** – Cadinhos em estufa para o ensaio de determinação do teor de umidade



**Fonte:** A autora (2021).

O resultado do teor de umidade, conforme a Equação 13, foi obtido pela média aritmética de duas determinações, sem variação entre si maior que 0,20 %.

**Equação 13** – Cálculo da determinação do teor de umidade

$$U = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \cdot 100$$

Onde:

U: umidade da amostra (%);

m<sub>1</sub>: massa da amostra, antes da secagem (g);

m<sub>2</sub>: massa da amostra, após a secagem (g).

Os resultados do ensaio de determinação do teor de umidade para as cinzas CBC estudadas, encontram-se na Tabela 29.

**Tabela 29** – Resultados do ensaio de caracterização química da CBC como material pozolânico, quanto ao teor de umidade

Material	NBR NM 24 (2003)	NBR 12653 (2014)
	Teor de umidade (%)	Conformidade como material pozolânico (requisito mínimo: ≤ 3%)
CBC/27h	0,5 %	sim
CBC/5h	0,2 %	sim
CBC/calcinada	0,2 %	sim
CBC/estufa	0,7 %	sim
CBC/natural	8,6 %	não

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

Os valores encontrados para as cinzas CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa encontraram-se abaixo do limite de 3 %, descrito pela NBR 12653 (2014), podendo ser considerados como materiais com potencial pozolânico para esta propriedade. Como esperado, para o resultado da amostra CBC/natural, a umidade presente no material após o processo de secagem ficou em torno de 8,6 %, não atingindo o requisito mínimo para esta normativa.

Pode-se observar ainda o aumento da variação de teor de umidade a partir da amostra CBC/calcinada, possivelmente devido ao tempo de exposição à umidade do ar decorrente do processo de moagem.

### 7.2.2.11.2 Perda ao fogo

A determinação de perda ao fogo foi realizada conforme os procedimentos prescritos na NBR NM 18 (2012). Para a execução do ensaio optou-se pelo método nº 1 (determinação direta - método de referência), em função dos materiais disponíveis em laboratório. Este ensaio consistiu-se em, colocar 1,000 g ± 0,001 g do material em um cadinho de porcelana de massa conhecida, calcinar em forno mufla (Figura 60) à temperatura de 950 °C ± 50° C (por 50 minutos), resfriar em dessecador, pesar e calcular a variação de massa.

**Figura 60** – Cadinhos em mufla para o ensaio de determinação de perda ao fogo



**Fonte:** A autora (2021).

A determinação de perda ao fogo foi obtida pela média aritmética de três amostras, dadas pela Equação 14.

**Equação 14** – Cálculo da determinação de perda ao fogo

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100$$

Onde:

PF: perda ao fogo da amostra (%);

m<sub>1</sub>: massa do cadinho mais a massa de amostra ensaiada (g);

m<sub>2</sub>: massa do cadinho mais a massa de amostra, após a calcinação (g);

m: massa de amostra utilizada no ensaio (g).

Os resultados do ensaio de determinação de perda ao fogo para as cinzas CBC estudadas, encontram-se na Tabela 30.

**Tabela 30** – Resultados do ensaio de caracterização química da CBC como material pozolânico, quanto a perda ao fogo

Material	NBR NM 18 (2012)	NBR 12653 (2014)
	Perca ao fogo (%)	Conformidade como material pozolânico (requisito mínimo: ≤ 6%)
CBC/27h	0,6 %	sim
CBC/5h	0,3 %	sim
CBC/calcinada	0,2 %	sim
CBC/estufa	4,2 %	sim
CBC/natural	14,8 %	não

**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

Os valores encontrados para as cinzas CBC/27h, CBC/5h, CBC/calcinada e CBC/estufa situaram-se abaixo do limite de 6 %, descrito pela NBR 12653 (2014), podendo ser considerados como materiais com potencial pozolânico para esta propriedade. Com isso, o aspecto mais claro das amostras, verificado após a calcinação, indicaram baixa composição de materiais carbonosos. Conforme Cordeiro (2006), pode-se identificar que os valores reduzidos da perda ao fogo (abaixo de 1 %) indicaram que as cinzas CBC tiveram combustão praticamente completos.

Como observado no ensaio de determinação de teor de umidade, verificou-se também um aumento da variação de perda ao fogo a partir da amostra CBC/calcinada, possivelmente devido ao tempo de exposição à umidade do ar decorrente do processo de moagem.

Para o resultado de perda ao fogo da CBC/natural, com 14,8 %, e coloração mais preta da cinza, indicaram possivelmente, percentual de carbono na amostra. Portanto, é importante ressaltar que, valores elevados de perda ao fogo geralmente resultam em descoloração, segregação e baixa resistência à compressão do material quando adicionado em misturas de concreto (MALHOTRA; MEHTA, 1996).

Devido aos resultados positivos da CBC como característica pozolânica para as propriedades de teor de umidade e perda ao fogo, a reduzida atividade pozolânica das cinzas estudadas podem ser atribuídas mais ao processo de calcinação e moagem e menos à combustão incompleta da CBC, como previsto no ensaio granulométrico, reduzindo o efeito filler.

### 7.2.3 Planejamento experimental

Para alcançar os objetivos propostos na segunda campanha experimental, além da caracterização da CBC, definindo o uso da cinza CBC/5h em substituição

parcial do cimento Portland no concreto permeável, foram analisados os comportamentos mecânicos e hidráulicos deste material, conforme a Tabela 31, visando atender os requisitos mínimos da NBR 16416 (2015), para uso como revestimento de concreto permeável moldado no local, adquirido como resultado da primeira campanha.

**Tabela 31** – Planejamento da segunda campanha experimental (B0/3, B0/5 e B0/10)

Tipo de ensaio	Ensaio	Tipo de corpo de prova	Dimensão corpo de prova (mm)	Amostras por idade		
				7 dias	14 dias	28 dias
Ensaio mecânicos	NBR 5739 (2018) <b>Resistência à compressão</b>	Cilíndrico	100 x 200	7	7	7
	NBR 7222 (2011) <b>Resistência à tração por compressão diametral</b>	Cilíndrico	100 x 200	7	7	7
	NBR 12142 (2010) <b>Resistência à tração na flexão</b>	Prismático	100 x 100 x 400	7	7	7
Ensaio hidráulicos	NBR 9778 (1987) <b>Índice de vazios e absorção de água</b>	Cilíndrico	100 x 200	-	-	6
	NBR 13292 (1995) <b>Permeabilidade à carga constante</b>					
	NBR 16416 (2015) <b>Permeabilidade à carga variável de pavimento permeável</b>	Placa	400 x 400 x 80	-	-	1
				<b>Total 70 amostras</b>		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Conforme mencionado, mediante análise dos resultados da primeira campanha experimental, determinou-se o uso do agregado graúdo B0 (brita 0), como material constituinte ao concreto permeável controle, denominado B0/controle, para esta segunda campanha, pois obteve melhor resposta aos resultados mecânicos, hidráulicos e de acabamentos em relação as combinações granulométricas estudadas.

Desta forma, fica-se estabelecido para os ensaios, três teores do uso da CBC/5h em substituição parcial ao cimento Portland, estas caracterizadas e justificadas no capítulo de dosagem.

Como medida comparativa à primeira campanha experimental, mantêm-se os mesmos processos metodológicos para as caracterizações mecânicas e hidráulicas,

mistura e adensamento do concreto permeável, conforme mencionado no capítulo 5, para esta segunda campanha.

Portanto, de acordo com a Tabela 31, foram realizadas 70 amostras de concreto permeável para cada proporção de CBC utilizada em substituição ao cimento Portland, totalizando 210 corpos de prova. Destes, 144 unidades foram moldadas no formato cilíndrico, 63 no formato prismático e 3 em placa.

#### **7.2.4 Dosagem**

Existem referências na literatura por parte de vários pesquisadores indicando valores usuais de substituição do cimento no concreto, na ordem de 5 % a 20 % para microssílica, 55 % a 70 % para escória de alto forno, 25 % a 60 % para cinzas volantes, 15 % a 50 % para cinza de casca de arroz, 10% a 50% para filler calcário e de 3 % a 30 % para cinza do bagaço da cana-de-açúcar (MORAES, 2001; HOPPE FILHO, 2002; RUKZON E CHINDAPRASIRT, 2012; NUNES *et al.*, 2008).

Por sua vez, segundo Nunes *et al.* (2008), após análise dos concretos com adição de CBC em substituição ao cimento Portland, observou que 7 % de cinza em substituição ao cimento alcançou o maior aumento na resistência do material em relação ao concreto de referência. No estudo de Singh *et al.* (2000), verificou-se que a utilização da cinza diminui a permeabilidade do concreto e a resistência à compressão foi significativa, principalmente para o teor de 10 % de CBC, em substituição ao cimento.

Desta forma, para suprir as exigências mecânicas do concreto permeável, sem reduzir significativamente a permeabilidade do material, requisito essencial para uso como revestimento de pavimento urbano, optou-se nesta campanha experimental a substituição de no máximo 10 % do teor de CBC pelo cimento Portland.

Com a utilização do agregado graúdo B0 (brita 0), sem adição de areia (agregado miúdo) em sua composição, afim de garantir os desempenhos mecânicos e hidráulicos do concreto permeável, conforme a NBR 16416 (2015), estipula-se a adição em volume, devido a diferença entre as massas específicas dos materiais, no teor de 3 %, 5 % e 10 % de CBC/5h em substituição ao cimento Portland, dando origem as amostras B0/3, B0/5 e B0/10, consecutivamente.

Portanto, para a segunda campanha experimental mantém-se o traço de 1:3,26 (cimento:brita), com uma relação água cimento (a/c) de 0,34, conforme Sandoval

(2014), sem a utilização de aditivo químico, para efeito comparativo ao concreto permeável como controle (B0/controle) determinado pela primeira campanha.

Esta campanha, por sua vez, apresentou um consumo médio de cimento de 391,67 kg/m<sup>3</sup>, conforme os cálculos de referência a NBR 9833 (2008), apresentados na Tabela 32.

**Tabela 32** – Consumo de materiais por m<sup>3</sup> da segunda campanha experimental

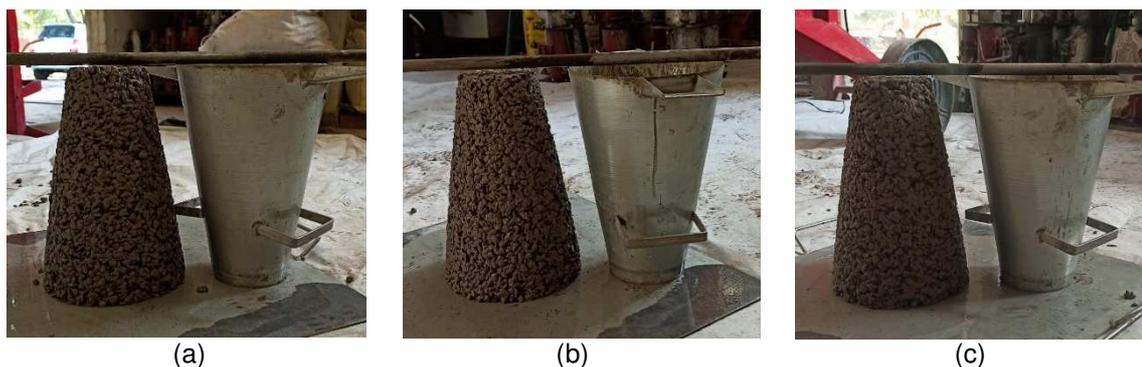
Teor de CBC/5h	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de CBC/5h (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de agregado (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de água (l/m <sup>3</sup> )	Rendimento do concreto (m <sup>3</sup> )
B0/3	404,17	15,52	1358,33	141,67	0,24
B0/5	395,83	25,98	1358,33	141,67	0,24
B0/10	375,00	59,39	1358,33	141,67	0,24

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 7.2.5 Ensaio em estado fresco

No ensaio de consistência (Slump test), conforme a NBR 16889 (2020), verificou-se que os concretos permeáveis com teores de CBC/5h (B0/3, B0/5 e B0/10), mantiveram-se como resultado zero (0 cm), seguindo as respostas encontradas na primeira campanha, formando argamassas eficientes sem comprometer os entrelaces entre os grãos, apresentado na Figura 61.

**Figura 61** – Ensaio de consistência segunda campanha experimental: a) B0/3; b) B0/5a; c) B0/10



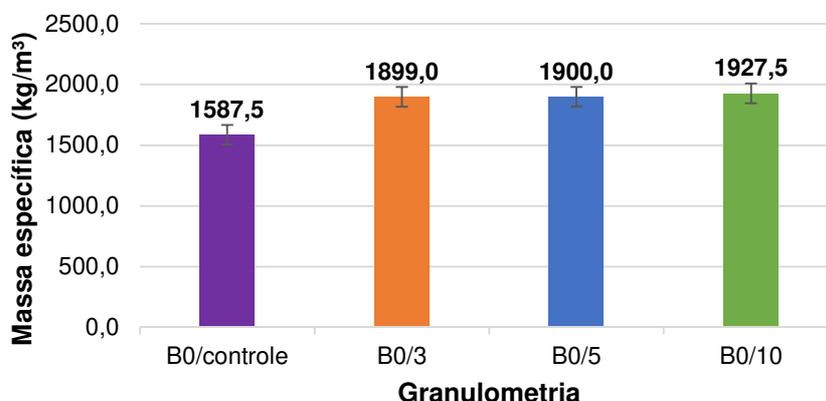
Fonte: A autora (2021).

Com isso, segundo Oliveira (2013), misturas com teores reduzidos de finos produzem acentuada dificuldade na movimentação dos agregados.

Ademais, foram realizados o ensaio massa específica do concreto permeável, segundo a NBR 9833 (2008), para todas as amostras desta campanha, sendo

possível verificar a variação com relação ao teor de CBC/5h em substituição ao cimento Portland (Figura 62).

**Figura 62** – Variação da massa específica conforme o teor de CBC/5h (B0/3, B0/5 e B0/10)



**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

Pode-se observar, conforme a Figura 62, o aumento da massa específica do concreto permeável com teor de CBC em relação ao concreto controle da primeira campanha experimental (B0/controle). Desta forma, essa diferença de valores da massa específica apenas pode ser considerada significativa comparada ao concreto B0/controle.

Sendo assim, a variação da massa específica pode estar relacionada devido a incorporação da CBC/5h em volume no compósito cimentício. Neste caso, conforme o aumento proporcional da substituição dos materiais, foi necessária uma maior quantidade em massa de cinza em relação ao cimento, obtendo-se uma variação positiva na massa específica do concreto.

Portanto, o concreto composto com teor de 10 % de CBC/5h (B0/10) em substituição ao cimento Portland, teve a maior valor de massa específica, seguida da B0/5 e finalmente B0/3. Tendo como massa específica mínima 1899,00 kg/m<sup>3</sup> e máxima 1927,50 kg/m<sup>3</sup>.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO: SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresentam-se os resultados da segunda campanha experimental, com o objeto analisar a influência do teor de CBC/5h (3 %, 5 % e 10 %), como elemento sustentável, nos desempenhos mecânicos e hidráulicos das amostras de concreto permeável (B0/3, B0/5 e B0/10), como revestimento de pavimento urbano, conforme a NBR 16416 (2015), em relação ao concreto permeável controle (B0/controle) da primeira campanha experimental.

Para as propriedades mecânicas e hidráulicas foram analisadas a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação presente na medição de cada ensaio realizado.

### 8.1 Resistência à compressão

Os concretos para esta propriedade foram ensaiados aos 7, 14 e 28 dias respectivamente. A Tabela 33 e a Figura 63 apresentam os valores da medição desta propriedade.

**Tabela 33** – Resistência à compressão da segunda campanha experimental e B0/controle

Teor de CBC/5h	B0/3			B0/5			B0/10		
Idade (dias)	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Resistência à compressão (MPa)	11,24	10,66	15,49	9,01	13,54	11,36	9,45	12,36	12,14
	11,18	14,66	14,32	10,09	12,93	13,05	12,03	10,38	13,89
	10,85	14,49	13,88	10,13	11,36	15,50	9,18	10,92	12,32
	9,12	15,11	14,84	9,91	13,24	14,12	9,96	12,23	13,66
	9,58	12,75	14,75	10,16	12,39	14,06	10,70	11,63	13,80
	10,95	14,13	15,13	9,98	12,98	13,11	10,64	10,24	14,10
Média (MPa)	10,33	13,61	14,63	9,87	12,57	13,50	10,23	11,38	13,17
Desvio padrão	0,92	1,52	0,59	0,40	0,83	1,27	0,98	0,87	0,87
Coef. de variação (%)	8,95	11,18	4,04	4,03	6,63	9,40	9,56	7,61	6,63

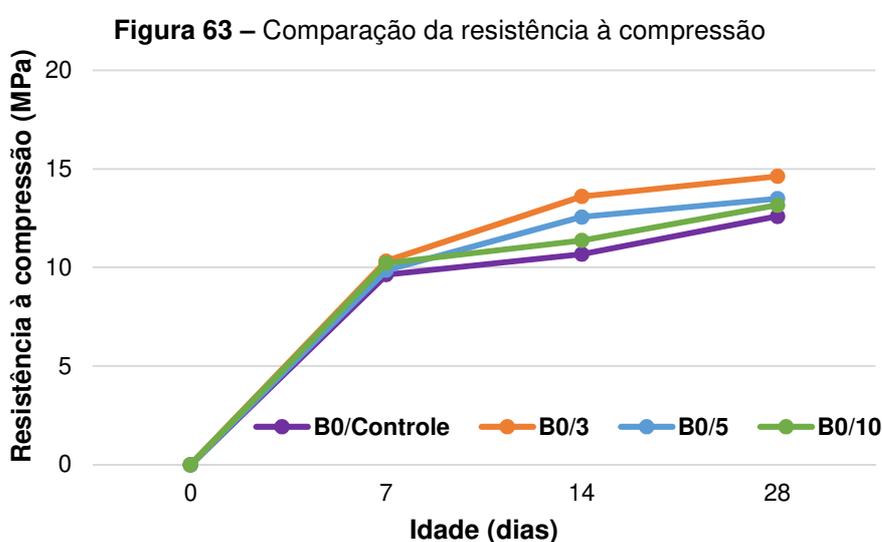
B0/controle (média dos resultados da primeira campanha experimental)		
7 dias	14 dias	28 dias
9,64 MPa	10,68 MPa	12,60 MPa

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pode-se observar, conforme os resultados da Tabela 33, que todas as amostras de concreto permeável tiveram ganho na resistência à compressão axial em relação a amostra B0/controle da primeira campanha experimental. Contudo, para

melhor análise e verificação, demanda-se um estudo de tratamento estatístico mais aprofundado.

Verifica-se que a substituição de 3 % do cimento Portland por CBC/5h (B0/3), não apresentou prejuízo na resistência à compressão, comparada às amostras B0/5 e B0/10, respectivamente. Porém, mesmo com a substituição de 10 % de CBC/5h pelo cimento Portland, o concreto permeável B0/10 obteve maior ganho de resistência à compressão em relação ao concreto permeável B0/controle da primeira campanha experimental, sem o uso de CBC.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As razões para o aumento da resistência à compressão nas amostras com substituição parcial do cimento Portland por CBC, comparada a amostra B0/controle, pode ser atribuída, conforme os estudos de Sales *et al.* (2010), Souto (2010) e Sampaio, Souza e Gouveia (2014), ao preenchimento dos poros da matriz cimentícia pelo grão da CBC, aumentando a compacidade, contribuída pelo diâmetro reduzido das partículas de finos. Bem como, o reduzido teor de umidade e perda ao fogo, com a possível presença do teor de sílica em estado amorfo, pode ter contribuído para a melhora das propriedades dos compósitos.

Contudo, observa-se que, a resistência a compressão nos concretos permeáveis com substituição parcial do cimento Portland por CBC, diminuiram em proporção ao teor de cinza adicionado, possivelmente devido ao baixo potencial pozolânico da CBC.

Por fim, de acordo com a NBR 16416 (2015), as respostas obtidas neste ensaio não qualificam o uso dos concretos estudados como revestimento de peça de concreto permeável, onde a resistência mecânica à compressão mínima é de 20,0 MPa. Dessa forma, mantém-se como referência à pesquisa o concreto permeável moldado no local, conforme os resultados apresentados de forma positiva a normativa, na primeira campanha experimental.

## 8.2 Ensaio de resistência à tração por métodos indiretos

### 8.2.1 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi avaliada aos 7, 14 e 28 dias e os resultados estão apresentados na Tabela 34 e na Figura 64.

**Tabela 34** – Resistência à tração por compressão diametral da segunda campanha experimental e B0/controle

Teor de CBC/5h	B0/3			B0/5			B0/10		
	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Idade (dias)	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	1,85	1,88	1,98	1,98	1,94	1,94	1,65	1,92	2,03
	1,63	2,06	2,34	1,90	1,98	2,29	1,62	1,80	2,26
	1,30	2,64	2,73	1,50	2,08	1,99	1,45	1,64	1,76
	1,94	2,30	2,50	1,79	2,36	2,11	1,49	1,70	2,03
	1,35	2,02	2,24	1,72	1,88	2,01	1,41	1,80	2,05
	1,31	2,03	2,18	1,67	2,27	2,53	1,41	1,91	2,39
Média (MPa)	1,59	2,12	2,32	1,76	2,09	2,17	1,50	1,75	2,13
Desvio padrão	0,27	0,27	0,24	0,16	0,18	0,22	0,10	0,14	0,23
Coef. de variação (%)	16,98	12,73	10,34	9,09	8,61	10,14	6,67	8,00	10,80
<b>B0/controle</b> (média dos resultados da primeira campanha experimental)									
7 dias			14 dias			28 dias			
1,62 MPa			1,66 MPa			2,00 MPa			

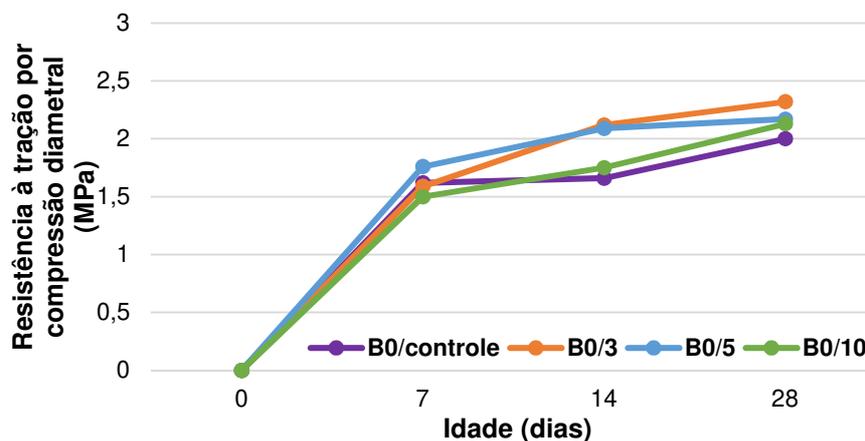
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Conforme as respostas obtidas no ensaio de resistência a compressão axial (Tabela 33), todas as amostras (B0/3, B0/5 e B/10), demonstraram ganho na resistência à tração por compressão diametral, comparado ao B0/controle da primeira campanha (Tabela 34), demandando também um estudo de tratamento estatístico mais aprofundado para melhor análise e verificação.

O concreto permeável B/03 apresentou maior resistência em relação ao B0/5 e B0/10, respectivamente. A substituição de 10 % de CBC/5h pelo cimento Portland, no

concreto permeável B0/10, não comprometeu o aumento da resistência à tração por compressão diametral, tendo maior resultado que o B0/controle.

**Figura 64** – Comparação da resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com base nas considerações de Mehta e Monteiro (2008), pode-se identificar, ainda que discreta, a ação pozolânica da cinza residual. Onde afirmam que, as diferenças entre os valores de resistência à compressão e à tração são menos acentuadas quando na presença de materiais com atividade pozolânicas.

### 8.2.2 Resistência à tração na flexão

Os valores encontrados para resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela 35 e na Figura 65. Para determinação dos cálculos foi utilizada a Equação 3, apresentada no capítulo 5, pois não foram obtidas rupturas nas amostras fora do terço médio, mesmo cenário encontrado na primeira campanha experimental.

Conforme a Tabela 35, os resultados para resistência à tração na flexão foram considerados satisfatórios, onde a média das amostras em 7 dias resultaram entre 1,43 MPa a 3,39 MPa e em 28 dias, entre 3,33 MPa a 3,63 MPa.

Este ensaio, propriedade importante para determinação do concreto permeável como revestimento permeável, pode-se observar que todos os resultados obtidos nas três amostras trabalhadas, independente do teor de CBC/5h (3 %, 5 % e 10 %) em substituição do cimento Portland, foram superiores ao estabelecido pela NBR 16416 (2015), onde determina que a resistência à tração na flexão para revestimentos de concreto permeável moldado no local seja superior a 1,0 MPa.

**Tabela 35** – Resistência à tração na flexão da segunda campanha experimental e B0/controle

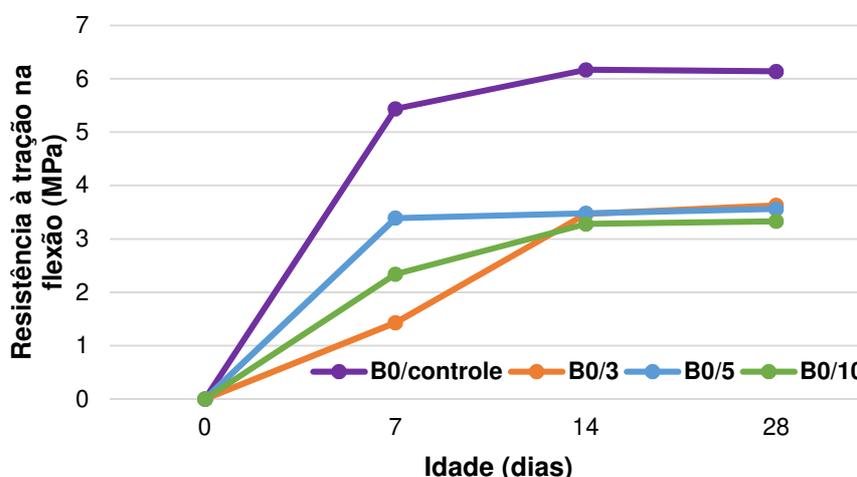
Teor de CBC/5h	B0/3			B0/5			B0/10		
Idade (dias)	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,21	3,91	4,68	3,65	2,97	4,05	2,03	2,03	3,18
	1,41	3,65	2,56	3,62	4,06	3,53	1,88	2,82	3,47
	1,41	4,03	4,12	3,26	2,38	3,85	2,94	3,91	2,97
	1,53	2,82	3,09	3,47	3,71	4,12	2,21	3,50	3,24
	1,50	3,74	3,35	3,41	3,74	2,79	2,47	3,79	3,35
	1,59	3,62	3,38	3,21	3,8	3,91	2,44	3,29	3,76
	1,35	2,56	4,21	3,12	3,68	2,65	2,44	3,65	3,35
Média (MPa)	1,43	3,47	3,63	3,39	3,48	3,56	2,34	3,28	3,33
Desvio padrão	0,13	0,56	0,74	0,20	0,59	0,60	0,35	0,66	0,25
Coef. de variação (%)	9,09	16,14	20,38	5,90	16,95	16,85	14,96	20,12	7,51

B0/controle (média dos resultados da primeira campanha experimental)		
7 dias	14 dias	28 dias
5,44 MPa	6,17 MPa	6,14 MPa

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diferente dos ensaios anteriormente apresentados, este demonstrou diminuição da resistência à tração na flexão, em comparação ao B0/controle, apresentado na primeira campanha, conforme a Figura 65. Porém, não comprometeu seu uso, mantendo-se superior a 2,0 MPa para concreto permeável moldado no local para tráfego leve e de pedestres. O concreto B/05 obteve aumento de resistência aos 7 dias (3,39 MPa), mas o concreto B/03 alcançou maior resistência entre as três amostras, aos 28 dias, com 3,63 MPa.

**Figura 65** – Comparação da resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Identificou-se que, o concreto B0/3 obteve o melhor desempenho, na sequência a composição com B/05 e B0/10, conforme indicado na Figura 65. Este fato indicou que quanto maior o teor de CBC, em substituição ao cimento Portland, menor a resistência à tração na flexão, possivelmente devido ao aumento das tensões de aderência e diminuição dos pontos de contato entre os grãos.

De acordo com Raphael (1984), foi possível verificar que a resistência à tração na flexão manteve-se, como a primeira campanha experimental, aproximadamente, 15% da resistência à compressão.

### 8.3 Ensaio de imersão

#### 8.3.1 Absorção de água por imersão

A Tabela 36 e Figura 66 trazem os resultados encontrados no ensaio de absorção de água por imersão, onde verificou-se que todas as amostras analisadas, mesmo que superior ao concreto B0/controle, encontram-se dentro do limite pré-estabelecido por Neville (1997), onde ressalta que concretos tidos como de boa qualidade apresentam resultados de absorção inferiores a 10 %.

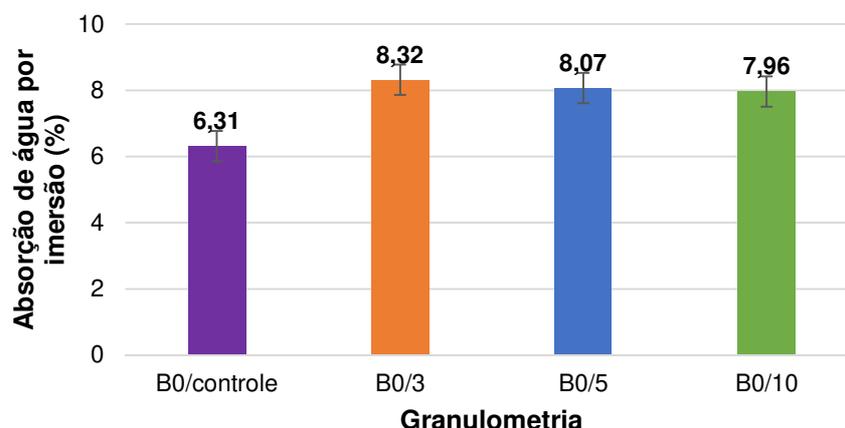
**Tabela 36** – Absorção de água por imersão da segunda campanha experimental e B0/controle

Teor de CBC/5h	Absorção de água por imersão (%)						Média (%)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
	28 dias								
B0/3	8,32	8,27	8,27	8,39	8,37	8,30	8,32	0,05	0,60
B0/5	8,15	8,03	8,06	8,01	8,07	8,09	8,07	0,05	0,62
B0/10	7,87	7,89	8,09	7,83	8,22	7,88	7,96	0,15	1,88
<b>B0/controle</b> (média do resultado da primeira campanha experimental)									
<b>28 dias</b>									
6,31 %									

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Segundo Cordeiro (2006), vale ressaltar que o ensaio de absorção de água por imersão, está associado ao volume total de poros acessíveis à água e não reflete a facilidade com a qual a água pode penetrar no concreto.

**Figura 66** – Comparação da absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 8.3.2 Determinação do índice de vazios

A Tabela 37 apresenta os dados obtidos com o ensaio de imersão para obtenção do índice de vazios, este realizado em estado endurecido aos 28 dias.

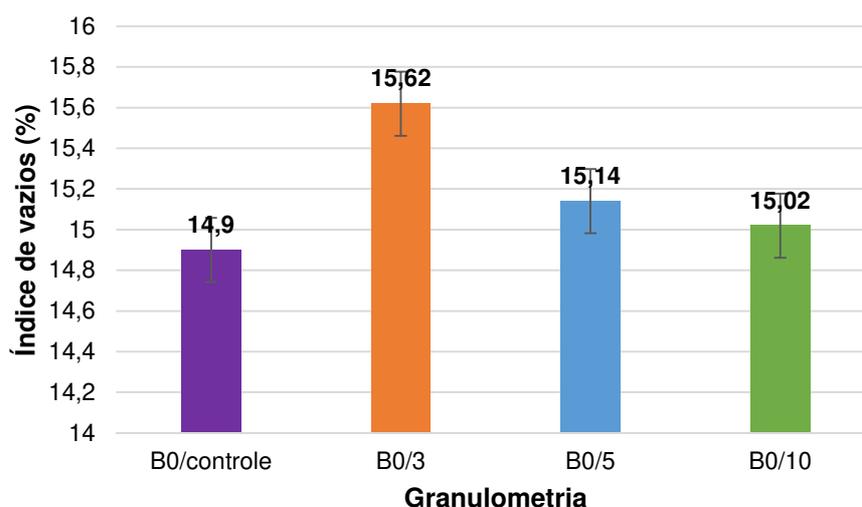
**Tabela 37** – Índice de vazios da segunda campanha experimental e B0/controle

Teor de CBC/5h	Índice de vazios (%)						Média (%)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
	28 dias								
B0/3	15,71	15,54	15,47	15,76	15,71	15,53	15,62	0,12	0,77
B0/5	15,10	15,07	15,54	14,93	15,05	15,13	15,14	0,21	1,39
B0/10	14,81	14,90	15,23	14,80	15,52	14,87	15,02	0,29	1,93
<b>B0/controle</b>									
(média dos resultados da primeira campanha experimental)									
<b>28 dias</b>									
14,90 %									

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pode-se observar, de acordo com Batezini (2013), que, quando o concreto apresenta índices de vazios acima de 15 %, estes contribuem para a redução da permeabilidade, em decorrência do aumento da porosidade do compósito.

**Figura 67 – Comparação do índice de vazios**



**Fonte:** Elaborado pela autora (2021).

Desta forma, como apresentado na Figura 67, os corpos de prova analisados são considerados com média porosidade ( $> 15\%$ ), diferente do concreto permeável B0/ controle, com baixa porosidade ( $< 15\%$ ) e neste caso, quanto maior o índice de vazios, maior a porosidade do material e conseqüente menor o coeficiente de permeabilidade.

Contudo, segundo Tennis, Leming e Akers (2004), e como observado nos valores médio das amostras deste ensaio, dentro da ordem de 20 % de índice de vazios, ainda garantem boas características quanto a permeabilidade e a resistência (como previamente apresentados).

## **8.4 Ensaio de permeabilidade**

### **8.4.1 Coeficiente de permeabilidade à carga constante e à carga variável em revestimento de pavimento permeável**

Na Tabela 38 e na Figura 68, encontram-se os resultados do coeficiente de permeabilidade à carga constante, avaliados mediante a adaptação dos ensaios de permeabilidade para solos finos, conforme NBR 13292 (1995), obtidos através dos três diferentes teores de CBC em substituição ao cimento Portland nos concretos permeáveis estudados.

**Tabela 38** – Coeficiente de permeabilidade à carga constante da segunda campanha experimental e B0/controle

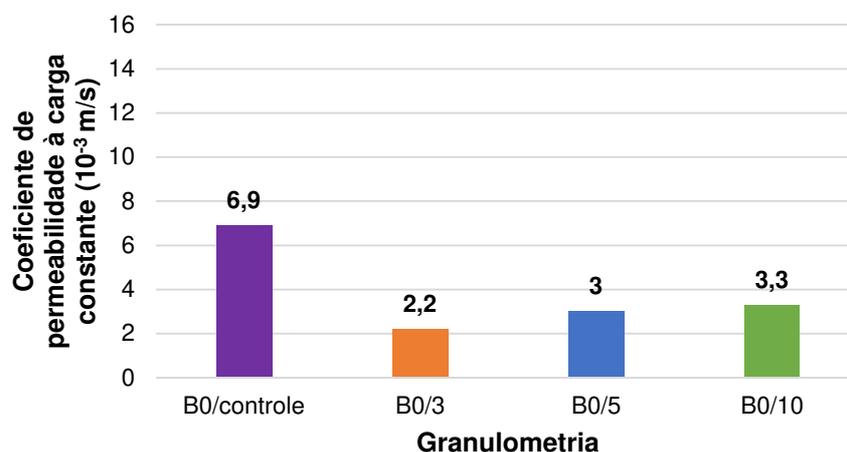
Teor de CBC/5h	Coeficiente de permeabilidade à carga constante ( $10^{-3}$ m/s)						Média ( $10^{-3}$ m/s)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
	28 dias								
B0/3	3	1,9	2,5	2,6	3,3	3,2	2,2	0,08	36,36
B0/5	3	2,2	3,4	2,9	3,4	3,1	3	0,04	13,33
B0/10	2,7	3,6	3	4,1	3,5	3	3,3	0,05	15,15

B0/controle (média dos resultados da primeira campanha experimental)	
28 dias	
6,9 . $10^{-3}$ m/s	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

**Figura 68** – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga constante



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Segundo os resultados da segunda campanha apresentados na Figura 68, o coeficiente de permeabilidade à carga constante, apresenta seu maior valor no concreto permeável com teor de 10 % de CBC/5h (B0/10), seguidos de B0/5 e B0/3, respectivamente. Bem como, pode-se observar a redução de permeabilidade em relação a amostra controle (B0/controle), da primeira campanha experimental.

Por conseguinte, os resultados do ensaio de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável, realizados em placas, conforme a NBR 16416 (2015), estão apresentados na Tabela 39 e na Figura 69.

**Tabela 39** – Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável da segunda campanha experimental e B0/controle

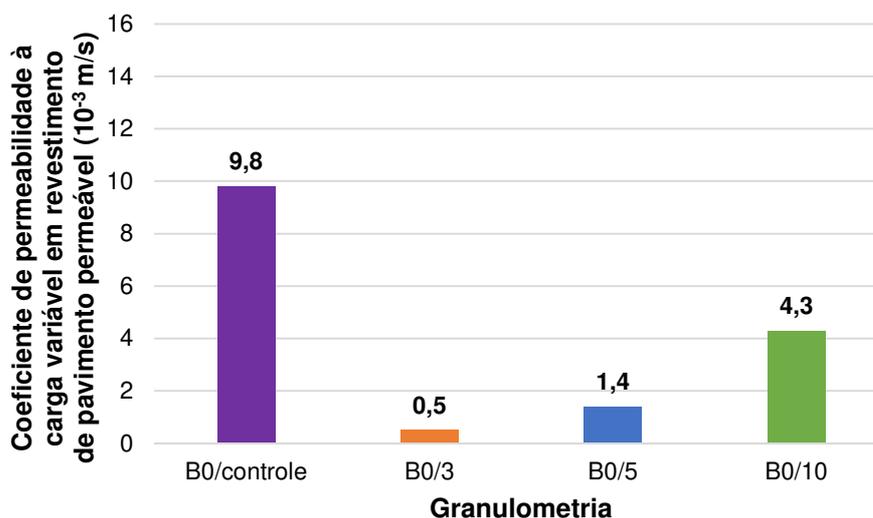
Teor de CBC/5h	Coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável ( $10^{-3}$ m/s)
	28 dias
B0/3	0,5
B0/5	1,4
B0/10	4,3

B0/controle (resultado da primeira campanha experimental)	
28 dias	
9,8 . $10^{-3}$ m/s	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

**Figura 69** – Comparação do coeficiente de permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável e B0/controle



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Em conformidade com o ensaio do coeficiente de permeabilidade à carga constante, pode-se observar também neste ensaio, de acordo com a Figura 69, sua maior resposta no concreto permeável B0/10, B0/5 e B0/3, consecutivamente, e a redução de permeabilidade das amostras em relação B0/controle.

Desta forma, constata-se que, quanto maior o teor de CBC em substituição ao cimento Portland, maior o coeficiente de permeabilidade, devido ao aumento da porosidade do compósito. Portanto, por adquirir índice de vazios superior a 15%, após o uso da CBC em substituição ao cimento Portland, todas as amostras desta campanha, tiveram um aumento da porosidade, contribuindo por reduzir

consideravelmente, em até 94,49 %, o coeficiente de permeabilidade em relação ao concreto B0/controle, sem CBC em sua composição.

Contudo, os concretos permeáveis acima apresentados, cumprem o requisito mínimo estipulado pela NBR 16416 (2015) a qual fixa a permeabilidade mínima para o revestimento de concreto permeável em  $10^{-3}$  m/s.

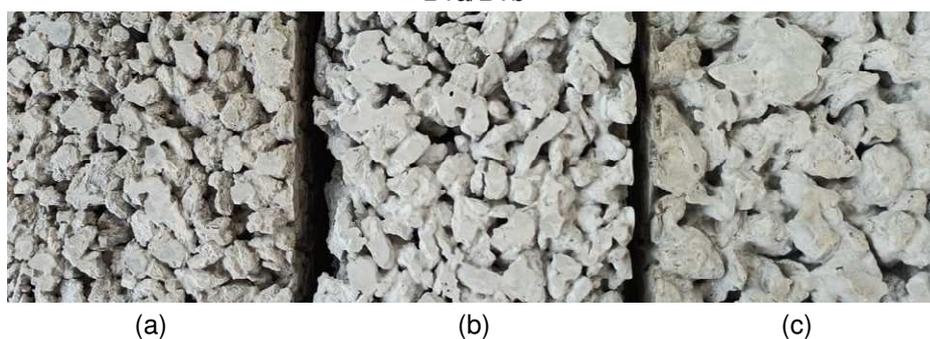
Observa-se, portanto, que os concretos permeáveis B0/3 nos ensaios, encontram-se próximos ao limite normativo, demonstrando que as amostras de concreto permeável B/10 são mais eficientes à permeabilidade.

### 8.5 Resumo das campanhas experimentais

Foram produzidos aproximadamente 1,46 m<sup>3</sup> de concreto permeável, contabilizando os ensaios da primeira e segunda campanha experimental, sendo em sua maioria corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, os prismáticos para os ensaios de tração na flexão e finalmente os corpos de prova em placas, para os ensaios de permeabilidade, como representado na Tabela 40.

Na Figura 70 apresenta-se os acabamentos das amostras trabalhadas na primeira campanha experimental, de acordo com as diferentes granulometrias de agregado graúdo empregadas na pesquisa.

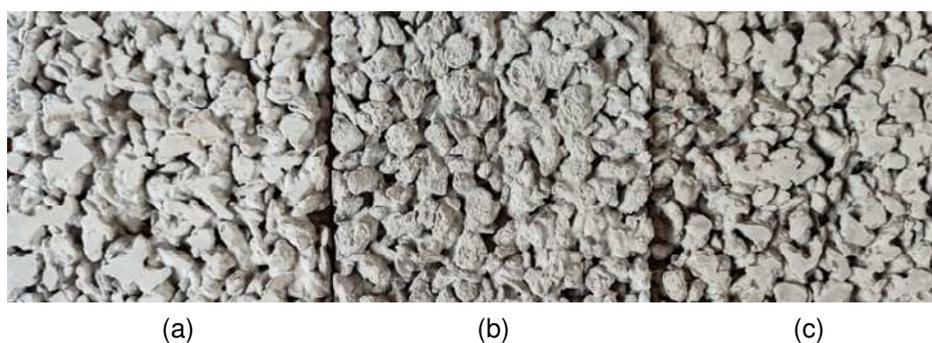
**Figura 70** – Acabamentos das amostras na primeira campanha experimental: a) B0; b) B0/B1a; c) B1a/B1b



**Fonte:** A autora (2021).

Na segunda campanha experimental (Figura 71), pode-se visualizar a semelhança entre os acabamentos das amostras, devido ao uso do agregado graúdo B0 em sua composição, porém com um leve escurecimento, conforme o teor de CBC incorporado ao concreto permeável.

**Figura 71** – Acabamentos das amostras na primeira campanha experimental: a) B0/3; b) B0/5; c) B0/10



Fonte: A autora (2021).

**Tabela 40** – Resumo das campanhas experimentais

Tipo de ensaio	Ensaio	Número de CPs por campanha		Total	Volume total m <sup>3</sup>
		1	2		
Ensaio mecânicos	NBR 5739 (2018) <b>Resistência à compressão</b>	63	63	126	1,46
	NBR 7222 (2011) <b>Resistência à tração por compressão diametral</b>	63	63	126	
	NBR 12142 (2010) <b>Resistência à tração na flexão</b>	63	63	126	
Ensaio hidráulicos	NBR 9778 (1987) <b>Índice de vazios e absorção de água</b>	18	18	36	
	NBR 13292 (1995) <b>Permeabilidade à carga constante</b>		-		
	NBR 14545 (2000) <b>Permeabilidade à carga variável</b>				
	NBR 16416 (2015) <b>Permeabilidade à carga variável de pavimento permeável</b>	3	3	6	
		210	210	<b>420</b>	

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos na pesquisa, cumpre-se o objetivo geral proposto, de analisar o desempenho das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável produzido com substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como uso de revestimento para pavimento em ambiente urbano, conforme a NBR 16416 (2015).

Na primeira campanha experimental, a análise de diferentes combinações do uso de agregado graúdo comercializado na cidade de Umuarama-PR para a definição da composição controle do traço de concreto permeável, sem adição da CBC, foi cumprido. O concreto permeável composto pelo agregado B0 (B0/controlado) foi escolhido por obter melhor resultado à tração na flexão, condutividade hidráulica e também melhor acabamento, garantindo mais segurança e conforto ao usuário quanto ao uso do revestimento de concreto permeável moldado no local, para tráfegos leve e de pedestre, conforme a NBR 16416 (2015).

Os ensaios de condutividade hidráulica, fator relevante para esse estudo, obtiveram resultados expressivos, entre  $2,7 \cdot 10^{-3}$  m/s e  $9,8 \cdot 10^{-3}$  m/s para permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável, aproximadamente 10 vezes mais ao solicitado em norma.

Em relação com as propriedades hidráulicas do material, conclui-se que a distribuição granulométrica tem uma grande influência na porcentagem de vazios internos, já que granulometrias uniformes resultam em uma maior porcentagem de vazios quando comparadas com granulometrias contínuas.

Nos ensaios à tração na flexão, obtiveram-se resultados bastante significativos na primeira campanha, no que se estabelece na norma de pavimentos de concreto permeáveis, onde as amostras B0 atingiram os melhores desempenhos com resistência média, aos 28 dias, de 6,14 MPa que é cerca de 207% acima do mínimo pretendido para tráfego leve.

Das amostras estudadas no ensaio de resistência à compressão, atingiram no máximo 14,42 MPa, aos 28 dias, os corpos de prova B0/B1a. Desta forma, mesmo considerada de grande potencial a esta propriedade, identificou-se que ficaram aproximadamente 27,90 % abaixo do que solicita em norma para uso como peça de concreto permeável para revestimento de pavimento, descartando este tipo de uso para esta pesquisa na primeira campanha.

No caso da resistência à compressão, na primeira campanha experimental, conclui-se que, com o uso dos agregados de basalto a granulometria contínua levou um ganho representativo nesta propriedade do material, graças a redução das tensões de aderência e o aumento dos pontos de contato entre os grãos, por isso, o material apresentou uma melhor distribuição de esforços frente aplicação de carga.

Na segunda campanha experimental, observou-se que o potencial pozolânico esperado da CBC estudada, ficou abaixo de alguns índices exigidos, conforme a NBR 12653 (2014), não podendo ser considerado com material pozolânico. Porém, a adição da CBC em substituição ao cimento Portland no concreto permeável, gerou acréscimos significativos na resistência à compressão e à tração por compressão diametral, não desclassificando seu uso como revestimento para pavimento urbano, quando submetido aos ensaios de tração na flexão e coeficiente de permeabilidade, de acordo com a NBR 16416 (2015).

Pode-se dizer que as partículas de CBC com diâmetro reduzido, somado ao baixo potencial pozolânico, faz com que os poros existentes da matriz cimentícia sejam preenchidos pelo grão de CBC do material, elevando a compacidade do concreto e, por consequência, melhora as propriedades dos compósitos nos estados fresco e endurecido.

No ensaio de resistência à compressão, mesmo com aumento no resultado, em relação ao B0/controle, obtido na primeira campanha experimental, as amostras atingiram no máximo 14,63 MPa com o concreto permeável B/03, ficando 26,85 % abaixo do que solicita a norma para o uso como peça de revestimento de pavimento de concreto permeável.

Com o uso da CBC residual de diâmetro médio de 0,104 mm (CBC/5h) no concreto permeável, foram obtidos resultados positivos, aos 7, 14 e 28 dias, no ensaio à tração na flexão, onde, de acordo a NBR 164616 (2015), a amostra B0/3 obteve melhor desempenho, atingindo resistência média de 3,63 MPa, seguida da B0/5 com 3,56 MPa e B0/10 com 3,33 MPa, todas acima do mínimo recomendado para tráfego leve (2,0 MPa) e pedestres (1,0 Mpa).

Nos ensaios de condutividade hidráulica dos concretos permeáveis, na segunda campanha experimental, todas as amostras obtiveram resultados positivos, de acordo com a normativa, entre  $0,5 \cdot 10^{-3}$  m/s e  $4,3 \cdot 10^{-3}$  m/s, para permeabilidade à carga variável em revestimento de pavimento permeável.

Com os processos de beneficiamento da CBC e produção definidos, quanto à moldagem, compactação e cura do material, foram identificadas as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável como aceitáveis, para todas as amostras estudadas, com substituição parcial do cimento Portland por CBC, com teores de 3 %, 5 % e 10 % (B0/3, B0/5 e B0/10).

Conforme os resultados encontrados na pesquisa, o concreto permeável B/10 fica classificado como a melhor opção encontrada, pois obteve o melhor resultado de condutividade hidráulica entre as amostras ( $4,3 \cdot 10^{-3}$  m/s), aproximadamente 4 vezes mais ao solicitado em norma, e resposta mecânica aceitável, 66,5 % maior, quanto ao ensaio de resistência à tração na flexão (3,33 MPa), que o classifica como revestimento de pavimento de concreto permeável moldado no local para tráfego leve e de pedestres, segundo a NBR 16416 (2015), bem como, utiliza o maior teor de substituição do cimento Portland por CBC (10 %), potencializando-o como produto sustentável.

Finalmente, os concretos permeáveis com substituição do cimento Portland por CBC estudados, apresentaram desempenhos aceitáveis sob as condições da pesquisa, utilizando desse subproduto como um agente sustentável, a fim de proporcionar benefícios econômico, social e ambiental ao ambiente urbano inserido.

### **9.1 Recomendações para pesquisas futuras**

Para futuras pesquisas recomenda-se a análise de diferentes processos de beneficiamento de moagem e peneiramento da CBC, afim de melhorar as características pozolânicas e efeito filler da cinza, para obter melhores resultados mecânicos e hidráulicos, em conformidade com os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 16416 (2015).

Identificar as características químicas da CBC, quanto a propriedade pozolânica, com a determinação dos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SO}_3$  e álcalis disponíveis em  $\text{Na}_2\text{O}$ , conforme a NBR 12653 (2014), para identificar possíveis comportamentos mecânicos e hidráulicos, quando adicionada ao concreto permeável.

Verificar o aumento do teor de CBC em substituição ao cimento Portland no concreto permeável até o limite máximo aceitável para uso como revestimento de pavimento permeável.

Realizar os ensaios de resistência à flexão, de acordo com a NBR 15805 (2015), para avaliar o uso do revestimento de pavimento como placa de concreto permeável, conforme a NBR 16416 (2015).

Observar os comportamentos mecânicos e hidráulicos de concretos permeáveis com adição de CBC em substituição ao cimento Portland e agregado graúdo de dimensão máxima característica menor ou igual a 6,3 mm, com o objetivo de melhorar o acabamento do material quanto a estética comercial e caminhabilidade.

Avaliar em campo, os diferentes tipos de sistemas de infiltração do pavimento de concreto permeável em comparação aos ensaios de coeficiente de permeabilidade laboratoriais.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland: Indústria do Cimento, Relatório Setorial - Agosto, 2021.

ABCP, Associação Brasileira de Cimento: **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**, São Paulo, 2017.

ACI Committee 522, **Pervious Concrete (ACI 522R-06): American Concrete Institute**, p.25, Farmington Hills, Michigan, 2006.

ALENCAR, Paulo Cezar Dias de. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

AOKI, Y. **Development of pervious concrete**. (Master) - University of Technology, Sydney, Sydney, jun, 2009.

ARAÚJO, P. R de; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n 3, p. 21 – 29, jul./set. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11172. Aglomerantes de origem mineral – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653 - Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 13292. Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 14545. Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR 15805. Pisos elevados de placas de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894. Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm**. Rio Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1. Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.

- \_\_\_\_\_. **NBR 16416. Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio Janeiro, 2017.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16889. Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5751. Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5752 - Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6457. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6502. Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7181 – Solo: Análises granulométricas.** Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211. Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2019.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7214. Areia normal para ensaio de cimento – Especificação.** Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7222. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9833. Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 24. Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45 Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53 Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM ISO 3310-2: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação – Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142. Concreto. Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

AZAÑEDO, W. H. M.; HELARD, C. H.; MUÑOZ, R. G. V. **Diseño de mezcla de concreto poroso con agregados de la cantera La Victoria, cemento pórtland tipo i con adición de tiras de plástico, y su aplicación en pavimentos rígidos, en la Ciudad de Cajamarca,** Universidade Nacional de Cajamarca, 2007.

BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 77–88, 2015.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** Dissertação (Mestrado Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 133, 2013.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELSPACH, D. A. Field Survey of Pavement Surface Infiltration Rates. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 133, n. 3, June, 2007.

BHUTTA et al. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243-1248, jun. 2013.

BIGARELLA, J. J; MAZUCHOWSKI, J. Z. Visão integrada da problemática da erosão. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO*, v. 3, 1985, Maringá. Anais. ABGE, ADEA, p. 322, 1985.

, Letícia Machado. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto Permeável para Utilização em Blocos Intertravados para Estacionamentos**. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Engenharia Civil), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

BRAGA, Júlia Oliveira. **Alagamentos e inundações em áreas urbanas: estudo de caso na cidade de Santa Maria – DF**. Monografia de graduação (Disciplina Prática e Pesquisa de Campo 2) - Departamento de Geografia, Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Diário Oficial da União, Brasília 11 julho de 2001. Disponível:  
[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/l10257.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm). Acesso em: 16. Jun. 2021.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Diário Oficial da União, Brasília, 6 de janeiro de 2007. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm). Acesso em: 02. Jul. 2021.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando a variabilidade da composição do RCD**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 208 p, 2007.

CÂMARA, Everlei. **Efeitos da substituição parcial de agregados miúdos por cinzas residuais do bagaço da cana-de- açúcar no processo de hidratação do cimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2015.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, p. 234,1988.

CARVALHO, Ana Elisa Ferrari. **Análises de multicritérios aplicadas à avaliação de alternativas de controle de inundações na bacia hidrográfica do rio Mineirinho (São Carlos – SP)**. Dissertação (Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP 2016.

CASTALDELLI, V. N et al. **Avaliação da cinza do bagaço da cana de- açúcar (in natura) quando adicionado ao concreto**. *In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto*. IBRACON, 2010.

CASTRO, J et al. Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 24, p. 271-284, out. 2009.

CASTRO, T; MARTINS, C. Caracterização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material alternativo para redução de impactos ambientais. **Revista MIX Sustentável**, v.2, n.1, 12-19. 2016.

CHINDAPRASIRT, P., HOMWUTTIWONG, S., SIRIVIVATNANOM, V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 7, pp. 1087-1092, 2004.

CHOPRA, M; WANIELISTA, M; MULLIGAN, A. M. **Compressive Strength of Pervious Concrete Pavements**. University of Central Florida. Orlando, p. 136, 2007. Cimento Nacional. CP II-F-32 RS. Disponível em: <http://www.cimentonacional.com.br/produto/cp-ii-f-32-rs>. Acessado em: 21 jun. 2021.

COELHO, Suani Teixeira. **Mecanismo para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa: um modelo para o Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento (Org.). **Acompanhamento da safra brasileira: Monitoramento agrícola: Cana-de-açúcar**. v. 4. Brasília, p. 81, 2021.

CONTENCO, Fabricante dos produtos Pavitest. Manual do usuário: equipamento moinho de bolas tipo “sonnex”, modelo I-4205. São José da Lapa, Minas Gerais, 2016.

CORDEIRO, G. C. et al. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 110 – 115, 2009b.

CORDEIRO, G. C; TOLEDO FILHO, R. D; FAIRBAIRN, REGO, E. de M. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009a.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COSTA, Marcella Ribeiro da. **Análise Da Reatividade Pozolânica Da Cinza Do Bagaço Da Cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento), Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional. CP II-E-32. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/cimentos/>. Acessado em: 21. Jul. 2021.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON. v. 1, p. 261–310, 2011.

DANCIGUER, G. M; REIS, E. A. P. **Pavimento Permeável Aplicado em Área Urbana, como Medida de Escoamento da Água da Chuva**. Encontro de Iniciação Científica, ETIC, 2016.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7 ed. São Paulo: Thomson Learning, p. 561, 2007.

DELLATE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. I. Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2113, p. 132 – 139, Nov. 2009.

DUXSON, P.; PROVIS, J. Low CO<sub>2</sub> concrete: are we making any progress? BEDP Environment Design Guide. PRO 24, November 2008.

FAIRBAIRN, E. M. R. et al. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potencial for carbon credits. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 1864 – 1871, 2010.

FERNANDES, Jáder Cristian. **Fabricação e caracterização de compósitos de concreto com adição de fibra de coco para confecção de pisos permeáveis**. 2018. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais), Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda, 2018.

FERNANDES, S. E. et al. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 909-923, Dec. 2015.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)**. São Paulo: FIESP/CIESP, p.90. 2001.

FILHO, Primo Fernandes. **Utilização da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar na produção de materiais cimentícios alcalinamente ativados**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

FREITAS, Elaine de Souza. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2005.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 490–496, 2011.

GANESAN, K; RAJAGOPAL, K; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**. v. 29, p. 515-524, 2007.

GARTNER, Ellis. Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements. **Cement and Concrete Research**, v.34, n. 9, p. 1489-1498, 2004.

GHAFOORI, N; DUTTA, S. Building and non-pavement applications of no-fines concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 4, [S.l], p. 286-289, 1995.

GONÇALVES, Jardel. **Desenvolvimento e caracterização de concreto permeável para utilização em blocos intertravados para estacionamentos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

GUERRA, Leonardo. **Viabilidade técnica da adição de finos de basalto à pasta de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento), Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. 2013.

HADDAD, E.; TEIXEIRA, E. **Economic Impacts of natural disasters in megacities. The case of floods in São Paulo, Brazil**. TD Nereus, p. 21, 2013.

HOLTZ, Fabiano da Costa. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2011.

HOPPE FILHO, Juarez. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Engenharia Civil) Departamento de Estruturas e Construção Civil - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

HUANG, B. et al. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 818-823, nov. 2010.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Drenagem Urbana e outros fatores do plano diretor, 2019b. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/2012-agencia-de-noticias/noticias/21633-desastres-naturais-59-4-dos-municipios-nao-tem-plano-de-gestao-de-riscos.html#:~:>. Acesso em: 29 mar. 2021.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**: Agência de notícias, Perfil dos municípios brasileiros, 2019a.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**: Agência de notícias, Perfil dos municípios brasileiros, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/umuarama.html> . Acessado em 15. Jun. 2021.

ILUSTRADO. **Empresários pedem apoio para sanar problemas com enxurradas na Av. Brasil**, 2020. Disponível em < <https://ilustrado.com.br/empresario-pedem-apoio-para-sanar-problemas-com-enxurradas-na-av-brasil/>>. Acessado em: 15. Julho. 2021.

JUNIOR, V. J. S; SANTOS, C. O. A evolução da urbanização e os processos de produção de inundação urbanas. **Estação Científica (UNIFAP)**, v. 3, n. 1, p. 19-30, jan-jun, 2014.

KAWABATA, Celso Yoji. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural**. Tese (Doutorado em Zootecnia e Engenharia de Alimentos). São Paulo: Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

LI et al. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management**, v. 118, p. 144-152, fev. 2012.

LIAN, C. ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete: An experimental investigation. **Journal Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2664-2671, 2010.

LIMA, S. A. et al. Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo. **Revista Tecnológica**, p. 87-97, 8 jan. 2010.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, dez. 2011.

MACEDO, Pamela Camargo. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Ilha Solteira/SP, 2009.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**, 1 ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p., 1996.

MARANGON, Ederli. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço**. Dissertação (Programa em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 142 p., 2006.

MARIANO, Humberto Rodrigues **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, p.163, Goiânia, 2014.

MARTIN, W. F; KAYE, N. B; PUTMAN, B. J. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 59, n. 30, p. 78.84, may 2014.

MARTINERA HERNÁNDEZ, J. F. et al. Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera (primeira parte). **Materiales de Construcción**, v.50, n.260, p. 71-78, 2000.

MARTINS, Ronaldo. **Análise da Capacidade de Infiltração do Pavimento Intertravado de Concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de cimento: impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan/jun 2012.

MAZZONETTO C. Concreto permeável: Alternativa para aumentar a permeabilidade de pavimentos submetidos a cargas reduzidas, sistema demanda cuidados de especificação, instalação e manutenção. **Infraestrutura urbana**, 13 ed., São Paulo, abr. 2011.

MEDINA, Engler Apaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEHTA, P. K. Advancements in concrete technology. **Concrete International**, p. 69-76, 1999.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, J. M. P. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, J. M. P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIER, J. G. M. and VLIET, M. R. A. Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 69, p. 235-247, 2002.

MONTEIRO, Anna Carolina Neves. **Concreto Poroso: Dosagem e Desempenho**. Trabalho de Conclusão de Curso - TCC (Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MORAES, R. C. **Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001

MORAIS, A. C de; PUGLIESI, F; SALVESTRO, A; C. **Análise e Adequação do Sistema de Drenagem na Zona Central de Umuarama-PR**. Trabalho de Conclusão de Curso - TCC (Engenharia Civil). Universidade Paranaense - Campus Umuarama, 2017.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M. **Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas**. In: Congresso pan-americano de engenharia de trânsito e transporte, 11., 2000, Gramado. Gramado, 1998. p.1007-1017.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010. Pervious Concrete. Disponível em: <<http://perviouspavement.org>>. Acesso em 18 de Julho de 2019.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1203 - 1210, 2003.

NEPTUNE, A et al. Effect of aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 6, p. 625-631, dez. 2010.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 2º ed., p.828, 2013.

NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R. D.; SECCHI, M.; ABE, M. A. P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica**, v.17, p. 39-48, 2008.

OLIVEIRA, Caroline Oliveira. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, I. R. et al. Dispersão e empacotamento de partículas, 2ª ed., Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, SP, 2000, 224 p.

OLIVEIRA, M. P.; N, A. F.; CAMPO, M. S.; BARBOSA, N. P. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: **Conferencia Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitação e infraestrutura de interesse social Brasil – NOCMAT 2004**, Pirassununga. Anais. Pirassununga: USP, p. 15, 2004.

OLOUKUN, F. A; BURDETTE, E. G; DEATHERAGE, J. H. Splittin tensile strength and compressive strength relationship at early ages. **ACI Material Journal**, v. 88, n. 2, p. 115-121, 1991.

OLUOKUN, Francis. Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete. **ACI Materials Journal**. V. 88, n. 3, p. 302- 309, 1991.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, Rio de Janeiro, 2015.

Organização dos Estados Americanos - OEA. **Bacia do Rio da Prata**; estudo para sua planificação e desenvolvimento. Rio de Janeiro: OEA, v.1, 217p, 1973.

PAULA, M. O. et al. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p.353-357, 2009.

PAULA, Marcos Oliveira de. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial ao cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2006.

PAYA, J; MONZÓ, J; BORRACHERO, M. V. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal Of Chemical Technology And Biotechnology**, Oxford, v. 77, p. 321-325, 2002.

PETRUCCI, R. G. E. **Concreto de cimento Portland**. 6ª edição. Porto Alegre: Editora Gloro, 1979.

POGGIALI, Flavia Spitale Jacques. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestre em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010.

PORTAL DA CIDADE. **Chuva causa alagamento em residência, empresa e ruas de Umuarama**, 2019. Disponível em <<https://umuarama.portaldacidade.com/index.php/noticias/cidade/chuva-causa-alagamento-em-residencia-empresa-e-ruas-de-umuarama>>. Acessado em: 15. Julho. 2021.

PREFEITURA DE UMUARAMA. **Portal da transparência, obras públicas**. Governo Federal. Disponível em: <http://servicos.umuarama.pr.gov.br/portaltransparencia/licitacoes/detalhes?entidade=1&exercicio=2020&tipoLicitacao=3&licitacao=12%20>. Acesso em: 28. Mar. 2021

PROMSA. Empresa do Grupo Cimentos Molins. Sant Vicenç dels Horts, Barcelona, 2014.

RAMOS, Gustavo Moreira. **Análise das propriedades do concreto permeável com adição de agregado miúdo e resíduo (cinza de madeira)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Engenharia Civil de Infraestrutura), Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, p.90, 2018.

RANIERI, V, et al. Measurement of hydraulic conductivity in porous mixes.” **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1, p. 1-10, 2012.

RAPHAEL, Jerome M. Tensile Strength of Concrete. **ACI Journal**, v.81, n. 2, p. 158-165, 1984.

REZENDE, Mariana Felicetti. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento portland como mecanismo de desenvolvimento limpo**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2016

RODRIGUES, Michelle Santos. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias**. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, 2012.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials & Design**, v. 34, p. 45–50, fev. 2012.

SAMPAIO, Zodino Laurisa Monteiro. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades**. Dissertação (Mestrado em mecânica das estruturas, estruturas de concreto e alvenaria e materiais e processos construtivos) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SANDOVAL, Gersson. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina - UEL, 2014.

SANTOS JÚNIOR, V, J; SANTOS, C. O. Avaliação da fragilidade no sistema de drenagem pluvial urbana: o caso da bacia hidrográfica do córrego das Melancias em Montes Claros/MG. **Revista Monografias Ambientais – REMOA**, v.13, n.5, p.3986-3997, dez. 2014.

SAMPAIO, Z. L. M; SOUZA, P. A. B. F; GOUVEIA, B. G. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais [online]**. v. 7, n. 4, 2014.

SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana. São Paulo: SMDU. v.1, p. 168, v.1, 2012.

SÃO PAULO (SP). Prefeitura Municipal (PMSP). Lei nº 11.228, de 25 de julho de 1992. São Paulo: PMSP, 1992.

SAVASTANO, Jr; Warden, P. G. Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v.25, n.5, p.517-624, 2003.

SCHWETZ et al. Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve. In: **XIII Congresso Latino Americano da Patologia da Construção**, Lisboa, 2015.

SCRIVENER, Karen L; KIRKPATRICK, R. James. **Innovation in use and research on cementitious material**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 128-136. 2008.

SILVA JÚNIOR, J. R.; PASSOS, L. A. **O negócio é participar: a importância do plano diretor para o desenvolvimento municipal**. – Brasília DF: CNM, SEBRAE, p. 36, 2006.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research** 30, p. 1485 – 1488, 2000.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p.1485-1488, set. 2000.

SOARES, Marcela Maira Nascimento de Souza. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOUTO, Jean Marcelo Fernandes. **Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá. 108 p., 2010.

TENNIS, P. D., LEMING, M. L.; AKERS, D, J. Pervious Concrete Pavements, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association. **Silver Spring**, p. 36, 2004.

TORRES, Sara Martins. **Aplicação da difração de raios x na análise do potencial pozolânico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para adição ao cimento Portland**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Pós-graduação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

TORRES, Sara Martins. **Aplicação da difração de raios x na análise do potencial pozolânico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para adição ao cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, fev, 2019.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. M. **Programa de drenagem sustentável: apoio ao desenvolvimento do manejo das águas pluviais urbanas – Versão 2.0**. Brasília: Ministério das Cidades, 2005.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gerenciamento da drenagem urbana. **In: RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.7, p. 5-27. 2002.

TUCCI, C, E. M; COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Drenagem urbana. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 36-37, 2003.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Gestão da Drenagem Urbana**. Brasília: Cepal-Ipea, 2012. 50 p.

VALENCIANO, M. D. C. M.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p.484-492, set. /dez. 2004.

VASCONCELLOS, C. B.; et al. O aproveitamento da cinza de caldeira na construção civil. Vértices. **CEFET Campos dos Goytacazes**, v.6, n.1. p. 131-148jan/abr 2004.

VASCONCELLOS, Marcelaa Correia de Araújo. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos**

**físicos.** Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

VÉLEZ, Ligia. M. Permeabilidad y Porosidad en Concreto. **Revista Tecno Lógicas**, p.169-187, dez. 2010.

VIDAL, Almir dos Santos. **Caracterização do Concreto Permeável produzido com agregado reciclado de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

VIRGILIIS, Afonso Luís **Corrêa de.** **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WELLENKAMP, F. J. **Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão.** 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999.

YANG, J; JING. G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and concrete Research**, v. 33, p.381-386, ago. 2002.

ZAMPIERI, Valdir Aparecido. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** Dissertação (Mestrado em Geociências: Mineralogia e Petrologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 191 p, 1989.