

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL - GUARAPUAVA
ENGENHARIA CIVIL**

DIEGO ALEXANDRE VAZ

**CARACTERIZAÇÕES FÍSICA E MECÂNICA DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS PARA DRENAGEM URBANA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2021

DIEGO ALEXANDRE VAZ

**CARACTERIZAÇÕES FÍSICA E MECÂNICA DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS PARA DRENAGEM URBANA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro

GUARAPUAVA

2021

ATA DE DEFESA

Realizou-se no dia **27**, de **Agosto** de 2021, às **16 h 00 min**, no Campus Guarapuava da UTFPR, a defesa Trabalho de Conclusão de Curso, como requisito parcial para aprovação do aluno **Diego Alexandre Vaz**, na disciplina de TCC2 do Curso de Engenharia Civil intitulado: **Caracterizações física e mecânica de pavimentos permeáveis para drenagem urbana**.

A Banca foi composta pelo Presidente:

Rodrigo Scoczynski Ribeiro (Orientador), e pelos seguintes membros:

Luis Fernando Sequinel

Gustavo de Miranda Saleme Gidrão

Guarapuava, 27 de Agosto de 2021.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por tudo que fizeram por mim durante toda a minha vida.

A Rafaella, por todo apoio incondicional, orientação, ajuda e amor.

A Universidade Federal do Paraná e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade de ter estudado e feito parte de instituições de ensino superior tão grandiosas.

A todos os meus professores, sejam eles do ensino infantil, médio, cursinho ou superior.

A todos os meus amigos que participaram desta trajetória, em especial a meu melhor amigo Breendown, e ao meu primo Valmor.

Ao meu orientador, professor Rodrigo, que me ajudou e dividiu seus conhecimentos comigo.

E por fim a UTFPR – Campus Guarapuava, pelas inúmeras experiências vivenciadas.

RESUMO

VAZ, D. A. **Caracterizações Física e Mecânica de Pavimentos Permeáveis Para Drenagem Urbana**. 2021. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

A falta de planejamento no processo de urbanização das cidades pode trazer uma série de problemas como a impermeabilização do solo, acarretando na diminuição da superfície de absorção, causando um aumento no escoamento das águas pluviais e a ocorrência de inundações e alagamentos. Como consequência, em dias de chuva intensa, o tráfego nas ruas de muitas cidades é reduzido ou impossibilitado, construções são danificadas e a população ainda pode sofrer com perdas materiais, financeiras, e até se contaminar com doenças. Diante disso, este trabalho teve como objetivo verificar a viabilidade do uso de pavimentos de concreto permeável como alternativa para a drenagem urbana. Para o desenvolvimento da pesquisa, foram produzidos corpos de prova de concreto permeável, de traço 1:4, em massa, com diferentes relações água/cimento (a/c) e composições granulométricas, os quais foram avaliados quanto à absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e coeficiente de permeabilidade e fluxo. Os resultados obtidos mostraram que, para as três composições granulométricas, brita 0, brita 1 e brita mista (B0, B1 e BM), o aumento da relação a/c acarretou no aumento da resistência à compressão e à tração, na redução do índice de vazios, e conseqüentemente, na redução do índice de permeabilidade e fluxo dos concretos. Com relação à influência das composições granulométricas nas propriedades dos concretos produzidos com mesma relação a/c , os resultados mostraram que a brita 0 proporcionou um concreto com melhor acabamento superficial, a brita 1 proporcionou um concreto mais permeável e a brita mista proporcionou um concreto com maiores valores de resistências. Com base nos resultados, concluiu-se que o concreto permeável se apresentou como uma alternativa sustentável à drenagem urbana tradicional, podendo ser utilizados em calçadas e passeios, onde não exista tráfego pesado.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Concreto Permeável. Permeabilidade.

ABSTRACT

VAZ, D. A. **Physical and Mechanical Characterization of Pervious Pavements for Urban Drainage** 2021. 91 f. Civil Engineering final term paper- Federal University of Technology. Guarapuava, 2021.

The lack of planning in the urbanization process of cities can bring a role of problems such as soil sealing, leading to the reduction of the absorption surfaces, causing an increase in the flow of rainwater and the occurrence of flooding and flooding. As a result, on days of intense rain, traffic on the streets of many cities is reduced or impossible, buildings are damaged and the population can still suffer material and financial losses, and even become infected with diseases. Therefore, this work aimed to verify the feasibility of using pervious concrete pavements as an alternative for urban drainage. For the development of the research, pervious concrete specimens were produced, with a mix of 1:4, by mass, with different water/cement ratios (w/c) and granulometric compositions, which were evaluated for water absorption, index of voids, specific mass, compressive strength, tensile strength by diametrical compression and permeability and flux coefficient. The results obtained showed that, for the three granulometric compositions, gravel 0, gravel 1 and mixed gravel (B0, B1 and BM), the increase in the w/c ratio resulted in an increase in compressive and tensile strength, in a reduction in the void ratio, and consequently in a reduction in the permeability index and concrete flow. Regarding the influence of particle size compositions on the properties of concrete produced with the same w/c ratio, the results showed that gravel 0 provided a concrete with better surface finish, gravel 1 provided a more pervious concrete and mixed gravel provided a concrete with higher resistance values. Based on the results, it was concluded that pervious concrete presented itself as a sustainable alternative to traditional urban drainage, being able to be used in sidewalks and sidewalks, where there is no heavy traffic.

Keywords: Urban Drainage. Pervious Concrete. Permeability.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	46
Equação 2	48
Equação 3	49
Equação 4	49
Equação 5	50
Equação 6	50
Equação 7	50
Equação 8	51
Equação 9	51

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ensaio de massa específica do cimento	35
Figura 2 - Curvas granulométricas B0, B1 e BM (50/50)	36
Figura 3 – Ensaio de massa específica a) Secagem das britas b) Massa saturada c) Massa imersa	37
Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.....	38
Figura 5 – Procedimento de produção do concreto permeável	40
Figura 6 – Misturas no estado fresco a) Relação a/c 0,30 b) Relação a/c 0,35 c) Relação a/c 0,40	41
Figura 7 – Teste preliminar – estado endurecido a) B1_0,30 b) B1_0,35 c) B1_0,40	42
Figura 8 – Corpos de prova moldados	43
Figura 9 – Corpos de prova desmoldados	43
Figura 10 – Cura submersa dos corpos de prova em tanque saturado com cal	44
Figura 11 – Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica a) Saturação b) Massa imersa c) Secagem em estufa	45
Figura 12 – Ensaio de resistência à compressão axial	45
Figura 13 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	45
Figura 14 - Permeômetro	46
Figura 15 – Gráfico da absorção de água média	53
Figura 16 – Gráfico do índice de vazios médio	53
Figura 17 – Gráfico da massa específica média	54
Figura 18 - Resultado do teste de Tukey entre as absorções de água dos traços estudados.....	55
Figura 19 – Resultado do teste de Tukey entre os índices de vazios dos traços estudados.....	55
Figura 20 – Gráfico da resistência média à compressão	56
Figura 21 - Resultado do teste de Dunn com ajuste de Benjamini e Hochberg entre as resistências à compressão dos traços estudados	58
Figura 22 – Gráfico de resistência média à tração	59
Figura 23 - Resultado do teste de Tukey entre as resistências à tração dos traços estudados.....	60
Figura 24 – Gráfico do coeficiente de permeabilidade médio	61
Figura 25 – Gráfico do fluxo médio	62
Figura 26 - Resultado do teste de Tukey entre as permeabilidades dos traços estudados.....	63
Figura 27 – Gráfico de combinação entre o índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade.....	64
Figura 28 – Gráfico de combinação entre o índice de vazios e o fluxo	64
Figura 29 – Gráfico de combinação entre o coeficiente de permeabilidade e o fluxo.....	65
Figura 30 - Gráfico de combinação entre a resistência à compressão e o índice de vazios	66

Figura 31 - Gráfico de combinação entre a resistência à compressão e o fluxo	66
Figura 32 - Gráfico de combinação entre a resistência à tração e o índice de vazios	67
Figura 33 - Gráfico de combinação entre a resistência à tração e o fluxo.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações do Cimento Portland CP II-F-32	34
Quadro 2 – Ensaio de caracterização das britas	37
Quadro 3 – Nomenclatura dos traços.....	40
Quadro 4 – Consumo de materiais para o estudo preliminar	40
Quadro 5 – Consumo de materiais para o estudo definitivo.....	42
Quadro 6 – Ensaio de caracterização do concreto permeável no estado endurecido	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise granulométrica B0, B1 e M (50/50).....	36
Tabela 2 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica real médios.....	52
Tabela 3 – Resistência à compressão média.....	56
Tabela 4 – Resistência à tração média	58
Tabela 5 – Coeficiente de permeabilidade e fluxo médios	61
Tabela A1 – Absorção de água	78
Tabela A2 – Índice de vazios	79
Tabela A3 – Massa específica real	80
Tabela A4 – Resistência à compressão	81
Tabela A5 – Resistência à tração.....	82
Tabela A6 – Dados para cálculo do coeficiente de permeabilidade e fluxo	83
Tabela A7 – Coeficiente de permeabilidade.....	84
Tabela A8 - Fluxo	85
Tabela B1 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para o índice de vazios.	87
Tabela B2 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para a absorção de água	88
Tabela B3 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis para a resistência à compressão.....	89
Tabela B4 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para a resistência à tração	90
Tabela B5 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para a permeabilidade..	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
2 DRENAGEM URBANA	17
2.1 URBANIZAÇÃO E SEUS IMPACTOS NA DRENAGEM URBANA.....	17
2.2 PROBLEMAS ASSOCIADOS À IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO.....	19
2.2.1 Tipos de Inundação	21
2.2.2 Consequências das Inundações.....	21
2.2.3 Mitigação das Inundações pelo Aumento de Superfícies Permeáveis.....	23
3 CONCRETO PERMEÁVEL	25
3.1 DEFINIÇÃO	25
3.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	25
3.3 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL	27
3.4 APLICAÇÕES	28
3.5 BENEFÍCIOS DO SEU USO.....	29
3.6 EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL	30
3.7 MANUTENÇÃO E DURABILIDADE.....	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 MATERIAIS.....	34
4.1.1 Cimento Portland	34
4.1.2 Agregado Graúdo	35
4.1.3 Água	38
4.2 MÉTODOS.....	38
4.2.1 Dosagem	38
4.2.2 Estudo Preliminar do Concreto Permeável	39
4.2.3 Produção do Concreto Permeável.....	42
4.2.4 Caracterização do Concreto Permeável	44
4.2.5 Análise Estatística.....	47
4.2.5.1 Verificação da distribuição normal	48
4.2.5.2 Definição de intervalos de confiança.....	48
4.2.5.3 Métodos de análise de variância e testes de comparações múltiplas	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	52
5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	56
5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	58
5.4 PERMEABILIDADE.....	60

5.5 ANÁLISES COMBINADAS DAS PROPRIEDADES.....	63
6 CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS.....	70
ANEXO A - TABELAS COM RESULTADOS COMPLETOS	77
ANEXO B - TABELAS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA	86

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem sido possível observar o processo de urbanização das cidades, que sem um devido planejamento acaba por trazer uma série de problemas como a impermeabilização do solo, a retirada da cobertura vegetal, a produção de resíduos sólidos e a ocupação de áreas de risco (LAMB, 2014).

O crescimento do perímetro urbano, as construções de edificações e a pavimentação de vias públicas acarretam na diminuição da superfície de absorção, causando um aumento no escoamento das águas pluviais e favorecendo a ocorrência de inundações e alagamentos. Como consequência da impermeabilização do solo as cidades sofrem em dias de chuva intensa, as ruas são atingidas tendo o tráfego reduzido ou impossibilitado, construções sofrem danos e a população pode sofrer com perdas materiais e financeiras além de poder se contaminar com doenças (TUCCI, 2007).

A Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, define drenagem urbana como o conjunto de atividades e mecanismo de manejo das águas pluviais urbanas e um componente do saneamento básico, ela muitas vezes se torna ineficiente pois é sobrecarregado pelos efeitos da urbanização (BRASIL, 2020).

Com vistas a minimizar a ocorrência de inundações e suas consequências, novos sistemas e tecnologias voltadas à drenagem urbana se fazem necessários. Os materiais geralmente utilizados para pavimentação das vias, como o concreto asfáltico e o concreto de cimento Portland são muito pouco permeáveis, e uma alternativa para aumentar a infiltração, diminuindo o escoamento superficial é o emprego do concreto permeável (HÖLTZ, 2011).

O concreto permeável é um tipo de concreto que difere do tradicional, pois em sua composição utiliza-se pouca ou nenhuma areia e, também maiores proporções de brita. Em função disso, este concreto apresenta uma elevada porosidade que lhe confere uma capacidade de drenagem. A sua utilização se enquadra como uma técnica de drenagem urbana compensatória, buscando um aumento na infiltração e redução da vazão de águas pluviais superficiais (POLASTRE; SANTOS, 2006).

No Brasil esse material ainda é pouco conhecido e utilizado, carecendo de estudos e pesquisas para avaliar seu comportamento, sua eficiência e seus

benefícios. Portanto, este trabalho visa contribuir com a expansão de estudos acerca deste relevante tema.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento sustentável é algo muito importante e que se faz muito necessário na sociedade, e com um peso ainda maior na engenharia civil pois é ela que na maioria das vezes gera grandes transformações na natureza e também é quem produz a infraestrutura adequada para sustentar essas mudanças no meio ambiente. São necessárias soluções que tragam equilíbrio entre o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente, evitando assim problemas que impactem na qualidade de vida das pessoas (HÖLTZ, 2011).

A urbanização mal planejada mina o sistema de drenagem urbano, conseqüentemente inúmeros problemas ocorrem e uma parcela da população acaba sendo afetada. Esse problema é comum em países em desenvolvimento, como o Brasil, pela alta taxa de urbanização e por isso são necessárias novas soluções e tecnologias para se utilizar nos sistemas de drenagem visto que o modelo atual, em grande parte, é ineficiente (TUCCI, 2001).

O modelo de drenagem em utilização na maioria das cidades segue ideias ultrapassadas de quando seu único objetivo era destinar as águas pluviais o mais rápido possível, evitando seu acúmulo nas áreas urbanas. Aliando-se a isso as obras desse sistema geram danos ao meio ambiente, tem altos custos e causam transtornos para a população pois envolvem escavação e movimentação de terra (CANHOLI, 2005; TUCCI, 2007).

Em vista disso é necessário e fundamental estudar métodos alternativos que possam vir a melhorar o sistema de drenagem urbana atual e minimizar os problemas com inundações e alagamentos, e por consequência melhorar a qualidade de vida da sociedade. Sendo assim, a utilização de pavimentos de concreto permeável se apresenta como uma alternativa, ainda sendo pouco utilizado no Brasil, mas que pode trazer benefícios ambientais, sociais e almeja ser muito eficiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Identificar a viabilidade do uso de pavimentos de concreto permeável como alternativa para a drenagem urbana.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o concreto permeável quanto às suas propriedades mecânicas e hidráulicas;
- Analisar as relações existentes entre as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável;
- Relacionar as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável com aspectos sustentáveis para drenagem urbana.

2 DRENAGEM URBANA

Este capítulo apresenta uma revisão da problemática relacionada à situação da drenagem urbana e dos desafios associados à gestão das águas pluviais, enfatizando os problemas ligados ao processo de impermeabilização do solo.

2.1 URBANIZAÇÃO E SEUS IMPACTOS NA DRENAGEM URBANA

No atual cenário de desenvolvimento do Brasil, que ainda vivencia um aumento dos processos de urbanização, com decorrentes impactos hidrológicos e ambientais, o desafio da drenagem urbana vem tornando-se cada vez maior e mais complexo, pois envolve aspectos ambientais, sanitários, paisagísticos e técnicos. A dinâmica de expansão urbana, nas últimas décadas, tem produzido grandes impactos negativos, de diferentes naturezas, em grande parte, esses estão associados à ausência de infraestrutura e planejamento adequado que permitam dar suporte a essa urbanização (LAMB, 2014).

O Brasil apresenta uma taxa de 84,4% de população residindo na área urbana de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), o que demonstra o aumento da urbanização e o crescimento das regiões metropolitanas no país.

O desenvolvimento econômico provocou o aumento no número de edificações culminando na expansão dos centros urbanos. As áreas, antes ocupadas por complexos rurais, foram se transformando com a urbanização. Disso, ocorreram negativos impactos ambientais devido a relação entre a hiper densificação de centros urbanos já consolidados e o alastramento de suas respectivas malhas urbanas para áreas circundantes (MENDONÇA, 2004).

Dentre os vários problemas ligados à urbanização mal planejada destacam-se os problemas associados à drenagem urbana, decorrentes de sistemas subdimensionados e/ou obstruídos. Os impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem urbana são vastos, mas estão normalmente relacionados aos processos do crescimento populacional desordenado, à ausência de uma estratégia de ocupação do solo, ao deficiente planejamento urbano e a problemas de provisão de infraestrutura de serviços (LAMB, 2014).

O aumento da população urbana nos últimos anos tem ocorrido principalmente nas periferias das cidades, ocupando áreas de mananciais e de risco de inundação e deslizamento. O processo de urbanização tem acontecido, em geral, de forma desordenada, sem o planejamento de ações que conduzam à ocupação do solo de forma adequada. O ciclo hidrológico sofre fortes modificações nas áreas urbanas, devido, principalmente, à alteração da superfície e da canalização do escoamento em virtude da poluição gerada pela população. Tal processo apresenta grave impacto nos países em desenvolvimento, onde a urbanização e as obras de drenagem são realizadas de forma totalmente insustentável, com técnicas que já foram abandonadas pelos países desenvolvidos há muitos anos (TUCCI, 2003).

Mendonça (2004) evidencia que a concentração de população em grandes metrópoles favorece o aumento da poluição e da frequência das inundações em função da impermeabilização do solo e da canalização de rios. Acioli (2005) acrescenta como danos gerados pela urbanização: a redução da umidade do solo, que leva a uma redução do lençol freático; a diminuição do escoamento de base de rios; o aumento na carga de poluentes decorrente da rede pluvial ou do escoamento superficial.

Já Tucci (2003) ainda relata que, à medida que a cidade cresce, ocorrem consequências indesejadas para o sistema de drenagem urbana, tais como: redução da evapotranspiração, do escoamento subterrâneo e do rebaixamento do lençol freático; aumento da produção de sedimentos, devido à desproteção das superfícies e à produção de resíduos sólidos e deterioração da qualidade da água, em função da lavagem das ruas, ao transporte de material e às ligações clandestinas de esgoto.

Os impactos da urbanização também são significativos do ponto de vista ambiental pois, a carga de poluição das águas pluviais tem se mostrado muitas vezes equivalente e, eventualmente, até mesmo superior às cargas poluentes dos esgotos sanitários (ELLIS; HVITED-JACOBSEN, 1996).

Um número crescente de obras, de porte cada vez maior, vem acontecendo devido as muitas ocorrências de fluxos superficiais de água concentrados no meio urbano, tal situação está piorando com o passar do tempo. Apesar dos enormes investimentos, muitas vezes o resultado efetivo das intervenções consiste em transferir o problema para jusante. Para agravar o problema, as extensas e precárias redes de drenagem das cidades brasileiras acabam comprometidas pelo acúmulo de

sujeira e lixo nas bocas de lobo, no interior das canalizações e nos corpos de água (LAMB, 2014).

2.2 PROBLEMAS ASSOCIADOS À IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO

O aumento das superfícies impermeáveis é um dos principais impactos que a urbanização provoca no meio ambiente, pois as alterações no escoamento natural da bacia hidrográfica, com o aumento do volume das águas pluviais escoadas na superfície, incrementam as vazões de pico dos corpos d'água. Consequentemente ocorre a degradação da qualidade da água, geração de sedimentos, alteração das características naturais do solo e aumento da ocorrência de alagamentos (POLASTRE; SANTOS, 2006).

O fator determinante que agrava a questão da drenagem urbana é a impermeabilização do solo associada à ocupação urbana. A construção de edificações, junto à pavimentação gera uma camada impermeável de grande extensão, que direciona toda a água precipitada para o sistema de drenagem ou para os corpos de água existentes na região (AGRA, 2001).

O processo de impermeabilização do solo faz com que ele perca a sua capacidade natural de infiltração, desse modo, onde antes as águas percolavam naturalmente, são construídos pavimentos impermeáveis, aumentando assim o volume de escoamento superficial das águas para as áreas mais baixas, favorecendo a ocorrência de inundações (HÖLTZ, 2011).

Com o aumento do processo de impermeabilização do solo, impactos sobre o ciclo hidrológico das regiões afetadas vão se agravando. Uma das consequências é a redução do nível do lençol freático, que deixa de ser reabastecido pelas chuvas, pois esse volume que escoas das redes urbanas, juntamente com a precipitação, acaba recarregando os aquíferos. Tal perda varia entre 10 e 50% nas redes de abastecimento de águas dos grandes centros urbanos. Outra é a alteração da movimentação do fluxo de água na bacia (LERNER, 1990).

Com o aumento da impermeabilização, a bacia perde a sua funcionalidade, pois os pontos de detenção natural e a capacidade das plantas de reterem parte dessa água também se perdem com essa alteração, gerando uma maior necessidade de

tubulações, retificações de rios e revestimento de canais para o gerenciamento dessas águas. Tais alterações acarretam num aumento do hidrograma (TUCCI; GENZ, 1995).

Com a perda de capacidade de infiltração no solo aliado ao desmatamento, ocorre também uma importante redução da evapotranspiração. As superfícies impermeáveis não desempenham o mesmo papel da cobertura vegetal, que retém água no seu interior, conseqüentemente, o equilíbrio térmico é impactado (TUCCI, 2007).

As enxurradas carregam muitos resíduos sólidos ou solúveis para os corpos hídricos, que por consequência recebem cargas absurdas de poluentes, comprometendo a sua qualidade. Esse fluxo de água é aumentado pela impermeabilização de grandes áreas urbanas e se torna uma importante fonte de degradação da qualidade da água de corpos receptores próximos a aglomerações urbanas. Já são encontrados em corpos d'água vários poluentes nocivos que comprometem o equilíbrio ecológico da natureza (PORTO, 2001).

Porto (2001) destaca que a melhoria da drenagem é algo que precisa ser mais bem explorado. Existe uma preocupação com a poluição proveniente do esgoto sanitário, que tem participação importante na degradação da qualidade da água. Todavia, para melhorar a qualidade dos corpos d'água urbanos é necessário, também, cuidar das águas pluviais provenientes do escoamento das chuvas, resultantes da impermeabilização do solo, pois estas se contaminam ao passar por locais como áreas em construção, depósitos de resíduos sólidos, industriais, de saúde e outros.

Relacionado à contaminação das águas pluviais urbanas, uma das grandes preocupações é o excesso de nutrientes recebidos pelos corpos d'água, que causa sérios desequilíbrios na fauna e flora aquáticas. Esses grandes volumes de nutrientes favorecem o processo de eutrofização nessas águas. Em situações em que o tempo de residência ultrapassa três semanas, as chances de ocorrência de eutrofização aumentam exponencialmente (HÖLTZ, 2011).

Outro problema alarmante está relacionado à presença de metais pesados nas águas de drenagem pluvial. São encontrados nas águas pluviais materiais tóxicos que acabam poluindo o lençol freático, por conterem altas concentrações de elementos como arsênico, berilo, cádmio, cromo, cobre, mercúrio, níquel, chumbo, selênio e zinco (WONG; BREEN; LLOYD, 2000).

É evidente que a urbanização crescente provoca uma obsolescência gradual dos sistemas de drenagem e a impermeabilização do solo gera inúmeros problemas com sérias consequências, como as inundações cada vez mais frequentes em áreas urbanas. Esses fenômenos ocorrem quando a precipitação é elevada, ou seja, quando a chuva é intensa e constante, causando uma elevação nos corpos d'água que sem escoamento suficiente transbordam (LAMB, 2014).

2.2.1 Tipos de Inundação

Inundação é o transbordamento das águas de um curso d'água, existindo dois tipos de inundações: as ribeirinhas e as associadas à urbanização. Inundações ribeirinhas ocorrem naturalmente, em função da variação do nível dos rios durante os períodos secos e chuvosos. Já as inundações associadas à urbanização e ao sistema de drenagem urbana são as que ocorrem com a ampliação dos escoamentos, devido à canalização e à impermeabilização do solo em áreas urbanizadas, provocando o aumento das vazões máximas (TUCCI, 2007).

Os problemas no tocante ao controle de inundações são decorrentes do aumento dos picos de cheias, ocasionado tanto pela intensificação do volume do escoamento superficial, relacionado ao aumento da densidade das construções e impermeabilização do solo, como pela diminuição dos tempos de concentração. Essa diminuição também é proveniente do acréscimo na velocidade de escoamento devido à alteração do sistema de drenagem existente, exigida pelo aumento da densidade de construções (TUCCI, 2000).

2.2.2 Consequências das Inundações

Inundações urbanas são cada vez mais frequentes, dificultando o cotidiano dos moradores, causando transtornos no tráfego, muitas vezes deixando vias intransitáveis e inundando muitas casas e estabelecimentos durante os eventos de chuva. Dentre os piores efeitos das inundações destacam-se: maiores picos de vazão e volumes, assoreamento de canais e galerias, entupimento de bueiros, degradação da qualidade da água, doenças de veiculação hídrica e perdas e prejuízos às populações que sofrem com as inundações (LAMB, 2014).

Lamb (2014) afirma que a tendência de controle das cheias associada à urbanização é que ele seja realizado através da canalização dos trechos críticos. Tal solução segue a visão particular de um trecho da bacia, sem que as consequências sejam previstas para o restante da mesma. A canalização dos pontos críticos serve apenas para transferir a inundação de um lugar para outro na bacia.

A população ribeirinha sofre muito com as inundações, sendo a principal causa a maior ocupação do leito nos anos secos, o que causa fortes prejuízos nos anos mais úmidos, quando essas áreas são inundadas. Como resultado dessa ocupação, quando chega uma inundação mais intensa, os impactos são enormes, com grandes prejuízos, gerando sérios problemas públicos (TUCCI, 2007).

Tucci (2007) especifica que, em uma bacia hidrográfica rural, o fluxo de água acaba sendo retido pela vegetação, causando maior infiltração no solo. O restante da água escoar de forma gradual, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão e picos de enchente moderados. Durante o processo de urbanização, a vegetação é retirada, o solo é impermeabilizado e os canais de escoamento são retificados, causando uma forte redução da infiltração e do tempo de escoamento, o que faz com que mais água chegue rapidamente aos leitos dos cursos de água. Como os mesmos se encontram estrangulados pela ocupação das margens, as inundações tornam-se frequentes e intensas.

O impacto sobre a qualidade da água é somatório de vários fatores como: poluição no ar que se precipita junto com a água, lavagem das superfícies urbanas contaminadas com diferentes materiais orgânicos e metais pesados, resíduos sólidos representados por sedimentos erodidos devido ao aumento da vazão, lixo urbano depositado ou transportado para a drenagem e esgoto cloacal que não é coletado e escoar através da drenagem (TUCCI, 2003).

Outra questão são as doenças de veiculação hídrica que podem ser transmitidas diretamente pela água, provocadas pela ingestão de água contaminada por urina ou fezes, humanas ou de animais, contendo bactérias ou vírus patogênicos. Existem inúmeras doenças de veiculação hídrica, como amebíase, cólera, febre amarela, tifoide, hepatites A e C, tétano, dengue, malária, poliomielite, salmonelose, teníase e leptospirose, que constituem importante causa de morbidade e mortalidade no Brasil e no mundo. Destacando-se a leptospirose, que é uma doença infecciosa causada por uma bactéria que pode estar presente na urina de ratos contaminados

presentes em esgotos e bueiros, cuja urina mistura-se a água na enxurrada (LAMB, 2014).

Batista e Nascimento (1996) estimaram um valor anual médio referente a despesas e prejuízos relacionados a inundações num montante superior a dois bilhões de dólares, enquanto Tucci (2000) estima valores da ordem de um bilhão de dólares por ano. Ambas as estimativas são bastante significativas, dando noção da magnitude que tal problema representa. Essa situação tende a piorar cada vez mais, visto que as cidades médias apresentam grande crescimento populacional e reproduzem os problemas das grandes metrópoles. Sendo assim, são necessárias pesquisas sobre formas de mitigação das inundações, como por exemplo através do aumento das superfícies permeáveis.

2.2.3 Mitigação das Inundações pelo Aumento de Superfícies Permeáveis

Uma percepção moderna, reconhece que a drenagem urbana não deve ser apenas um conjunto de ações isoladas, voltadas exclusivamente para a implantação de grandes obras de engenharia, com a finalidade de corrigir problemas já existentes, na tentativa de livrar-se rapidamente da água da chuva. De modo geral, as águas da chuva que são coletadas nas vias públicas por meio de bocas de lobo e descarregadas em condutos subterrâneos, são lançadas em cursos d'água naturais. A introdução de redes de drenagem ocasiona uma diminuição considerável no tempo de concentração e maiores picos a jusante (LAMB, 2014).

Princípios modernos da drenagem urbana aconselham que novos desenvolvimentos não podem aumentar a vazão de pico das condições naturais, que o planejamento da bacia deve acrescentar o controle do volume e que se deve evitar a transferência dos impactos para jusante. O controle da drenagem na fonte pode ser executado através de áreas de infiltração e de trincheiras, de pavimentos permeáveis ou de retenção. O princípio é manter a vazão preexistente, não transferindo o impacto para o sistema de drenagem (TUCCI, 2007).

Visando tentar reverter o quadro de problemas de drenagem, além da modernização do sistema, devem-se gerenciar as águas pluviais na fonte da geração do escoamento superficial, não mais encaminhando o problema para outro setor da cidade. Podendo se utilizar de dois métodos: dispositivos de infiltração que buscam

o incremento da infiltração da água no solo, quando possível, para reduzir o escoamento superficial à jusante e com dispositivos de retenção que visam o armazenamento provisório da água pluvial, para controlar o escoamento superficial, e limitando a poluição a jusante (SUDERHSA, 2002).

O objetivo principal desses dispositivos é manter as condições hidrológicas do ambiente, combinando os processos de infiltração, interceptação e amortecimento visando reconstituir as condições de pré-ocupação. As novas tecnologias podem reduzir os volumes escoados, favorecendo a infiltração das águas drenadas, ou colaborar na retenção dos poluentes presentes nas enxurradas urbanas (HÖLTZ, 2011).

Dentre as estratégias para promover uma maior infiltração destacam-se os pavimentos permeáveis. O concreto permeável não só permite a infiltração, como pode atuar como reservatório devido ao grande índice de vazios, se associado a uma base de brita. Estas características permitem que o pavimento armazene uma grande quantidade de água, colaborando para a redução do pico inicial de muitos eventos de enxurradas (CONCRETE NETWORK, 2020).

Tal característica é muito importante pois a eficiência da maioria dos pavimentos permeáveis depende da capacidade de infiltração do solo sobre o qual foi construído, sendo a infiltração o processo de transferência do fluxo de água da superfície para o interior do solo segundo. Para garantir um bom processo de percolação, é necessário que se tenha um solo adequado. A baixa permeabilidade do solo dificulta a infiltração, reduzindo a possibilidade de usar essa estratégia para controlar o escoamento superficial (PINTO, 2006).

Apesar dessas novas tecnologias de gerenciamento de águas pluviais já serem utilizadas em países do Primeiro Mundo, estas ainda possuem uma baixa adesão em países em desenvolvimento. Algumas das vantagens que os pavimentos permeáveis podem apresentar são: manutenção das condições de pré-urbanização com relação ao escoamento superficial; menores custos de implantação destes sistemas alternativos em comparação aos sistemas tradicionais; proteção maior contra o risco de inundações por um custo semelhante e a valorização dos ambientes que adotarem essas técnicas por conta de uma integração estética (AZZOUT *et al.*, 1994).

3 CONCRETO PERMEÁVEL

Este capítulo apresenta uma revisão do conhecimento atual sobre a natureza, características, fabricação e formas de aplicação de concretos permeáveis através de uma análise da sua evolução histórica no que se refere à sua aplicação na drenagem urbana e em pavimentos, bem como à sua manutenção.

3.1 DEFINIÇÃO

O concreto permeável é um tipo de concreto caracterizado por uma grande presença de vazios interligados entre si, que permitem a passagem de fluidos, resultando numa elevada permeabilidade. Normalmente, para se obter essa configuração, não é empregada em sua composição o agregado miúdo, sendo produzido apenas com água, cimento e agregado graúdo (LAMB, 2014).

Na elaboração do concreto permeável pode-se utilizar agregados graúdos de granulometria contínua ou uniforme, onde a contínua apresenta grãos de diferentes tamanhos, já na uniforme praticamente todos os grãos de material tem o mesmo tamanho. Portanto, para permitir a máxima drenagem de água recomenda-se a granulometria uniforme, e para se ter um melhor comportamento mecânico, a granulometria contínua. Alguns autores recomendam que o diâmetro máximo nominal seja de 10 mm (CASTRO *et al.*, 2009).

A relação agregado/pasta é bastante elevada, o que proporciona economia de cimento e garante-se que o material obtido tenha um índice de vazios na faixa que varia de 15 a 25% e uma capacidade de percolação na ordem de 200 l/min/m², o que é suficiente para permitir a passagem de todo fluxo precipitado de grande parte dos eventos de precipitação, praticamente anulando o escoamento superficial (ACI 522R, 2006).

3.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O primeiro registro do uso de concreto permeável ocorreu em 1852, na construção de duas casas do Reino Unido. Segundo os registros, esse tipo de concreto era feito apenas com agregado graúdo e cimento. Durante a década de 1930

a *Scottish Special Housing Association Limited* utilizou-se de concreto permeável para a construção de residências. Por volta de 1942, o concreto permeável já tinha sido usado no Reino Unido para a construção de mais de 900 casas (ACI 522R, 2006).

A Segunda Guerra Mundial, entre 1939 e 1945, gerou uma onda de uso de concreto permeável, pois deixou quase toda a Europa com uma grande necessidade de moradias, além da escassez de cimento e abundância de restos de construção, o que encorajou o emprego de métodos de construção simples e de baixo custo que nunca tinham sido antes usados (HÖLTZ, 2011).

Apesar de o concreto permeável ter sido muito usado na Europa especialmente nos últimos 60 anos, o seu uso como material de construção nas Américas, até o final do século XX, foi bastante limitado, tendo como uma possível razão o fato da América não ter experimentado a escassez de materiais vivida pela Europa após a Segunda Guerra Mundial (GHAFOORI, 1995).

Na década de 1970 o concreto permeável começou a ser utilizado nos EUA com a finalidade de incrementar a permeabilidade de zonas urbanizadas, nos Estados da Flórida, Utah e Novo México, mas os bons resultados fizeram com que a tecnologia rapidamente se espalhasse para outros lugares como a Califórnia, Illinois, Oklahoma e Wisconsin. O crescente interesse acarretou na disseminação de pequenos fornecedores do material e na fundação de uma associação, a NPCA (*National Pervious Concrete Association*) (MULLIGAN, 2005).

De 1970 até 2004 este concreto foi utilizado de maneira mais empírica pelo fato de carecer de uma normativa que o regulamentasse. Em consequência disto, a associação americana de cimento Portland (PCA) no ano de 2004 elaborou o primeiro manual de concreto permeável, aonde se encontram generalidades do material e algumas recomendações sobre dosagem e faixas de valores de desempenho (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

É notável que o interesse pelo concreto permeável está se disseminando. Nos últimos anos a comunidade científica internacional passou a estudar de maneira mais aprofundada este material, com o objetivo de caracterizá-lo e normatizá-lo de maneira adequada. É fundamental que o Brasil se aprofunde e produza estudos sobre o tema, visto que são escassas as pesquisas e as referências sobre concreto permeável no Brasil e também pois o concreto permeável pode ter um papel relevante na melhoria da drenagem das cidades, mitigando os problemas de inundações e colaborando com a sustentabilidade (HÖLTZ, 2011).

3.3 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

As propriedades normalmente avaliadas no estado fresco são: consistência pelo abatimento do tronco de cone e massa específica. Já no estado endurecido são avaliadas tanto as propriedades mecânicas quanto as propriedades hidráulicas e de durabilidade. As propriedades mecânicas são avaliadas por resistência à compressão e resistência à tração; as propriedades hidráulicas pela absorção de água, índice de vazios e permeabilidade, e dependendo de tais propriedades, o material pode ser utilizado para diferentes aplicações (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; SCHAEFER *et al.*, 2006).

Geralmente o concreto permeável possui uma resistência inferior à dos concretos convencionais, devido à sua alta porosidade. Em razão disso, sua utilização acaba se limitando a áreas de tráfego leve ou pouco intenso. Segundo a norma americana ACI 522R (2006), as misturas de concreto permeável desenvolvem resistências mecânicas de compressão na faixa de 3,5 a 28 MPa, porém Polastre e Santos (2006) afirmam que normalmente a média dos concretos permeáveis está próxima a 25 MPa.

Os concretos permeáveis apresentam uma textura superficial diferenciada quando comparados ao concreto convencional. Essa diferença está ligada à pequena ou nula quantidade de agregados miúdos na sua composição, o que confere uma superfície mais rugosa (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A massa específica e o índice de vazios característicos do concreto permeável variam em função da proporção de cada material constituinte da mistura, bem como do procedimento de compactação adotado. O elevado valor do índice de vazios afeta diretamente as propriedades mecânicas do material. É considerado de baixa porosidade quando apresenta índice de vazios inferior a 15 %, e de alta porosidade quando o índice é superior a 30 %. Sugere-se índices de vazios na ordem de 20 % para garantir conjuntamente boas características de resistência e de permeabilidade neste tipo de concreto (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A permeabilidade é uma das características marcantes desse material, sendo que as taxas de permeabilidade através do concreto permeável variam de 120 l/min/m² (2 mm/s) a 320 l/min/m² (5,4 mm/s), que são valores muito superiores à capacidade de infiltração dos concretos convencionais (LAMB, 2014).

O concreto permeável é produzido com os mesmos materiais utilizados na composição do concreto convencional, diferenciando-se nas proporções utilizadas nas misturas onde geralmente são muito mais restritas em relação às do concreto convencional, sendo necessário um controle visual rigoroso em sua produção para que se consiga obter as características desejadas no produto final (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A relação água/cimento (a/c) deve ficar entre 0,25 e 0,30, atingindo, no máximo, a 0,45, dependendo do uso de aditivos. A relação entre rigidez e quantidade de água no concreto permeável não é tão clara quanto em um concreto convencional, já que a presença dos vazios altera a resistência geral da peça. A quantidade correta de água pode ser percebida ao passo que a massa ganha certo brilho de umidade, sem ficar liquefeita (ACI 522R, 2006).

O agregado miúdo quase nunca é utilizado no concreto permeável, enquanto que o agregado graúdo tem como maior característica sua granulometria homogênea, podendo-se utilizar agregados graúdos com diâmetros variando de 0,5 a 20 mm, sendo que, quanto maior seu diâmetro, maior a rugosidade (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Conforme relatado no ACI 522R (2006), o tempo disponível para as operações de concretagem desse tipo de concreto deve ser inferior que o normalmente adotado para concretos convencionais, devendo esse processo ser concluído em até uma hora entre o tempo inicial de mistura e o término do trabalho. Isso é necessário devido às características desse material, que favorece o aumento da taxa de evaporação, perdendo água com maior rapidez.

3.4 APLICAÇÕES

Pelo fato do concreto permeável ser um material que permite a passagem da água por sua estrutura, suas principais aplicações estão relacionadas a tal característica. As principais aplicações do concreto permeável atualmente são em (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004):

- Calçadas: com o objetivo de permitir a passagem de água, evitar alagamentos e manutenção do nível do lençol freático;

- Estacionamentos: para reduzir completamente o escoamento superficial e garantir a funcionalidade deste tipo de obra;
- Pavimentos de vias de tráfego leve: para reduzir o escoamento superficial e evitar acidentes nos eventos de precipitação;
- Estabilização de taludes: para a evacuação rápida da água na estabilização de taludes;
- Pátios: como é um material poroso tem um atrativo especial por seu acabamento, às vezes poder ser pigmentado e decorado sem afetar suas propriedades.

Embora seja empregado geralmente para pavimentação, o concreto permeável também tem sido usado como material de vedação, como na Europa, há muitos anos. Aplicações práticas do concreto permeável são os painéis para paredes de grandes edifícios (*NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION*, 2010).

Em razão das baixas resistências à compressão dos elementos de concreto permeável, o uso desse tipo de pavimento é limitado a locais com tráfego leve ou pouco intenso, como estacionamentos. Isso acaba representando um ponto positivo para os donos de edificações, que precisam, por lei, destinar uma porcentagem da área para a drenagem das águas pluviais (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 1999).

Os pavimentos permeáveis foram muito estudados, na década de 1970, nos EUA, como uma alternativa para evitar a aquaplanagem de veículos, na redução de ruído, na redução do ofuscamento do farol dos carros e no efeito de spray, mas acabaram abandonados. Mais tarde eles ressurgiram para prevenir os problemas hidráulicos da recarga dos aquíferos e como solução complementar de drenagem (LAMB, 2014).

3.5 BENEFÍCIOS DO SEU USO

Os dispositivos de infiltração possuem uma série de vantagens com relação aos demais sistemas de drenagem. A infiltração reduz o volume total de água que entraria na rede de drenagem, diminuindo assim, os riscos de inundações, além de poder ser usado onde não exista uma rede de drenagem. Ao controlar o escoamento superficial na fonte, os dispositivos de infiltração reduzem os impactos hidrológicos da urbanização por não sobrecarregarem a rede de drenagem e evitarem o dispêndio com a ampliação da rede. A construção dos dispositivos de infiltração é normalmente

simples e rápida e os custos acabam sendo menores a longo prazo em relação aos sistemas de drenagem tradicionais (CIRIA, 1996).

Outras vantagens são o tratamento da água da chuva, através da remoção de poluentes filtrados pela estrutura do concreto permeável, a diminuição da necessidade de meio-fio e canais de drenagem, o aumento da segurança e conforto em vias, devido à diminuição de derrapagens e ruídos, além de se integrar completamente à obra, não necessitando de espaço exclusivo para si (EPA, 1999).

Outro importante aspecto que favorece o uso do concreto permeável, sob o ponto de vista da sustentabilidade, é que a EPA (*US Environmental Protection Agency*), o classificou uma prática apropriada de gestão (*Best Management Practice – BMP*). Assim, sua utilização pode favorecer um projeto a conquistar a certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*). Na avaliação LEED, a sustentabilidade do concreto permeável advém de três características básicas: o auxílio na redução do aquecimento terrestre, por permitir a troca de calor entre o subsolo e a superfície; por ser um material reciclável, podendo ser reaproveitado após o seu ciclo de vida e por poder ser confeccionado com materiais locais (HÖLTZ, 2011).

3.6 EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL

A construção de um pavimento de concreto permeável deve ser realizada de acordo com as especificações de projeto, que por sua vez devem ser detalhados e adequados para produzir um produto final de acordo com as necessidades previstas e as regulamentações locais. As construções devem iniciar com um planejamento completo com etapas de conferência de pré-construção, determinação da sequência de construção, seleção do equipamento ideal para o tamanho do projeto, coordenação dos testes e inspeções de controle de qualidade e testes para verificação se as misturas propostas funcionam como o esperado (ACI 522R, 2006).

Para garantir o bom funcionamento da estrutura de infiltração, é necessária uma detalhada caracterização do solo suporte, assim como seu comportamento em presença da água (AZZOUT *et al.*, 1994).

Com relação à preparação da base, esta deverá estar numa elevação correta, uniforme e bem preparada, para garantir a qualidade do pavimento. O topo da base deve ter cerca de 150 mm e ser composto de material granular. O solo da camada de

sub-base deve ser misturado antes da pavimentação. Caso não ocorra tal mistura na base, poderá ocorrer uma redução da resistência, levando à falha prematura no concreto (HÖLTZ, 2011).

A camada base do pavimento permeável tem como função transmitir as solicitações aplicadas na camada superior para o solo suporte, como também armazenar provisoriamente a água pluvial, até sua infiltração no solo. O material que constitui a camada base deve ser escolhido em função de sua compatibilidade com a camada superficial, do tipo de tráfego, dos aspectos construtivos, da porosidade e do custo. O material mais comumente utilizado é a pedra britada. A resistência do material deve ser suficiente para suportar as solicitações às quais será submetido, e possuir uma dureza suficiente para resistir ao atrito, evitando sua fragmentação, o que levaria à compactação da camada e conseqüente redução da porosidade do material (KNAPTON; COOK; MORRELL, 2002).

O material da camada superficial deve resistir às solicitações produzidas pelo tráfego, além de permitir a infiltração da água da chuva. Ele deve ser escolhido com base no seu uso e sua capacidade de infiltração. Outros aspectos também devem ser considerados na escolha do material da superfície, como: a estética, a aderência, a baixa propagação de ruídos, a resistência ao arrancamento, o custo, a disponibilidade e a manutenção dos vários tipos disponíveis (AZZOUT *et al.*, 1994).

A aplicação do concreto permeável deve ser feita o mais rápido possível, pois, ele apresenta pouco excesso de água na sua mistura. Durante o tempo que a mistura fica exposta no ar a mesma está perdendo água necessária para a cura, e a secagem da pasta do cimento pode levar a uma falha na superfície do pavimento. Todas as operações de lançamento devem ser planejadas e todos os equipamentos necessários devem estar disponíveis para que se possa fazer uma rápida aplicação e compactação, sendo iniciada imediatamente a cura do pavimento (HÖLTZ, 2011).

O lançamento do concreto deve ser feito próximo ao local de aplicação final, por uma questão de praticidade. Após a deposição, o concreto permeável deve ser espalhado com um ancinho, ou com qualquer outra ferramenta de mão. Para o processo de cura, o pavimento precisa ser coberto com uma manta para evitar a perda de água, comprometendo os seus processos de hidratação. O tempo de cura do concreto permeável, deve ser de no mínimo sete dias. Entretanto, para que atinja o máximo de resistência à compressão, é necessário um período de até 28 dias (PERVIOUS CONCRETE, 2020).

O concreto permeável deve ser moderadamente compactado para assegurar sua resistência e integridade estrutural, e não comprometer a sua permeabilidade. Assim que o concreto é aplicado, ele deve ser compactado com um rolo compressor, criando uma forte ligação entre a pasta e o agregado e provendo uma aceitável maciez na superfície (ACI 522R, 2006).

Para impedir a migração de material de uma camada do pavimento para outra, a interface deve ser feita utilizando-se um filtro geotêxtil ou uma geomembrana, dependendo da função à qual o pavimento se destina (ACIOLI, 2005).

3.7 MANUTENÇÃO E DURABILIDADE

Para garantir um bom funcionamento, o pavimento permeável necessita de operação e manutenção adequados. A maioria dos concretos permeáveis funciona bem com pouca manutenção, sendo essa, constituída principalmente pela prevenção do entupimento da estrutura de vazios. Na preparação do local onde será executado, deve-se projetar o paisagismo circundante afim de impedir o fluxo de materiais na superfície, visto que os problemas de obstrução podem ocorrer em função de detritos como grama, folhas entre outros quando infiltram-se nos espaços vazios e impedem a permeabilidade, diminuindo assim sua utilidade (LAMB, 2014).

A profundidade do entupimento geralmente se limita aos primeiros centímetros do pavimento de concreto permeável. Os principais métodos de limpeza ou desentupimento consistem na aspiração e lavagem sob alta pressão. Os resultados de ensaios indicaram que estes dois métodos poderiam recuperar 100 % da taxa de infiltração inicial (BALADES; LEGRET; MADLEC, 1995).

O pavimento deve ser inspecionado várias vezes durante os primeiros meses após sua instalação, e anualmente depois disso. A permeabilidade em pavimentos de concreto permeável tende a diminuir com o decorrer do tempo, por isso procedimentos de manutenção e limpeza devem ser executados com periodicidade de seis meses (KUANG *et al.*, 2007; EPA, 1999).

Os principais fatores que influenciam na durabilidade dos pavimentos permeáveis são: rotina de limpeza, restrições ao acesso de veículos pesados, inspeção na execução e posteriormente à construção, pré-tratamento do escoamento

de outros locais e controle de sedimentos durante e após a construção (SCHUELER; KUMBLE; HERATY, 1992).

Estudos mostram que quando bem projetado e conservado, os pavimentos permeáveis apresentam durabilidade semelhante à de um pavimento comum. Um exemplo disso é o estacionamento em concreto permeável da Reserva Estadual de *Walden Pond*, em Concord, Massachusetts, construído em 1977 e que sem grandes restaurações se mantém em uso (KEATING, 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa deste trabalho.

4.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados materiais de construção comumente encontrados na região Sul do país.

4.1.1 Cimento Portland

Como aglomerante foi utilizado o cimento Portland CP II-F-32, por ser mais facilmente encontrado no comércio e com características semelhantes ao CP V-ARI. Tal cimento possui uma dosagem única de calcário e argila, com adição apenas de *filler* calcário e gesso, mais puro e fino, o que favorece a formação do conglomerado sem preenchimento dos poros (KIHARA; CENTURIONE, 2004). As especificações do cimento CP II-F-32 foram fornecidas pelo fabricante estão apresentadas no Quadro 1.

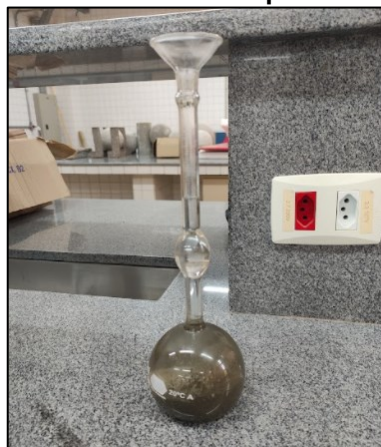
Quadro 1 - Especificações do Cimento Portland CP II-F-32

Parâmetros	
Tempo de início de pega (horas)	> 1
MgO (%)	-
Perda ao fogo (%)	< 12,5
Resíduo insolúvel (%)	< 7,5
SO ₃ (%)	< 4,5
Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	-
3 dias	> 10,0
7 dias	> 20,0
28 dias	> 32,0

Fonte: O fabricante (2021).

A massa específica do cimento CP II-F-32 foi obtida através da execução de ensaio em laboratório, conforme as prescrições da ABNT NBR 16605:2017, como mostrado na Figura 1, tendo como resultado o valor de 3,14 g/cm³.

Figura 1 – Ensaio de massa específica do cimento



Fonte: O autor (2021).

4.1.2 Agregado Graúdo

Como agregado graúdo, fração que representa o maior volume do concreto permeável, foi utilizado brita 0 (B0) com dimensão máxima esperada de 9,5 mm e brita 1 (B1) com dimensão máxima esperada de 19 mm, ambas da região de Guarapuava-PR.

Na Tabela 1 apresenta-se a análise granulométrica, determinada a partir da realização do ensaio de granulometria, com base nas prescrições da ABNT NBR NM 248:2003, das britas utilizadas no planejamento experimental (B0, B1), bem como da composição mista de 50% de cada uma das britas (BM 50/50). Tal combinação foi escolhida no intuito de melhorar a distribuição dos grãos de forma contínua. Na Figura 2 é possível observar a curva granulométrica da brita 0 (B0), brita 1 (B1) e da combinação B0 e B1, BM (50/50).

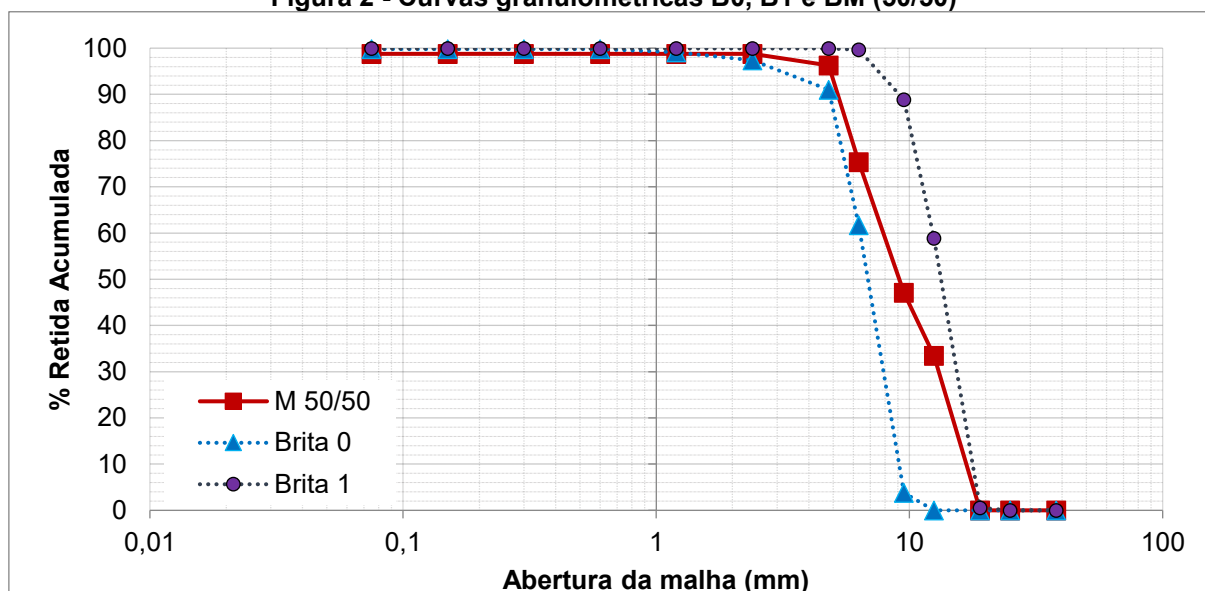
D60 é a abertura da peneira que permite a passagem de 60% do material, D10 a abertura que permite a passagem de 10% do material, o coeficiente de uniformidade (C.u.) é a razão entre o D60 e D10. A dimensão máxima característica (DMC) corresponde à abertura da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras série normal, dividida por 100.

Tabela 1 - Análise granulométrica B0, B1 e M (50/50)

Tipo de brita	Brita 0		Brita 1		Brita M (50/50)	
	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada
38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,53	0,53	0,00	0,00
12,5	0,00	0,00	58,31	58,84	33,47	33,47
9,5	3,82	3,82	29,99	88,83	13,61	47,07
6,3	57,89	61,71	10,85	99,68	28,31	75,38
4,8	29,31	91,01	0,26	99,94	20,87	96,25
2,4	6,35	97,36	0,00	99,94	2,52	98,77
1,2	1,77	99,13	0,00	99,94	0,00	98,77
0,6	0,67	99,80	0,00	99,94	0,00	98,77
0,3	0,00	99,80	0,00	99,94	0,00	98,77
0,15	0,00	99,80	0,00	99,94	0,00	98,77
0,075	0,00	99,80	0,00	99,94	0,00	98,77
Fundo	0,20	100,00	0,06	100,00	1,23	100,00
D60	7,30		15,00		12,00	
D10	4,85		9,40		5,50	
C.u.	1,51		1,60		2,18	
DMC (mm)	9,50		19,00		19,00	
MF	5,91		6,89		6,37	

Fonte: O autor (2021).

Figura 2 - Curvas granulométricas B0, B1 e BM (50/50)



Fonte: O autor (2021).

Observa-se na Tabela 1 que a brita 0 possui granulometria contínua, tendo seis tamanhos de grãos apenas em sua composição, com coeficiente de uniformidade de 1,51. A brita 1 apresenta uma granulometria contínua tendo cinco tamanhos de grãos em sua composição e um coeficiente de uniformidade de 1,60, o que indica que é um pouco mais contínua do que a B0. A combinação das britas 0 e 1 apresenta uma

distribuição mais contínua com cinco tamanho de grãos e com coeficiente de uniformidade de 2,18.

Entende-se como granulometria contínua aquela que tem vários tamanhos de grãos, granulometria uniforme a que só tem um tamanho de grão e finalmente granulometria descontínua a que tem uma faixa incompleta de grãos. Um coeficiente de uniformidade com valor inferior a 5 caracteriza uma amostra muito uniforme (NEPTUNE; PUTMAN, 2010).

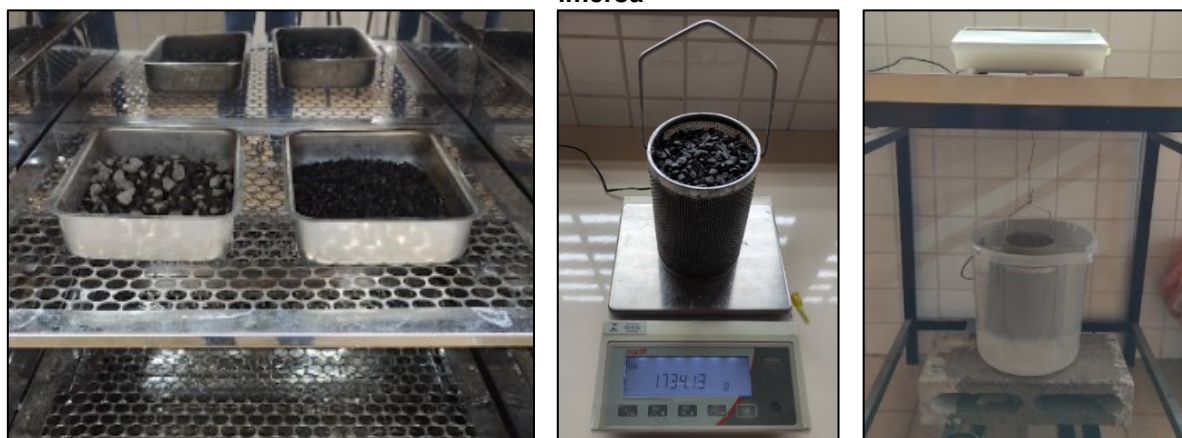
Os resultados dos demais ensaios de caracterização realizados nos agregados graúdo, assim como suas respectivas normas, encontram-se no Quadro 2. Na Figura 3 pode-se observar alguns procedimentos para a realização do ensaio para determinação da massa específica das britas.

Quadro 2 – Ensaio de caracterização das britas

Ensaio realizado	Norma	B0	B1	BM (50/50)	Unidade
Massa unitária	NBR 16972:2021	1,50	1,67	1,61	(g/cm ³)
Massa específica	NBR 16917:2021	2,87	2,90	2,88	(g/cm ³)
Absorção de água	NBR 16917:2021	1,71	1,34	1,53	(%)

Fonte: O autor (2021).

Figura 3 – Ensaio de massa específica a) Secagem das britas b) Massa saturada c) Massa imersa



Fonte: O autor (2021).

Do Quadro 2 pode-se concluir que não houve muitas variações em parâmetros como a massa específica, massa unitária e a absorção de água devido ao fato de que as três granulometrias utilizadas eram do mesmo tipo de material, o basalto.

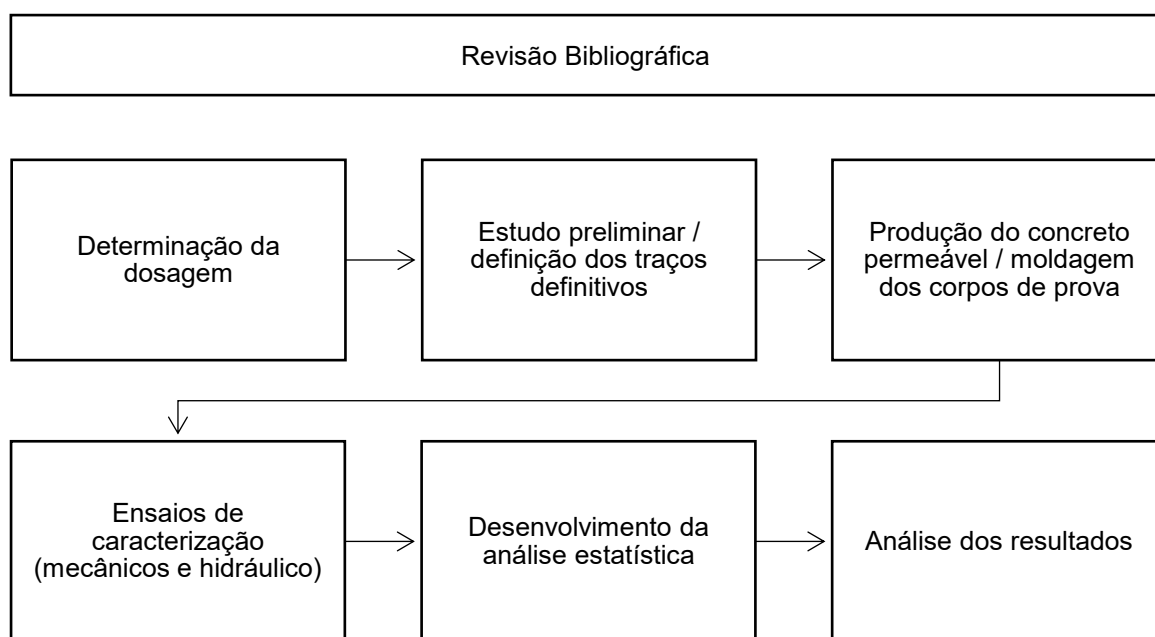
4.1.3 Água

Para a produção dos concretos foi utilizada água potável, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

4.2 MÉTODOS

O programa experimental foi realizado conforme fluxograma apresentado na Figura 4 e explanado nos itens subsequentes.

Figura 4 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: O autor (2021).

4.2.1 Dosagem

O uso do concreto permeável está em lenta expansão pelo Brasil, havendo poucos trabalhos publicados e ainda menos exemplos práticos do uso desse tipo de material. Aliado a isto, ainda não existem normas brasileiras para orientar a confecção e o controle de qualidade do concreto permeável.

Sendo assim, a estratégia experimental adotada para o desenvolvimento desta pesquisa teve um caráter exploratório, tomando como base as referências

disponíveis na literatura nacional, e em conjunto com as diretrizes propostas pelas recomendações da ACI 522R (2006), uma coletânea de conhecimento sobre concreto permeável, publicada pelo *American Concrete Institute*, estabeleceram-se alguns traços para serem estudados, tendo em vista duas variáveis básicas e necessárias para orientar a dosagem dos traços de concreto: a relação água/cimento (a/c) e o teor de agregados (m).

É importante ressaltar que apesar da relação a/c de um concreto permeável ser importante para o desenvolvimento de sua resistência e de sua estrutura de vazios, a relação entre a a/c e a resistência de um concreto permeável não é tão bem definida como no caso de concretos convencionais. Uma relação a/c alta pode resultar em uma pasta muito fluida, que escorre dos agregados e preenche os vazios do concreto permeável. Já uma relação a/c muito baixa pode resultar em uma adesão reduzida entre as partículas de agregado, gerando problemas para a formação do conglomerado (ACI 522R, 2006).

Portanto, a proporção de cimento para agregado (1:m) foi definida e fixada em um valor de 1:4, ou seja, uma parte de cimento para quatro partes de agregado graúdo. Com relação à quantidade de água, inicialmente foram estabelecidas três relações de água para cimento (a/c) para a produção dos concretos permeáveis, sendo estas de 0,30, 0,35 e 0,40. Tais proporções foram estabelecidas com base nas diretrizes da ACI 522R (2006) e nos resultados obtidos nos estudos de Höltz (2011). Ainda com o intuito de se estudar a influência da dimensão do agregado no concreto permeável, todos os traços estabelecidos foram executados utilizando-se três tipos de composições granulométricas: 100% brita 0 (B0), 100% brita 1 (B1) e 50% brita 0 e 50% brita 1 (BM 50/50).

4.2.2 Estudo Preliminar do Concreto Permeável

O estudo preliminar dos concretos foi realizado com a produção de nove traços, de maneira manual, em pequenas quantidades, a fim de se verificar o seu aspecto durante o processo de mistura. A nomenclatura desses traços leva em consideração o tipo de agregado e a relação a/c , conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Nomenclatura dos traços

	a/c 0,30	a/c 0,35	a/c 0,40
Brita 0 (B0)	B0_0,30	B0_0,35	B0_0,40
Brita 1 (B1)	B1_0,30	B1_0,35	B1_0,40
Brita mista (BM)	BM_0,30	BM_0,35	BM_0,40

Fonte: O autor (2021).

As quantidades dos materiais utilizadas para a produção dos concretos deste estudo preliminar estão apresentadas no Quadro 4, assim como a relação água/cimento (a/c) e água materiais secos (a/ms).

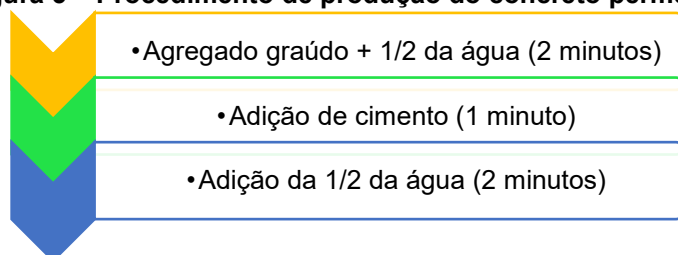
Quadro 4 – Consumo de materiais para o estudo preliminar

Produção de 0,001m ³ de concreto por traço						
Traços	Cimento (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	a/c	C água (l)	a/ms
B0_0,30	0,250	1,000	-	0,300	0,075	0,060
B1_0,30	0,250	-	1,000	0,300	0,075	0,060
BM_0,30	0,250	0,500	0,500	0,300	0,075	0,060
B0_0,35	0,250	1,000	-	0,350	0,088	0,070
B1_0,35	0,250	-	1,000	0,350	0,088	0,070
BM_0,35	0,250	0,500	0,500	0,350	0,088	0,070
B0_0,40	0,250	1,000	-	0,400	0,100	0,080
B1_0,40	0,250	-	1,000	0,400	0,100	0,080
BM_0,40	0,250	0,500	0,500	0,400	0,100	0,080

Fonte: O autor (2021).

O tempo total de mistura para a produção dos traços foi de 5 minutos, seguindo a sequência apresentada na Figura 5, baseando-se em estudos realizados por Sandoval (2014), que verificou que este tempo era o suficiente para se obter uma consistência adequada e uma trabalhabilidade boa para a moldagem.

Figura 5 – Procedimento de produção do concreto permeável



Fonte: Adaptado de Sandoval (2014).

Durante o processo de produção manual, foi possível observar a influência da quantidade de água na trabalhabilidade dos concretos, sendo que os traços com relação a/c de 0,30 apresentaram-se menos trabalháveis e com um aspecto mais seco em comparação aos traços com relação a/c de 0,35 e 0,40, como é possível visualizar na Figura 6.

Figura 6 – Misturas no estado fresco a) Relação a/c 0,30 b) Relação a/c 0,35 c) Relação a/c 0,40



Fonte: O autor (2021).

Após a produção manual, moldaram-se corpos de prova de concreto, os quais foram desmoldados após 24 horas e permaneceram em processo de cura em tanque saturado com cal, durante 7 dias e então foram analisados os aspectos visuais dos corpos de prova.

Apesar de durante o processo de mistura os traços com relação a/c de 0,30 não terem apresentado boa trabalhabilidade, após o processo de cura foi possível notar a existência de coesão entre os materiais. Já os traços com relação a/c de 0,40 apresentaram visualmente menos poros e vazios do que os traços com relação a/c mais baixa (0,30 e 0,35). Pode-se observar tais constatações na Figura 7, que apresenta a vista lateral e superior para as diferentes misturas.

Figura 7 – Teste preliminar – estado endurecido a) B1_0,30 b) B1_0,35 c) B1_0,40



Fonte: O autor (2021).

Posteriormente às análises realizadas durante a produção dos traços e aos aspectos visuais observados, optou-se por escolher para o desenvolvimento deste estudo os traços com relação a/c de 0,30 e 0,35, descartando o traço de relação a/c de 0,40, visto que este apresentou-se visualmente menos poroso, devido ao maior preenchimento dos vazios com a pasta de cimento, o que poderia impactar na redução da permeabilidade, sendo esta propriedade muito relevante nesta pesquisa.

4.2.3 Produção do Concreto Permeável

Finalizado o estudo preliminar e tendo em vista os traços definidos, partiu-se para a produção em maior escala dos concretos permeáveis. Os consumos de materiais para produção dos seis diferentes traços estão apresentados no Quadro 5, assim como a relação água/cimento (a/c) e água materiais secos (a/ms).

Quadro 5 – Consumo de materiais para o estudo definitivo

Produção de 0,014m ³ de concreto por traço						
Traços	Cimento (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	a/c	C água (L)	a/ms
B0_0,30	6,870	27,478	0,000	0,300	2,061	0,060
B1_0,30	6,919	0,000	27,677	0,300	2,076	0,060
BM_0,30	6,894	13,789	13,789	0,300	2,068	0,060
B0_0,35	6,703	26,812	0,000	0,350	2,346	0,070
B1_0,35	6,750	0,000	27,001	0,350	2,363	0,070
BM_0,35	6,727	13,453	13,453	0,350	2,354	0,070

Fonte: O autor (2021).

O procedimento de mistura seguiu a mesma sequência de produção mencionada no estudo preliminar, baseado nos estudos de Sandoval (2014) e nas recomendações da ABNT NBR 12655:2015, no entanto, utilizou-se processo de mistura mecânico, com uso de betoneira de eixo inclinado. Após a produção dos concretos, foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos de dimensão 10x20 cm, para cada traço, os quais foram adensados em 2 camadas com 12 golpes em cada.

Todos os corpos de prova foram mantidos devidamente protegidos contra a perda de umidade durante as primeiras 24 ± 6 horas, contadas a partir do início da mistura. Após serem desmoldados, os corpos de prova foram curados submersos em tanque saturado com cal, até as idades pré-estabelecidas para a realização dos ensaios. Os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova foram realizados conforme estabelecido pela ABNT NBR 5738:2015. Pode-se visualizar estas etapas na Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

Figura 8 – Corpos de prova moldados



Fonte: O autor (2021).

Figura 9 – Corpos de prova desmoldados



Fonte: O autor (2021).

Figura 10 – Cura submersa dos corpos de prova em tanque saturado com cal



Fonte: O autor (2021).

4.2.4 Caracterização do Concreto Permeável

Após o processo de cura, os corpos de prova de concreto permeável foram caracterizados no estado endurecido, por meio da execução dos ensaios apresentados no Quadro 6, que também traz a idade dos ensaios, a quantidade de corpos de prova ensaiados e as normas técnicas vigentes. A caracterização no estado fresco através do ensaio de abatimento de cone conforme ABNT NBR 16889:2020 não foi realizado devido à baixa trabalhabilidade dos traços de concreto, não apresentando assim nenhum abatimento.

Quadro 6 – Ensaio de caracterização do concreto permeável no estado endurecido

Tipo de ensaio	Nome do ensaio	Idade (dias)	Qtd.	Norma
Mecânico	Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	28	5	NBR 9778:2005
	Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos	28	5	NBR 5739:2018
	Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	28	5	NBR 7222:2011
Hidráulico	Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável (Adaptado)	28	5	NBR 14545:2021

Fonte: O autor (2021).

Os procedimentos dos ensaios de determinação de absorção de água e índice de vazios, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, seguiram rigorosamente as normas técnicas e estão ilustrados na Figura 11, Figura 12 e Figura 13, sequencialmente.

**Figura 11 – Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica a) Saturação
b) Massa imersa c) Secagem em estufa**



Fonte: O autor (2021).

Figura 12 – Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: O autor (2021).

Figura 13 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2021).

O ensaio de permeabilidade foi feito mediante uma adaptação do ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Tal método foi baseado numa proposta originalmente apresentada num trabalho de Neithalath *et al.* (2003), e utilizada nos estudos realizados por Hóltz (2011), que se baseia num conceito equivalente ao de um permeâmetro de carga variável, onde

através da Equação 1 consegue-se determinar o coeficiente de permeabilidade do material.

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

k é o coeficiente de permeabilidade, expresso em centímetros por segundo (cm/s);

Δt é o valor dado pela diferença entre os instantes t_2 e t_1 , expresso em segundos (s);

h_1 é a carga hidráulica no instante t_1 , expressa em centímetros (cm);

h_2 é a carga hidráulica no instante t_2 , expressa em centímetros (cm);

a é a área interna do reservatório de água expressa em centímetros quadrados (cm²);

H é a altura do corpo de prova expressa em centímetros (cm);

A é a área do corpo de prova expressa em centímetros quadrados (cm²).

A adaptação do ensaio de permeabilidade segundo a ABNT NBR 14545:2021 é mostrada na Figura 14, onde pode-se observar que o permeâmetro fabricado consiste em três partes:

Figura 14 - Permeâmetro



Fonte: O autor (2021).

- a) Corpo principal: para o setor onde se inseria a amostra, usou-se um tubo de PVC rígido, com 100mm de diâmetro interno e comprimento de 200mm, com uma

tampa na parte inferior, que vedava a saída por baixo e já servia para apoio do corpo de prova, garantindo seu posicionamento;

- b) Reservatório de água: para o reservatório de água, que continha a coluna de água que gerava a carga hidráulica que estimulava o fluxo através da amostra, usou-se um tubo de PVC rígido, com 100mm de diâmetro externo e comprimento de 300mm, com duas marcações nas alturas de 250mm (h_1) e 100mm (h_2), acoplado ao corpo principal do equipamento;
- c) Dreno: para regular a saída de água do reservatório principal foi usado um cano com diâmetro interno de 32mm e registro de esfera, com uma extensão vertical com altura suficiente para estabilizar a coluna de água num nível 10mm mais alto que o topo do corpo de prova.

A execução do ensaio obedeceu aos seguintes passos:

- 1) Introduziu-se o corpo de prova no corpo principal do equipamento;
- 2) Acoplou-se o reservatório de água ao corpo principal do equipamento;
- 3) Com o registro aberto no dreno, foi colocada água até a saída do “ladão”;
- 4) Fechou-se o registro e o reservatório de água foi preenchido até completar o nível desejado para início do ensaio;
- 5) Aguardaram-se três minutos para que ocorresse a saturação do corpo de prova, completando-se o nível do reservatório de água se necessário;
- 6) Abriu-se o registro com um movimento só e, no momento em que água estava no nível 250mm (h_1), foi disparado o cronômetro, tendo sido travado o mesmo no ponto 100mm (h_2) do reservatório;
- 7) Fez-se a leitura e repetiu-se o processo por três vezes, para o cálculo da média, sendo esta utilizada para o cálculo do coeficiente de permeabilidade.

4.2.5 Análise Estatística

Para as análises estatísticas das amostras foram realizados os testes de Shapiro-Wilk, ANOVA, Kruskal-Wallis, Dunn e Tukey, conforme explanados nos itens subsequentes. A utilização dos testes também foi verificada no trabalho de Ribeiro (2020).

4.2.5.1 Verificação da distribuição normal

Dentre inúmeros testes para a verificação da distribuição normal destaca-se o teste de Shapiro-Wilk. Tal teste baseia-se nos valores amostrais ordenados elevados ao quadrado e tem sido o teste de normalidade preferido por se mostrar mais poderoso que diversos testes alternativos (LEOTTI *et al.*, 2005). O teste consiste na determinação do parâmetro W , dado pela Equação 2.

$$W = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_{(n-i+1)/n} - x_{i/n}) \right\}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

α_i são coeficientes obtidos de uma tabela apresentada no trabalho de Shapiro e Wilk (1965), implementados computacionalmente por Royston (1992);

x_i são os valores das amostras ordenados;

\bar{x} é a média aritmética dos valores.

A hipótese nula do teste é a de que os dados são normalmente distribuídos, e a hipótese alternativa é a de que os dados não o são. A rejeição da hipótese nula ocorre quando os valores da variável W são menores que valores críticos tabelados e quando o p-valor é menor que o nível de significância, geralmente igual à 0,05 (5%). Caso não haja rejeição da hipótese nula, os dados podem ser testados mediante estatística paramétrica, como o teste t e a ANOVA (em inglês *ANalysis Of VAriance*) (SALKIND, 2007).

4.2.5.2 Definição de intervalos de confiança

Para distribuições normais com uma quantidade de amostras (n) menor ou igual à 30 o procedimento indicado para definição de intervalos de confiança consiste na distribuição t de Student. Os intervalos podem ser obtidos pela Equação 3, considerando a variância populacional desconhecida (HINES *et al.*, 2011).

$$\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \cdot S / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \cdot S / \sqrt{n}$$

Equação 3

Onde:

\bar{X} é a média aritmética dos valores;

$t_{\alpha/2, n-1}$ é o valor crítico de t, tabelado em função do grau de liberdade das amostras (n-1);

S é o desvio-padrão amostral;

μ é a média esperada dentro do intervalo de confiança.

4.2.5.3 Métodos de análise de variância e testes de comparações múltiplas

A análise de variância ANOVA generaliza o teste de comparação de duas médias de populações de mesma variância. O teste enfoca o problema sob o comportamento das variâncias envolvidas e tem como hipótese nula a de que as médias dos grupos envolvidos no teste são semelhantes, baseando-se em um teste denominado F (LOESCH, 2012).

A rejeição da hipótese nula ocorre quando o valor do teste F é superior a um valor tabelado e quando o p-valor é menor ou igual ao nível de significância. O teste é utilizado em amostras com distribuições normais, ou seja, um método de estatística paramétrica. A sua opção não-paramétrica é o teste de Kruskal-Wallis, que utiliza postos associados aos valores numéricos dos dados, tendo como resultado o teste H, tendo a mesma consideração de hipótese nula que o teste ANOVA (LOESCH, 2012).

Quando a hipótese nula é rejeitada por meio das análises de variâncias, sejam elas paramétricas ou não-paramétricas, teste de comparações múltiplas permitem identificar quais grupos diferem entre si estatisticamente. Para a estatística paramétrica um dos testes que pode ser utilizado é o teste de Tukey, utilizado neste trabalho. Este teste faz uso de uma distribuição denominada distribuição de amplitude studentizada, cuja estatística teste é dada pela Equação 4 (HINES *et al.*, 2011).

$$q = \frac{\bar{y}_{\max} - \bar{y}_{\min}}{\sqrt{MQ_E/n}}$$

Equação 4

Onde:

$\bar{y}_{m\acute{a}x}$ é a maior média amostral;

$\bar{y}_{m\acute{i}n}$ é a menor média amostral;

MQ_E é a média quadrática correspondente à variância dentro dos grupos, calculada no teste de ANOVA

Duas médias (\bar{y}_i e \bar{y}_j) são consideradas diferentes se a Equação 5 for atendida.

$$|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > T_\alpha \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

i é diferente de j ;

O parâmetro T_α é calculado pela Equação 6.

$$T_\alpha = Q_\alpha(a, f) \sqrt{MQ_E/n} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$Q_\alpha(a, f)$ é o ponto percentual superior α do parâmetro q , onde a é o número de tratamentos e f é o número de graus de liberdade para o erro. Os valores podem ser encontrados em tabelas na literatura (HINES et al., 2011).

Quanto à estatística não-paramétrica, o teste de comparações múltipla utilizado neste trabalho foi o de Dunn, posteriores à análise de variância pelo teste de Kruskal-Wallis, que identificou que pelo menos um grupo difere estatisticamente de outro.

O teste de Dunn inicia-se pelo cálculo da diferença mínima significativa entre dois grupos A e B ($DMS_{A,B}$), conforme a Equação 7.

$$DMS_{A,B} = Q \cdot SE_{A,B} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Q é uma distribuição típica para o teste de Dunn considerando um número k de grupos analisados. Tabelas com estas distribuições podem ser verificadas na literatura (WHEATER; COOK, 2000).

$SE_{A,B}$ é o erro padrão entre dois grupos, dado pela Equação 8.

$$SE_{A,B} = \sqrt{\frac{n_t(n_t + 1)}{12} \left[\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right]}$$

Equação 8

Onde:

n_A e n_B são os números de observações nos grupos A e B, respectivamente.

As diferenças entre as médias dos postos de dois grupos que resultarem em valores superiores à $DMS_{A,B}$ levam à rejeição da hipótese nula, ou seja, os dois grupos são estatisticamente diferentes. Isto também ocorre caso o p-valor do teste seja igual ou inferior ao nível de significância. Benjamini e Hochberg (1995) desenvolveram um ajuste nos p-valores resultantes do teste de Dunn para que fosse evitado o erro tipo I, que consiste na rejeição da hipótese nula quando ela é verdadeira e absoluta.

As correções podem ser aplicadas em testes de variáveis independentes. Os p-valores são ordenados de forma decrescente e em seguida ajustados conforme a Equação 9.

$$p_i^* = p \frac{m}{(m + 1 - i)}$$

Equação 9

Onde:

p_i^* são os p-valores ajustados conforme a sua ordem i ;

m é a quantidade de p-valores resultante do teste.

O teste de Dunn foi implementado por Pohlert (2014) no software R (R CORE TEAM, 2021), utilizado para a realização das análises estatísticas desta pesquisa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões deste trabalho.

5.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica foram determinados de acordo com as prescrições da ABNT NBR 9778:2005, utilizando-se uma amostra de cinco corpos de prova para cada traço de concreto permeável. Os resultados médios para estes ensaios estão apresentados na Tabela 2, e os resultados para cada corpo de prova encontram-se no ANEXO A, na Tabela A1, Tabela A2 e Tabela A3, respectivamente.

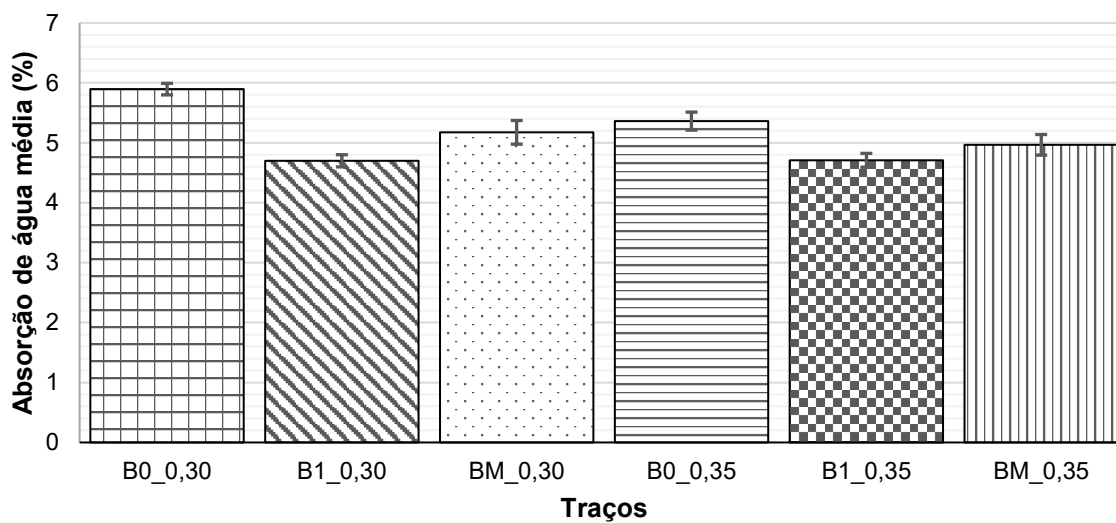
Tabela 2 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica real médios

Traço	Absorção de água			Índice de vazios			Massa específica real		
	Média (%)	Desv. Pad. (%)	C.V. (%)	Média (%)	Desv. Pad. (%)	C.V. (%)	Média (g/cm ³)	Desv. Pad. (g/cm ³)	C.V. (%)
B0_0,30	5,90	0,10	1,63	14,42	0,25	1,71	2,86	0,01	0,51
B1_0,30	4,70	0,10	2,16	11,94	0,24	1,99	2,88	0,01	0,33
BM_0,30	5,17	0,20	3,81	12,86	0,41	3,21	2,85	0,01	0,34
B0_0,35	5,36	0,15	2,81	13,25	0,31	2,33	2,85	0,01	0,18
B1_0,35	4,71	0,12	2,45	11,64	0,19	1,62	2,80	0,06	2,07
BM_0,35	4,97	0,17	3,47	12,16	0,36	2,99	2,79	0,01	0,41

Fonte: O autor (2021).

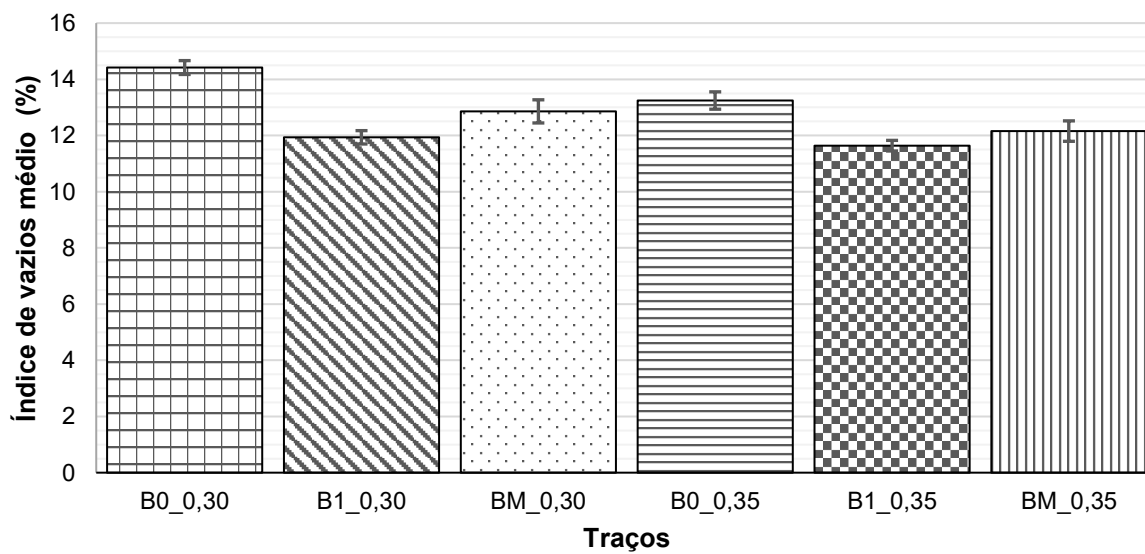
Para melhor visualização, os resultados da absorção de água, índice de vazios e massa específica estão ilustrados nos gráficos da Figura 15, Figura 16 e Figura 17, respectivamente, sendo que as barras de erro representam os desvios padrão de cada traço.

Figura 15 – Gráfico da absorção de água média



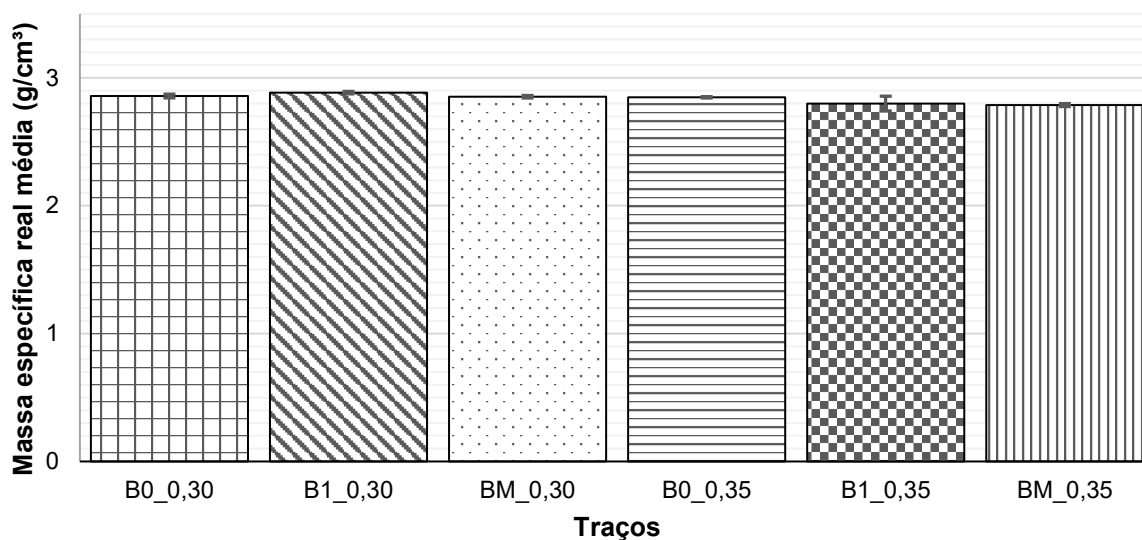
Fonte: O autor (2021).

Figura 16 – Gráfico do índice de vazios médio



Fonte: O autor (2021).

Figura 17 – Gráfico da massa específica média



Fonte: O autor (2021).

Como pode-se observar na Figura 15 e Figura 16, a absorção de água e o índice de vazios estão intimamente ligados visto que quanto maior o índice de vazios maior a absorção de água, sendo que os traços com brita 0 apresentaram os maiores valores para estas propriedades, possivelmente pelo fato de que um traço de concreto permeável com a brita 0 apresentar uma maior quantidade de grãos de agregado em função de seu menor diâmetro.

Devido ao fato de uma melhora na trabalhabilidade com o aumento da relação a/c , os traços com essa relação mais alta apresentaram melhor empacotamento dos agregados e como consequência um menor índice de vazios e uma menor absorção de água. Já a massa específica real apresentou uma pequena variação entre os traços como pode-se observar na Figura 17, com valores entre 2,79 e 2,88 g/cm³. Tais resultados corroboram com os apresentados nas pesquisas de Sandoval (2014).

Os p-valores encontrados por meio do teste de Shapiro-Wilk para cada traço foram maiores que o nível de significância (5,00%), logo, as amostras de cada traço utilizadas compõem uma distribuição normal quanto aos valores de absorção de água e índice de vazios, enquanto que o p-valor encontrado por meio do teste ANOVA ficou abaixo do nível de significância (5,00%), rejeitando assim a hipótese que não existe diferença estatística entre os diferentes traços quanto aos valores de absorção de água e índice de vazios. Estes dados encontram-se no ANEXO B, na Tabela B1 e Tabela B2.

Conforme o resultado do teste de Tukey apresentado na Figura 18, pode-se observar que os pares BM_0,30 e B0_0,35; B1_0,30 e B1_0,35; B1_0,30 e BM_0,35; B1_0,35 e BM_0,35 e BM_0,30 e BM_0,35 apresentaram um valor de *p-adj* maior que o nível de significância (5,00%) e pode ser dito que estes pares não possuem diferenças estatísticas quanto a absorção de água. Já todos os demais pares são estatisticamente diferentes entre si.

Figura 18 - Resultado do teste de Tukey entre as absorções de água dos traços estudados

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = ABSORCAO ~ TRACO, data = Y)

$TRACO
      diff      lwr      upr      p adj
B0035-B0030 -0.53398 -0.81525722 -0.25270278 0.0000627
B1030-B0030 -1.19622 -1.47749722 -0.91494278 0.0000000
B1035-B0030 -1.18796 -1.46923722 -0.90668278 0.0000000
BM030-B0030 -0.72124 -1.00251722 -0.43996278 0.0000005
BM035-B0030 -0.92952 -1.21079722 -0.64824278 0.0000000
B1030-B0035 -0.66224 -0.94351722 -0.38096278 0.0000022
B1035-B0035 -0.65398 -0.93525722 -0.37270278 0.0000027
BM030-B0035 -0.18726 -0.46853722 0.09401722 0.3410526
BM035-B0035 -0.39554 -0.67681722 -0.11426278 0.0026609
B1035-B1030 0.00826 -0.27301722 0.28953722 0.9999990
BM030-B1030 0.47498 0.19370278 0.75625722 0.0003084
BM035-B1030 0.26670 -0.01457722 0.54797722 0.0701950
BM030-B1035 0.46672 0.18544278 0.74799722 0.0003860
BM035-B1035 0.25844 -0.02283722 0.53971722 0.0846112
BM035-BM030 -0.20828 -0.48955722 0.07299722 0.2367819

```

Fonte: O autor (2021).

Conforme o resultado do teste de Tukey apresentado na Figura 19, pode-se observar que os pares BM_0,30 e B0_0,35, B1_0,30 e B1_0,35, B1_0,30 e BM_0,35 e B1_0,35 e BM_0,35 apresentaram um valor de *p-adj* maior que o nível de significância (5,00%) e, portanto, estes pares não possuem diferenças estatísticas quanto ao índice de vazios. Já todos os demais pares são estatisticamente diferentes entre si.

Figura 19 – Resultado do teste de Tukey entre os índices de vazios dos traços estudados

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VAZIOS ~ TRACO, data = Y)

$TRACO
      diff      lwr      upr      p adj
B0035-B0030 -1.17376 -1.76601144 -0.5815086 0.0000335
B1030-B0030 -2.48346 -3.07571144 -1.8912086 0.0000000
B1035-B0030 -2.78142 -3.37367144 -2.1891686 0.0000000
BM030-B0030 -1.56046 -2.15271144 -0.9682086 0.0000003
BM035-B0030 -2.26202 -2.85427144 -1.6697686 0.0000000
B1030-B0035 -1.30970 -1.90195144 -0.7174486 0.0000062
B1035-B0035 -1.60766 -2.19991144 -1.0154086 0.0000002
BM030-B0035 -0.38670 -0.97895144 0.2055514 0.3613841
BM035-B0035 -1.08826 -1.68051144 -0.4960086 0.0000993
B1035-B1030 -0.29796 -0.89021144 0.2942914 0.6336909
BM030-B1030 0.92300 0.33074856 1.5152514 0.0008346
BM035-B1030 0.22144 -0.37081144 0.8136914 0.8527101
BM030-B1035 1.22096 0.62870856 1.8132114 0.0000185
BM035-B1035 0.51940 -0.07285144 1.1116514 0.1095632
BM035-BM030 -0.70156 -1.29381144 -0.1093086 0.0138084

```

Fonte: O autor (2021).

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão dos concretos permeáveis foi determinada de acordo com as prescrições da ABNT NBR 5739:2018, utilizando-se uma amostra de cinco corpos de prova para cada traço. Os resultados médios para estes ensaios estão apresentados na Tabela 3, e os resultados para cada corpo de prova encontram-se no ANEXO A, na Tabela A4.

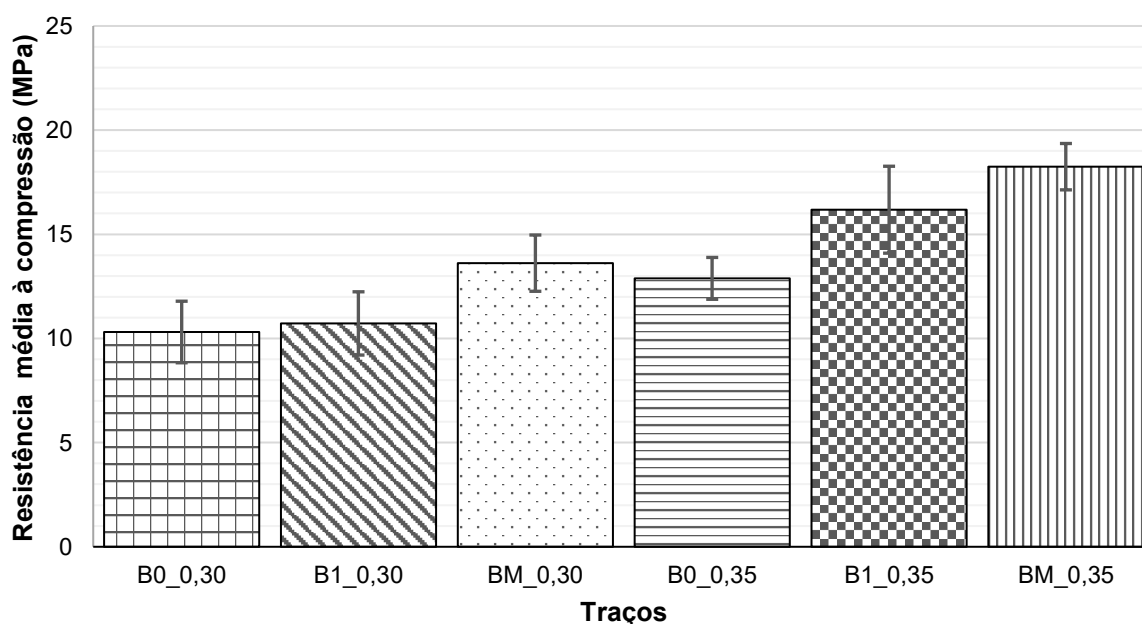
Tabela 3 – Resistência à compressão média

Traço	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	C.V. (%)
B0_0,30	10,31	1,48	14,34
B1_0,30	10,72	1,52	14,16
BM_0,30	13,61	1,35	9,92
B0_0,35	12,88	1,00	7,80
B1_0,35	16,18	2,09	12,89
BM_0,35	18,25	1,11	6,10

Fonte: O autor (2021).

Para melhor visualização, os resultados da resistência à compressão estão ilustrados no gráfico da Figura 20, sendo que as barras de erro representam os desvios padrão de cada traço.

Figura 20 – Gráfico da resistência média à compressão



Fonte: O autor (2021).

Como pode-se observar na Figura 20, mantida uma mesma relação água/cimento há um aumento de resistência à compressão à medida que o coeficiente de uniformidade do agregado cresce, pois, a distribuição mais contínua favorece o ganho de resistência, sendo que a composição de brita mista BM (50/50) foi a que apresentou maior C.u. (2,18) e as maiores resistências à compressão, para ambas relações a/c. Tais resultados são corroborados pelas pesquisas de Neptune e Putman (2010) e Sandoval (2014).

Analisando-se os resultados, também foi possível observar que a relação a/c teve influência no ganho de resistência à compressão dos concretos permeáveis, uma vez que, mantendo as mesmas composições granulométricas, com o aumento da relação a/c de 0,30 para 0,35, houve também um aumento da resistência à compressão, o que pode ser justificado pelo fato de que o concreto permeável difere do convencional nesse aspecto, e os resultados confirmaram que a hidratação da pasta não é o fator principal que governa a resistência, informação presente na ACI 522R (2006).

Isso decorre do fato de que, com uma maior relação a/c, a mistura ganha trabalhabilidade e a pasta consegue lubrificar melhor a mistura, permitindo uma melhor acomodação dos agregados, que ficam mais bem envoltos pela pasta. Cabe salientar que todos os traços se enquadraram na faixa de resistência estabelecida pela ACI 522R (2006) que é de 3,5 a 28 MPa. Os estudos de Hóltz (2011), Sandoval (2014) e as informações da ACI 522R (2006) corroboram com estes resultados.

Observou-se ainda maiores coeficiente de variabilidade no traço com relação a/c de 0,30, o que possivelmente está associado a problemas de moldagem decorrentes da menor trabalhabilidade dos traços com tal relação a/c, aspecto notável durante a produção do concreto e moldagem dos corpos de prova, especialmente com a brita 1, devido a maior dimensão de seus grãos.

Com relação à análise estatística para esta propriedade, os p-valores encontrados por meio do teste de Shapiro-Wilk para cada traço foram maiores que o nível de significância (5,00%) exceto para o traço BM_0,30, logo, nem todas as amostras compõem uma distribuição normal quanto aos valores de resistência à compressão, isso impede a realização do teste ANOVA. Realizando o teste de Kruskal-Wallis o p-valor encontrado ficou abaixo do nível de significância (5,00%), rejeitando assim a hipótese que não existe diferença estatística entre os diferentes

traços quanto a resistência à compressão. Estes dados encontram-se no ANEXO B, na Tabela B3.

Conforme o resultado do teste de Dunn com o ajuste de Benjamini e Hochberg apresentado na Figura 21, pode-se observar que os pares B0_0,30 e B1_0,35; B0_0,30 e BM_0,35; B1_0,30 e B1_0,35 e B1_0,30 e BM_0,35; apresentaram um valor de p-adj menor que o nível de significância (5,00%) e, portanto, estes pares possuem diferenças estatísticas quanto a resistência à compressão. Já todos os demais pares não apresentam diferenças estatísticas entre si.

Figura 21 - Resultado do teste de Dunn com ajuste de Benjamini e Hochberg entre as resistências à compressão dos traços estudados

```

Pairwise comparisons using Dunn's-test for multiple
comparisons of independent samples

data: Y$RESISTENCIA and Y$TRACO

      B0030 B0035 B1030 B1035 BM030
B0035 0.1641 -      -      -      -
B1030 0.8015 0.2199 -      -      -
B1035 0.0089 0.2112 0.0152 -      -
BM030 0.0852 0.6863 0.1255 0.3931 -
BM035 0.0012 0.0645 0.0016 0.4716 0.1255

P value adjustment method: BH

```

Fonte: O autor (2021).

5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

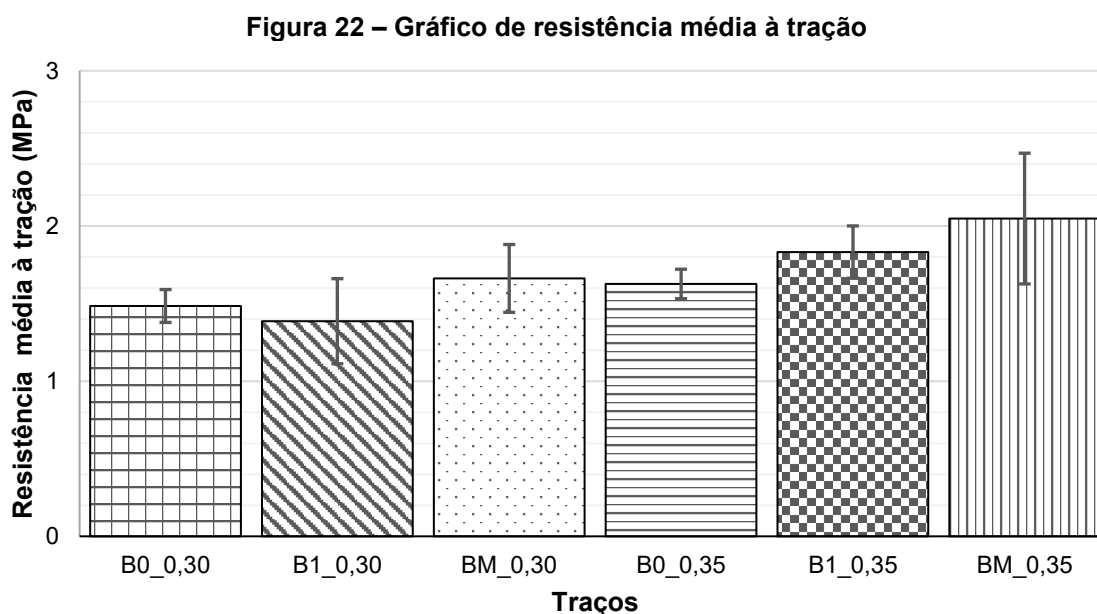
A resistência à tração por compressão diametral foi determinada de acordo com as prescrições da ABNT NBR 7222:2011, utilizando-se uma amostra de cinco corpos de prova para cada traço de concreto permeável. Os resultados médios para estes ensaios estão apresentados na Tabela 4, e os resultados para cada corpo de prova encontram-se no ANEXO A, na Tabela A5.

Tabela 4 – Resistência à tração média

Traço	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	C.V. (%)
B0_0,30	1,48	0,11	7,14
B1_0,30	1,39	0,27	19,78
BM_0,30	1,66	0,22	13,15
B0_0,35	1,63	0,09	5,83
B1_0,35	1,83	0,17	9,20
BM_0,35	2,05	0,42	20,57

Fonte: O autor (2021).

Para melhor visualização, os resultados da resistência à tração estão ilustrados no gráfico da Figura 22, sendo que as barras de erro representam os desvios padrão de cada traço.



Fonte: O autor (2021).

Como pode-se observar na Figura 22, muito do que se constatou na resistência à compressão também ocorreu na resistência à tração, como o aumento de resistência à tração em função do aumento C.u. do agregado e do aumento da relação a/c, com as mesmas justificativas mencionadas anteriormente na resistência à compressão.

No caso da resistência à tração, o travamento dos grãos é um parâmetro importante. Granulometrias uniformes com só um tamanho de grãos não vão gerar tal travamento e vão ser mais frágeis nos contatos entre eles. De maneira semelhante ao que se constatou na resistência à compressão, os traços com brita mista apresentaram as maiores resistências. Tais resultados são corroborados pelas pesquisas de Neptune e Putman (2010) e Sandoval (2014).

Com relação à análise estatística para esta propriedade, os p-valores encontrados por meio do teste de Shapiro-Wilk para cada traço foram maiores que o nível de significância (5,00%), logo, as amostras de cada traço utilizadas compõem uma distribuição normal quanto aos valores de resistência à tração, enquanto que o

p-valor encontrado por meio do teste ANOVA ficou abaixo do nível de significância (5,00%), rejeitando assim a hipótese que não existe diferença estatística entre os diferentes traços quanto a resistência à tração. Estes dados encontram-se no ANEXO B, na Tabela B4.

Conforme o resultado do teste de Tukey apresentado na Figura 23, pode-se observar que os pares B0_0,30 e BM_0,35 e B1_0,30 e BM_0,35, apresentaram um valor de p-adj menor que o nível de significância (5,00%) e, portanto, estes pares possuem diferenças estatísticas quanto a resistência à tração. Já todos os demais pares não apresentam diferenças estatísticas entre si.

Figura 23 - Resultado do teste de Tukey entre as resistências à tração dos traços estudados

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level				
Fit: aov(formula = RESISTENCIA ~ TRACO, data = Y)				
\$TRACO	diff	lwr	upr	p adj
B0035-B0030	0.1416	-0.33032113	0.6135211	0.9353471
B1030-B0030	-0.0984	-0.57032113	0.3735211	0.9862124
B1035-B0030	0.3456	-0.12632113	0.8175211	0.2469305
BM030-B0030	0.1776	-0.29432113	0.6495211	0.8493369
BM035-B0030	0.5616	0.08967887	1.0335211	0.0132728
B1030-B0035	-0.2400	-0.71192113	0.2319211	0.6233272
B1035-B0035	0.2040	-0.26792113	0.6759211	0.7623657
BM030-B0035	0.0360	-0.43592113	0.5079211	0.9998858
BM035-B0035	0.4200	-0.05192113	0.8919211	0.1012139
B1035-B1030	0.4440	-0.02792113	0.9159211	0.0735784
BM030-B1030	0.2760	-0.19592113	0.7479211	0.4793746
BM035-B1030	0.6600	0.18807887	1.1319211	0.0028203
BM030-B1035	-0.1680	-0.63992113	0.3039211	0.8762656
BM035-B1035	0.2160	-0.25592113	0.6879211	0.7178524
BM035-BM030	0.3840	-0.08792113	0.8559211	0.1589934

Fonte: O autor (2021).

5.4 PERMEABILIDADE

O coeficiente de permeabilidade e o fluxo dos concretos permeáveis foram determinados através de adaptações das prescrições da ABNT NBR 14545:2021, utilizando-se uma amostra de cinco corpos de prova para cada traço. Os resultados médios para estes ensaios são apresentados na Tabela 5, e os resultados para cada corpo de prova encontram-se no ANEXO A, na Tabela A6, Tabela A7 e Tabela A8.

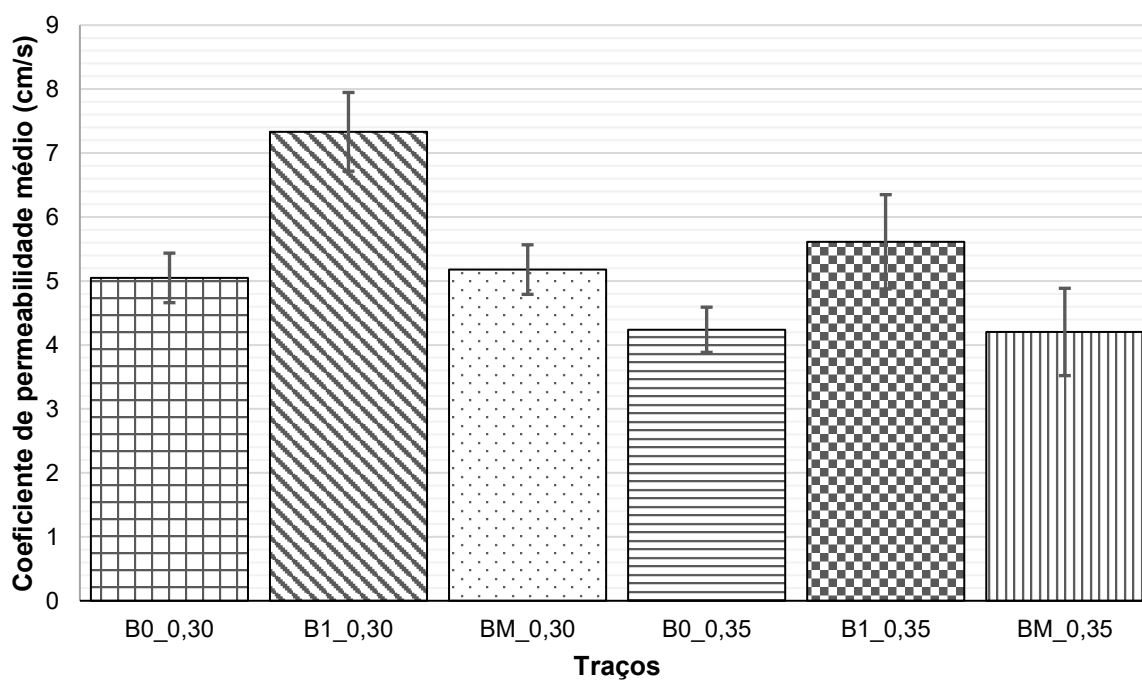
Tabela 5 – Coeficiente de permeabilidade e fluxo médios

Traço	Coeficiente de permeabilidade			Fluxo		
	Média (cm/s)	Desv. Pad. (cm/s)	C.V. (%)	Média (l/min/m ²)	Desv. Pad. (l/min/m ²)	C.V. (%)
B0_0,30	5,05	0,39	7,68	2458,05	199,86	8,13
B1_0,30	7,33	0,62	8,39	3543,85	351,87	9,93
BM_0,30	5,18	0,39	7,48	2504,25	175,54	7,01
B0_0,35	4,24	0,35	8,34	2060,19	168,79	8,19
B1_0,35	5,61	0,74	13,14	2681,86	389,78	14,53
BM_0,35	4,20	0,68	16,24	2025,01	322,74	15,94

Fonte: O autor (2021).

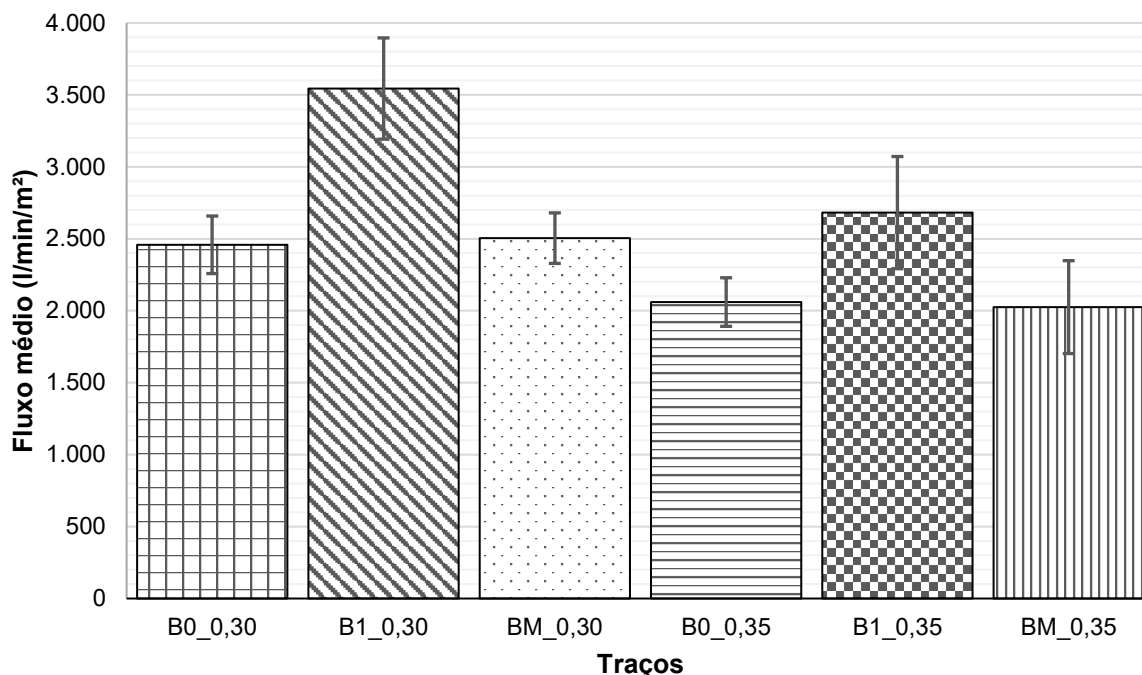
Para melhor visualização, os resultados do coeficiente de permeabilidade e do fluxo estão ilustrados nos gráficos da Figura 24 e Figura 25, respectivamente, sendo que as barras de erro representam os desvios padrão de cada traço.

Figura 24 – Gráfico do coeficiente de permeabilidade médio



Fonte: O autor (2021).

Figura 25 – Gráfico do fluxo médio



Fonte: O autor (2021).

Com base nos resultados, verificou-se que todos os traços superaram os valores mínimos estipulados pela norma ACI 522R (2006) que fixa o coeficiente de permeabilidade mínimo para concretos permeáveis em 1,35 cm/s e um fluxo mínimo de 200 l/min/m².

Como pode-se observar na Figura 24 e Figura 25, o coeficiente de permeabilidade e o fluxo estão intimamente ligados entre si, visto que quanto maior coeficiente de permeabilidade, maior o fluxo, para todos os traços. Notou-se que a brita 1 obteve o maior coeficiente de permeabilidade quando comparado com as outras duas granulometrias. Este fato se explica pela sua granulometria uniforme, pelo diâmetro do agregado máximo de 19 mm e seu C.u. de 1,60, assim os vazios internos têm um maior diâmetro e como consequência uma maior permeabilidade.

O aumento na relação água/cimento reduz a permeabilidade devido ao fato de deixar a pasta mais fluida, e esta escorrer dos agregados com mais facilidade preenchendo os vazios, resultado este também constatado neste trabalho. Os estudos de Höltz (2011), Sandoval (2014) e as informações da ACI 522R (2006) corroboram com estes resultados.

Com relação à análise estatística para esta propriedade, os p-valores encontrados por meio do teste de Shapiro-Wilk para cada traço foram maiores que o

nível de significância (5,00%), logo, as amostras de cada traço utilizadas compõem uma distribuição normal quanto aos valores de fluxo, enquanto o p-valor encontrado por meio do teste ANOVA ficou abaixo do nível de significância (5,00%), rejeitando assim a hipótese que não existe diferença estatística entre os diferentes traços quanto ao fluxo. Estes dados encontram-se no ANEXO B, na Tabela B5.

Conforme o resultado do teste de Tukey apresentado na Figura 26, pode-se observar que os pares B0_0,30 e B1_0,30; B1_0,30 e B0_0,35; B0_0,35 e B1_0,35; B1_0,30 e B1_0,35; B1_0,30 e BM_0,30; B1_0,30 e BM_0,35 e B1_0,35 e BM_0,35 apresentaram um valor de p-adj menor que o nível de significância (5,00%) e, portanto, estes pares possuem diferenças estatísticas quanto ao fluxo. Já todos os demais pares não apresentam diferenças estatísticas entre si.

Figura 26 - Resultado do teste de Tukey entre as permeabilidades dos traços estudados

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level				
Fit: aov(formula = PERMEABILIDADE ~ TRACO, data = Y)				
\$TRACO	diff	lwr	upr	p adj
B0035-B0030	-397.86140	-950.47395	154.75115	0.2628963
B1030-B0030	1085.79968	533.18713	1638.41223	0.0000381
B1035-B0030	223.81412	-328.79843	776.42667	0.8069122
BM030-B0030	46.19800	-506.41455	598.81055	0.9998208
BM035-B0030	-433.03386	-985.64641	119.57869	0.1881070
B1030-B0035	1483.66108	931.04853	2036.27363	0.0000002
B1035-B0035	621.67552	69.06297	1174.28807	0.0211563
BM030-B0035	444.05940	-108.55315	996.67195	0.1683698
BM035-B0035	-35.17246	-587.78501	517.44009	0.9999533
B1035-B1030	-861.98556	-1414.59811	-309.37301	0.0008258
BM030-B1030	-1039.60168	-1592.21423	-486.98913	0.0000714
BM035-B1030	-1518.83354	-2071.44609	-966.22099	0.0000001
BM030-B1035	-177.61612	-730.22867	374.99643	0.9154417
BM035-B1035	-656.84798	-1209.46053	-104.23543	0.0134087
BM035-BM030	-479.23186	-1031.84441	73.38069	0.1162314

Fonte: O autor (2021).

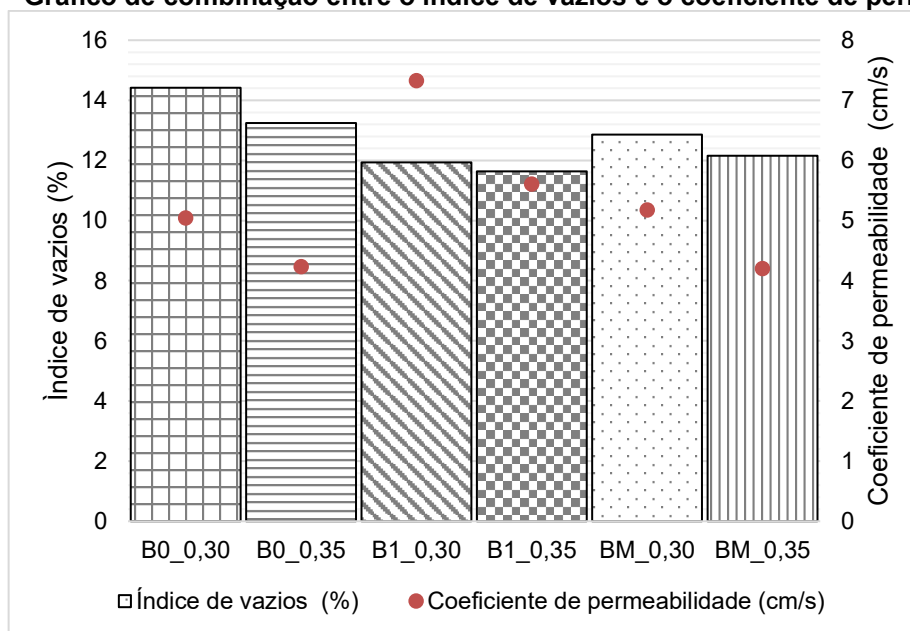
5.5 ANÁLISES COMBINADAS DAS PROPRIEDADES

A fim de melhor compreender o comportamento do concreto permeável, foram feitas algumas correlações entre os resultados anteriormente apresentados. Para facilitar a interpretação, os gráficos foram gerados posicionando-se lado a lado os traços com mesma composição granulométrica em pares, diferentemente dos apresentados anteriormente, onde estavam agrupados em trios com base na mesma relação a/c.

A Figura 27 e Figura 28 apresentam os gráficos combinados com resultados de índice de vazios e permeabilidade, para os seis traços de concreto permeável. É possível observar que com o aumento da relação água/cimento para as três

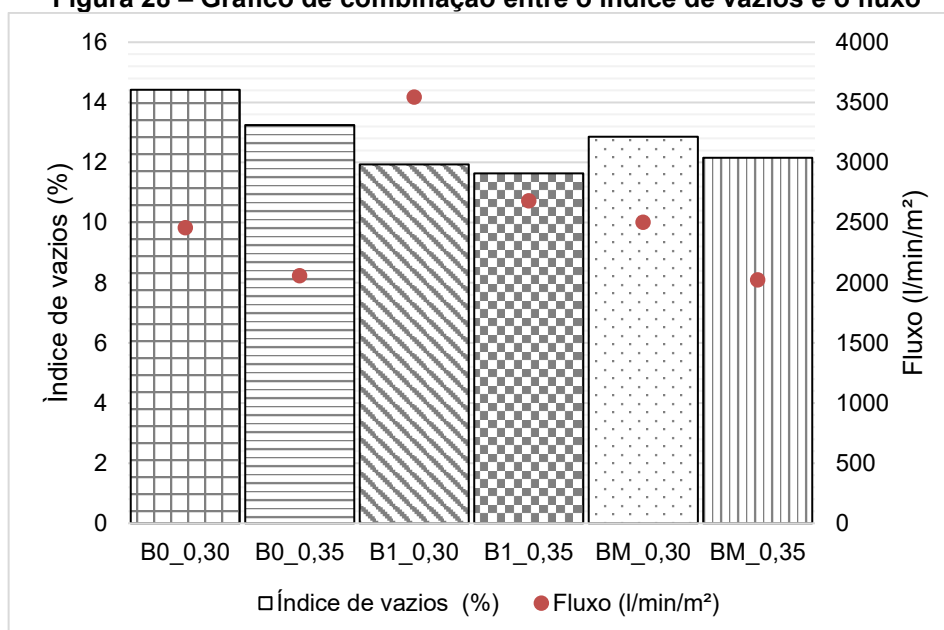
composições granulométricas (B0, B1 e BM), houve uma redução dos valores de índices de vazios e por consequência, também se diminuíram os valores dos coeficientes de permeabilidade e do fluxo, isso ocorre em decorrência do melhor empacotamento dos agregados com a pasta mais fluída e do maior preenchimento dos vazios pela pasta que escorre com maior facilidade.

Figura 27 – Gráfico de combinação entre o índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade



Fonte: O autor (2021).

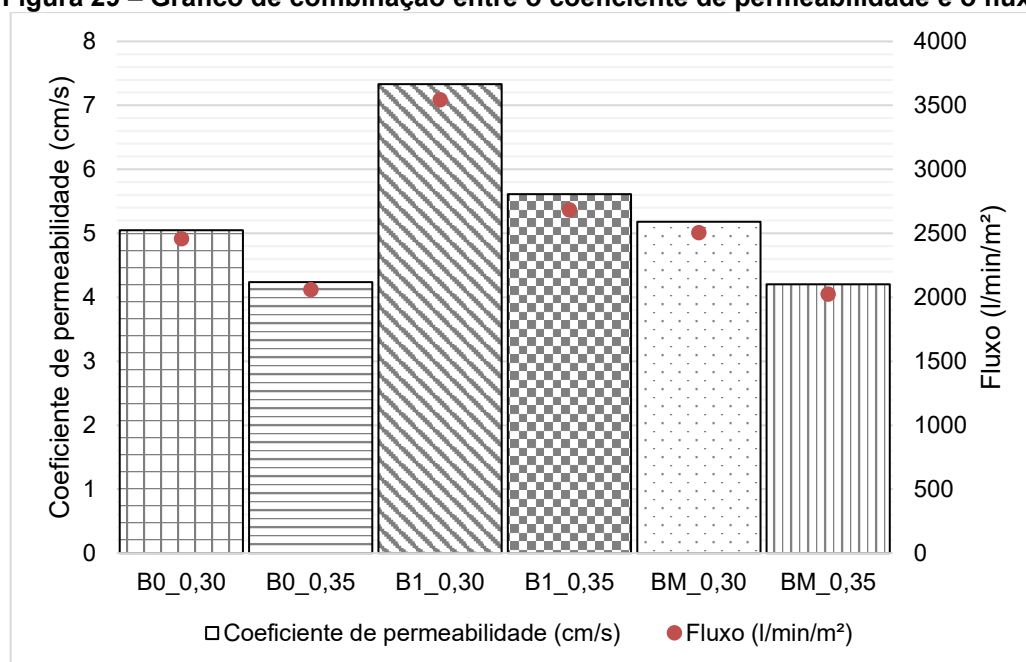
Figura 28 – Gráfico de combinação entre o índice de vazios e o fluxo



Fonte: O autor (2021).

A Figura 29 apresenta o gráfico combinado com resultados de coeficiente de permeabilidade e fluxo, para os seis traços de concreto permeável. Pode-se observar, analisando-se os gráficos que existe uma interdependência entre o coeficiente de permeabilidade e o fluxo, visto que com o aumento da relação água/cimento para as três composições granulométricas (B0, B1 e BM), ambos os valores diminuem nas mesmas proporções.

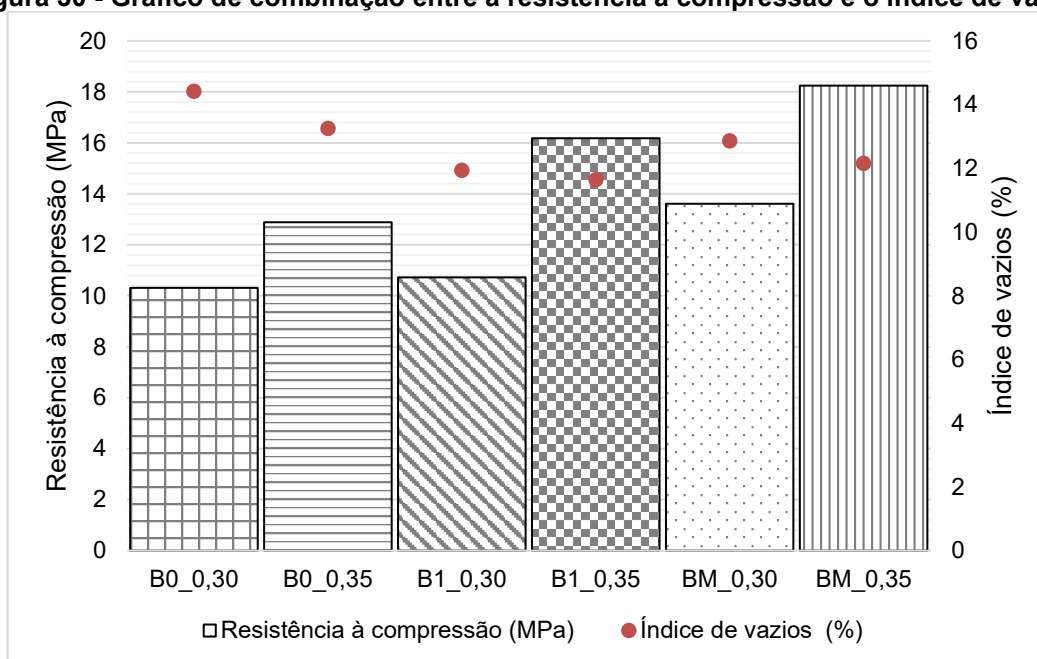
Figura 29 – Gráfico de combinação entre o coeficiente de permeabilidade e o fluxo



Fonte: O autor (2021).

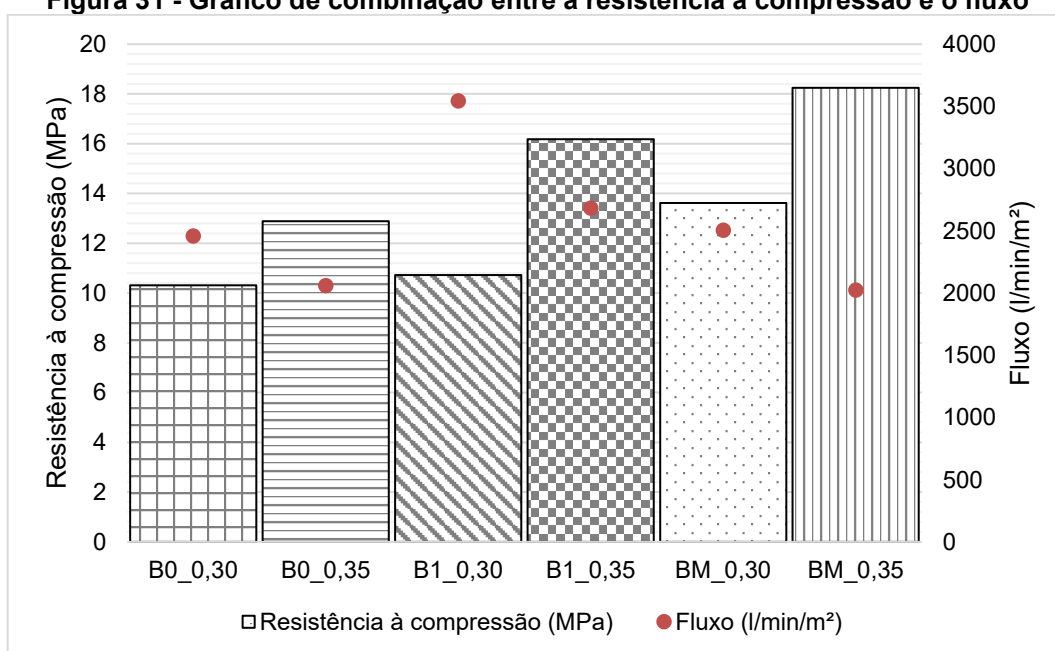
A Figura 30 apresenta o gráfico combinado com os resultados de resistência à compressão e índice de vazios e a Figura 31, com os resultados de resistência à compressão e fluxo, para os seis traços de concreto permeável. Analisando-se os gráficos, é possível verificar que o aumento na relação a/c de 0,30 para 0,35, para as três composições granulométricas (B0, B1 e BM), acarretou no aumento da resistência à compressão, em função da redução do índice de vazios, e consequentemente na redução do fluxo.

Figura 30 - Gráfico de combinação entre a resistência à compressão e o índice de vazios



Fonte: O autor (2021).

Figura 31 - Gráfico de combinação entre a resistência à compressão e o fluxo

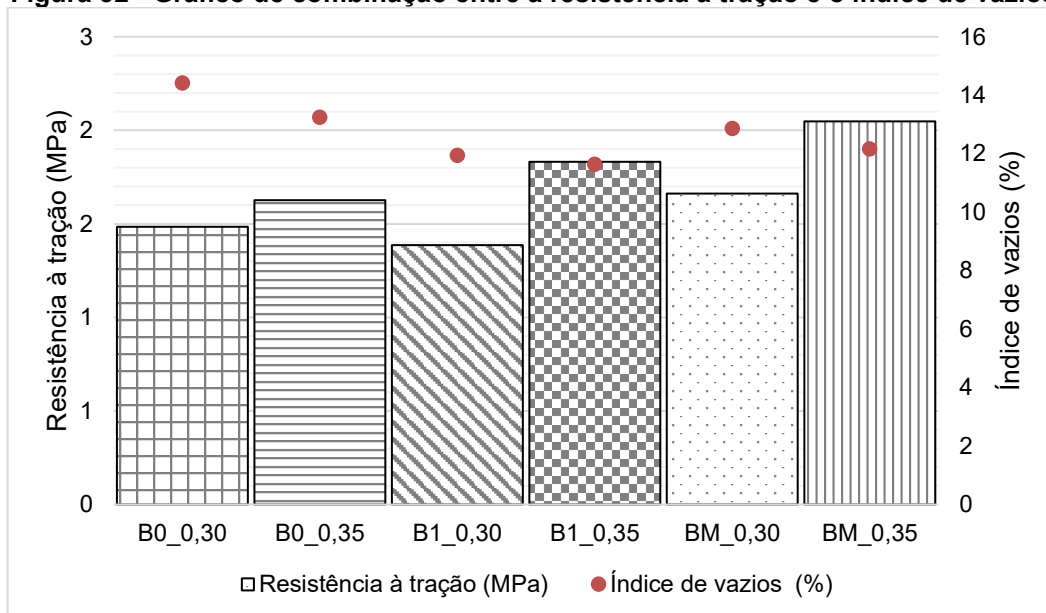


Fonte: O autor (2021).

A Figura 32 apresenta o gráfico combinado com os resultados de resistência à tração e índice de vazios e a Figura 33, com os resultados de resistência à tração e fluxo, para os seis traços de concreto permeável. Analisando-se os gráficos, de forma análoga aos resultados apresentados para a resistência à compressão, é possível

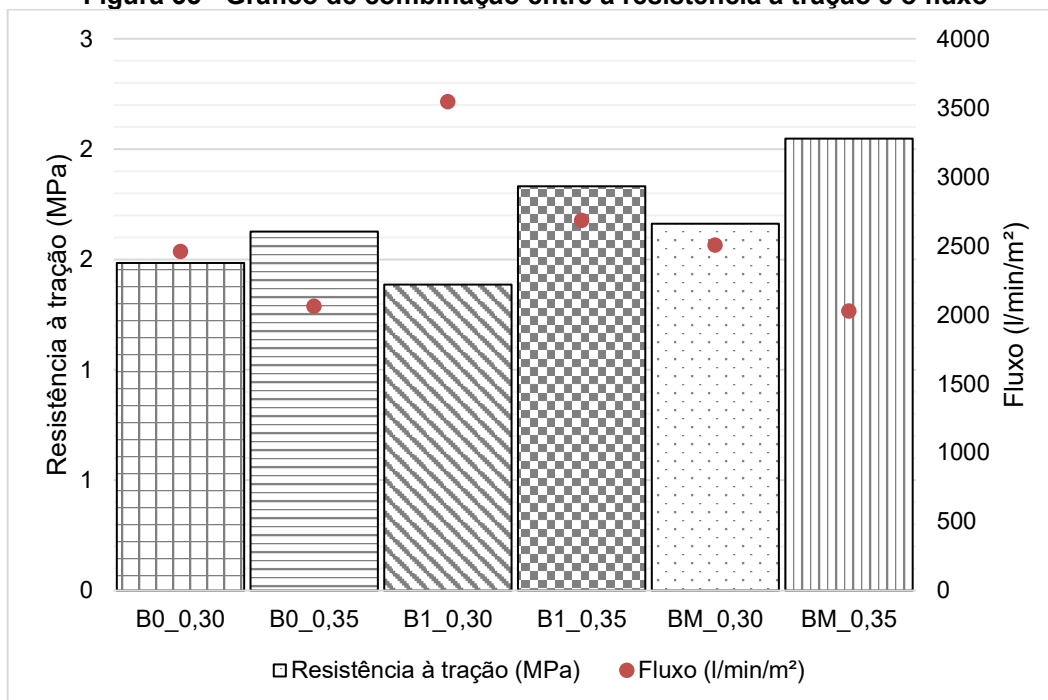
verificar que o aumento na relação a/c de 0,30 para 0,35, para as três composições granulométricas (B0, B1 e BM), acarretou no aumento da resistência à tração, em função da redução do índice de vazios, e conseqüentemente na redução do fluxo.

Figura 32 - Gráfico de combinação entre a resistência à tração e o índice de vazios



Fonte: O autor (2021).

Figura 33 - Gráfico de combinação entre a resistência à tração e o fluxo



Fonte: O autor (2021).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso procurou verificar a viabilidade da utilização de concreto permeável como uma alternativa aos métodos tradicionais de drenagem urbana, estudando alguns traços com o objetivo de encontrar o equilíbrio entre uma boa resistência à compressão, tração e permeabilidade.

Nesse trabalho estudaram-se diversos traços de concretos permeáveis, produzidos com base nas recomendações do ACI 522R (2006) e nos estudos de Höltz (2011) e Sandoval (2014). Foram obtidos concretos com resistências moderadas (na faixa de 10 a 18 MPa à compressão e de 1,5 a 2 MPa à tração) e com altos índices de permeabilidade (na faixa de 2000 a 3500 l/min/m²), superiores às dos solos naturais (de acordo com Pinto (2006), o máximo de permeabilidade encontrada em um solo arenoso, graúdo, foi de 600 l/min/m²).

Os traços com relação a/c de 0,30 apresentaram uma menor trabalhabilidade, porém uma maior permeabilidade, enquanto os traços com relação a/c de 0,35 apresentaram uma maior trabalhabilidade e maiores resistências. Quanto as britas, cada uma proporcionou uma característica marcante em seu concreto, a brita 0 é a que proporciona um concreto com melhor acabamento, a brita 1 a que proporciona um concreto mais permeável e a brita mista a que proporciona um concreto com maior resistência.

Os resultados encontrados quanto às resistências, tanto à compressão quanto à tração são satisfatórios para a utilização do concreto permeável em calçadas e passeios, onde não existe um tráfego pesado. No entanto, ainda são necessários outros estudos para que este concreto tenha uso na pavimentação de estacionamentos e ruas com trânsito veicular, tendo em vista que nestes casos, os traços precisam atingir uma maior resistência.

Quanto aos resultados de permeabilidade, apesar de terem sido excelentes, ainda precisam estar de acordo com as características do solo onde o pavimento vai ser instalado e também com o índice pluviométrico da região, ou seja, há a necessidade do estudo complementar da capacidade de percolação do solo e do índice pluviométrico para se poder produzir um pavimento altamente eficaz, pois pouco adianta ter um concreto altamente permeável se o solo abaixo infiltrar pouco.

É verdade que o próprio concreto permeável e a camada de brita que se coloca sob o mesmo também servem de camada de amortecimento, o que faz com

que parte da chuva não escorra, mas seja armazenada. Nesse cenário o problema das enxurradas urbanas pode não ser totalmente resolvido, mas o pico de cheia seria bastante atenuado.

A análise estatística demonstrou que o traço BM_0,35 apresentou maiores diferenças estatísticas dos demais quanto aos parâmetros de resistência. Logo, este traço é o indicado para pavimentos com cargas mais elevadas. Quanto a permeabilidade, não foi possível individualizar um traço como sendo o melhor.

Ainda existem outros fatores a serem levados em consideração na produção desse concreto, fatores estes condizentes com a realidade brasileira, como: a resistência da população; o descaso desta com os seus resíduos sólidos que poderão entupir os poros do concreto, comprometendo a permeabilidade e a necessidade de mão-de-obra especializada quanto à construção de um pavimento permeável.

Há um longo caminho a ser percorrido para que este concreto possa ser usado em larga escala, auxiliando na drenagem urbana, beneficiando não só a sociedade, como também o meio ambiente, promovendo uma aproximação das condições de pré-urbanização. Levando em conta o quanto o contínuo processo de expansão e impermeabilização das cidades tem impactado no meio ambiente, a adoção deste tipo de concreto torna-se imperativa.

O desafio das pesquisas na área de concretos permeáveis será encontrar traços capazes de satisfazer adequadamente ambas as demandas de permeabilidade e resistência para cada uso específico, que tenham boa durabilidade e resistência ao uso. Em vistas destas constatações, reforça-se a necessidade do desenvolvimento de novas pesquisas. Os índices de permeabilidade alcançados comprovam o potencial de uso que uma pavimentação com concreto permeável pode ter em relação a todos os problemas causados pelas enxurradas urbanas, tanto para a sociedade como para o meio ambiente.

A utilização do concreto permeável como uma alternativa às superfícies impermeabilizadas com o concreto convencional e o asfalto se mostra uma proposta válida e sustentável em vista da problemática urbana, representada, sobretudo, pelas grandes enxurradas e alagamentos.

REFERÊNCIAS

A. NEPTUNE & B. PUTMAN, Andrew I. P. N. and Bradley J. P. *Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures*. **ACI materials journal**, v. 107, p. 625-631, dez. 2010.

ACIOLI, L.A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005.145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

AGRA, S.G. **Estudo Experimental de Micro reservatórios para Controle do Escoamento Superficial**. Porto Alegre, UFRGS: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-06: pervious concrete**. Farmington Hills, 2006.

ARAÚJO, P.R.; 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, jul./set. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

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

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F.N.; ALFAKIH, E. *Tecniques alternatives en assainissement pluvial*. Paris: *Technique et Documentation* – Lavoisier. 1994.

BALADES, J. D.; LEGRET, M.; MADLEC, H. *Pervious pavements: pollution management tools*. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, v. 32, n. 1, Jan.1995.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. *Sustainable development and urban stormwater management in the context of a tropical developing country*. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL,

25, 1996, Ciudad de México. **Anais... Ciudad de México**: AIDIS, 1996. v. IV, p. 523-529.

BENJAMINI, Yoav; HOCHBERG, Yosef. *Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing*. **Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological)**, v. 57, n. 1, p. 289-300, 1995.

BRASIL. **Lei Federal nº 14.026 de 15 de julho de 2020**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm>. Acesso em 21 de ago. 2020.

CANHOLI, A.P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CASTRO *et al.*, Javier C., Hernán de S., Carlos V., Bonifacio F. *Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón*. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 24, p. 271-284, out. 2009.

CIRIA, 1996. *Infiltration drainage – Manual of good practice*. **CIRIA – Construction Industry Research and Information Association** – Report 156. 1996.

CONCRETE NETWORK. 2020. Disponível em: <www.concretenetwork.com>. Acesso em: 25 de ago., 2020.

ELLIS, J. B.; HVITED-JACOBSEN, T. *Urban drainage impacts on receiving waters*. **Journal of Hydraulic Research: Association International des Recherché Hydrauliques**, v. 34, n. 6, p. 771-784, Jun. 1996.

EPA, 1999. **Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement**. EPA 832-F-99-023 *Office of Water*, Washington, D.C. 1999.

GHAFOORI, N. Development of No-Fines Concrete Pavement Applications, **Journal of Transportation Engineering**, Mai/Jun 1995, Vol.126, No 3, p. 283 – 288.

HINES, W.; GOLDSMAN, David M.; BORROR, Connie M.; MONTGOMERY Douglas C. Tradução Vera Regina Lima de Faria e Flores. Revisão técnica Ana Maria Lima de Farias. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011

HÖLTZ, F.C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censos demográficos. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=destaques>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

KEATIN G, J. 2001. *Porous Pavement. Stormwater Features - The Journal for surface water quality professionals*. Volume 2, N. 2, Mar/Abr. 2001.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: ISAIA, G.C. Concreto, ensino, pesquisa e realizações. v. 2. São Paulo: **Anais...** IBRACON, 2005. p. 295-322.

KNAPTON, J.; COOK, I.; MORRELL, D. 2002 *A new design method for pervious pavements surfaced with pavers*. In: **Highways & Transportation**. Pág. 23- 27. jan/fev. 2002.

KUANG, X.; KIM, J. Y.; GNECCO, I.; RAJE, S.; GAROFALO, G.; SANSALONE, J. J. *Particle separation and hydrologic control by cementitious pervious pavement*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, v. 2025, Jan. 2007. p. 111-117.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.

LEOTTI, Vanessa Bielefeldt; BIRCK, Alan Rodrigues; RIBOLDI, João. Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, Anderson-Darling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. **Anais** do 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica, 2005

LERNER, D.N., 1990. *Groundwater Recharge in Urban Areas in: Duisberg Symposium 1988. Hydrology for urban planning – A guide book on the Hydrologic effects of urban land use*. USGS circ. 554. 18p.

LOESCH, C. **Probabilidade e estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 978-85-216-2172- 0. Disponível em:
<<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000002729&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>>. Acesso em: 2 jun. 2021.

MENDONÇA, F. Riscos, vulnerabilidade e abordagem sócio ambiental urbana: uma reflexão a partir da RCM e de Curitiba. **Desenvolvimento e meio ambiente**. Curitiba: UFPR. n. 10, p. 139-148. Out. 2004.

MULLIGAN, A.N., 2005. **Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems**. University Orlando, Florida. 145p. 2005.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (NRMCA), 2010. *Pervious Concrete*. Disponível em:
<https://www.nrmca.org/>. Acesso em: 09 out. 2020.

NEITHALATH, N, et. al. *Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. Final Report, The Institute for Safe, Quiet, and Durable Higways*, 2003, 179 p.

PERVIOUS CONCRETE. 2020. Disponível em:< <http://www.perviousconcrete.com>>. Acesso em: out. de 2020.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos:** em 16 aulas. 3ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POHLERT, Thorsten. **The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR)**. [s.l.: s.n.], 2014. Disponível em:
<<https://cran.r-project.org/web/packages/PMCMR/index.html>>. Acesso em:27 jul. 2021.

POLASTRE, B.; SANTOS, L.D. **Concreto Permeável**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2006.

PORTO, M.F.A. 2001. *Water quality of overland flow in urban areas*. In: Tucci, C.E. M. *Urban drainage specific climates: urban drainage in humid tropics*. Paris: UNESCO. IHP-V. **Technical Documents in Hydrology**. No.40. v.1 cap.4, p 103 – 124.

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing.* Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

ROYSTON, Patrick. *Approximating the Shapiro-Wilk W-test for non-normality.* ***Statistics and computing***, v. 2, n. 3, p. 117-119, 1992.

SALKIND, Neil J. ***Encyclopedia of Measurement and Statistics.*** 1. ed. Thousand Oaks, EUA: SAGE Publications, 2007.

SANDOVAL, G. F. B. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis.** 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

SCHAEFER, V. R.; Wang, K.; Suleiman, M. T.; Kevern, J. T. ***Mix Design Development for Pervious Concrete in cold weather climates.*** Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Iowa, 2006.

SCHUELER, T.; KUMBLE, P. A.; HERATY, M. A. 1992. ***A current assessment of urban best management practices – Techniques for reducing non-point source pollution in the coastal zone.*** U. S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. 1992.

SHAPIRO, Samuel Sanford; WILK, Martin B. ***An analysis of variance test for normality (complete samples).*** *Biometrika*, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SUDERHSA. 2002. **Manual de drenagem urbana** – Região metropolitana de Curitiba/PR. SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2002.

TENNIS, P. D., LEMING, M. L. & AKERS, D. J., ***Pervious Concrete Pavements.*** Portland Cement Association. Skokie Illinois, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas,** Porto Alegre: RBRH, v. 5, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas.** 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros dos hidrogramas unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n.2, p. 195-199, 2003.

TUCCI, C.E.M. 2001. *Urban drainage issues in developing countries*. In: TUCCI, C.E.M. *Urban drainage specific climates: urban drainage in humid tropics*. Paris: UNESCO. IHP-V. **Technical Documents in Hydrology**. No.40. v.1. cap.1, p23 – 40.

TUCCI, C.E.M.; GENZ, F. 1995. **Controle do Impacto da Urbanização**. In: TUCCI, C.E.M., PORTO, R.L.; BARROS, M.T. (organizadores) *Drenagem Urbana*. ABRH. Editora Universidade. UFRGS. Porto Alegre. 1995.

WHEATER, Philip C.; COOK, Penny A. ***Using Statistics to Understand the Environment***. 1. ed. Londres, Reino Unido: Routledge, 2000

WONG, T.; BREEN, P.; LLOYD, S. 2000. *Water sensitive road design options for improving stormwater quality of road runoff*. **Technical Report for Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology** 00/1. 2000.

ANEXO A - TABELAS COM RESULTADOS COMPLETOS

Tabela A1 – Absorção de água

Traço	Amostra	Massa (g)			Absorção de água (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	C.V. (%)
		Seca	Saturada	Imersa				
B0_0,30	CP I	2930,55	3098,90	1897,52	5,74	5,90	0,10	1,63
	CP II	2856,14	3025,85	1857,20	5,94			
	CP III	2906,61	3079,42	1887,19	5,95			
	CP IV	2936,51	3108,55	1913,83	5,86			
	CP V	2927,82	3103,11	1907,90	5,99			
B1_0,30	CP I	3044,36	3188,06	1987,84	4,72	4,70	0,10	2,16
	CP II	2970,39	3111,07	1943,96	4,74			
	CP III	2971,05	3113,34	1943,81	4,79			
	CP IV	2893,46	3024,38	1889,92	4,52			
	CP V	2964,62	3104,74	1931,72	4,73			
BM_0,30	CP I	3063,91	3229,21	1991,35	5,40	5,17	0,20	3,81
	CP II	2993,43	3151,13	1938,13	5,27			
	CP III	3081,97	3244,62	2000,91	5,28			
	CP IV	3026,45	3176,42	1969,19	4,96			
	CP V	3020,25	3170,52	1962,41	4,98			
B0_0,35	CP I	3010,17	3178,16	1949,98	5,58	5,36	0,15	2,81
	CP II	2970,95	3127,77	1928,47	5,28			
	CP III	3022,00	3180,46	1961,68	5,24			
	CP IV	3020,56	3179,11	1960,04	5,25			
	CP V	3014,20	3178,66	1957,33	5,46			
B1_0,35	CP I	3229,79	3386,58	2031,88	4,85	4,71	0,12	2,45
	CP II	3137,39	3282,36	2030,50	4,62			
	CP III	3131,38	3277,13	2023,16	4,65			
	CP IV	3296,62	3448,29	2124,20	4,60			
	CP V	3105,44	3254,73	2006,13	4,81			
BM_0,35	CP I	3131,03	3286,89	2013,39	4,98	4,97	0,17	3,47
	CP II	3149,74	3305,53	2023,39	4,95			
	CP III	3164,82	3330,14	2025,79	5,22			
	CP IV	3206,02	3364,49	2050,58	4,94			
	CP V	3188,28	3339,39	2043,50	4,74			

Fonte: O autor (2021).

Tabela A2 – Índice de vazios

Traço	Amostra	Massa (g)			Índice de vazios (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	C.V. (%)
		Seca	Saturada	Imersa				
B0_0,30	CP I	2930,55	3098,90	1897,52	14,01	14,42	0,25	1,71
	CP II	2856,14	3025,85	1857,20	14,52			
	CP III	2906,61	3079,42	1887,19	14,49			
	CP IV	2936,51	3108,55	1913,83	14,40			
	CP V	2927,82	3103,11	1907,90	14,67			
B1_0,30	CP I	3044,36	3188,06	1987,84	11,97	11,94	0,24	1,99
	CP II	2970,39	3111,07	1943,96	12,05			
	CP III	2971,05	3113,34	1943,81	12,17			
	CP IV	2893,46	3024,38	1889,92	11,54			
	CP V	2964,62	3104,74	1931,72	11,95			
BM_0,30	CP I	3063,91	3229,21	1991,35	13,35	12,86	0,41	3,21
	CP II	2993,43	3151,13	1938,13	13,00			
	CP III	3081,97	3244,62	2000,91	13,08			
	CP IV	3026,45	3176,42	1969,19	12,42			
	CP V	3020,25	3170,52	1962,41	12,44			
B0_0,35	CP I	3010,17	3178,16	1949,98	13,68	13,25	0,31	2,33
	CP II	2970,95	3127,77	1928,47	13,08			
	CP III	3022,00	3180,46	1961,68	13,00			
	CP IV	3020,56	3179,11	1960,04	13,01			
	CP V	3014,20	3178,66	1957,33	13,47			
B1_0,35	CP I	3229,79	3386,58	2031,88	11,57	11,64	0,19	1,62
	CP II	3137,39	3282,36	2030,50	11,58			
	CP III	3131,38	3277,13	2023,16	11,62			
	CP IV	3296,62	3448,29	2124,20	11,45			
	CP V	3105,44	3254,73	2006,13	11,96			
BM_0,35	CP I	3131,03	3286,89	2013,39	12,24	12,16	0,36	2,99
	CP II	3149,74	3305,53	2023,39	12,15			
	CP III	3164,82	3330,14	2025,79	12,67			
	CP IV	3206,02	3364,49	2050,58	12,06			
	CP V	3188,28	3339,39	2043,50	11,66			

Fonte: O autor (2021).

Tabela A3 – Massa específica real

Traço	Amostra	Massa (g)			Massa específica real (g/cm ³)	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)	C.V. (%)
		Seca	Saturada	Imersa				
B0_0,30	CP I	2930,55	3098,90	1897,52	2,84	2,86	0,01	0,51
	CP II	2856,14	3025,85	1857,20	2,86			
	CP III	2906,61	3079,42	1887,19	2,85			
	CP IV	2936,51	3108,55	1913,83	2,87			
	CP V	2927,82	3103,11	1907,90	2,87			
B1_0,30	CP I	3044,36	3188,06	1987,84	2,88	2,88	0,01	0,33
	CP II	2970,39	3111,07	1943,96	2,89			
	CP III	2971,05	3113,34	1943,81	2,89			
	CP IV	2893,46	3024,38	1889,92	2,88			
	CP V	2964,62	3104,74	1931,72	2,87			
BM_0,30	CP I	3063,91	3229,21	1991,35	2,86	2,85	0,01	0,34
	CP II	2993,43	3151,13	1938,13	2,84			
	CP III	3081,97	3244,62	2000,91	2,85			
	CP IV	3026,45	3176,42	1969,19	2,86			
	CP V	3020,25	3170,52	1962,41	2,86			
B0_0,35	CP I	3010,17	3178,16	1949,98	2,84	2,85	0,01	0,18
	CP II	2970,95	3127,77	1928,47	2,85			
	CP III	3022,00	3180,46	1961,68	2,85			
	CP IV	3020,56	3179,11	1960,04	2,85			
	CP V	3014,20	3178,66	1957,33	2,85			
B1_0,35	CP I	3229,79	3386,58	2031,88	2,70	2,80	0,06	2,07
	CP II	3137,39	3282,36	2030,50	2,83			
	CP III	3131,38	3277,13	2023,16	2,83			
	CP IV	3296,62	3448,29	2124,20	2,81			
	CP V	3105,44	3254,73	2006,13	2,82			
BM_0,35	CP I	3131,03	3286,89	2013,39	2,80	2,79	0,01	0,41
	CP II	3149,74	3305,53	2023,39	2,80			
	CP III	3164,82	3330,14	2025,79	2,78			
	CP IV	3206,02	3364,49	2050,58	2,77			
	CP V	3188,28	3339,39	2043,50	2,79			

Fonte: O autor (2021).

Tabela A4 – Resistência à compressão

Traço	Amostra	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V. (%)
B0_0,30	CP I	100,00	200,00	82,86	10,55	10,31	1,48	14,34
	CP II	99,90	193,40	92,01	11,74			
	CP III	99,90	197,20	61,16	7,80			
	CP IV	99,30	199,50	83,30	10,76			
	CP V	100,00	200,10	84,06	10,70			
B1_0,30	CP I	100,00	196,20	81,46	10,37	10,72	1,52	14,16
	CP II	100,00	197,80	98,74	12,57			
	CP III	100,00	201,00	88,19	11,23			
	CP IV	98,40	197,00	83,83	11,02			
	CP V	99,10	201,00	64,90	8,41			
BM_0,30	CP I	100,50	199,50	115,37	14,54	13,61	1,35	9,92
	CP II	100,20	200,30	88,74	11,25			
	CP III	100,10	197,10	111,97	14,23			
	CP IV	100,80	200,00	114,13	14,30			
	CP V	100,60	199,00	109,27	13,75			
B0_0,35	CP I	99,30	198,20	106,80	13,79	12,88	1,00	7,80
	CP II	100,20	195,00	100,48	12,74			
	CP III	100,00	196,60	92,79	11,81			
	CP IV	100,70	197,60	95,87	12,04			
	CP V	100,20	193,70	110,70	14,04			
B1_0,35	CP I	100,30	198,50	133,68	16,92	16,18	2,09	12,89
	CP II	99,90	197,00	118,95	15,18			
	CP III	100,90	200,10	105,14	13,15			
	CP IV	99,80	199,30	133,36	17,05			
	CP V	99,70	198,20	145,30	18,61			
BM_0,35	CP I	99,80	199,30	134,23	17,16	18,25	1,11	6,10
	CP II	99,60	198,50	143,27	18,39			
	CP III	100,00	200,70	138,42	17,62			
	CP IV	99,90	196,00	157,26	20,06			
	CP V	100,00	198,30	141,32	17,99			

Fonte: O autor (2021).

Tabela A5 – Resistência à tração

Traço	Amostra	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V. (%)
B0_0,30	CP I	100,00	202,70	41580,41	1,306	1,48	0,11	7,14
	CP II	99,40	200,00	49327,70	1,580			
	CP III	100,50	201,50	48248,96	1,517			
	CP IV	100,40	202,90	49229,63	1,538			
	CP V	100,50	201,80	47170,23	1,481			
B1_0,30	CP I	97,00	206,00	51289,04	1,63	1,39	0,27	19,78
	CP II	100,00	209,00	45993,42	1,40			
	CP III	99,00	203,80	37559,66	1,19			
	CP IV	99,70	194,70	50896,77	1,67			
	CP V	99,00	204,00	33048,58	1,04			
BM_0,30	CP I	100,00	204,80	51485,18	1,60	1,66	0,22	13,15
	CP II	100,20	201,40	58447,93	1,84			
	CP III	100,50	204,20	50798,71	1,58			
	CP IV	100,00	204,70	61586,08	1,92			
	CP V	100,50	200,20	43443,68	1,37			
B0_0,35	CP I	100,00	202,00	52760,05	1,66	1,63	0,09	5,83
	CP II	100,10	200,70	49818,04	1,58			
	CP III	100,50	203,50	47856,70	1,49			
	CP IV	99,30	202,30	54819,45	1,74			
	CP V	100,00	201,50	52661,98	1,66			
B1_0,35	CP I	100,30	206,00	68744,97	2,12	1,83	0,17	9,20
	CP II	100,00	207,00	55113,65	1,69			
	CP III	99,00	201,00	55702,06	1,78			
	CP IV	100,20	210,00	60605,41	1,83			
	CP V	100,30	205,50	55996,26	1,73			
BM_0,35	CP I	99,50	204,40	51092,91	1,60	2,05	0,42	20,57
	CP II	100,80	205,00	52073,58	1,60			
	CP III	100,40	203,00	79826,54	2,49			
	CP IV	98,80	201,60	73648,32	2,35			
	CP V	98,30	205,00	69235,30	2,19			

Fonte: O autor (2021).

Tabela A6 – Dados para cálculo do coeficiente de permeabilidade e fluxo

Traço	Amostra	a (cm ²)	H (cm)	A (cm ²)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t _{med} (s)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)
B0_0,30	CP I	73,90	20,27	78,54	3,71	3,39	3,66	3,59	25,00	10,00
	CP II	73,90	20,00	77,60	3,10	3,03	3,05	3,06	25,00	10,00
	CP III	73,90	20,15	79,33	3,44	3,61	3,62	3,56	25,00	10,00
	CP IV	73,90	20,29	79,17	3,44	3,47	3,32	3,41	25,00	10,00
	CP V	73,90	20,18	79,33	3,77	3,52	3,61	3,63	25,00	10,00
B1_0,30	CP I	73,90	20,60	73,90	2,30	2,47	2,29	2,35	25,00	10,00
	CP II	73,90	20,90	78,54	2,48	2,64	2,73	2,62	25,00	10,00
	CP III	73,90	20,38	76,98	2,59	2,42	2,38	2,46	25,00	10,00
	CP IV	73,90	19,47	78,07	2,21	2,08	2,14	2,14	25,00	10,00
	CP V	73,90	20,40	76,98	2,74	2,66	2,76	2,72	25,00	10,00
BM_0,30	CP I	73,90	20,48	78,54	3,51	3,74	3,65	3,63	25,00	10,00
	CP II	73,90	20,14	78,85	3,56	3,32	3,66	3,51	25,00	10,00
	CP III	73,90	20,42	79,33	3,21	3,25	3,39	3,28	25,00	10,00
	CP IV	73,90	20,47	78,54	3,03	3,04	3,06	3,04	25,00	10,00
	CP V	73,90	20,02	79,33	3,39	3,44	3,42	3,42	25,00	10,00
B0_0,35	CP I	73,90	20,20	78,54	4,34	4,46	4,36	4,39	25,00	10,00
	CP II	73,90	20,07	78,70	3,87	3,91	3,69	3,82	25,00	10,00
	CP III	73,90	20,35	79,33	3,64	3,76	3,84	3,75	25,00	10,00
	CP IV	73,90	20,23	77,44	4,09	4,14	4,22	4,15	25,00	10,00
	CP V	73,90	20,15	78,54	4,67	4,84	4,20	4,57	25,00	10,00
B1_0,35	CP I	73,90	20,60	79,01	3,21	3,29	3,19	3,23	25,00	10,00
	CP II	73,90	20,70	78,54	3,34	3,24	3,27	3,28	25,00	10,00
	CP III	73,90	20,10	76,98	2,71	2,72	2,85	2,76	25,00	10,00
	CP IV	73,90	21,00	78,85	3,86	3,94	4,10	3,97	25,00	10,00
	CP V	73,90	20,55	79,01	2,77	2,84	2,90	2,84	25,00	10,00
BM_0,35	CP I	73,90	20,44	77,76	3,27	3,19	3,49	3,32	25,00	10,00
	CP II	73,90	20,50	79,80	3,91	4,13	4,29	4,11	25,00	10,00
	CP III	73,90	20,30	79,17	4,81	4,65	4,74	4,73	25,00	10,00
	CP IV	73,90	20,16	76,67	4,74	4,28	4,97	4,66	25,00	10,00
	CP V	73,90	20,50	75,89	4,84	4,56	4,56	4,65	25,00	10,00

Fonte: O autor (2021).

Tabela A7 – Coeficiente de permeabilidade

Traço	Amostra	k (cm/s)	Média k (cm/s)	Desvio Padrão (cm/s)	C.V. (%)
B0_0,30	CP I	4,872	5,048	0,388	7,678
	CP II	5,703			
	CP III	4,836			
	CP IV	5,089			
	CP V	4,741			
B1_0,30	CP I	8,021	7,332	0,615	8,394
	CP II	6,886			
	CP III	7,278			
	CP IV	7,879			
	CP V	6,597			
BM_0,30	CP I	4,860	5,178	0,387	7,482
	CP II	4,922			
	CP III	5,309			
	CP IV	5,799			
	CP V	5,002			
B0_0,35	CP I	3,970	4,237	0,353	8,338
	CP II	4,517			
	CP III	4,636			
	CP IV	4,262			
	CP V	3,801			
B1_0,35	CP I	5,466	5,612	0,737	13,139
	CP II	5,435			
	CP III	6,406			
	CP IV	4,546			
	CP V	6,208			
BM_0,35	CP I	5,367	4,203	0,683	16,239
	CP II	4,232			
	CP III	3,668			
	CP IV	3,818			
	CP V	3,931			

Fonte: O autor (2021).

Tabela A8 - Fluxo

Traço	Amostra	Fluxo (l/min/m ²)	Média Fluxo (l/min/m ²)	Desvio Padrão (l/min/m ²)	CV (%)
B0_0,30	CP I	2360,99	2458,047	199,862	8,131
	CP II	2800,86			
	CP III	2357,28			
	CP IV	2463,57			
	CP V	2307,54			
B1_0,30	CP I	3824,36	3543,847	351,871	9,929
	CP II	3236,22			
	CP III	3507,46			
	CP IV	3974,71			
	CP V	3176,48			
BM_0,30	CP I	2330,67	2504,245	175,538	7,010
	CP II	2400,66			
	CP III	2553,52			
	CP IV	2782,51			
	CP V	2453,87			
B0_0,35	CP I	1930,42	2060,186	168,787	8,193
	CP II	2210,42			
	CP III	2237,74			
	CP IV	2069,38			
	CP V	1852,98			
B1_0,35	CP I	2606,04	2681,861	389,780	14,534
	CP II	2579,12			
	CP III	3130,45			
	CP IV	2126,30			
	CP V	2967,40			
BM_0,35	CP I	2578,92	2025,014	322,743	15,938
	CP II	2027,79			
	CP III	1774,81			
	CP IV	1860,27			
	CP V	1883,28			

Fonte: O autor (2021).

ANEXO B - TABELAS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela B1 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para o índice de vazios

TRAÇO	VAZIOS (%)	p-valor Shapiro-Wilk	p-valor ANOVA
B0030	14,0131	0,3354	1,39E-09
B0030	14,5219		
B0030	14,4947		
B0030	14,4000		
B0030	14,6660		
B1030	11,9728	0,2653	
B1030	12,0537		
B1030	12,1664		
B1030	11,5403		
B1030	11,9452		
BM030	13,3537	0,3048	
BM030	13,0008		
BM030	13,0778		
BM030	12,4227		
BM030	12,4384		
B0035	13,6780	0,1262	
B0035	13,0760		
B0035	13,0015		
B0035	13,0058		
B0035	13,4656		
B1035	11,5738	0,1543	
B1035	11,5804		
B1035	11,6231		
B1035	11,4547		
B1035	11,9566		
BM035	12,2387	0,8695	
BM035	12,1508		
BM035	12,6745		
BM035	12,0609		
BM035	11,6607		

Fonte: O autor (2021).

Tabela B2 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para a absorção de água

TRAÇO	ABSORÇÃO (%)	p-valor Shapiro-Wilk	p-valor ANOVA
B0030	5,7447	0,3687	6,67E-12
B0030	5,9419		
B0030	5,9454		
B0030	5,8587		
B0030	5,9870		
B1030	4,7202	0,0611	
B1030	4,7361		
B1030	4,7892		
B1030	4,5247		
B1030	4,7264		
BM030	5,3951	0,2158	
BM030	5,2682		
BM030	5,2775		
BM030	4,9553		
BM030	4,9754		
B0035	5,5807	0,1399	
B0035	5,2784		
B0035	5,2435		
B0035	5,2490		
B0035	5,4562		
B1035	4,8545	0,2155	
B1035	4,6207		
B1035	4,6545		
B1035	4,6008		
B1035	4,8074		
BM035	4,9779	0,5189	
BM035	4,9461		
BM035	5,2237		
BM035	4,9429		
BM035	4,7395		

Fonte: O autor (2021).

Tabela B3 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis para a resistência à compressão

TRAÇO	RESISTENCIA (MPa)	p-valor Shapiro-Wilk	p-valor Kruskal-Wallis
B0030	10,55	0,1043	0,0002
B0030	11,74		
B0030	7,80		
B0030	10,76		
B0030	10,70		
B1030	10,37	0,7880	
B1030	12,57		
B1030	11,23		
B1030	11,02		
B1030	8,41		
BM030	14,54	0,0217	
BM030	11,25		
BM030	14,23		
BM030	14,30		
BM030	13,75		
B0035	13,79	0,3935	
B0035	12,74		
B0035	11,81		
B0035	12,04		
B0035	14,04		
B1035	16,92	0,7894	
B1035	15,18		
B1035	13,15		
B1035	17,05		
B1035	18,61		
BM035	17,16	0,4243	
BM035	18,39		
BM035	17,62		
BM035	20,06		
BM035	17,99		

Fonte: O autor (2021).

Tabela B4 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para a resistência à tração

TRAÇO	RESISTENCIA (MPa)	p-valor Shapiro-Wilk	p-valor ANOVA
B0030	1,306	0,2081	0,0032
B0030	1,580		
B0030	1,517		
B0030	1,538		
B0030	1,481		
B1030	1,63	0,5497	
B1030	1,40		
B1030	1,19		
B1030	1,67		
B1030	1,04		
BM030	1,60	0,7029	
BM030	1,84		
BM030	1,58		
BM030	1,92		
BM030	1,37		
B0035	1,66	0,7915	
B0035	1,58		
B0035	1,49		
B0035	1,74		
B0035	1,66		
B1035	2,12	0,1313	
B1035	1,69		
B1035	1,78		
B1035	1,83		
B1035	1,73		
BM035	1,60	0,1729	
BM035	1,60		
BM035	2,49		
BM035	2,35		
BM035	2,19		

Fonte: O autor (2021).

Tabela B5 - Resultado do teste de Shapiro-Wilk e ANOVA para a permeabilidade

TRAÇO	PERMEABILIDADE (l/min/m ²)	p-valor Shapiro-Wilk	p-valor ANOVA
B0030	2360,9944	0,0576	1,11E-07
B0030	2800,8625		
B0030	2357,2774		
B0030	2463,5658		
B0030	2307,5367		
B1030	3824,3626	0,4868	
B1030	3236,2166		
B1030	3507,4574		
B1030	3974,7145		
B1030	3176,4841		
BM030	2330,6697	0,5464	
BM030	2400,6629		
BM030	2553,5177		
BM030	2782,5082		
BM030	2453,8683		
B0035	1930,4179	0,5125	
B0035	2210,4244		
B0035	2237,7357		
B0035	2069,3759		
B0035	1852,9759		
B1035	2606,0431	0,7602	
B1035	2579,1168		
B1035	3130,4481		
B1035	2126,3014		
B1035	2967,3980		
BM035	2578,9207	0,0712	
BM035	2027,7905		
BM035	1774,8083		
BM035	1860,2685		
BM035	1883,2795		

Fonte: O autor (2021).