



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

RAEL ERNANI WOJAHN

**INFLUÊNCIA DAS CAMADAS QUE COMPÕEM A
ESTRUTURA DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE
BLOCOS DE CONCRETO PERMEÁVEL RELATIVO À
PERMEABILIDADE E REMOÇÃO DE CONTAMINANTES**

Londrina
2021

RAEL ERNANI WOJAHN

**INFLUÊNCIA DAS CAMADAS QUE COMPÕEM A
ESTRUTURA DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE
BLOCOS DE CONCRETO PERMEÁVEL RELATIVO À
PERMEABILIDADE E REMOÇÃO DE CONTAMINANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Berenice Martins Toralles

Londrina
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

W874i Wojahn, Rael Ernani.

Influência das camadas que compõem a estrutura de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável relativo à permeabilidade e remoção de contaminantes / Rael Ernani Wojahn. – Londrina, 2021.
196 p.

Orientadora: Berenice Martins Toralles

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Permeabilidade. 2. Pavimentos permeáveis. 3. Materiais granulares.
4. Estrutura permeável. 5. Qualidade da água. I. Toralles, Berenice Martins.
II. Título.

RAEL ERNANI WOJAHN

**INFLUÊNCIA DAS CAMADAS QUE COMPÕEM A
ESTRUTURA DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE
BLOCOS DE CONCRETO PERMEÁVEL RELATIVO À
PERMEABILIDADE E REMOÇÃO DE CONTAMINANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Profa. Dra. Berenice Martins
Torales
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Generoso de Angelis Neto
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Londrina, 17 de dezembro de 2021

Dedico este trabalho a minha amada família.
Somente com o apoio deles, descobri que a fé,
a esperança e o amor, fazem o homem ser
sonhador.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais Rui e Janira por todo amor, carinho, incentivo e compreensão na realização deste mestrado e ao meu irmão Gabriel por todas as vezes que esteve ao meu lado. Agradeço também aos demais familiares que me deram força e motivação para atingir este objetivo.

Agradeço, em particular, a minha orientadora professora Berenice Martins Toralles, por toda a contribuição e todo suporte que me deu, não só nesse trabalho, mas ao longo de toda a trajetória na pós-graduação. Agradeço também ao professor Rinaldo Pinheiro e ao professor Generoso Neto por terem aceitado o convite para compor a banca e por todas as suas sugestões e contribuições.

Agradeço à equipe do Laboratório de Saneamento, em especial a professora Deize Dias, a doutoranda Ana Carolina Figueiredo e a mestranda Marisa Morita, por terem me recebido e me auxiliado na realização dos ensaios de análise de água.

Deixo aqui meus agradecimentos ao pessoal do Laboratório de Geotecnia, em especial a professora Raquel Teixeira e ao técnico William Lemos, pelo empréstimo dos equipamentos que utilizei no decorrer do meu trabalho.

Sou imensamente grato a empresa Bloco Ville pela parceria e pelo fornecimento dos materiais utilizados na presente pesquisa.

Agradeço ao pessoal do Núcleo de Desenvolvimento, em especial, ao David e ao Gérsson, por toda a ajuda, contribuições e conselhos que me deram durante este período de mestrado.

Sou muito grato por todos os amigos que fiz aqui durante nesta trajetória, em especial, ao Vitor, Thiago Louro e Thiago Neri.

Por fim, deixo meu agradecimento a CAPES pelo período de um ano de suporte financeiro recebido através da bolsa.

“É o grau de comprometimento que determina
o sucesso, não o número de seguidores”.

Remo Lupin

RESUMO

A impermeabilização do solo devido ao aumento da urbanização vem causando grandes problemas ambientais e tem contribuído para catástrofes hídricas através do aumento de inundações, que são conseqüentes do escoamento ineficiente das águas pluviais. Além disso, as mudanças radicais do ciclo hidrológico, trazem sérias conseqüências ambientais e sociais, o que agrava ainda mais o problema, tornando-o insustentável à longo prazo. Desta forma, é imprescindível o estudo de novos materiais a fim de obter uma resposta à essa problemática. O pavimento de concreto permeável é considerado um material de construção sustentável, uma vez que possui a capacidade de reduzir o escoamento das águas pluviais, melhorando a qualidade da água de recarga do lençol freático e reduzindo os impactos causados pela impermeabilização do solo. Assim, os pavimentos de concreto permeável assumem o papel de medida mitigadora do escoamento superficial, com principal atuação na diminuição dos picos de cheia. Considerando as poucas aplicações dos pavimentos permeáveis no Brasil, diversos autores vêm estudando estes materiais. No entanto, verificou-se a ausência de estudos relacionadas à estrutura de pavimentos de concreto permeável. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo verificar a influência das camadas que compõem a estrutura de pavimentos intertravados de concreto permeável através de ensaios realizados em corpos de prova. O trabalho foi dividido em três etapas, Estudo I, Estudo II e Estudo III. De posse dos resultados, verificou-se que a permeabilidade, a quantidade de água retida na estrutura e a capacidade de remoção de contaminantes contidos na água foram diretamente influenciadas pelo tipo de material, bem como pela estrutura utilizada. A permeabilidade das estruturas variou de 0,09 a 0,23 mm/s, enquanto que a quantidade de água retida no interior das camadas variou de 0,02 a 0,19 L. As estruturas compostas por três camadas (revestimento/assentamento/base) contendo materiais de granulometria descontínua apresentaram maior permeabilidade e menor quantidade de água em seu interior. Já as estruturas constituídas por quatro camadas (revestimento/assentamento/base/sub-base), obtiveram uma melhora na qualidade da água, possuindo uma significativa capacidade de remover contaminantes contidos na água. A partir dos resultados encontrados, foi possível determinar que, a estrutura composta por assentamento de areia fina e base de brita 1, é a mais indicada para ser utilizada em pavimentação com blocos de concreto permeável cujo objetivo é diminuir o escoamento superficial. Por outro lado, quando o objetivo for diminuir a concentração de poluentes e contaminantes contidos na água, a estrutura mais recomendada para ser utilizada é a que utiliza assentamento de areia fina, base de pó de pedra e sub-base de brita 1. A escolha dos materiais que irão compor uma obra de pavimentação permeável deve levar em consideração seu desempenho e sua disponibilidade, enquanto que a escolha da estrutura deve levar em consideração o objetivo da implantação do pavimento permeável, devendo ser consideradas as características do local.

Palavras-chave: Permeabilidade. Pavimentos permeáveis. Materiais granulares. Estrutura permeável. Qualidade da água.

ABSTRACT

The waterproofing of the soil due to increased urbanization has been causing many environmental problems and has contributed to water catastrophes through increased flooding, which is a consequence of inefficient rainwater runoff. Moreover, the radical changes in the hydrological cycle bring serious environmental and social consequences, which further aggravate the problem, making it unsustainable in the long term. Thus, it is essential to study new materials in order to obtain an answer to this problem. The permeable concrete pavement is considered a sustainable building material, since it has the ability to reduce rainwater runoff, improve the quality of groundwater recharge and reduce the impacts caused by soil sealing. Thereby, permeable concrete pavement assumes the role of a runoff mitigation measure, mainly reducing flood peaks. Considering the few applications of permeable pavements in Brazil, several authors have studied these materials. However, there is an absence of studies related to the structure of permeable concrete pavement. Therefore, the present work aims to verify the influence of the layers that make up the structure of permeable concrete interlocked pavement through tests performed on specimens. The work was divided into three stages, Study I, Study II and Study III. The results showed that the permeability, the amount of water retained in the structure, and the ability to remove contaminants contained in the water were directly influenced by the type of material, as well as, the structure used. The permeability of the structures ranged from 0.09 to 0.23 mm/s, while the amount of water retained within the layers ranged from 0.02 to 0.19 L. The structures composed of three layers (coating/settlement/base) containing materials of discontinuous granulometry showed higher permeability and less water in their interior. However, the structures consisting of four layers (coating/settlement/base/sub-base), on the other hand, obtained an improvement in water quality, possessing a significant capacity to remove contaminants contained in the water. From the results found, it was possible to determine that the structure composed of fine sand and gravel 1 base is the most suitable to use in paving with permeable concrete blocks, which objective is to reduce surface runoff. On the other hand, when the objective is to decrease the concentration of pollutants and contaminants contained in the water, the most recommended structure to be used is the one that uses fine sand laying, stone powder base and gravel 1 sub-base. The choice of materials that will compose a permeable paving work must take into consideration their performance and availability, while the choice of structure must take into consideration the objective of the permeable paving implementation, and also the characteristics of the site must be considered.

Keywords: Permeability. Permeable pavement. Granular materials. Permeable structure. Water quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de um bloco de concreto permeável	29
Figura 2 – Diferença entre um pavimento tradicional e um pavimento de concreto permeável durante um evento de precipitação	44
Figura 3 – Estrutura comumente utilizada para pavimentos intertravados de concreto permeável	47
Figura 4 – Exemplos de pavimentos intertravados de concreto permeável	48
Figura 5 – Tipos de intertravamento das peças	50
Figura 6 – Transferência do carregamento vertical	50
Figura 7 – Configurações de assentamento das peças de pavimentos intertravados de concreto	51
Figura 8 – Aplicações para pavimentos de concreto permeável	53
Figura 9 – Estrutura padrão de um projeto de pavimento com blocos de concreto permeável	58
Figura 10 – Exemplo de aplicação das peças de concreto com juntas alargadas	59
Figura 11 – Exemplo de aplicação das peças de concreto com áreas vazadas	60
Figura 12 – Exemplo de aplicação das peças de concreto permeável	61
Figura 13 – Exemplo de aplicação das placas de concreto permeável	61
Figura 14 – Exemplo de aplicação do pavimento de concreto permeável	62
Figura 15 – Manta geotêxtil não-tecido composta por filamentos de polipropileno	68
Figura 16 – Aplicação de manta geotêxtil em obra de pavimentação	68
Figura 17 – Exemplo de uma estrutura de pavimento permeável com sistema de infiltração total	70
Figura 18 – Exemplo de uma estrutura de pavimento permeável com sistema de infiltração parcial	71
Figura 19 – Exemplo de uma estrutura de pavimento permeável com sistema sem infiltração	72
Figura 20 – Estrutura de pavimento permeável utilizada pelos autores para determinação da permeabilidade da estrutura	78
Figura 21 – Estrutura de pavimento permeável utilizada pelos autores no trabalho	79

Figura 22 – Estrutura de pavimento permeável utilizada pelos autores no trabalho	79
Figura 23 – Fluxograma da metodologia adotada	82
Figura 24 – Bloco de concreto permeável utilizado	84
Figura 25 – Agregados graúdos utilizados	84
Figura 26 – Agregados miúdos utilizados	85
Figura 27 – Local de coleta da água e amostras coletadas	86
Figura 28 – Manta geotêxtil utilizada	87
Figura 29 – Passo I do procedimento de adaptação dos corpos de prova	88
Figura 30 – Passo II do procedimento de adaptação dos corpos de prova	89
Figura 31 – Anel de infiltração utilizado e ilustração do respectivo ensaio	90
Figura 32 – Fluxograma do Estudo I	91
Figura 33 – Realização dos ensaios de forma	93
Figura 34 – Realização dos ensaios hidráulicos dos blocos de concreto permeável	94
Figura 35 – Ensaio de resistência à compressão de um dos blocos de concreto permeável	95
Figura 36 – Realização dos ensaios físicos dos agregados graúdo e miúdo	98
Figura 37 – Equipamento utilizado no ensaio de abrasão Los Angeles	98
Figura 38 – Fluxograma do Estudo II	99
Figura 39 – Croquis das estruturas do pavimento testadas contendo três camadas	104
Figura 40 – Croquis das estruturas do pavimento testadas contendo quatro camadas	105
Figura 41 – Equipamentos e acessórios utilizados para compactação das camadas	106
Figura 42 – Metodologia de compactação da estrutura E.Ref	110
Figura 43 – Passo I do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova	110
Figura 44 – Passo II do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova	111
Figura 45 – Passo III do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova	111
Figura 46 – Passo IV do procedimento de montagem da estrutura do pavimento	

permeável no interior dos corpos de prova	112
Figura 47 – Passo V do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova	112
Figura 48 – Passo VI do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova	113
Figura 49 – Passo VII do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova	114
Figura 50 – Fluxograma do Estudo III	118
Figura 51 – Peagâmetro utilizado e procedimento de ensaio do pH	119
Figura 52 – Procedimentos realizados para determinação dos sólidos suspensos	120
Figura 53 – Turbidímetro utilizado e procedimento de ensaio da turbidez	121
Figura 54 – Condutivímetro utilizado e procedimento de ensaio da condutividade elétrica	122
Figura 55 – Procedimentos do ensaio de determinação da DQO	123
Figura 56 – Materiais e equipamentos utilizados no ensaio de determinação do ferro total	124
Figura 57 – Realização do ensaio de determinação do nitrogênio amoniacal	125
Figura 58 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos	132
Figura 59 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos	135
Figura 60 – Variação da permeabilidade dos corpos de prova ensaiados	138
Figura 61 – Variação do tempo de escoamento dos corpos de prova ensaiados..	142
Figura 62 – Variação da quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova ensaiados	143
Figura 63 – Variação do pH da água nos corpos de prova ensaiados	148
Figura 64 – Variação dos sólidos suspensos totais, sólidos suspensos fixos e sólidos suspensos voláteis da água nos corpos de prova ensaiados	150
Figura 65 – Variação da turbidez da água nos corpos de prova ensaiados	153
Figura 66 – Variação da condutividade elétrica da água nos corpos de prova ensaiados	155
Figura 67 – Variação da DQO da água nos corpos de prova ensaiados	157
Figura 68 – Variação do ferro total da água nos corpos de prova ensaiados	159
Figura 69 – Variação do nitrogênio amoniacal da água nos corpos de prova ensaiados	161

Figura 70 – Comparação entre a Amostra inicial e as águas coletadas dos corpos de prova ensaiados 163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de massa específica do concreto permeável encontrados na literatura	33
Tabela 2 – Diferentes resultados de porosidade do concreto permeável encontrados na literatura	35
Tabela 3 – Resultados encontrados na literatura sobre a permeabilidade de concretos permeáveis	38
Tabela 4 – Resultados de resistência à compressão encontrados na literatura para o concreto permeável	41
Tabela 5 – Resultados de resistência à tração na flexão encontrados na literatura para o concreto permeável	42
Tabela 6 – Lista de autores encontrados na literatura que realizaram trabalhos sobre a capacidade da estrutura de pavimentos permeáveis de remover contaminantes da água	75
Tabela 7 – Resultados encontrados pelos autores citados anteriormente em seus trabalhos sobre a capacidade da estrutura de pavimentos permeáveis de remover contaminantes da água	76
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de calibração	109
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de forma encontrados a partir dos blocos ensaiados	128
Tabela 10 – Resultados dos ensaios físicos dos blocos de concreto permeável...	128
Tabela 11 – Resultados dos ensaios hidráulicos dos blocos de concreto permeável	129
Tabela 12 – Resultados do ensaio mecânico dos blocos de concreto permeável	129
Tabela 13 – Análise granulométrica da brita 1	131
Tabela 14 – Análise granulométrica da brita 0	131
Tabela 15 – Resultados do ensaio de material pulverulento dos agregados graúdos	132
Tabela 16 – Resultados dos ensaios físicos dos agregados graúdos	133
Tabela 17 – Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles	133
Tabela 18 – Análise granulométrica do pó de pedra	134
Tabela 19 – Análise granulométrica da areia média	134

Tabela 20 – Análise granulométrica da areia fina	135
Tabela 21 – Resultados do ensaio de material pulverulento dos agregados miúdos	136
Tabela 22 – Resultados dos ensaios físicos dos agregados miúdos	137
Tabela 23 – Resultados dos ensaios realizados	138
Tabela 24 – Resultados das análises de água	146
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de análise da água da Amostra inicial	147
Tabela 26 – Resultados dos ensaios de pH das amostras analisadas	148
Tabela 27 – Resultados dos ensaios de sólidos suspensos totais das amostras analisadas	150
Tabela 28 – Resultados dos ensaios de turbidez das amostras analisadas	152
Tabela 29 – Resultados dos ensaios de condutividade elétrica das amostras analisadas	155
Tabela 30 – Resultados dos ensaios de DQO das amostras analisadas	157
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de ferro total das amostras analisadas	159
Tabela 32 – Resultados dos ensaios de nitrogênio amoniacal das amostras analisadas	160

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Proporções típicas dos materiais constituintes do concreto permeável	30
Quadro 2 – Especificações hidráulicas do revestimento de concreto permeável para pavimentação	39
Quadro 3 – Especificações de resistência mecânica e espessura mínima do revestimento de concreto permeável para pavimentação	43
Quadro 4 – Elementos comumente utilizados na composição da estrutura de pavimentos permeáveis	57
Quadro 5 – Especificação para o material de assentamento	63
Quadro 6 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de assentamento	63
Quadro 7 – Especificações para o material da base e sub-base de pavimentos permeáveis	66
Quadro 8 – Distribuição granulométrica recomendada para a camada de base e sub-base de pavimentos permeáveis	66
Quadro 9 – Especificações para o material do subleito de pavimentos permeáveis	67
Quadro 10 – Faixa de valores de condutividade hidráulica para vários tipos de materiais	73
Quadro 11 – Ensaio de caracterização dos blocos de concreto permeável e seus respectivos procedimentos normativos utilizados	92
Quadro 12 – Ensaio de caracterização dos agregados graúdo e miúdo e seus respectivos procedimentos normativos utilizados	96
Quadro 13 – Ensaio de caracterização dos índices físicos dos agregados graúdo e miúdo e seus respectivos procedimentos normativos utilizados	97
Quadro 14 – Iniciais adotadas para identificação dos corpos de prova	101
Quadro 15 – Nomenclatura adotada para identificação dos corpos de prova	101
Quadro 16 – Planejamento experimental	103
Quadro 17 – Parâmetros analisados e seus respectivos procedimentos normativos	119

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Determinação da porosidade total	36
Equação 2 – Determinação da porosidade aberta	36
Equação 3 – Determinação da porosidade fechada	36
Equação 4 – Determinação da permeabilidade de pavimentos de concreto permeável descrita pela ASTM C1701	115
Equação 5 – Determinação da permeabilidade da estrutura do pavimento intertravado permeável simulada em corpos de prova utilizada neste trabalho	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABINT	Associação Brasileira das Indústrias de Não-tecidos e Tecidos Técnicos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANA	Agência Nacional de Águas
ANOVA	Analysis of variance
APHA	American Public Health Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Graus Celsius
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRMCA	Colorado Ready Mixed Concrete Association
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

ICPI	Interlocking Concrete Pavement Institute
ISO	International Organization for Standardization
K	Permeabilidade
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
pH	Potencial hidrogeniônico
PVC	Policloreto de vinila
$\mu\text{S/cm}$	Microsiemens por centímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA	25
1.3	HIPÓTESE	25
1.4	OBJETIVOS	25
1.4.1	Objetivo geral	25
1.4.2	Objetivos específicos	25
1.5	LIMITAÇÃO DA PESQUISA	26
1.6	CONTRIBUIÇÃO ESPERADA	26
1.7	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1	CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO	28
2.1.1	Materiais constituintes	29
2.1.2	Propriedades	31
2.1.2.1	Propriedades físicas	32
2.1.2.2	Propriedades hidráulicas	33
2.1.2.2.1	<i>Porosidade</i>	34
2.1.2.2.2	<i>Permeabilidade</i>	37
2.1.2.3	Propriedades mecânicas	39
2.2	PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL	44
2.2.1	Tipos de pavimentos permeáveis	45
2.2.1.1	Pavimento intertravado de blocos de concreto permeável	46
2.2.1.1.1	<i>Intertravamento</i>	48
2.2.2	Aplicações	52
2.2.3	Vantagens	53
2.2.4	Desvantagens	54
2.2.5	Requisitos para implantação de pavimentos de concreto permeável	55
2.3	ESTRUTURA DE PAVIMENTOS DE BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO PERMEÁVEL	56
2.3.1	Revestimento	58
2.3.1.1	Revestimento de peças de concreto com juntas alargadas	59

2.3.1.2	Revestimento de peças de concreto com áreas vazadas	60
2.3.1.3	Revestimento de peças de concreto permeável	60
2.3.1.4	Revestimento de placas de concreto permeável	61
2.3.1.5	Revestimento de pavimento de concreto permeável	61
2.3.2	Assentamento	62
2.3.3	Base e sub-base	64
2.3.4	Subleito	66
2.3.5	Manta geotêxtil	67
2.3.6	Interface entre camadas	69
2.3.7	Sistema de infiltração	69
2.3.7.1	Infiltração total	70
2.3.7.2	Infiltração parcial	70
2.3.7.3	Sem infiltração	71
2.3.8	Permeabilidade das camadas	72
2.4	REMOÇÃO DE CONTAMINANTES	73
2.5	TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA RELACIONADOS ESPECIFICAMENTE COM A METODOLOGIA ADOTADA	77
3	MATERIAIS E MÉTODOS	81
3.1	MATERIAIS	83
3.1.1	Blocos de concreto permeável	83
3.1.2	Agregados graúdos	84
3.1.3	Agregados miúdos	85
3.1.4	Água proveniente do escoamento superficial	85
3.1.5	Manta geotêxtil	86
3.1.6	Caixas de polietileno (corpos de prova)	87
3.1.7	Anel de PVC	89
3.2	ESTUDO I	90
3.2.1	Blocos de concreto permeável	92
3.2.1.1	Ensaio de forma	92
3.2.1.2	Ensaio físico	93
3.2.1.3	Propriedades hidráulicas	93
3.2.1.4	Propriedades mecânicas	94
3.2.2	Agregados	95

3.2.2.1	Análise granulométrica	96
3.2.2.2	Material pulverulento	97
3.2.2.3	Índices físicos	97
3.2.2.4	Índices mecânicos – Abrasão Los Angeles	98
3.3	ESTUDO II	99
3.3.1	Planejamento experimental	100
3.3.1.1	Estruturação das camadas que compõem a estrutura de pavimento permeável	100
3.3.1.2	Nomenclatura adotada para os corpos de prova	101
3.3.1.3	Materiais e estruturas projetadas	102
3.3.2	Preparação dos corpos de prova	106
3.3.2.1	Compactação das camadas	106
3.3.2.1.1	<i>Massa unitária</i>	107
3.3.2.1.2	<i>Permeabilidade</i>	108
3.3.2.2	Montagem da estrutura no interior dos corpos de prova	110
3.3.3	Ensaio realizados nos corpos de prova	114
3.3.3.1	Ensaio de permeabilidade	114
3.3.3.2	Quantidade de água retida na estrutura do pavimento permeável	116
3.4	ESTUDO III	117
3.4.1	Potencial hidrogeniônico (pH)	119
3.4.2	Sólidos suspensos	120
3.4.3	Turbidez	121
3.4.4	Condutividade elétrica	122
3.4.5	Demanda química de oxigênio (DQO)	122
3.4.6	Ferro total	123
3.4.7	Nitrogênio amoniacal	124
3.5	ANÁLISES E CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS	125
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	127
4.1	ESTUDO I	127
4.1.1	Blocos de concreto permeável	127
4.1.1.1	Ensaio de forma	127
4.1.1.2	Ensaio físicos	128

4.1.1.3	Ensaio hidráulico	128
4.1.1.4	Ensaio mecânico	129
4.1.2	Agregados	130
4.1.2.1	Agregado graúdo	130
4.1.2.1.1	<i>Análise granulométrica</i>	130
4.1.2.1.2	<i>Material pulverulento</i>	132
4.1.2.1.3	<i>Índices físicos</i>	133
4.1.2.1.4	<i>Índices mecânicos – Abrasão Los Angeles</i>	133
4.1.2.2	Agregado miúdo	134
4.1.2.2.1	<i>Análise granulométrica</i>	134
4.1.2.2.2	<i>Material pulverulento</i>	136
4.1.2.2.3	<i>Índices físicos</i>	136
4.2	ESTUDO II	137
4.2.1	Permeabilidade	138
4.2.2	Tempo de escoamento	142
4.2.3	Quantidade de água retida no interior da estrutura	143
4.3	ESTUDO III	146
4.3.1	Análise da água	146
4.3.1.1	Amostra inicial	146
4.3.1.2	Potencial hidrogeniônico (pH)	147
4.3.1.3	Sólidos suspensos	149
4.3.1.4	Turbidez	152
4.3.1.5	Condutividade elétrica	154
4.3.1.6	Demanda química de oxigênio (DQO)	156
4.3.1.7	Ferro total	158
4.3.1.8	Nitrogênio amoniacal	160
4.3.1.9	Análise visual da água	162
5	CONCLUSÃO	165
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	167
	REFERÊNCIAS	168
	APÊNDICES	185

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, observa-se que a construção está em constante processo evolutivo. Buscam-se materiais mais avançados, com maior resistência, segurança, tecnologia e ecologicamente corretos. Em sua grande maioria, os materiais utilizados para pavimentação são materiais com baixa permeabilidade. Assim, a água não consegue ter um fluxo livre, ficando retida na superfície.

Desta forma, a impermeabilização do solo se apresenta como um dos principais resultados do crescimento urbano e têm contribuído para catástrofes hídricas através do aumento da velocidade de escoamento superficial e dos picos de cheia (CHOCAT, 1997; ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; LAMB, 2014; ANTUNES; GHISI; SEVERIS, 2020).

Com o aumento da urbanização, dentro do modelo de desenvolvimento vigente, ocorreu uma gradual impermeabilização do solo, devido à construção de edifícios com calçadas impermeáveis ligados por ruas pavimentadas. O crescimento urbano e a demanda por vias de tráfego asfaltadas e planas levaram à ocupação de grande parte da superfície das cidades com materiais impermeáveis, como o concreto asfáltico e o concreto de cimento Portland (HÖLTZ, 2011; OLIVEIRA, 2017). A utilização de materiais de construção com baixos coeficientes de permeabilidade resulta em mudanças radicais no ciclo hidrológico, facilitando a ocorrência de inundações e do escoamento ineficiente das águas pluviais (POTOCNIK, 2012; ANTUNES; GHISI; SEVERIS, 2020). Ao não ser corretamente drenada, a água pluvial traz sérias consequências ambientais e sociais, aumentando o risco de desabamentos, inundações, erosões e assoreamento das bacias de amortecimento de cheias, o que agrava ainda mais o problema tornando-o insustentável à longo prazo (ONO; BALBO; CARGNIN, 2017).

Com o objetivo de minimizar os efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, ou seja, aumentar a infiltração das águas pluviais, começaram a ser utilizados os pavimentos permeáveis, materiais considerados como uma das melhores práticas de gestão dos sistemas de drenagem urbana (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Estes materiais são capazes de promover a infiltração da água da chuva no pavimento e atuam como um retardador dos tempos de pico das cheias, agindo diretamente sobre o hidrograma da bacia local (ASCE, 1992; ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

A ABNT NBR 16416 (2015) define pavimentos permeáveis como sendo um tipo de pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura.

O uso de materiais permeáveis auxilia na diminuição dos impactos ocasionados pela impermeabilização, trazendo equilíbrio no ciclo hidrológico, que é alterado de maneira radical com os recobrimentos impermeáveis das grandes cidades, minimizando o risco de acidentes pelo fenômeno da hidroplanagem e das doenças que se derivam das enchentes, garantindo a segurança do meio (SANDOVAL, 2014).

De acordo com Batezini (2013), Lamb (2014) e Oliveira (2017), o pavimento de concreto permeável é uma técnica compensatória para a drenagem, já que é um elemento poroso, que permite a passagem de água e ar por suas camadas. A água que se infiltra neste pavimento pode ser reutilizada, quando captada, ou simplesmente absorvida pelo solo. No pavimento convencional ocorre o escoamento superficial das águas, enquanto que o pavimento permeável drena estas águas. A água fica entre os vazios do pavimento até que o solo tenha capacidade de absorção. A estrutura do pavimento deve ser dimensionada levando em consideração a intensidade da chuva na área e as características do solo, e ainda devem ser consideradas as condições de tráfego que o pavimento estará sujeito. O principal objetivo para o uso desse sistema é a redução do escoamento superficial mantendo a área útil do pavimento.

Considerando as poucas aplicações dos pavimentos permeáveis no Brasil, diversos autores vêm estudando estes materiais e suas proporções, métodos de dimensionamento e execução. No entanto, verificou-se a ausência de estudos sobre a estrutura dos pavimentos de concreto permeável, motivo o qual tornou-se o foco desta pesquisa.

Para que haja uma drenagem e um escoamento eficaz, é imprescindível que as camadas de sustentação do pavimento permeável sejam dimensionadas e funcionem adequadamente. Caso isto não ocorra, podem ocorrer problemas como erosão do material que compõem as camadas, acúmulo de água, afundamento do pavimento e colmatção. Através de um correto dimensionamento e escolha dos materiais com maiores eficiências, é possível apresentar uma solução

para problemas de inundações que ocorrem frequentemente em centros e vias urbanas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O crescimento populacional desordenado e a expansão cada vez mais significativas de áreas urbanizadas somados a falta de planejamento nos sistemas de drenagens urbanos, vem causando grandes problemas ambientais. Entre eles, destacam-se a diminuição da infiltração de água no solo, gerando um aumento do número de áreas impermeáveis e um sistema de escoamento ineficiente, que gera grandes problemas de inundações em centros e vias urbanas.

Como enfatizam Tennis; Leming; Akers (2004); Canholi (2005); Tucci (2007); Pinto (2011); Canholi (2013) e Antunes; Ghisi; Severis (2020), a frequência e gravidade das inundações, evidenciam a necessidade de procurar soluções alternativas estruturais e não estruturais, assim como, conhecer melhor a fenomenologia climatológica, ambiental, hidrológica e hidráulica do problema, além de seus componentes sociais com relação à habitação, saúde, saneamento e aspectos político institucionais.

Desta forma, a implantação de pavimentos de concreto permeável surge como uma alternativa eficaz a fim de realizar um escoamento em áreas que sofrem com problemas de enchentes. Por outro lado, a implantação de pavimentos de concreto permeável não terá nenhum efeito caso as camadas localizadas abaixo do revestimento não forem dimensionadas de forma a atenderem os requisitos para que auxiliem no escoamento e infiltração da água.

O presente trabalho justifica-se sob o argumento de que as camadas localizadas abaixo do pavimento de concreto permeável são extremamente importantes para um escoamento eficaz. É imprescindível a realização de um estudo a fim de verificar quais os tipos de materiais são mais eficientes para que haja um correto escoamento do fluxo, evitando problemas de impermeabilização das camadas.

Devido à ausência de pesquisas relacionadas à estrutura de pavimentos de concreto permeável, bem como o comportamento de cada uma dessas camadas e o desempenho dos diferentes materiais que podem compô-las, o presente trabalho visa contribuir para uma melhor compreensão da permeabilidade e da capacidade de remoção de contaminantes da estrutura permeável, verificando quais

os melhores materiais que devem ser utilizados, a fim de que os requisitos de escoamento, dimensionamento de fluxo e questões ambientais sejam atendidas.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

A estrutura e o tipo de material utilizado nas camadas de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável interferem na permeabilidade e na capacidade de remoção de contaminantes contidos na água?

1.3 HIPÓTESE

A partir da realização de ensaios na estrutura de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável simulada em corpos de prova, é possível determinar quais os materiais e as estruturas mais indicadas para serem utilizados em pavimentação com blocos de concreto permeável.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Verificar a influência das camadas que compõem a estrutura de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável através de ensaios realizados em corpos de prova.

1.4.2 Objetivos específicos

- i. Quantificar a permeabilidade de diferentes estruturas de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável;
- ii. Determinar a quantidade de água que ficou retida nas camadas da estrutura do pavimento;
- iii. Verificar se a estrutura do pavimento intertravado permeável possui a capacidade de remover contaminantes contidos na água.

1.5 LIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa tem como objetivo apenas o estudo das propriedades da estrutura de pavimentos permeáveis simulada em corpos de prova, não incluindo o estudo das mesmas propriedades em condições de campo.

Para o presente estudo, foi utilizado somente o sistema sem infiltração. Dessa forma, a pesquisa não contemplou os demais sistemas de infiltração existente de acordo com a ABNT NBR 16416 (2015).

Este estudo também se limita a trabalhar apenas com materiais de origem local. Desta forma, os agregados utilizados possuem composição basáltica, não englobando agregados compostos por outros tipos de rocha. O pavimento utilizado foi composto por blocos intertravados de concreto permeável, portanto, não contempla os demais tipos de pavimentos permeáveis classificados pela ABNT NBR 16416 (2015).

1.6 CONTRIBUIÇÃO ESPERADA

Através deste trabalho, espera-se determinar os materiais mais indicados para serem utilizados em cada uma das camadas da estrutura de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável, através de ensaios laboratoriais de caracterização tecnológica. Também espera-se contribuir para ampliar o conhecimento a respeito da permeabilidade no interior da estrutura dos pavimentos intertravados de blocos concreto permeável, bem como a capacidade da estrutura de remover contaminantes contidos na água.

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta uma introdução sobre a problemática da impermeabilização do solo e a utilização de pavimentos permeáveis para a drenagem urbana. Contempla ainda a justificativa para a realização do trabalho, questão de pesquisa, hipótese, objetivos, limitação da pesquisa, contribuição esperada e estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o concreto permeável aplicado para pavimentação. São apresentados os materiais constituintes,

as principais propriedades, os tipos de pavimentos permeáveis, a estrutura, os requisitos para implantação, sua contribuição para redução de contaminantes contidos na água e os trabalhos anteriormente realizados.

O capítulo 3 aborda os materiais e métodos utilizados para alcançar os objetivos propostos. A metodologia adotada foi dividida em três etapas: Estudo I, Estudo II e Estudo III.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos no Estudo I, no Estudo II e no Estudo III, juntamente com as discussões a respeito dos mesmos.

Por fim, no capítulo 5 são abordadas as conclusões a respeito do trabalho, juntamente com sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre pavimentos de concreto permeável e sua estrutura. Inicialmente é apresentada uma definição do concreto permeável, materiais constituintes e propriedades. Em seguida, é apresentada uma definição de pavimentos de concreto permeável, suas características, tipos, aplicações, vantagens, desvantagens e requisitos para implantação. Posteriormente, são apresentadas as estruturas utilizadas para pavimentos permeáveis e suas respectivas camadas. Por fim, são apresentados os trabalhos encontrados na literatura que serviram como base para a adoção da metodologia utilizada no presente trabalho.

2.1 CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO

O concreto permeável, conhecido também como concreto poroso, é um tipo especial de concreto utilizado principalmente para pavimentação, que possui vazios interconectados entre si que permitem a passagem da água e de outros fluidos através da sua superfície (FERGUSON, 2005; ACI 522R, 2010).

O grau de permeabilidade associado aos concretos permeáveis deve ser suficiente para permitir a passagem de todo fluxo resultante dos eventos de precipitação, reduzindo assim o escoamento superficial (ACI 522.1R, 2006; OBLA, 2010; LAMB, 2014).

O concreto permeável é considerado um material de construção sustentável, uma vez que reduz o escoamento das águas pluviais, melhora a qualidade da água de recarga do lençol freático e pode reduzir o impacto da urbanização (FERGUSON, 2005). Oliveira (2017) cita que o concreto permeável assume o papel de medida mitigadora do escoamento superficial, com principal atuação na diminuição dos picos de cheia.

A Figura 1 apresenta um exemplo de um bloco de concreto permeável.

Figura 1 – Exemplo de um bloco de concreto permeável



Fonte: CRMCA (2009)

2.1.1 Materiais constituintes

Os materiais usados para a fabricação do concreto permeável são os mesmos utilizados no concreto convencional. Contudo, para obtenção de um elevado índice de vazios, é indicada uma concentração maior de agregado graúdo e diminuição ou remoção total dos agregados miúdos (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI 522R, 2010)

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

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

Basicamente, a dosagem escolhida deve fornecer o cimento necessário para efetuar uma camada em volta dos agregados, fazendo com que os mesmos criem aderência entre si (KIA; HONG; CHEESEMAN, 2016).

As proporções típicas dos materiais constituintes do concreto permeável são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Proporções típicas dos materiais constituintes do concreto permeável

Material	Consumo/Proporção
Cimento Portland (Kg/m ³)	270 a 415
Agregado graúdo (Kg/m ³)	1.190 a 1.700
Relação água/cimento (a/c)	0,27 a 0,40
Traço (cimento/agregado graúdo)	1:4 a 1:4,5
Relação agregado graúdo/agregado miúdo	0 a 1:9

Fonte: Tennis; Leming; Akers (2004); ACI 522R (2010)

Pode-se observar no Quadro 1, que ocorre uma variação entre as dosagens que podem ser empregadas. Isto é decorrente do fato do concreto permeável ter requisitos específicos para a finalidade e local para o qual foi projetado, além da inexistência de um método universal aceito (KIA; HONG; CHEESEMAN, 2016).

O consumo de cimento no concreto permeável varia entre 270 kg/m³ a 415 kg/m³. Esta quantidade depende do tamanho do agregado graúdo, pois quanto menor for o agregado utilizado, maior é a quantidade de cimento necessária para envolver o grão. Um teor de cimento insuficiente pode resultar em ligações fracas entre os agregados, provocando uma resistência à compressão menor (OBLA, 2010; RISSON, 2017).

Verifica-se também que as relações água/cimento empregadas na produção do concreto permeável, 0,27 a 0,40, são baixas quando comparadas ao concreto convencional, que possuem relações água/cimento $\leq 0,45$ (ABNT NBR 6118, 2014), explicada pela ausência ou pouca quantidade de agregado miúdo presente nas misturas (RISSON, 2017).

De acordo com a NRMCA (2008), a eliminação do agregado miúdo diminui a superfície específica da mistura, provocando a diminuição do consumo de água de amassamento e a substancial redução do tempo de pega do concreto. Em vista disso, é comum o uso de aditivos retardadores e estabilizadores de absorção de água para equilibrar o processo, pois o aumento da quantidade de água no concreto permeável tem ocasionado perda significativa de durabilidade e resistência.

Em virtude da baixa relação de água/cimento, o material resultante geralmente é muito seco e de baixa trabalhabilidade. Assim, podem ser utilizados aditivos químicos plastificantes e/ou redutores de água de elevada efetividade, no intuito de melhorar a plasticidade do material para conseguir obter um maior tempo de trabalho para a mistura (ACI 522R, 2010; SANDOVAL, 2014).

2.1.2 Propriedades

Segundo Ospina; Erazo (2007), o concreto permeável deve ter granulometria adequada para garantir a abertura de poros que permitem a passagem de água pelo material, preferencialmente agregado graúdo com ausência parcial ou total de finos. Deve apresentar porosidade elevada, que é alcançada limitando-se o conteúdo de argamassa entre 20 e 30% e ocasionando resistências mais baixas do que o concreto tradicional.

As propriedades do concreto permeável dependem da granulometria, quantidade de cimento, relação água/cimento e quantidade de volume de vazios (AZAÑEDO; HELARD; MUÑOZ, 2007). A graduação do agregado é um dos fatores que interferem nas propriedades do concreto permeável, pois influencia a resistência e a permeabilidade, que são propriedades importantes para o desempenho do mesmo (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI 522.1R, 2006; OBLA, 2010; PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2011).

No estado fresco, o concreto permeável apresenta baixa trabalhabilidade quando comparado com o concreto convencional. O ensaio de abatimento do tronco de cone normalmente apresenta resultados menores que 20 mm, o que pode prejudicar a execução de elementos com geometrias sofisticadas e torna o ensaio dispensável (ACI 522.1R, 2006). O valor elevado do índice de vazios afeta diretamente as características de resistência mecânica do material no estado endurecido (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; LAMB, 2014).

De acordo com Oliveira (2017), a relação entre permeabilidade, porosidade e resistência é complexa, pois existe uma dispersão muito grande nos resultados encontrados na literatura técnica. Porém, a tendência geral é aumentar a permeabilidade com o aumento da porosidade, ocorrendo a diminuição da resistência.

Vidal (2014) explica que esta discrepância ocorre porque a permeabilidade não depende unicamente da porosidade, variando também com a

disposição, tamanho, forma, grau de conectividade e alinhamento dos poros existentes no concreto permeável. Por exemplo, concretos que apresentam o corrimento da pasta de cimento para a parte inferior do elemento, apresentam permeabilidade nula, apesar de possuírem uma porosidade muito alta, maior que 15%. Outro aspecto que pode influenciar também nos resultados é o método de análise da permeabilidade (KIA; HONG; CHEESEMAN, 2016).

Segundo Kia; Hong; Cheeseman (2016), a resistência do concreto permeável é inferior quando comparada com o concreto convencional. Seus valores são principalmente determinados pela porosidade total, que por sua vez, é influenciada por uma gama de variáveis, como o consumo de cimento, a relação água/cimento, as características dos agregados e a energia de compactação empregada. Em média, pode-se observar que a sua resistência diminui cerca de 3% a cada aumento de 1% no índice de vazios.

2.1.2.1 Propriedades físicas

A massa específica do concreto permeável pode ser considerada um parâmetro de controle. Ela depende das propriedades e das proporções dos materiais usados e também dos procedimentos de compactação. São comuns valores entre 1600 e 2000 kg/m³, enquanto que, no concreto convencional, os valores encontram-se entre 1600 e 2800 kg/m³ (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; OBLA, 2010; HÖLTZ, 2011; ABNT NBR 16416, 2015).

Para Batezini (2013), a massa específica, por ser uma propriedade de fácil obtenção, pode ser utilizada como parâmetro de dosagem e apresenta uma correlação com a porcentagem de vazios. Quanto maior for a massa específica, menor é a porcentagem de vazios nos concretos permeáveis, apresentando uma correlação linear entre as duas propriedades.

A Tabela 1 apresenta diversos resultados de massa específica do concreto permeável encontrados na literatura. A partir dos valores encontrados, observa-se que ocorrem variações nos resultados. Estas variações ocorrem, principalmente, em função do traço e da relação água/cimento utilizada por cada um dos autores.

Por outro lado, verifica-se que a grande maioria dos valores encontram-se inseridos no intervalo padrão estipulado por Tennis; Leming; Akers

(2004), que varia entre 1600 e 2000 kg/m³.

Tabela 1 - Resultados de massa específica do concreto permeável encontrados na literatura

Ano	Autor	Massa específica (kg/m ³)
2004	Tennis; Leming; Akers	1600 - 2000
2006	Schaefer <i>et al.</i>	1575 - 2210
2007	Wang; Salmon; Pincheira	1665 - 2098
2010	Chopra <i>et al.</i>	1631 - 2355
2010	Neptune; Putman	1704 - 1773
2010	Lian; Zhuge	1926 - 2248
2013	Batezini	1740 - 1950
2014	Kevern; Biddle; Cao	1840 - 1870
2014	Ibrahim <i>et al.</i>	1638 - 1875
2014	Nguyen <i>et al.</i>	2025
2015	Joshaghani <i>et al.</i>	1723 - 1901
2017	Risson	1781 - 1992
2019	Singh <i>et al.</i>	1860 - 1989
2020	Kant Sahdeo <i>et al.</i>	1880 - 2150
2020	Lederle; Shepard; Meza	1937
2020	Shah <i>et al.</i>	1600 - 2100
2020	Sandoval	1898 - 1910

Fonte: Autor

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o valor mínimo para a massa específica, especificado em projeto de pavimentos permeáveis, deve ser 1600 kg/m³, com tolerância no estado fresco e endurecido de 80 kg/m³.

2.1.2.2 Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas comumente avaliadas no concreto permeável são a porosidade (ou índice de vazios) e o coeficiente de permeabilidade. A seguir são descritos os valores típicos dessas propriedades juntamente com os métodos utilizados para suas determinações.

2.1.2.2.1 Porosidade

A porosidade característica do concreto permeável varia em função da proporção relativa de cada material constituinte da mistura, bem como do procedimento de compactação empregado (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; OBLA, 2010). Tennis; Leming; Akers (2004) e a ACI 522R (2010) citam que o concreto permeável geralmente apresenta um índice de vazios entre 15 e 30%.

O material é dito de baixa porosidade quando possui índice de vazios inferior a 15%, enquanto que um índice de vazios superior a 30% caracteriza um material altamente poroso (BATEZINI, 2013). Tennis; Leming; Akers (2004) e a ACI 522R (2010) sugerem que se utilizem índices de vazios na ordem de 20% para garantir bons valores de permeabilidade e resistência do concreto permeável.

A Tabela 2 apresenta diversos resultados de porosidade do concreto permeável encontrados na literatura. A partir dos valores encontrados, verifica-se que ocorrem variações entre os resultados. Estas variações ocorrem, principalmente, em razão do tipo de agregado utilizado, bem como, do traço utilizado.

Contudo, conclui-se que a grande maioria dos valores encontram-se inseridos no intervalo padrão estipulado por Tennis; Leming; Akers (2004) e pela ACI 522R (2010), que varia entre 15 e 30%.

Tabela 2 – Diferentes resultados de porosidade do concreto permeável encontrados na literatura

Ano	Autor	Porosidade (%)
2004	Tennis; Leming; Akers	15,0 - 25,0
2006	Schaefer <i>et al.</i>	11,2 - 33,6
2007	Wang; Salmon; Pincheira	17,0 - 32,0
2010	Neptune; Putman	16,0 - 28,5
2010	Lian; Zhuge	7,5 - 16,6
2010	Kevern; Wang; Schaefer	15,1 - 30,0
2011	Shu <i>et al.</i>	10,0 - 24,0
2013	Batezini	20,0 - 29,0
2013	Chen <i>et al.</i>	15,0 - 25,0
2014	Kevern; Biddle; Cao	23,1 - 27,2
2014	Ibrahim <i>et al.</i>	30,0 - 42,0
2014	Sandoval	31,47 - 36,44
2014	Nguyen <i>et al.</i>	17,2 - 19,2
2015	Torres; Hu; Ramos	17,98 - 31,34
2015	Joshaghani <i>et al.</i>	13,5 - 33,1
2016	Wu <i>et al.</i>	15,0 - 24,5
2017	Risson	24,0 - 33,0
2018	Chandrappa <i>et al.</i>	22,1 - 33,37
2019	Singh <i>et al.</i>	14,41 - 29,1
2019	Wang <i>et al.</i>	20,9 - 23,3
2019	Sandoval <i>et al.</i>	19,1 - 28,6
2020	Kant Sahdeo <i>et al.</i>	8,0 - 28,5
2020	Lederle; Shepard; Meza	29,5
2020	Sandoval	26,57

Fonte: Autor

Os estudos de Tennis; Leming; Akers (2004) demonstraram que um pavimento de 125 mm de espessura com 20% de vazios foi capaz de armazenar, em seus espaços vazios, 25 mm de precipitação oriunda de uma tempestade, quantidade que cobre a grande maioria dos eventos de chuva nos Estados Unidos.

De acordo com a ACI 522R (2010), é necessária uma porosidade de aproximadamente 15% para atingir uma percolação significativa. Para uma porosidade de 20 a 25%, o coeficiente de permeabilidade relatado é de aproximadamente 0,01 m/s.

Para determinação da porcentagem de vazios do concreto permeável, foi utilizado, no presente trabalho, o método volumétrico descrito a seguir.

O método de volumétrico utilizado por Batezini (2013) e Risson (2017) baseia-se no princípio de Arquimedes, onde a força exercida por um fluido sobre um corpo parcial ou totalmente submerso é igual ao peso do volume de líquido deslocado pelo corpo. Assim, através das Equações 1, 2 e 3, obtêm-se as porosidades aberta, fechada e total. A porosidade aberta é a responsável pela infiltração da água no concreto permeável e a porosidade total é a soma da porosidade aberta mais a porosidade fechada (KIM; LEE, 2010; RISSON, 2017).

$$P_{total}(\%) = \left(1 - \frac{W_3 - W_1}{V_1 \rho_w}\right) \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$P_{aberta}(\%) = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{V_1 \rho_w}\right) \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

$$P_{fechada}(\%) = A_{total}(\%) - A_{aberta}(\%) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

P_{total} = Porosidade total, em %;

P_{aberta} = Porosidade aberta, em %;

$P_{fechada}$ = Porosidade fechada, em %;

W_1 = Massa da amostra submersa, em kg;

W_2 = Massa da amostra saturada superfície seca, em kg;

W_3 = Massa da amostra seca em estufa, em kg;

V_1 = Volume da amostra, em m³;

ρ_w = Densidade da água, em kg/m³.

2.1.2.2.2 Permeabilidade

A permeabilidade é um dos parâmetros mais importantes do concreto permeável e pode ser definida como a taxa de infiltração da água através de sua estrutura (BATEZINI, 2013). Não há um consenso sobre valores típicos para a permeabilidade, uma vez que esta propriedade é influenciada por diversos outros parâmetros, como espessura do concreto, índice de vazios, relação cimento/agregado, traço e tipo de agregado utilizado.

A Tabela 3 apresenta vários resultados de permeabilidade do concreto permeável encontrados na literatura. A partir dos dados encontrados, observa-se a existência de variações entre os valores, com resultados estando entre 0,002 até 28,2 mm/s.

Tabela 3 – Resultados encontrados na literatura sobre a permeabilidade de concretos permeáveis

Ano	Autor	Permeabilidade (mm/s)
2004	Tennis; Leming; Akers	2,0 - 5,3
2006	Schaefer <i>et al.</i>	0,08 - 14,9
2006	Montes; Haselbach	0,14 - 11,9
2007	Bean; Hunt; Bidelspach	0,7 - 7,7
2007	Wang; Salmon; Pincheira	1,0 - 5,0
2010	Neptune; Putman	1,0 - 9,0
2010	Lian; Zhuge	3,98 - 12,64
2010	Kevern; Wang; Schaefer	0,6 - 10,4
2011	Shu <i>et al.</i>	0,6 - 2,0
2012	Kayhanian <i>et al.</i>	0,002 - 19,86
2013	Batezini	1,1 - 1,5
2014	Kevern; Biddle; Cao	3,1 - 11,9
2014	Ibrahim <i>et al.</i>	16,3 - 28,2
2014	Nguyen <i>et al.</i>	1,1
2014	Sandoval	1,52 - 2,77
2015	Torres; Hu; Ramos	4,2 - 16,9
2015	Joshaghani <i>et al.</i>	8,0 - 16,3
2017	Risson	7,0 - 14,0
2017	Ono; Balbo; Cargnin	3,85 - 6,15
2018	Chandrappa <i>et al.</i>	3,9 - 14,5
2018	Singh <i>et al.</i>	0,5 - 2,9
2019	Sandoval <i>et al.</i>	4,1 - 15,4
2019	Wang <i>et al.</i>	6,1 - 7,1
2019	Singh <i>et al.</i>	0,2 - 12,8
2020	Kant Sahdeo <i>et al.</i>	0,8 - 7,0
2020	Lederle; Shepard; Meza	8,8 - 17,6
2020	Hu <i>et al.</i>	3,85 - 16,67
2020	Sandoval	10,27

Fonte: Autor

De acordo com a FGSV (1998), a capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis na Alemanha deve ser maior ou igual a 270 l/s/ha, o que reporta a uma condutividade hidráulica de 0,027 mm/s.

A ABNT NBR 16416 (2015) estabelece que o pavimento permeável, independentemente do tipo de revestimento adotado, vide item 2.3.1, deve apresentar, quando recém-construído, um coeficiente de permeabilidade maior que 10^{-3} m/s. Este requisito deve ser avaliado em campo após a execução do pavimento pelo método descrito pela ASTM C1701 (2009).

O coeficiente de permeabilidade pode ser previamente avaliado em laboratório, podendo-se ensaiar apenas a camada de revestimento ou o revestimento juntamente com toda a estrutura do pavimento. O Quadro 2 apresenta as especificações que o revestimento do pavimento de concreto permeável deve cumprir.

Quadro 2 – Especificações hidráulicas do revestimento de concreto permeável para pavimentação

Tipo de revestimento	Método de ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído (m/s)
	Local de avaliação		
	Em laboratório	Em campo	
Peças de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	ASTM C1701 (2009)	ASTM C1701 (2009)	$> 10^{-3}$
Peça de concreto permeável	ABNT NBR 13292 (1995) ou ASTM C1701 (2009)		
Placa de concreto permeável			
Concreto permeável moldado no local			

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

2.1.2.3 Propriedades mecânicas

O índice de vazios, a proporção dos materiais constituintes, a relação cimento/agregado e o procedimento de compactação utilizado na produção do concreto permeável interferem significativamente nas suas propriedades mecânicas (ACI 522.1R, 2006).

Segundo a norma americana ACI 522R (2010), as misturas de concreto permeável tendem a desenvolver resistências mecânicas de compressão na faixa de 3,5 a 28 MPa, que são valores adequado para uma ampla gama de

aplicações. A mesma norma recomenda que se utilize concretos permeáveis com valores médios de resistência à compressão na faixa de 17 Mpa, para que se obtenha valores adequados de resistência, em conjunto com valores apropriados de permeabilidade.

Segundo Dierkes *et al.* (2002), de acordo com a norma alemã DIN 18501 (1982), a resistência média à compressão de blocos de concreto permeável para pavimentação deve ser de cerca de 45 MPa.

A Tabela 4 apresenta diversos resultados de resistência à compressão do concreto permeável encontrados na literatura. A partir dos valores encontrados, verifica-se uma certa variação entre os resultados. Porém, conclui-se que, a maior parte dos resultados vistos na literatura, encontram-se inseridos no intervalo padrão estipulado pela ACI 522R (2010), que varia entre 3,5 e 28 MPa.

Tabela 4 - Resultados de resistência à compressão encontrados na literatura para o concreto permeável

Ano	Autor	Resistência à compressão (MPa)
2004	Tennis; Leming; Akers	5,51 - 20,68
2006	Schaefer <i>et al.</i>	5,4 - 27,76
2007	Wang; Salmon; Pincheira	12,21 - 25,24
2009	Goede	9,2 - 11,5
2010	Neptune; Putman	11,0 - 20,0
2010	Lian; Zhuge	11,8 - 19,0
2010	Kevern; Wang; Schaefer	11,0 - 25,8
2013	Batezini	6,02 - 10,17
2013	Chen <i>et al.</i>	32,1 - 46,7
2014	Sandoval	3,5 - 19,9
2014	Kevern; Biddle; Cao	15,6 - 19,7
2014	Ibrahim <i>et al.</i>	1,06 - 6,95
2014	Nguyen <i>et al.</i>	28,6
2015	Torres; Hu; Ramos	3,2 - 18,6
2015	Joshaghani <i>et al.</i>	5,5 - 9,4
2016	Wu <i>et al.</i>	7,5 - 19,0
2017	Risson	5,0 - 14,0
2018	Chandrappa <i>et al.</i>	11,29 - 19,48
2019	Sandoval <i>et al.</i>	3,3 - 11,0
2019	Wang <i>et al.</i>	30,1 - 34,5
2019	Singh <i>et al.</i>	20,47 - 24,56
2020	Kant Sahdeo <i>et al.</i>	15,6 - 26,0
2020	Lederle; Shepard; Meza	10,96
2020	Shah <i>et al.</i>	12,26 - 15,76

Fonte: Autor

De acordo com a ACI 522R (2010), em concretos permeáveis, a resistência à tração na flexão geralmente varia entre 1,0 e 3,8 MPa.

A Tabela 5 apresenta diversos resultados de resistência à tração na flexão do concreto permeável encontrados na literatura. A partir dos valores

encontrados, observa-se uma variação entre os resultados encontrados. Por outro lado, conclui-se que, a grande maioria dos resultados vistos na literatura, encontram-se inseridos no intervalo padrão estipulado pela ACI 522R (2010), que varia entre 1,0 e 3,8 MPa.

Tabela 5 - Resultados de resistência à tração na flexão encontrados na literatura para o concreto permeável

Ano	Autor	Resistência à tração na flexão (MPa)
2004	Tennis; Leming; Akers	1,03 - 3,79
2006	Schaefer <i>et al.</i>	1,38 - 2,95
2007	Wang; Salmon; Pincheira	1,41 - 2,9
2010	Lian; Zhuge	1,5 - 3,0
2010	Kevern; Wang; Schaefer	1,45 - 3,0
2011	Shu <i>et al.</i>	2,2 - 3,1
2013	Batezini	1,6 - 2,52
2013	Chen <i>et al.</i>	4,2 - 7,4
2014	Kevern; Biddle; Cao	1,7 - 2,5
2014	Ibrahim <i>et al.</i>	0,5 - 2,2
2014	Nguyen <i>et al.</i>	4
2014	Sandoval	1,35 - 1,89
2015	Torres; Hu; Ramos	1,09 - 3,09
2015	Joshaghani <i>et al.</i>	1,6 - 2,1
2016	Wu <i>et al.</i>	1,1 - 1,9
2017	Risson	1,0 - 2,0
2018	Chandrappa <i>et al.</i>	1,87 - 2,89
2020	Kant Sahdeo <i>et al.</i>	2,14 - 2,9

Fonte: Autor

A norma brasileira que regulamenta os valores de resistência mecânica do concreto permeável para pavimentação é a ABNT NBR 16416 (2015). Por não possuir um procedimento normativo específico, os métodos de ensaio de resistência à compressão e tração na flexão do concreto permeável para pavimentação são baseados em normas utilizadas para concreto convencional e

adaptados para o concreto permeável, vide Quadro 3.

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), a resistência mecânica e espessura mínima do revestimento de concreto permeável para pavimentação deve cumprir as especificações apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações de resistência mecânica e espessura mínima do revestimento de concreto permeável para pavimentação

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio	
Peças de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35,0^a$	ABNT NBR 9781 (2013)	
	Tráfego leve	80,0			
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20,0^a$		
	Tráfego leve	80,0			
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0^b$		ABNT NBR 15805 (2015)
	Tráfego leve	80,0			
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142 (2010)	
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$		
a	determinação da resistência à compressão, conforme a ABNT NBR 9781 (2013)				
b	determinação da resistência à flexão, conforme a ABNT NBR 15805 (2015)				
c	determinação da resistência à tração na flexão, conforme a ABNT NBR 12142 (2010)				

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

De acordo com o Quadro 3, o ensaio de resistência à flexão é utilizado somente para pavimentação com placas de concreto permeável, enquanto que o ensaio de resistência à tração na flexão, é utilizado somente para concreto permeável moldado no local.

Assim, o concreto permeável possui uma resistência inferior à dos concretos convencionais, devido à sua alta porosidade. Em razão disto, seu uso é, muitas vezes, limitado a áreas de tráfego leve ou pouco intenso (BATEZINI, 2013; LAMB, 2014).

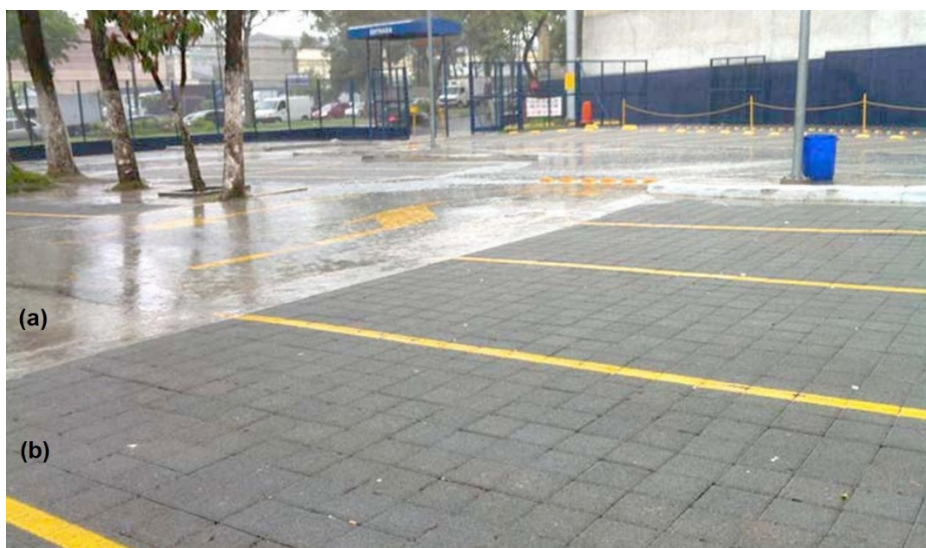
2.2 PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL

O termo pavimento aplica-se, de forma genérica, a qualquer tratamento ou cobertura da superfície que tem como finalidade suportar qualquer tipo de tráfego (VIRGILIIS, 2009).

Pavimento permeável se diferente de estrutura permeável. O pavimento permeável consiste em uma camada que possui vazios em sua estrutura, por onde a água pode escoar, e que, ao mesmo tempo, atende simultaneamente as solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento do tráfego. Os locais revestidos com pavimentos permeáveis devem permitir a percolação de 100% da água precipitada incidente sobre esta área, bem como 100% da precipitação incidente sobre áreas de contribuição. O pavimento permeável atua diminuindo o escoamento superficial de águas pluviais sem causar dano à estrutura. A estrutura permeável é composta pela combinação das camadas de revestimento permeável, camada de assentamento permeável (quando utilizada), base permeável e sub-base permeável (quando utilizada), dimensionadas para suportar concomitantemente as cargas do tráfego, distribuir os esforços mecânicos ao subleito e permitir a infiltração e/ou acúmulo temporário de água (FERGUSON, 2005; ABNT NBR 16416, 2015).

Na Figura 2 pode ser observada a diferença superficial entre um pavimento tradicional e um pavimento de concreto permeável durante um evento de precipitação.

Figura 2 – Diferença entre um pavimento tradicional (a) e um pavimento de concreto permeável (b) durante um evento de precipitação



Fonte: www.tecnosilbr.com.br (2020)

Dentre as características dos pavimentos permeáveis, as principais são a permeabilidade, que permite a infiltração da água pluvial no solo, e a textura rugosa, que eleva o coeficiente de atrito, reduzindo a velocidade de escoamento da água de chuva. Esse tipo de textura pode trazer benefícios relativos à segurança dos usuários. A permeabilidade do pavimento pode ser bastante efetiva na diminuição dos riscos de aquaplanagem. Isso ocorre porque a água proveniente das intempéries percola pelo revestimento permeável do pavimento, não permanecendo na sua superfície, o que evita a formação de empossamentos e diminui a ocorrência do fenômeno de spray. Tais propriedades são importantes para mitigar problemas de drenagem urbana (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; OLIVEIRA, 2017).

O pavimento permeável é considerado uma técnica compensatória na drenagem urbana, pois, o ponto principal quanto à sua utilização, é a grande melhoria para os impactos vistos durante as enxurradas urbanas, permitindo a infiltração direta para o subsolo. Este tipo de pavimento busca reduzir o volume de água referente ao escoamento superficial e, por consequência, reduzir a solicitação do sistema de drenagem urbana e a probabilidade de enchentes. Como efeitos complementares, tem-se a melhora da qualidade de água infiltrada por carrear menor quantidade de poluição difusa e a contribuição para a recarga do lençol freático (ASCE, 1992; FERGUSON, 2005; OLIVEIRA, 2017).

No Brasil, os requisitos mínimos exigidos ao projeto, especificação, execução e manutenção dos pavimentos de concreto permeável construídos com revestimentos de peças, placas ou concreto moldado no local, são prescritos pela ABNT NBR 16416 (2015).

2.2.1 Tipos de pavimentos permeáveis

Butler; Davies (2004) relatam que há algumas alternativas para a camada de superfície do pavimento, podendo consistir de uma variedade de tipos de blocos ou ser de uma camada de material permeável.

De acordo com Ferguson (2005); Scholz; Grabowiecki (2007) e Batezini (2013), existem três tipos de pavimentos permeáveis que são mais utilizados:

- Pavimento intertravado de blocos de concreto permeável: Os blocos podem ser permeáveis, permitindo que a água se infiltre através deles por meio de poros no material, ou impermeáveis, porém, dispostos de tal maneira que permitam

com que a água passe nas juntas formadas entre os blocos.

- Pavimento de concreto permeável: Este tipo de pavimento é constituído por concreto permeável moldado no local ou por placas de concreto permeável. As placas de concreto permeável diferem dos blocos de concreto permeável, apresentados no item anterior, por não apresentarem intertravamento (ABNT NBR 16416, 2015);

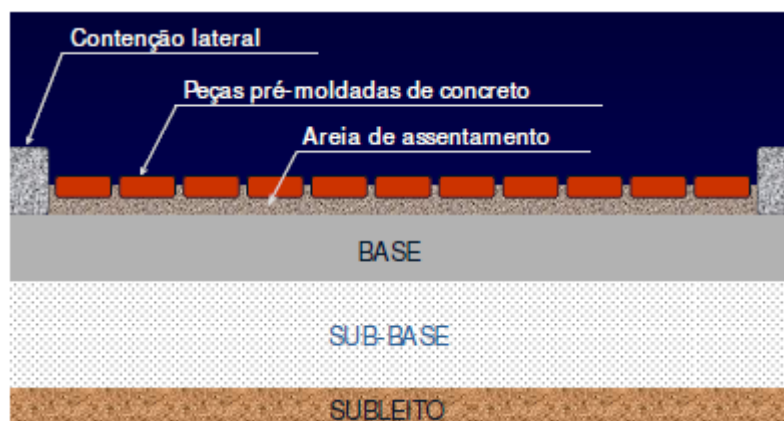
- Pavimento de asfalto poroso: A camada superior (revestimento asfáltico) é composta de forma similar aos pavimentos convencionais, porém, com a retirada de fração de finos da mistura dos agregados do pavimento. Assim, o pavimento de asfalto poroso é composto pela mistura entre ligante betuminoso e agregados de tamanho uniforme. Essa graduação resulta em uma mistura asfáltica que pode conter de 18 a 25% de vazios, permitindo uma rápida percolação da água (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; BERNUCCI *et al.*, 2006).

A escolha do tipo de pavimento a ser utilizado depende principalmente do lugar de aplicação, isto garante a qualidade e a durabilidade de um projeto (FEBESTRAL, 2005).

2.2.1.1 Pavimento intertravado de blocos de concreto permeável

A ABCP (2010a), a ABNT NBR 15953 (2011) e a ABCP (2013) definem o pavimento intertravado de blocos de concreto permeável como um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por uma camada de revestimento constituída de peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento. O intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção. Embora apresente o concreto como principal material do revestimento, o pavimento intertravado não é um pavimento rígido, mas sim, é considerado um pavimento flexível, devido ao modo como são distribuídas as tensões. A Figura 3 demonstra a composição típica da estrutura do pavimento intertravado de concreto permeável.

Figura 3 – Estrutura comumente utilizada para pavimentos intertravados de concreto permeável



Fonte: Adaptado de ABCP (2001)

O bloco de concreto mais utilizado em pavimentação é conhecido como *paver*, piso intertravado feito de concreto maciço, que além do baixo custo, possui a capacidade de permitir que a água escoe entre os espaços deixados entre uma peça a outra. Por sua vez, o bloco de concreto permeável possui superfície 100% drenante, onde a água percola pelos poros existentes por toda sua área, o que o torna ainda mais eficaz (BRASTON, 2015 apud IDALGO *et al.*, 2018).

Além da versatilidade do material, facilidade de estocagem e homogeneidade, Godinho (2009) ressalta, entre os principais benefícios dos pavimentos intertravados, estão a possibilidade de utilização imediata após a execução, reparação e acesso às instalações de serviços subterrâneas facilitados, fácil execução (não requer mão-de-obra altamente especializada e nem equipamentos complexos), além de permitirem a incorporação de sinalização horizontal, apresentando simultaneamente capacidade estrutural e valor paisagístico.

A permeabilidade dos blocos intertravados de concreto permeável depende das suas características de produção e da granulometria do material de assentamento, sendo que granulometrias mais abertas favorecem a infiltração. Contudo, a permeabilidade desse tipo de pavimento é menor em relação aos demais tipos de pavimentos permeáveis (MADRID, 2010; GONÇALVES; OLIVEIRA, 2014).

A Figura 4 ilustra dois exemplos de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável. A Figura 4a apresenta um estacionamento composto por blocos de concreto permeável onde a percolação ocorre pela estrutura dos blocos. Já a Figura 4b demonstra um estacionamento composto por blocos de concreto onde a percolação ocorre pelas juntas entre os blocos.

Figura 4 – Exemplos de pavimentos intertravados de concreto permeável. Em (a) estacionamento composto por blocos de concreto permeável e (b) estacionamento composto por blocos de concreto cuja percolação ocorre pelas juntas entre os blocos



Fonte: ABCP (2010b)

As peças de pavimento intertravado mais usuais são as retangulares. As dimensões geralmente são 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e a espessura varia de 6 a 10 cm. A taxa de aplicação é de 50 peças por metro quadrado. O intertravamento das peças de concreto ocorre por meio de areia nas juntas e pelo confinamento lateral da via, a fim de oferecer resistência ao deslocamento das peças sob a ação das cargas (ABCP, 2010b; SMITH, 2011).

O pavimento intertravado de concreto permeável é apresentado atualmente como uma solução que abrange duas questões essenciais, que são a drenagem e a mobilidade de áreas urbanas. A facilidade de manutenção também é notória, visto que o pavimento pode ser instalado e removido a qualquer momento, havendo um ganho de produtividade e de recursos quando se pensa no grande número de subsistemas existentes sob o pavimento. Além disso, o pavimento proporciona um belo efeito estético, pois são várias as formas, texturas e cores destas peças (ABCP, 2010b).

2.2.1.1.1 *Intertravamento*

Segundo Hallack (1999) e Smith (2011), intertravamento é a capacidade que as peças de concreto possuem de adquirir resistência aos movimentos de deslocamento individual, seja vertical, horizontal, de rotação ou de gição em relação às peças vizinhas. O desempenho estrutural está ligado ao intertravamento das peças. É definido também como a incapacidade de uma peça do pavimento se mover independentemente de seus vizinhos.

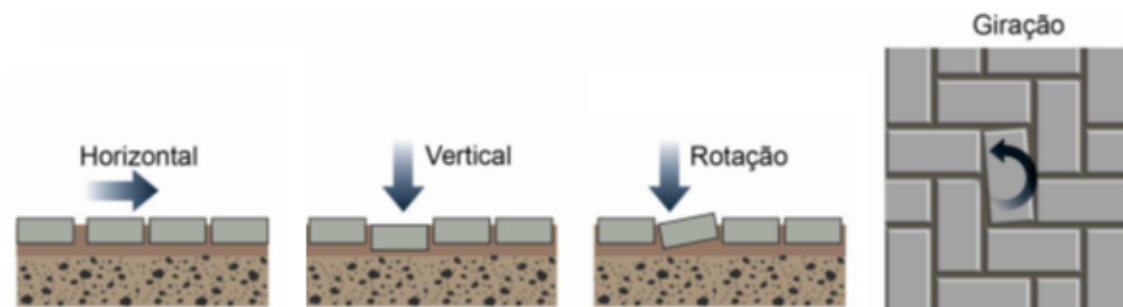
Shackel (1992), Knapton (1996), Hallack (1999), Burack (2002), Cruz (2003) e ABCP (2010a) descrevem que, na pavimentação com blocos de concreto, existem três tipos de intertravamento que atuam simultaneamente, sendo detalhados a seguir.

Knapton (1996) descreve o intertravamento horizontal como sendo a incapacidade de uma peça se deslocar horizontalmente em relação às peças vizinhas em qualquer tipo de arranjo de assentamento. Está relacionado diretamente com o formato e arranjo de assentamento das peças sobre a camada de areia. Neste sentido, contribui na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal sob a atuação do tráfego, principalmente em áreas de aceleração e frenagem. As juntas entre as peças, quando convenientemente cheias com tipo adequado de areia e bem compactadas, são, na verdade, as responsáveis pelo nível deste tipo de intertravamento. É o tipo de intertravamento mais utilizado atualmente.

O intertravamento vertical é descrito por Knapton (1996) como sendo a incapacidade de cada peça se mover no sentido vertical em relação às peças vizinhas. É conseguido através dos esforços de cisalhamento absorvidos pelo rejuntamento de areia entre as peças e a capacidade estrutural das camadas inferiores do pavimento. Pode ser obtido utilizando peças especiais com formatos e encaixes reentrantes uma a uma. Assim, quando é aplicada uma carga vertical sobre as peças, existe um contato distribuindo os esforços para as peças vizinhas. Shackel (1992) relata que este tipo de peça tem uma geometria geralmente complexa, sendo, conseqüentemente, mais difícil de executar em relação às peças de intertravamento horizontal. Atualmente, este tipo de intertravamento é pouco utilizado.

Knapton (1996) descreve o intertravamento rotacional ou giratório como a incapacidade de a peça girar em relação ao seu próprio eixo em qualquer direção. É conseguido pela espessura das juntas entre as peças e pelo conseqüente confinamento oferecido pelas peças vizinhas. Geralmente, este fenômeno é provocado pelo tipo e frequência do tráfego, principalmente nas áreas de frenagem, aceleração e tensões radiais dos pneus (curvas), além de regiões de confinamento lateral duvidoso. Assim, sua ocorrência depende principalmente da natureza das juntas entre as peças de concreto, isto é, da sua largura, do tipo de areia utilizada e do rejuntamento. A Figura 5 exemplifica os tipos de intertravamento.

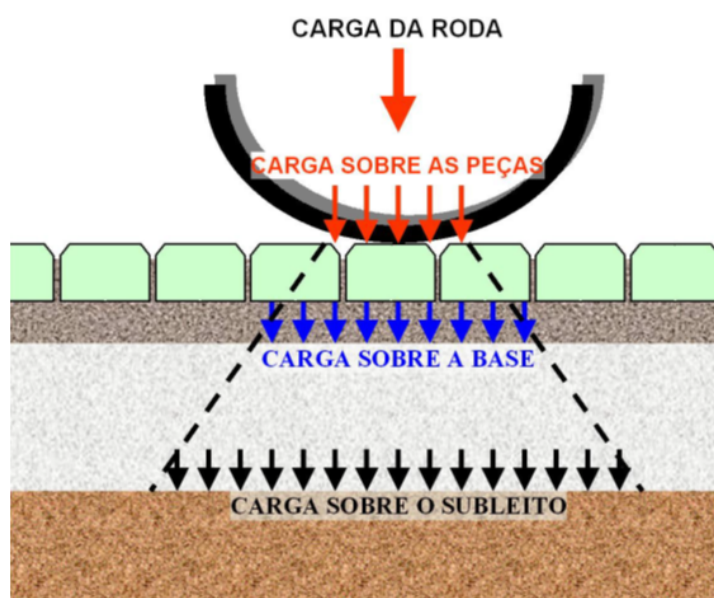
Figura 5 – Tipos de intertravamento das peças



Fonte: ABCP (2010a)

A ilustração de como ocorre a distribuição das cargas verticais no pavimento intertravado está representado na Figura 6. As cargas são absorvidas pela camada de revestimento e transferidas para as camadas subsuperficiais que formam a estrutura do pavimento (ABCP, 2010a).

Figura 6 – Transferência do carregamento vertical



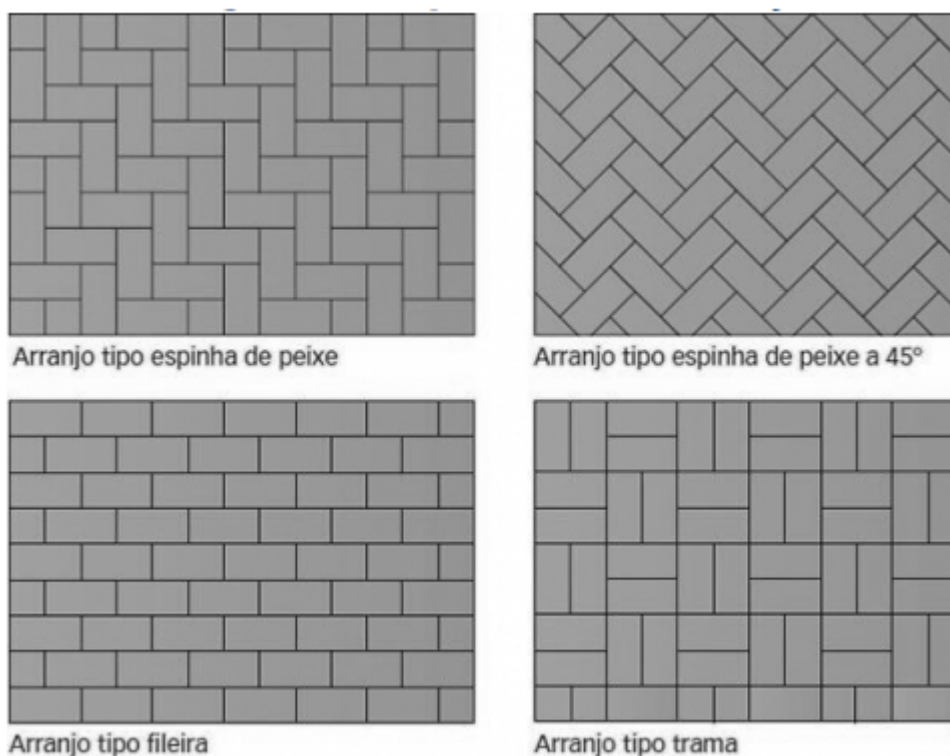
Fonte: ABCP (2010a)

As peças podem ser configuradas de diversas formas, definindo assim o aspecto estético do pavimento. Segundo Cruz (2003), não existe um consenso entre pesquisadores na interferência do formato e arranjo das peças no desempenho final do pavimento, apenas que este influi na sua durabilidade.

ICPI (2002) e Cruz (2003) citam que o arranjo do tipo espinha de peixe, quando comparado aos outros arranjos, confere o maior intertravamento horizontal, dispersando as forças de frenagem e aceleração, oferecendo assim maior capacidade estrutural e resistência horizontal a movimentos laterais. Portanto, este é

o arranjo mais recomendado para ser utilizado em áreas sujeitas ao tráfego de veículos. Este fato pode ser aproveitado a favor da arquitetura e paisagismo do empreendimento. Ao se empregar diferentes arranjos para diferentes funções, como vias, áreas de manobra, vagas e áreas de circulação, as próprias peças com seus formatos e cores podem naturalmente fazer a delimitação dos espaços, sem a necessidade de inserir outros elementos no sistema. Além da praticidade, este fato também é capaz de reduzir custos ao eliminar serviços posteriores à pavimentação. A Figura 7 apresenta os tipos de configurações de assentamento das peças de concreto mais utilizados.

Figura 7 – Configurações de assentamento das peças de pavimentos intertravados de concreto



Fonte: Adaptado de Cruz (2003)

As peças pré-moldadas de concreto que possuem relação comprimento/espessura menor que 4 são as mais apropriadas para tráfego de veículos e devem ser utilizadas na pavimentação intertravada permeável. Este sistema de revestimento pode permitir a infiltração da água por aberturas específicas para este fim, pelas juntas de assentamento ou através das próprias peças, quando confeccionadas com concreto permeável (ABCP, 2015).

As peças de concreto para pavimentação devem atender aos

requisitos da ABNT NBR 9781 (2013), sendo de concreto convencional ou concreto permeável. No caso das peças permeáveis, além da resistência à compressão, também é necessário verificar o coeficiente de permeabilidade do concreto através da ABNT NBR 16416 (2015).

2.2.2 Aplicações

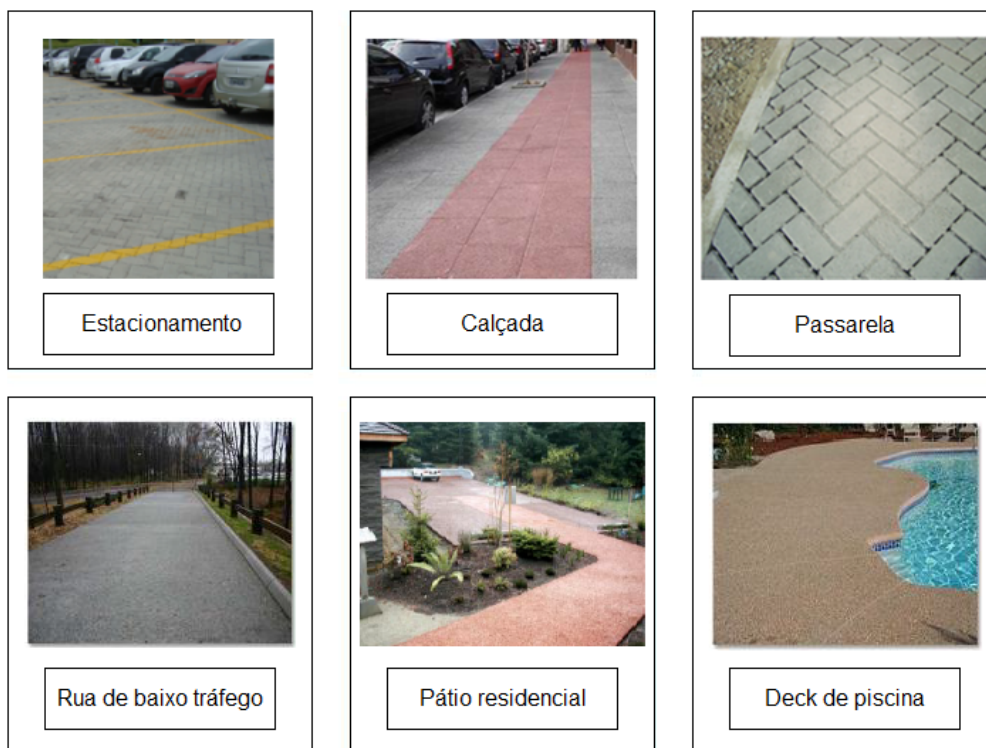
Os pavimentos permeáveis possuem grande potencial para serem utilizados em obras e loteamentos com o objetivo de diminuir a sobrecarga na rede pluvial bem como evitar o transporte de poluentes aos corpos d'água. Do mesmo modo, devem ser incentivados em áreas consolidadas, auxiliando assim a reabilitação ambiental das bacias hidrográficas. A capacidade de infiltração do solo original é fundamental para determinação da eficácia da técnica.

Höltz (2009) e Batezini (2013) salientam que o emprego de pavimentos permeáveis em vias de tráfego pesado é comprometido, devido ao elevado volume de vazios, baixa tenacidade e resistência à fadiga, que afetam sua eficácia.

Portanto, o pavimento permeável possui sua utilização mais difundida em vias de tráfego leve, como calçadas, ciclovias, ruas de baixo tráfego, estacionamentos, pátios residenciais, passarelas de pedestres, parques, praças e decks de piscinas (LAMB, 2014).

A Figura 8 apresenta alguns exemplos de aplicações dos pavimentos de concreto permeável.

Figura 8 – Aplicações para pavimentos de concreto permeável



Fonte: Adaptado de Tennis; Leming; Akers (2004); ABCP (2013); Sandoval (2014)

2.2.3 Vantagens

Segundo EPA (1999), algumas vantagens específicas do uso de pavimentos permeáveis são:

- Tratamento da água da chuva, através da remoção de poluentes;
- Diminuição da necessidade de meio-fio e canais de drenagem;
- Aumento da segurança e conforto em vias, pela diminuição de derrapagens e ruídos;
- É um dispositivo de drenagem que se integra completamente à obra, não necessitando de espaço exclusivo;
- O pavimento permeável reduz consideravelmente os itens de poluição difusa oriunda de óleos e outras substâncias encontradas nas pistas de tráfego.

Höltz (2011) cita algumas vantagens na utilização de pavimentos permeáveis:

- Elimina empossamentos e outros problemas relacionados com enxurradas;
- Pode ser executado in loco, com materiais locais, baixa tecnologia e

mão-de-obra não especializada;

- Custo de manutenção relativamente baixos.

Alencar (2013) cita o potencial de ganho ambiental promovido pelos pavimentos permeáveis sob os seguintes aspectos:

- Redução do escoamento superficial, infiltração no local e eliminação de contaminantes;
- Redução das ilhas de calor pela menor absorção de calor em relação aos pavimentos escuros;
- Contribuição para a oferta de ar e água para as raízes das árvores localizadas nas adjacências do pavimento permeável;
- Economia de água tratada pelo aproveitamento da água de chuva acumulada;
- Reciclagem de água pelo pré-tratamento das águas contaminadas, viabilizando o seu reuso.

2.2.4 Desvantagens

Apesar das inúmeras vantagens, podem ocorrer alguns pontos negativos na utilização de pavimentos permeáveis.

Segundo a EPA (1999), algumas desvantagens específicas dos pavimentos permeáveis incluem:

- O pavimento permeável tem a tendência de tornar-se obstruído, se inapropriadamente instalado ou mantido;
- O pavimento permeável envolve um risco de falha considerável (devido a colmatagem ou má construção);
- Risco de contaminação do lençol freático.

Outros autores observam também como desvantagens do uso de pavimentos permeáveis:

- Devido ao elevado volume de vazios, baixa tenacidade e resistência à fadiga, os pavimentos permeáveis possuem utilização mais difundida em vias de tráfego leve (HÖLTZ, 2011; BATEZINI, 2013);
- Tempo de vida útil menor que os pavimentos asfálticos tradicionais, cerca de 15 anos (HÖLTZ, 2011);
- Necessidade de manutenção periódica (PINTO, 2011);

COUTINHO, 2011).

O uso do pavimento permeável pode ser restringido em: regiões de clima frio, devido ao entupimento e trincagem pela neve; regiões áridas, devido à alta amplitude térmica; regiões com altas taxas de erosão, devido ao vento e em face do grande acúmulo de sedimentos na superfície. O uso do pavimento permeável pode ser restrito, requerendo solos permeáveis profundos (no caso do sistema de infiltração total), tráfego leve e o uso de terras adjacentes (ACIOLI, 2005).

2.2.5 Requisitos para implantação de pavimentos de concreto permeável

De acordo com a ABCP (2010b) e a ABNT NBR 16416 (2015), alguns requisitos devem ser checados para garantir a viabilidade da instalação de pavimentos permeáveis:

- Os pavimentos permeáveis somente são viáveis para taxas de infiltração do revestimento superiores a 7 mm/h;

- Para utilização de pavimentos permeáveis em solos muito pouco permeáveis, pode ser necessário a utilização de tubos de drenagem. Desta forma, evita-se que a água permaneça muito tempo na estrutura do pavimento, podendo ocasionar perda de suporte;

- O lençol freático deverá estar, no mínimo, a 1,20 metros do fundo do pavimento permeável;

- As áreas de contribuição não podem exceder em cinco vezes a área do pavimento e recomenda-se, no mínimo, 30 metros de distância entre córregos, reservatórios de água e pântanos;

- Recomenda-se uma declividade do pavimento de, no mínimo 1% e no máximo de 5%, caso contrário, a velocidade do escoamento superficial reduz a infiltração. Nas áreas no entorno do pavimento, devem ser evitadas declividades superiores a 20%;

- Devem ser conhecidos os dados de precipitação do local, sendo primeiramente definido o período de retorno do projeto, normalmente de 5 a 10 anos para projetos de pavimentos permeáveis;

- Também devem ser conhecidos os dados de tráfego no local de implantação. Esses dados são utilizados para determinação da vida útil do pavimento, sendo normalmente adotada a previsão de 20 anos para pavimentos permeáveis.

2.3 ESTRUTURA DE PAVIMENTOS DE BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO PERMEÁVEL

Um refinado processo de fabricação dos blocos de concreto permeável, com traços bem dosados e procedimentos adequados, produz peças de qualidade, com dimensões sem grandes variações, sendo importante para se ter um piso bem nivelado e com boa aparência. Por outro lado, a estrutura do pavimento é um fator essencial no que diz respeito à permeabilidade e correto escoamento da água infiltrada (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; VIRGILIIS, 2009; ABCP, 2010b; HEIN, 2015; ABNT NBR 16416, 2015).

A ABNT NBR 16416 (2015) estabelece que o projeto de um pavimento permeável deve considerar o tipo de uso e o local de implantação, sendo que a definição dos materiais e a espessura das camadas a serem executados devem atender a diversos critérios estabelecidos no próprio procedimento normativo. A estrutura do pavimento permeável deve ser executada de modo a permitir a passagem de toda água infiltrada até sua deposição final sem causar dano à estrutura. A presença de uma camada impermeável inviabiliza todo funcionamento de uma estrutura de pavimento permeável (VIRGILIIS, 2009).

Atualmente, um procedimento de projeto da espessura da camada estrutural não está disponível para pavimentos de concreto permeável. Desta forma, a determinação dos parâmetros estruturais utilizados para uma obra de pavimentação com concreto permeável, geralmente é feito com base em procedimentos normativos não específicos para concreto permeável ou a partir de parâmetros conhecidos que já foram testados ou utilizados em obras ou estudos (ACI 522R, 2010; NASSIRI; RANGELOV; CHEN, 2017).

A ABNT NBR 16416 (2015) cita ainda que a norma brasileira permite que a estrutura de pavimentos permeáveis seja executada utilizando procedimentos normativos não específicos para concreto permeável.

O Quadro 4 apresenta alguns dos componentes comumente utilizados na estrutura de pavimentos permeáveis. Poucos pavimentos possuem todos os componentes listados, sendo que cada pavimento deve ter uma combinação específica que atenda às suas próprias necessidades. Podem ocorrer ainda estruturas de pavimentos que contenham elementos não listados, dependendo das características e adequações do projeto.

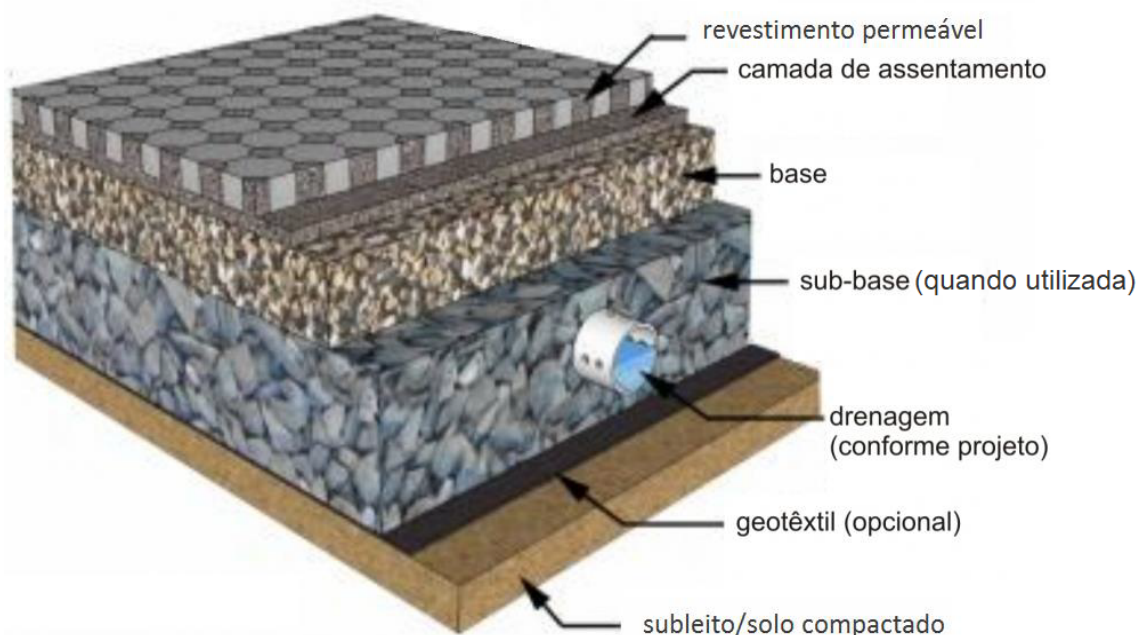
Quadro 4 – Elementos comumente utilizados na composição da estrutura de pavimentos permeáveis

Componente	Definição
Estrutura permeável	Combinação das camadas de revestimento, assentamento, base e sub-base dimensionadas para suportar o tráfego, distribuir os esforços e permitir a percolação da água.
Revestimento	Camada que recebe diretamente as cargas do tráfego.
Assentamento	Camada que tem como principal função fornecer uma superfície uniforme para assentamento das peças pré-moldadas de concreto permeável.
Rejuntamento	Camada utilizada apenas nos projetos de pavimentos intertravados permeáveis, cuja percolação da água ocorre pelas juntas alargadas ou pelas áreas vazadas entre as peças.
Sobrecamada	Camada aplicada sobre um tipo de pavimento pré-existente.
Base	Camada destinada a resistir e distribuir os esforços aos quais o pavimento estará submetido e que permite a percolação e/ou acúmulo temporário de água.
Sub-base	Camada utilizada como reforço do subleito ou camada complementar a base.
Subleito	Solo natural sobre o qual será executada a estrutura do pavimento. É destinado a suportar as cargas das camadas superiores sem causar dano à estrutura.
Manta geotêxtil	Manta não-tecido a base de polipropileno destinada a deter a migração de partículas entre as camadas e permitir a livre passagem da água.
Geomembrana	Tecido impermeável a base de plástico ou polietileno de alta densidade destinado a impermeabilizar a água na estrutura.
Reservatório	Qualquer parte do pavimento com capacidade de estocagem ou condução da água infiltrada.
Drenos	São utilizados para remover a água infiltrada da estrutura do pavimento quando o sistema de infiltração utilizado é parcial ou impermeável.

Fonte: Adaptado de Interpave (2008); CRMCA (2009); Virgiliis (2009); ABCP (2010b); ACI 522.1M (2013); ABNT NBR 16416 (2015)

A estrutura padrão de um projeto de pavimento com blocos de concreto permeável está exemplificada na Figura 9.

Figura 9 – Estrutura padrão de um projeto de pavimento com blocos de concreto permeável



Fonte: Adaptado de ABCP (2010b); ACI 522R (2010); ACI 522.1M (2013); ABNT NBR 16416 (2015)

São descritos, a seguir, as características de cada um destes elementos componentes, com seus aspectos construtivos juntamente com algumas especificações recomendadas pelos procedimentos normativos.

2.3.1 Revestimento

O revestimento consiste na camada superficial da estrutura de pavimento permeável. Pode ser composto por três diferentes tipos de pavimentos permeáveis, conforme o item 2.2.1 Esta camada é projetada para resistir às cargas estabelecidas pelos diversos usos e transferi-las para as camadas inferiores. O revestimento deve permitir a percolação da água, reduzindo o escoamento da superfície sem causar dano para as demais camadas da estrutura permeável. As espessuras do revestimento variam de 60 a 100 mm, dependendo do tipo de uso desejado (VIRGILIIS, 2009; ABNT NBR 16416, 2015).

De maneira geral, o revestimento é economicamente mais caro por ser constituído de material resistente ao desgaste. Subjetivamente ao revestimento, são atribuídas características, tais como aparência e acessibilidade. Uma ampla variedade de materiais pode satisfazer os requisitos de durabilidade, economia, aspecto e facilidade de execução do revestimento (VIRGILIIS, 2009).

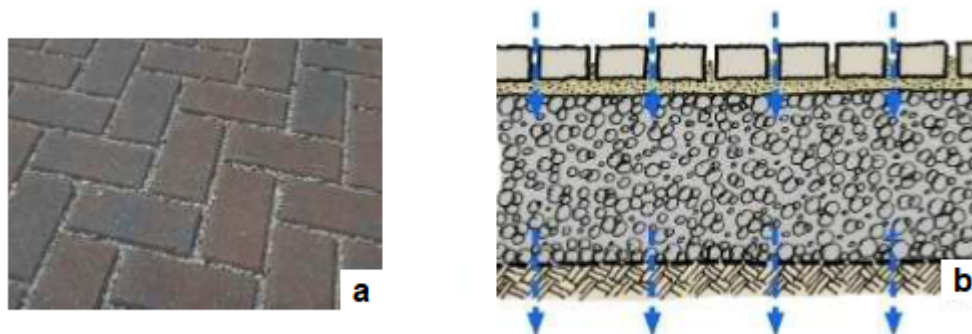
Conforme a ABNT NBR 16416 (2015), pode-se diferenciar os revestimentos de concreto permeável em cinco tipos, dos quais dois deles são constituídos por peças de concreto convencional e os três restantes por concreto permeável aplicado de diferentes formas. Os dois pavimentos de blocos de peças de concreto convencional são muito similares, sendo diferenciados pelo local de percolação da água. Nos pavimentos de concreto permeável, a diferença entre os três tipos é que o primeiro é composto por peças de concreto permeável, o segundo é fabricado em placas e o terceiro é executado e moldado *in loco*. A percolação da água dos três tipos de pavimentos de concreto permeável ocorre pela própria estrutura do concreto.

2.3.1.1 Revestimento de peças de concreto com juntas alargadas

O revestimento de peças de concreto com juntas alargadas é executado de modo que possua afastadores alargados para que formem uma junta mais larga entre os blocos, que é preenchida com o material de assentamento ou pedrisco, e que permite que a percolação da água ocorra por estas juntas (SALES, 2008; ABNT NBR 16416, 2015).

A Figura 10a demonstra um exemplo de aplicação das peças de concreto com juntas alargadas, enquanto que a Figura 10b apresenta um croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação.

Figura 10 – Exemplo de aplicação das peças de concreto com juntas alargadas. Em (a) aplicação das peças de concreto com juntas alargadas. Em (b) croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação



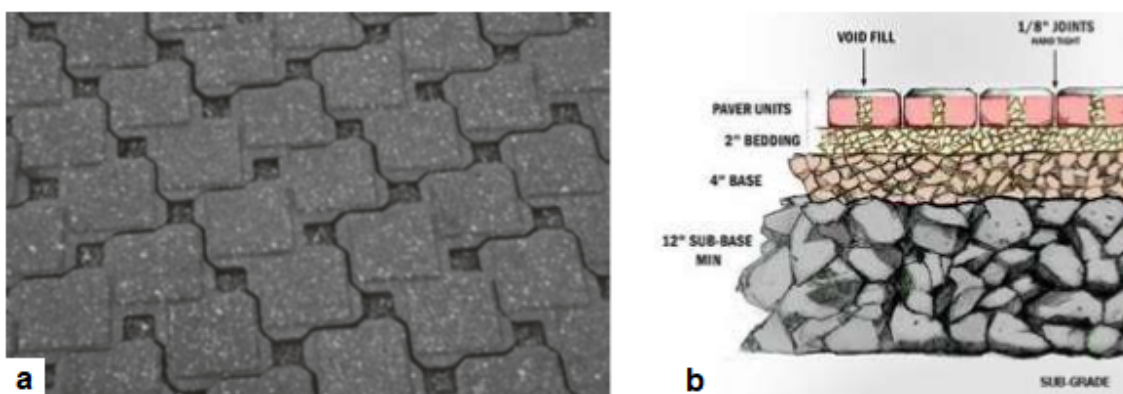
Fonte: ABCP (2015)

2.3.1.2 Revestimento de peças de concreto com áreas vazadas

No revestimento de peças de concreto com áreas vazadas, a percolação ocorre nas áreas vazadas entre os blocos, que são preenchidas com pedrisco (ABNT NBR 16416, 2015).

A Figura 11a demonstra um exemplo de aplicação das peças de concreto com áreas vazadas, enquanto que a Figura 11b apresenta um croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação.

Figura 11 – Exemplo de aplicação das peças de concreto com áreas vazadas. Em (a) um exemplo da aplicação das peças de concreto com áreas vazadas. Em (b) um croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação



Fonte: ABNT NBR 16416 (2015); ABCP (2015)

2.3.1.3 Revestimento de peças de concreto permeável

Segundo a ABNT NBR 16416 (2015), as peças de concreto permeável compõem um revestimento permeável cuja percolação de água ocorre pela sua estrutura. As peças de concreto permeável são executadas através do intertravamento, conforme item 2.2.1.1.

A Figura 12a demonstra um exemplo da aplicação das peças de concreto permeável, enquanto que a Figura 12b apresenta um croqui da estrutura comumente utilizada para este tipo de pavimentação.

Figura 12 – Exemplo de aplicação das peças de concreto permeável. Em (a) um exemplo da aplicação das peças de concreto permeável. Em (b) um croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação



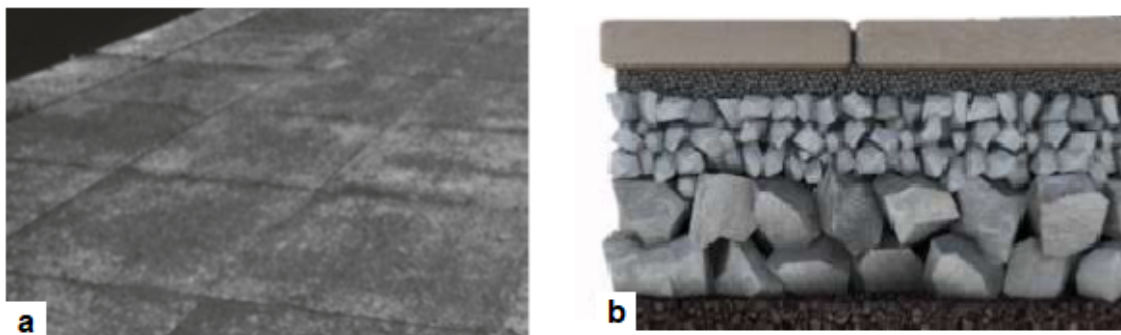
Fonte: ABNT NBR 16416 (2015); ABCP (2015)

2.3.1.4 Revestimento de placas de concreto permeável

Pavimento revestido com placas de concreto permeável, cuja percolação de água ocorre pelo interior da placa. Este tipo de revestimento difere do revestimento de peças de concreto permeável, apresentado em 2.3.1.3, por não apresentar intertravamento (ABNT NBR 16416, 2015).

A Figura 13a demonstra um exemplo de aplicação das placas de concreto permeável, enquanto que a Figura 13b apresenta um croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação.

Figura 13 – Exemplo de aplicação das placas de concreto permeável. Em (a) um exemplo da aplicação das placas de concreto permeável. Em (b) um croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação



Fonte: ABNT NBR 16416 (2015); ABCP (2015)

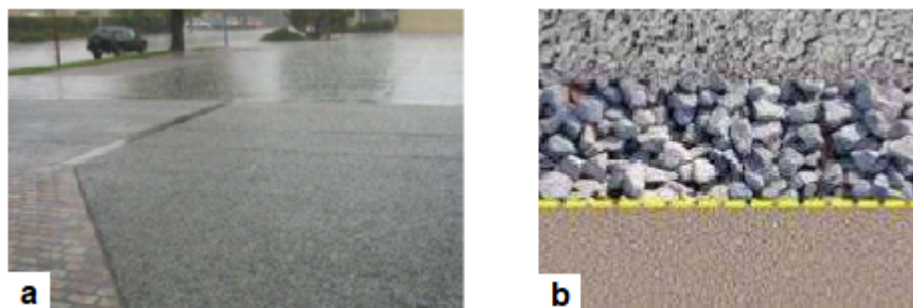
2.3.1.5 Revestimento de pavimento de concreto permeável

Pavimento revestido com concreto permeável moldado no local em que a percolação de água ocorre pelo interior da estrutura do pavimento (ABNT NBR

16416, 2015).

A Figura 14a demonstra um exemplo de aplicação do pavimento de concreto permeável, enquanto que a Figura 14b apresenta um croqui da estrutura comumente utilizada para este tipo de pavimentação.

Figura 14 – Exemplo de aplicação do pavimento de concreto permeável. Em (a) um exemplo da aplicação do pavimento de concreto permeável. Em (b) um croqui da estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimentação



Fonte: ABCP (2015)

2.3.2 Assentamento

A camada de assentamento é utilizada somente em projetos de pavimento intertravado permeável ou pavimento com placas de concreto permeável (ABNT NBR 16416, 2015). O principal objetivo desta camada é servir de base para o assentamento dos blocos ou placas de concreto permeável. Também espera-se que essa camada venha proporcionar uma superfície regular onde se possam colocar os blocos e acomodar suas eventuais tolerâncias dimensionais (CRUZ, 2003; ABCP, 2010b; ABNT NBR 16416, 2015).

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), a camada de assentamento deve ser uniforme e constante, com espessura especificada em projeto, podendo estar entre 20 e 60 mm. A variação máxima permitida da camada é de ± 5 mm em relação à espessura especificada.

A seleção do material que irá compor a camada de assentamento do pavimento permeável deverá levar em consideração a disponibilidade local, porém, em nenhuma hipótese, deverá comprometer a função estrutural do pavimento (FIORITI, 2007).

Um aspecto de grande importância no agregado da camada de assentamento é que ele tenha dimensão suficiente para garantir uma superfície uniforme para o assentamento das peças de concreto, mas que também ocorra um

travamento com a camada de base (ABCP, 2010a; ABCP, 2010b).

A ABCP (2010b) e a ABNT NBR 16416 (2015) citam que a camada de assentamento deve ser composta por materiais pétreos que tenham uma distribuição granulométrica descontínua, que resulte em um adequado teor de vazios, existindo assim, um coeficiente de permeabilidade apropriado para o pavimento. Os agregados que compõem a camada de assentamento devem cumprir as especificações do Quadro 5. A distribuição granulométrica recomendada para o material de assentamento está apresentada no Quadro 6.

Quadro 5 – Especificação para o material de assentamento

Propriedade	Método	Limites estabelecidos
Abrasão Los Angeles	ABNT NBR NM 51 (2001)	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45 (2006)	≥ 32%
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm	ABNT NBR NM 46 (2003)	≤ 2%
Dimensão máxima característica (D _{máx})	ABNT NBR 7212 (2012)	9,5 mm

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Quadro 6 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de assentamento

Peneira com abertura de malha	Porcentagem retida acumulada (%), em massa
12,5 mm	0
9,5 mm	0 a 15
4,75 mm	70 a 90
2,36 mm	90 a 100
1,16 mm	95 a 100

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Segundo a ABCP (1998), a camada de assentamento comumente utilizada para pavimentos intertravados é composta por areia, contendo no máximo 5% de silte e argila.

A estabilidade da camada de assentamento constitui um dado muito importante em relação ao material utilizado para a base. É muito importante evitar que o material da camada de assentamento seja levado pela água para as camadas inferiores. Se tal cuidado não for tomado, poderão ocorrer depressões na superfície

drenante. A compactação da camada de assentamento é realizada de maneira indireta após o assentamento dos blocos de concreto (FEBESTRAL, 2005; SALES, 2008).

Entre a camada de assentamento e a camada de base, podem ser utilizadas mantas geotêxteis, a fim de evitar a migração do material da camada de assentamento para a camada de base da estrutura, evitando que ocorra a lixiviação da camada de assentamento (FEBESTRAL, 2005; INTERPAVE, 2008).

2.3.3 Base e sub-base

A camada de base é o componente estrutural que recebe as tensões distribuídas pela camada de revestimento. Sua função principal é proteger estruturalmente o subleito das cargas externas, evitando, desta forma, deformações de caráter permanente e uma conseqüente deterioração do pavimento. A base é a camada estrutural mais importante do pavimento, pois recebe e distribui os esforços que surgem com o tráfego. Geralmente é de 2 a 20 vezes mais espessa que o revestimento (CRUZ, 2003; ACIOLI, 2005; INTERPAVE, 2008; ABCP, 2010b; SILVA, 2012; ACI 522.1M, 2013; ABNT NBR 16416, 2015; DEBNATH; SARKAR, 2018).

No caso de pavimentos permeáveis, além da função de transmissão das solicitações, a base funciona como um reservatório, armazenando provisoriamente a água da chuva até que a mesma infiltre no solo ou se encaminhe para uma rede de drenagem lateral (ACIOLI, 2005; CARRENHO; SILVA; ROSA, 2014; DEBNATH; SARKAR, 2018). Para que cumpra a função de manutenção da integridade estrutural e atue como uma bacia de reservatório ou armazenamento, a espessura da base é geralmente maior do que a espessura utilizada para pavimentos convencionais, de modo a obter um volume de reservatório satisfatório, sem perder as propriedades de sustentação (DEBNATH; SARKAR, 2018).

A camada de base deve apresentar uma boa compactação, aliada a uma boa capacidade de rolamento e um mínimo de permeabilidade, suficiente para encaminhar as águas pluviais para o subleito. Em princípio, todos os tipos de agregados que podem ser utilizados para a camada de base em pavimentação convencional, podem igualmente ser usados para base permeável, com tanto que os mesmos tenham uma granulometria que garanta uma boa capacidade de rolamento (não deformações) em conjunto com uma boa permeabilidade (SALES, 2008).

As espessuras das camadas de base e sub-base são definidas em projeto, em função da precipitação da região e das características do solo, que permitirá calcular o suporte de carga e a permeabilidade do mesmo. A cada 10 cm, no entanto, é ideal que o material seja compactado (ABCP, 2013). A norma americana ACI 522R (2010) recomenda que a camada de base tenha espessura entre 15 e 30 cm, dependendo do tipo de aplicação.

A base utilizada sob o revestimento permeável deve ser constituída por materiais de granulometria descontínua, com dimensão máxima de 25 mm, contendo uma pequena quantidade de finos. O subsolo natural pode ser utilizado como camada de base quando há predominância de solos arenosos (BATEZINI, 2013; CARRENHO; SILVA; ROSA, 2014; ABNT NBR 16416, 2015).

É muito comum a construção de pavimentos com duas camadas acima do subleito até o revestimento. Diferentes camadas podem ser otimizadas para propósitos especiais definidos para cada tipo de pavimento. Além disso, a combinação de materiais em diferentes camadas pode tornar o pavimento mais econômico (ABNT NBR 16416, 2015).

A camada de sub-base é utilizada quando há necessidade de reforço no subleito ou como uma camada complementar à base. Pode ser executada quando se precisa melhorar a capacidade de carga das camadas adjacentes ou quando se precisa de uma camada mais espessa, que funcione como armazenamento da água infiltrada (VIRGILIIS, 2009; INTERPAVE, 2010; ABNT NBR 16416, 2015).

A norma ACI 522R (2010) tem recomendado a execução de uma seção de sub-base abaixo da camada de base para fornecer suporte vertical e, ao mesmo tempo, atuar como uma bacia de armazenamento. A EPA (1999) também recomenda a utilização da sub-base como um reforço para a camada de base.

A sub-base deve ser composta por materiais de granulometria descontínua que variem de 19 a 63 mm, sem finos ou com fração de finos pouco expressiva e permeáveis, que permitam que a água infiltre para o subleito ou fique armazenada na camada quando for utilizada a manta impermeabilizante (ABCP, 2010b; ACI 522.1M, 2013; ABNT NBR 16416, 2015).

Os agregados que compõem as camadas de base e sub-base devem cumprir as especificações do Quadro 7. No Quadro 8, está representada a distribuição granulométrica recomendada para os materiais de base e sub-base.

Quadro 7 – Especificações para o material da base e sub-base de pavimentos permeáveis

Propriedade	Método	Limites estabelecidos
Abrasão Los Angeles	ABNT NBR NM 51 (2001)	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45 (2006)	≥ 32%
Índice de suporte Califórnia	ABNT NBR 9895 (2016)	≥ 80%
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm	ABNT NBR NM 46 (2003)	≤ 2%

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Quadro 8 – Distribuição granulométrica recomendada para a camada de base e sub-base de pavimentos permeáveis

Peneira com abertura de malha	Porcentagem retida acumulada (%), em massa	
	Sub-base	Base
75 mm	0	-
63 mm	0 a 10	-
50 mm	30 a 65	-
37,5 mm	85 a 100	0
25 mm	90 a 100	0 a 5
19 mm	95 a 100	0 a 35
12,5 mm	-	40 a 75
4,75 mm	-	90 a 100
2,36 mm	-	95 a 100

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

2.3.4 Subleito

O subleito consiste no terreno de fundação onde será apoiada toda a estrutura do pavimento. Geralmente é composto pelo solo da região, porém, pode ser adicionado solo oriundo de outros locais. Esta camada influencia diretamente no dimensionamento da base e sub-base do pavimento. O subleito deve ser considerado e estudado até as profundidades em que atuam significativamente as cargas impostas pelo tráfego, variando de 60 a 150 cm de profundidade (ACI 522R, 2010; DNIT 137, 2010; ABNT NBR 16416, 2015). O Quadro 9 demonstra as especificações recomendadas para a camada do subleito de pavimentos permeáveis.

Quadro 9 – Especificações para o material do subleito de pavimentos permeáveis

Propriedade	Método	Limites estabelecidos
Índice de suporte Califórnia (CBR)	ABNT NBR 9895 (2016)	$\leq 2\%$
Análise granulométrica	DNER/ME 080 (1994)	Partículas < 76 mm
Coefficiente de permeabilidade	ABNT NBR 13292 (1995) ou ABNT NBR 14545 (2000)	Depende das especificações do projeto

Fonte: DNIT 137 (2010); Suzuki; Azevedo; Kabbach Junior (2013)

Se o CBR do subleito for $< 2\%$, ele deve ser substituído por um material melhor ($2\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$) até pelo menos 1 metro. Se o CBR do material for $\geq 20\%$, o subleito pode ser usado como sub-base (MARQUES, 2006).

Batezini (2013) cita que um dos critérios chave para execução de pavimentos permeáveis é a uniformidade do subleito. Como no caso dos pavimentos convencionais, todas as irregularidades existentes devem ser retiradas procedendo-se com a compactação do solo. Sugere-se que o grau de compactação do subleito varie de 90% a 95%, com relação ao peso específico aparente seco teórico de laboratório. Entretanto, deve-se considerar que, com o aumento do peso específico do subleito, existe uma tendência de decréscimo de sua permeabilidade, situação esta possivelmente desfavorável, uma vez que o solo precisa apresentar um coeficiente de permeabilidade elevado para que o sistema de pavimento permeável seja funcional e efetivo (caso o sistema projetado depender da infiltração total da água no solo).

De acordo com a ABNT NBR 14616 (2015), quando a estrutura possui um sistema de infiltração total, a água percola por todas as camadas e infiltra no subleito, que é a camada de sustentação de toda estrutura. Nos casos em que não ocorre a infiltração no solo, a camada de subleito exerce a função de fundação do pavimento, não atuando como uma camada permeável, podendo inclusive atuar como uma camada impermeável, dependendo da permeabilidade do solo.

2.3.5 Manta geotêxtil

A manta geotêxtil pode ser utilizada entre camadas distintas do pavimento. Sua função é permitir o livre fluxo de água e evitar a migração de partículas sólidas entre as camadas. Trata-se de uma manta não-tecido composta por filamentos de polipropileno que possibilita a livre passagem das águas de infiltração para o meio

drenante ou para uma camada adjacente (ABINT, 1999; VIRGILIIS, 2009; ABNT NBR 14616, 2015).

A manta geotêxtil é aplicada entre duas camadas com a finalidade de separação de seus materiais. A separação é necessária para manter a porosidade, evitando o carregamento de partículas para outra camada, além de manter a integridade estrutural das camadas do pavimento. Em alguns pavimentos, o uso de manta geotêxtil proporciona resistência às tensões de deformação (ICPI, 2008; INTERPAVE, 2008; VIRGILIIS, 2009). A Figura 15 apresenta um exemplo de uma manta geotêxtil comumente utilizada, enquanto que a Figura 16 ilustra a aplicação da manta geotêxtil em uma obra de pavimentação.

Figura 15 – Manta geotêxtil não-tecido composta por filamentos de polipropileno



Fonte: Bidim (1999)

Figura 16 – Aplicação de manta geotêxtil em obra de pavimentação



Fonte: ABINT (1999)

A instalação de mantas geotêxteis em projetos de pavimentos permeável pode ser feita de duas maneiras:

- (i) manta geotêxtil instalada no topo do subleito;

(ii) manta geotêxtil instalada logo abaixo da superfície permeável.

Scholz; Grabowiecki (2007) demonstraram que a manta geotêxtil superior auxiliou na filtragem da água e inibiu a areia de migrar para a camada de base. A função principal da manta geotêxtil inferior é proteger o subleito e ajudar na estabilização do solo (DEBNATH; SARKAR, 2018). Newman *et al.* (2002) relataram que a maioria das mantas geotêxteis podem absorver poluentes e ajudar na retenção de contaminantes. As camadas de mantas geotêxteis endossam a ação microbiana e auxiliam na remoção de poluentes da estrutura do pavimento de concreto permeável.

2.3.6 Interface entre camadas

A fim de evitar a migração de material de uma camada do pavimento para outra, a interface pode ser executada utilizando-se um filtro geotêxtil ou uma geomembrana, dependendo do sistema de infiltração adotado e da função à qual o pavimento se destina.

Na interface entre o reservatório e a camada de assentamento, deve ser utilizada uma manta geotêxtil, que servirá como filtro para evitar que os finos do revestimento e do assentamento migrem para o reservatório, permitindo que somente a água infiltre para as camadas adjacentes (AZZOUT *et al.*, 1994; ACIOLI, 2005).

Na interface entre o reservatório e o solo suporte, o uso do material vai depender do sistema de infiltração e da função do pavimento. Se o pavimento tiver função apenas de armazenamento, deverá ser utilizada uma geomembrana impermeável, que servirá para garantir que a água não infiltre para o subleito. Caso o pavimento seja do tipo permeável ou semipermeável, deve ser utilizada uma manta geotêxtil, para impedir a penetração dos materiais da base e sub-base e evitar problemas de desestabilização da estrutura (AZZOUT *et al.*, 1994; ACIOLI, 2005).

2.3.7 Sistema de infiltração

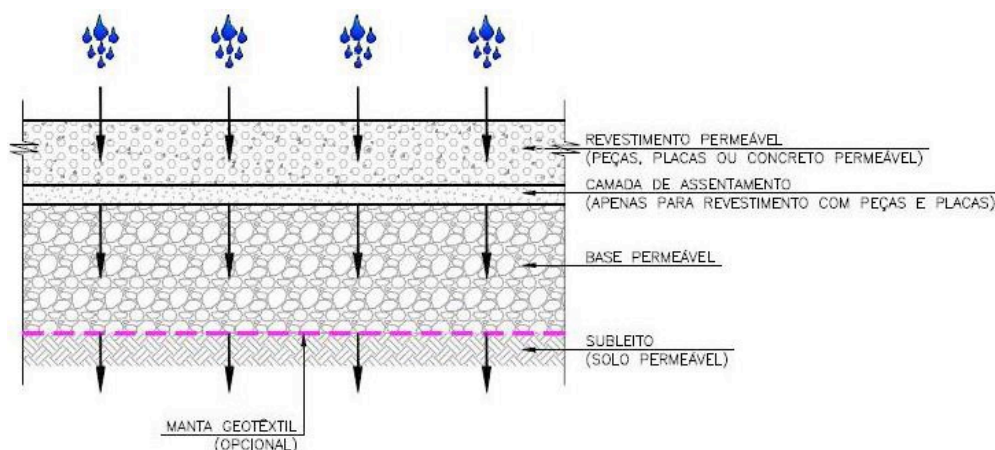
De acordo com a Interpave (2010) e a ABNT NBR 16416 (2015), a estrutura permeável pode ser concebida de três diferentes maneiras em relação à infiltração da água precipitada. A escolha do sistema de infiltração depende das características do solo e do local, bem como dos condicionantes do projeto.

2.3.7.1 Infiltração total

Nesse sistema, a estrutura é construída de maneira a permitir que a água penetre por seus espaços vazios, até se infiltrar no subleito. Durante o percurso da água no interior da estrutura do pavimento, esta preenche temporariamente os espaços entre os agregados das camadas de base e sub-base para, posteriormente, adentrar ao solo. Com o sistema de reservatório do material granular bem dimensionado, o mesmo promove o controle total da descarga de pico, em chuvas de igual ou inferior magnitude a do projeto. Para que este sistema funcione, é necessário que o solo do subleito apresente alta permeabilidade ($>10^{-3}$ m/s) (INTERPAVE, 2010; SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH JÚNIOR, 2013; ABNT NBR 16416, 2015; LEAL; BARRETO; NETO, 2017).

Este sistema só é permitido em lugares onde a resistência mecânica dos solos adjacentes não é diminuída pela presença de água, quando o lençol freático se encontra suficientemente distante do subleito do pavimento (pelo menos 1 metro para permitir a filtragem de poluentes) e quando não existe risco de contaminação das águas (INTERPAVE, 2010; LEAL; BARRETO; NETO, 2017). A Figura 17 ilustra o sistema de infiltração total.

Figura 17 – Exemplo de uma estrutura de pavimento permeável com sistema de infiltração total



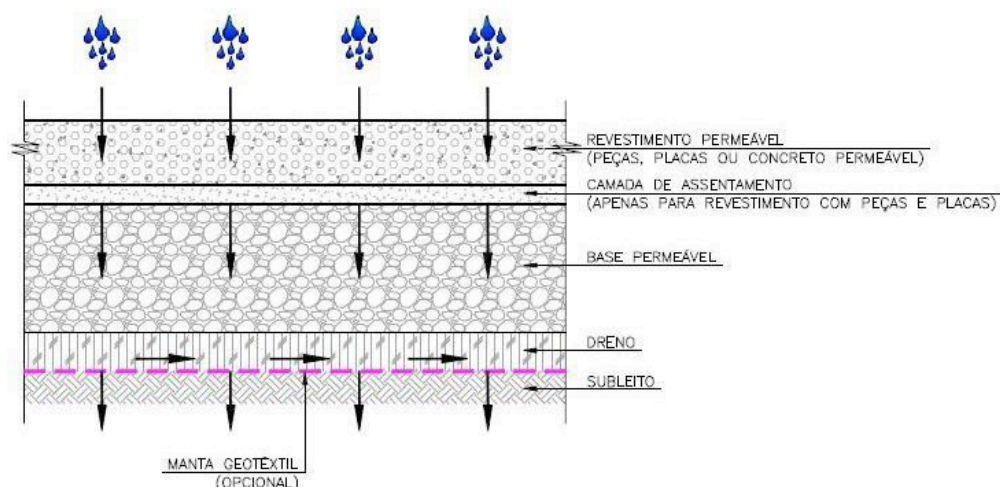
Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

2.3.7.2 Infiltração parcial

Quando o lençol freático é elevado ou o solo do subleito não possui uma adequada taxa de infiltração (10^{-3} a 10^{-5} m/s), sugere-se a utilização do sistema

de infiltração parcial. Semelhante ao sistema de infiltração total, nesta configuração, apenas parte da água que permeia a estrutura se infiltra no solo. Enquanto isso, o excesso de água é drenado por meio de tubos para fora da estrutura do pavimento. Este sistema é utilizado para evitar que o solo do subleito perca sua estabilidade (INTERPAVE, 2010; ABNT NBR 16416, 2015; LEAL; BARRETO; NETO, 2017). A Figura 18 demonstra o sistema de infiltração parcial.

Figura 18 – Exemplo de uma estrutura de pavimento permeável com sistema de infiltração parcial



Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

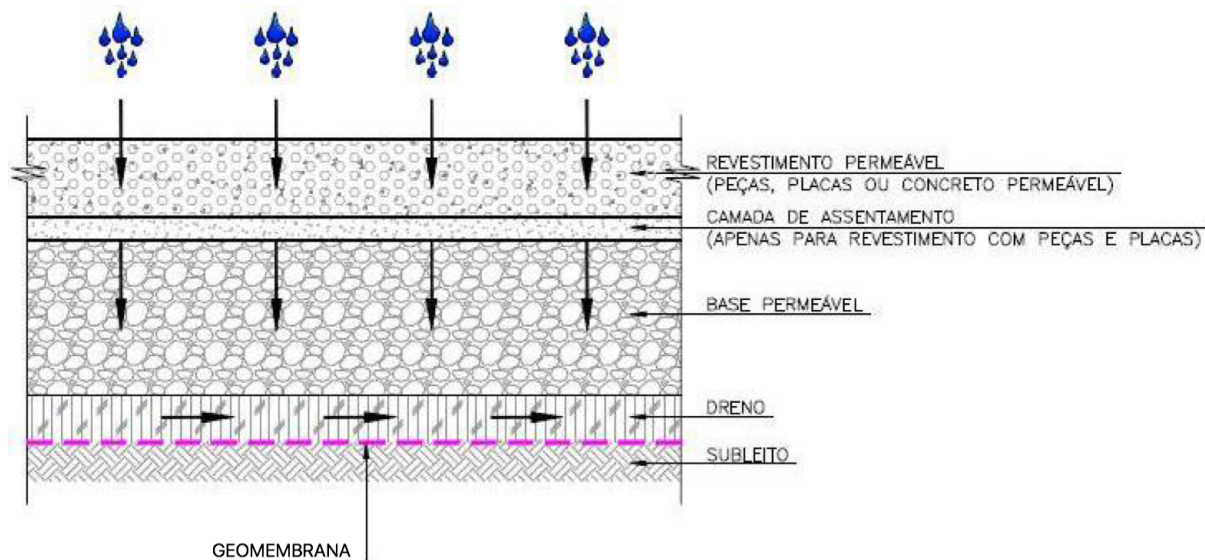
Como pode ser observado nas Figuras 17 e 18, a principal diferença entre o sistema de infiltração total e o sistema de infiltração parcial, é a instalação de drenos acima da camada do subleito para remoção do excesso de água do interior da estrutura do pavimento.

2.3.7.3 Sem infiltração

Neste sistema, a água precipitada permanece retida, por um tempo, na estrutura do pavimento, sendo totalmente escoada para fora da estrutura por drenos. A instalação de uma geomembrana impermeável acima do subleito se faz necessária para a retenção de toda a água infiltrada no interior da estrutura. O sistema sem infiltração é necessário em solos muito argilosos que possuem baixíssimas taxas de permeabilidades ($<10^{-5}$ m/s), baixa resistência e em situações em que a infiltração possa promover a contaminação do solo e/ou das águas subterrâneas (INTERPAVE, 2010; ABCP, 2010b; ABNT NBR 16416, 2015; LEAL; BARRETO; NETO, 2017). A

Figura 19 apresenta o sistema sem infiltração.

Figura 19 – Exemplo de uma estrutura de pavimento permeável com sistema sem infiltração



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16416 (2015)

2.3.8 Permeabilidade das camadas

De acordo com a Feitosa *et al.* (2008), a permeabilidade (K), também chamada de condutividade hidráulica, é definida como sendo a maior ou menor facilidade com que um material se deixa atravessar por um fluido. A permeabilidade leva em consideração as características do meio, incluindo porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, bem como as características do fluido, como viscosidade e massa específica. Em um meio isotrópico, a permeabilidade pode ser entendida como sendo numericamente igual à vazão que atravessa uma área unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. Já a permeabilidade intrínseca (k), também chamada de permeabilidade específica, varia em função do tipo de material poroso, sua granulometria e sua dispersão estrutural. O Quadro 10 apresenta os valores de referência de condutividade hidráulica para vários tipos de materiais.

Quadro 10 – Faixa de valores de condutividade hidráulica para vários tipos de materiais

Material	Condutividade hidráulica (m/s)	Grau de permeabilidade
Brita	$> 10^{-3}$	Muito alto
Areia média	$10^{-3} - 10^{-4}$	Alto
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-4} - 10^{-5}$	Médio
Areia argilosa; Silte arenoso	$10^{-5} - 10^{-7}$	Baixo
Silte; Silte argiloso	$10^{-9} - 10^{-7}$	Muito baixo
Argila	$< 10^{-9}$	Praticamente impermeável

Fonte: Adaptado de Terzagui; Peck (1967); Feitosa *et al.* (2008); ABCP (2010b); ABNT NBR 16416 (2015)

Em uma obra de pavimentação permeável, diferentes tipos de materiais podem ser utilizados na composição da estrutura. A escolha dos materiais que serão utilizados em uma obra irá levar em consideração, principalmente, as especificações do projeto e os materiais disponíveis no local.

A utilização dos diversos tipos de materiais implicará em um maior ou menor valor de permeabilidade da estrutura. A partir disto, é imprescindível o estudo da permeabilidade das camadas da estrutura do pavimento permeável levando em consideração os diferentes tipos de materiais que podem ser utilizados.

2.4 REMOÇÃO DE CONTAMINANTES

A estrutura do pavimento permeável não foi apenas estabelecida como uma solução sustentável, mas também, como uma tecnologia de controle de poluentes pertencentes ao escoamento superficial de áreas usadas, como estradas ou estacionamentos, onde a água contaminada pode se infiltrar (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007).

De acordo com Chandrappa; Biligiri (2016); Becker; Pinheiro (2019), os pavimentos permeáveis, ao permitirem a infiltração do escoamento superficial, podem ser um canal de poluição dos lençóis freáticos ao dirigirem contaminantes para o subsolo. Por outro lado, eles propiciam a retenção de poluentes, promovendo uma purificação física, química e biológica da água. A purificação física ocorre quando os espaços internos absorvem as partículas presentes na água, removendo a maior parte do material particulado em suspensão. A purificação química envolve reações que

permitem a remoção de substâncias indesejadas da água. A purificação biológica está ligada à porosidade do concreto, que permite a ocorrência de atividade microbiana, promovendo a degradação dos materiais em suspensão. Outros materiais interagem de forma diferente, também podendo colaborar na purificação dos efluentes.

Desta forma, o pavimento permeável, além de promover a redução do volume do escoamento superficial, melhora a qualidade da água que por ele percola. Água esta que, durante o escoamento superficial, pode ser poluída com metais pesados, óleos, resíduos de animais, poeira, dentre outros (THOMLE, 2010).

As principais fontes da poluição no escoamento superficial são ocasionadas pelo tráfego rodoviário, pela construção e manutenção de estradas, mas também, é decorrente da matéria orgânica, nitrogênio e fósforo produzido pela degradação de folhas, resíduos de animais, assim como também pela aplicação de fertilizantes e pesticidas químicos (LEGRET; PAGATTO, 1999; JIANG *et al.*, 2015). A concentração da poluição no escoamento superficial pode estar relacionada com o local do pavimento (residencial, comercial, industrial), clima (temperatura, umidade, precipitação) e as condições de tráfego (volume e tipo) (JIANG *et al.*, 2015).

Foram encontrados na literatura estudos que se dedicaram a investigar a capacidade da estrutura de pavimentos permeáveis de remover contaminantes da água, através da medição da qualidade da água antes e depois da passagem da mesma pela estrutura do pavimento. A Tabela 6 apresenta uma lista de autores encontrados na literatura que realizaram estudos sobre este tema.

Tabela 6 – Lista de autores encontrados na literatura que realizaram trabalhos sobre a capacidade da estrutura de pavimentos permeáveis de remover contaminantes da água

Autor	Estrutura	Local	Água utilizada
Legret; Colandini; Le Marc (1996)	Asfalto poroso, base de agregado graduado	Campo	Água do escoamento superficial
Brown <i>et al.</i> (2009)	Asfalto poroso e pavimento intertravado permeável, base de agregado miúdo	Campo	Água da chuva
Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011)	Pavimento intertravado permeável, base preenchida com agregado graúdo dolomítico e quartzoso, manta geotêxtil	Laboratório	Água sintética
Beecham <i>et al.</i> (2012)	Pavimento intertravado permeável, base de cascalho com tamanho de 20 mm, manta geotêxtil	Campo	Água do escoamento superficial
Jiang <i>et al.</i> (2015)	Pavimento de asfalto poroso, base de cascalho com graduação aberta, manta geotêxtil	Laboratório	Água do escoamento superficial
Nnadi <i>et al.</i> (2015)	Pavimento de concreto permeável, base de cascalho, sub-base de agregado graúdo	Laboratório	Água com adição de óleo e fertilizante
Kazemi; Hill (2015)	Pavimento intertravado permeável, base de agregado graúdo	Laboratório	Água da chuva

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 6, verifica-se que foram realizados estudos em condições de campo e de laboratório, sendo utilizadas diferentes tipos de águas e testadas em diversos tipos de estruturas, sendo compostas por base ou base e sub-base, utilizando diversos tipos de agregados, contendo revestimentos variando de asfalto poroso, blocos intertravados permeáveis e concreto permeável, e contendo ou não manta geotêxtil. A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados por cada um dos autores citados.

Tabela 7 - Resultados encontrados pelos autores citados anteriormente em seus trabalhos sobre a capacidade da estrutura de pavimentos permeáveis de remover contaminantes da água

Autor	Parâmetro/contaminante	Concentração inicial	Concentração final	Redução (%)
Legret; Colandini; Le Marc (1996)	pH	7,5	7,5	-
	Sólidos suspensos	33 mg/L	12 mg/L	64%
	Chumbo	26 µg/L	5,4 µg/L	79%
	Zinco	165 µg/L	46 µg/L	72%
	Cobre	15 µg/L	11 µg/L	26,6%
	Cádmio	1,48 µg/L	0,49 µg/L	66,9%
Brown <i>et al.</i> (2009)	Sólidos suspensos	138 mg/L	23 mg/L	94%
Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011)	pH	7,7	7,7	-
	Sólidos suspensos	23 mg/L	2 mg/L	92%
	Condutividade elétrica	375 µS/cm	708 µS/cm	Aumento de 88%
	Oxigênio dissolvido	4,6 mg/L	0,4 mg/L	72%
	Nitrogênio total	30 mg/L	24,7 mg/L	16,6%
	Fósforo	1 mg/L	0,09 mg/L	90,5%
Jiang <i>et al.</i> (2012)	pH	7,17	7,18	Aumento de 0,14%
	Sólidos suspensos	9750 mg/L	1250 mg/L	86%
	Turbidez	785 NTU	77 NTU	74,4%
	Nitrogênio total	10,3 mg/L	10 mg/L	2,91%
	Nitrogênio amoniacal	0,929 mg/L	0,602 mg/L	34%
	DQO	532 mg/L	226 mg/L	57,5%
	DBO	218 mg/L	92,8 mg/L	57,4%
	Matéria orgânica	6,69 mg/L	2,32 mg/L	44%
	Fósforo	0,39 mg/L	0,271 mg/L	46%
Cloretos	37,7 mg/L	35,2 mg/L	6%	
Beecham <i>et al.</i> (2012)	Sólidos suspensos	61,67 mg/L	38,33 mg/L	37,8%
	Nitrogênio total	1,41 mg/L	0,6 mg/L	57,6%
	Fósforo	0,12 mg/L	0,08 mg/L	32,6%
	Cobre	0,044 mg/L	0,041 mg/L	2,9%
	Zinco	0,11 mg/L	0,06 mg/L	38,9%
	Níquel	0,003 mg/L	0,002 mg/L	18,2%
Nnadi <i>et al.</i> (2015)	Cálcio	43,69 mg/L	18,89 mg/L	70%
	Magnésio	4,59 mg/L	1,6 mg/L	65,14%
	Fósforo	2,97 mg/L	1,5 mg/L	49,5%
	Sódio	39,95 mg/L	7,21 mg/L	72,46%
Kazemi; Hill (2015)	pH	8,63	8,07	6,49%
	Condutividade elétrica	512,5 µS/cm	341,25 µS/cm	33,41%
	Oxigênio dissolvido	7,64 mg/L	6,1 mg/L	27,16%

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 7, observa-se que, exceto em quatro ensaios, ocorreu uma redução na concentração de contaminantes da água. As diversas reduções encontradas ocorreram em função do tipo de água utilizada, do

procedimento de ensaio e da estrutura e materiais utilizados.

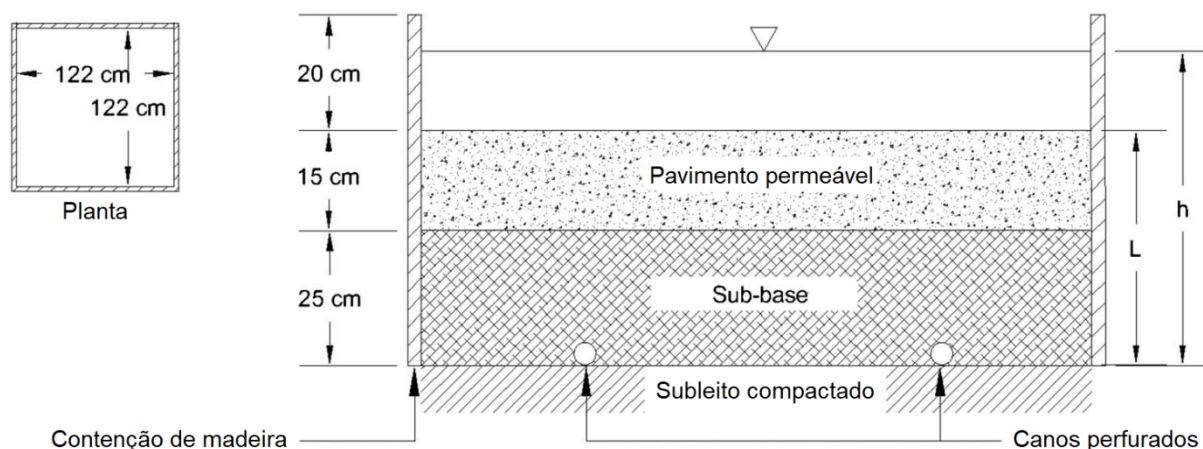
A partir dos resultados encontrados na literatura, concluiu-se que a estrutura de pavimentos permeáveis possui uma significativa capacidade de reduzir contaminantes contidos na água, podendo ser utilizada como ferramenta para redução da poluição nos locais onde for implantada.

2.5 TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA RELACIONADOS ESPECIFICAMENTE COM A METODOLOGIA ADOTADA

A partir da revisão da literatura, foi encontrado um trabalho que realizou o estudo da permeabilidade da estrutura de pavimentos de concreto permeável em campo e três trabalhos que realizaram a simulação da estrutura de pavimentos permeáveis em corpos de prova, porém, o objetivo dos trabalhos realizados em corpos de prova foi determinar a capacidade da estrutura de remover contaminantes da água. A seguir, é realizada uma abordagem a respeito dos trabalhos, pois, todos serviram de base para a metodologia adotada no presente trabalho.

Singh *et al.* (2019) realizaram um estudo para determinar a permeabilidade da estrutura de um pavimento de concreto permeável executado em campo. O campo experimental construído possuía comprimento de 122 cm, largura de 122 cm e profundidade de 40 cm. O revestimento utilizado foi composto por concreto permeável moldado no local, com espessura de 15 cm, e a camada de sub-base foi constituída por agregados miúdos com dimensões entre 1,18 e 12,5 mm e espessura de 25 cm. Abaixo da camada de sub-base, foram instalados drenos para coletar a água após a realização do ensaio. A Figura 20 apresenta a estrutura utilizada pelos autores em seu trabalho.

Figura 20 – Estrutura de pavimento permeável utilizada pelos autores para determinação da permeabilidade da estrutura



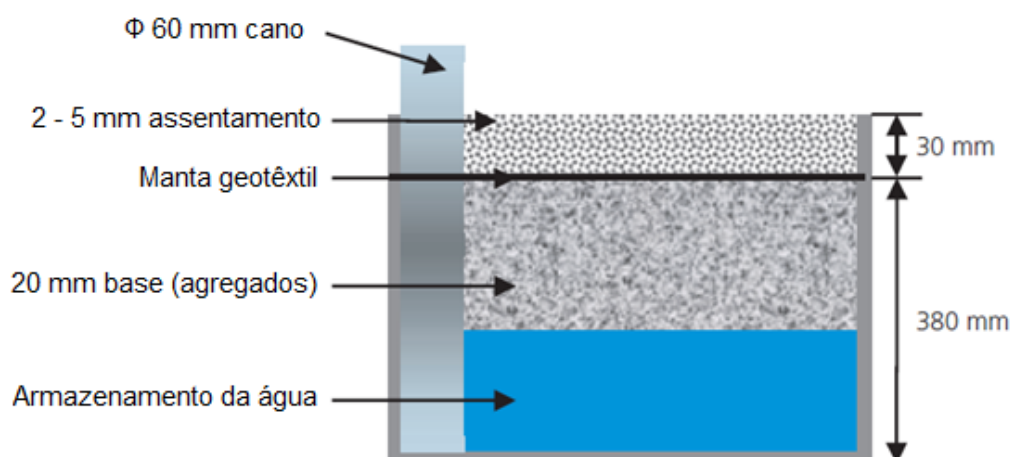
Fonte: Singh *et al.* (2019)

O ensaio consistiu em derramar uma certa quantidade de água no pavimento e determinar o tempo necessário para a água passar pelas camadas até ser coletada pelos drenos. A permeabilidade da estrutura foi obtida a partir da norma ASTM C1701 (2009).

Foram realizados dois ensaios para determinação da permeabilidade e os resultados encontrados pelos autores foram de 0,11 cm/s e 0,32 cm/s. A partir dos resultados, conclui-se que a média da permeabilidade encontrada para a estrutura estudada foi de 0,215 cm/s.

Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011) realizaram um estudo para determinar a capacidade de remoção de contaminantes da água pelos materiais constituintes da estrutura do pavimento permeável simulada em corpos de prova. O corpo de prova utilizado foi uma caixa retangular composta por polipropileno com dimensões de 52 cm de comprimento, 36 cm de largura e 40 cm de profundidade. O revestimento utilizado foi composto por pavimento intertravado permeável. A camada de assentamento utilizada foi composta por agregado miúdo com granulometria variando entre 2 e 5 mm. Entre a camada de assentamento e a camada de base, foi utilizada uma manta geotêxtil e, para a camada de base, foi utilizado agregado graúdo com granulometria de cerca de 20 mm. Na borda do corpo de prova, foi instalado um dreno para a captação da água após a realização do ensaio. A Figura 21 apresenta a estrutura utilizada pelos autores em seu trabalho. Os resultados encontrados pelos autores estão especificados na Tabela 7.

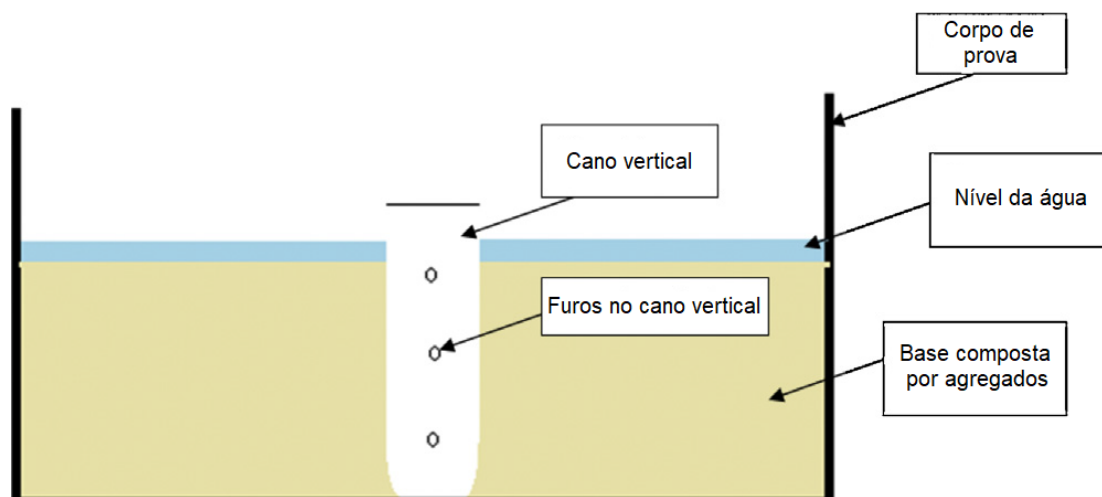
Figura 21 – Estrutura de pavimento permeável utilizada pelos autores no trabalho



Fonte: Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011)

Kazemi; Hill (2015) também realizaram um estudo para determinar a capacidade de remoção de poluentes da água pelos materiais que compõem a estrutura do pavimento permeável simulada em corpos de prova. O corpo de prova utilizado foi uma caixa retangular composta por polipropileno com dimensões de 75 cm de comprimento, 25 cm de largura e 30 cm de profundidade. O revestimento utilizado foi composto por pavimento intertravado permeável. Para a camada de base, foi utilizado agregado graúdo de composição basáltica, dolomítica e quartzosa com granulometria de cerca de 20 mm. No centro do corpo de prova, foi instalado um dreno para captação da água após a realização do ensaio. A Figura 22 apresenta a estrutura utilizada pelos autores no trabalho. Os resultados encontrados pelos autores estão especificados na Tabela 7.

Figura 22 – Estrutura de pavimento permeável utilizada pelos autores no trabalho



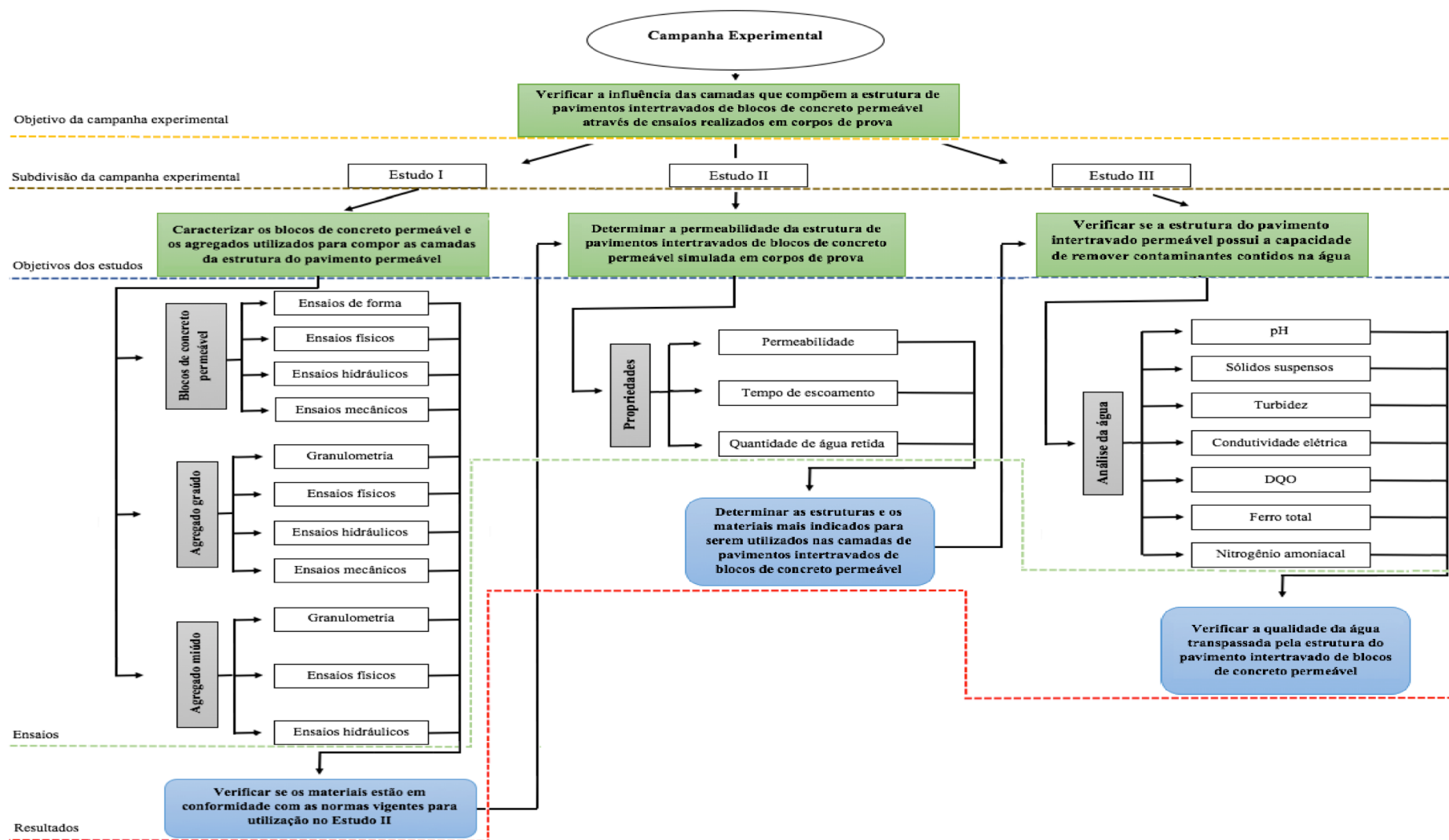
Fonte: Kazemi; Hill (2015)

Nnadi *et al.* (2015) realizaram um estudo para determinar a capacidade de remoção de determinados elementos contidos na água pelos materiais que compõem a estrutura do pavimento permeável simulada em corpos de prova. O corpo de prova utilizado foi um recipiente circular composto de polietileno com diâmetro de 71 cm e profundidade de 35 cm. O revestimento utilizado foi composto por pavimento de concreto permeável. Para a camada de base, foi utilizada uma espessura de 10 cm de cascalho. Para a camada de sub-base, foi utilizada uma espessura de 20 cm de agregado graúdo. Os resultados encontrados pelos autores estão especificados na Tabela 7.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da presente pesquisa. O trabalho foi dividido em três campanhas experimentais. A primeira campanha, denominada Estudo I, teve como objetivo realizar a caracterização dos blocos de concreto permeável e dos agregados utilizados. A segunda campanha, denominada Estudo II, teve como objetivo realizar ensaios de permeabilidade na estrutura do pavimento intertravado de blocos de concreto permeável simulada em corpos de prova. Já a terceira campanha, chamada de Estudo III, teve como objetivo determinar se as estruturas testadas possuem a capacidade de remover contaminantes contidos na água através da análise da água coletada após a realização dos ensaios do Estudo II. A Figura 23 ilustra, de forma simplificada, a sequência de procedimentos realizados para o cumprimento dos objetivos do trabalho.

Figura 23 – Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Autor

A seguir são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e, em seguida, são descritas, detalhadamente, as etapas que compõem o estudo.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados no presente trabalho foram:

- Blocos de concreto permeável
- Agregados graúdos
 - Brita 19 mm
 - Brita 9,5 mm
- Agregados miúdos
 - Pó de pedra
 - Areia com granulometria entre 0,2 mm e 0,6 mm
 - Areia com granulometria entre 0,06 mm e 0,2 mm
- Água proveniente do escoamento superficial
- Mantas geotêxteis
- Caixas de polietileno (corpos de prova) com dimensões de 66 cm de comprimento, 44 cm de largura e 45 cm de profundidade
- Anel de PVC com 30 cm de diâmetro

3.1.1 Blocos de concreto permeável

Os blocos de concreto permeável utilizados no presente trabalho foram fornecidos por uma empresa localizada na região norte do estado do Paraná. Eles apresentam dimensões de 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 6 cm de espessura, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante. Na Figura 24 pode-se visualizar um dos blocos utilizados no presente trabalho.

Figura 24 – Bloco de concreto permeável utilizado



Fonte: Autor

3.1.2 Agregados graúdos

Os agregados graúdos utilizados foram pedras britadas com dimensões máximas de 19 mm e 9,5 mm, comercialmente chamados de brita 1 e brita 0, respectivamente. As britas foram fornecidos pela mesma empresa fornecedora dos blocos de concreto permeável e são provenientes de uma pedreira localizada à cerca de 55 Km da cidade de Londrina. As pedras britadas das duas frações possuem composição basáltica. Os agregados graúdos utilizados no presente trabalho estão ilustrados na Figura 25.

Figura 25 – Agregados graúdos utilizados. (a) brita 1 e (b) brita 0



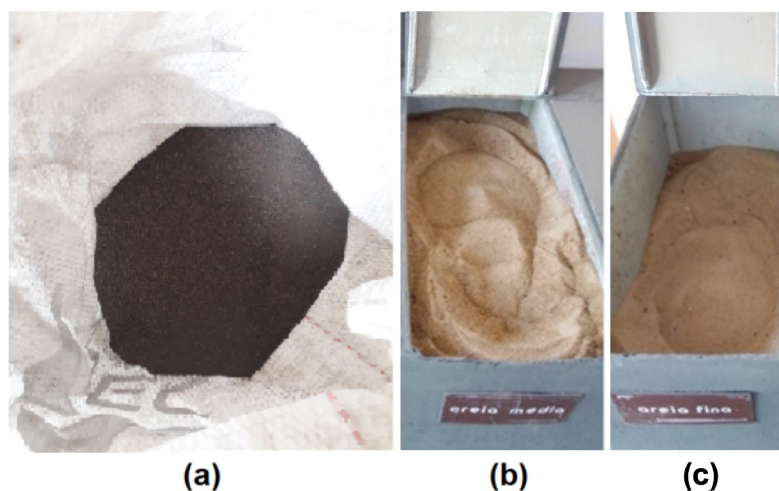
Fonte: Autor

3.1.3 Agregados miúdos

O pó de pedra utilizado também foi fornecido pela empresa citada anteriormente. É proveniente da mesma pedreira que os agregados graúdos, sendo obtido pela cominuição de rocha de composição basáltica.

A areia natural utilizada é proveniente do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Londrina, possuindo uma composição quartzosa. Foram utilizadas duas frações granulométricas, sendo uma contendo granulometria entre 0,2 mm e 0,6 mm, classificada como areia média e a outra com granulometria entre 0,06 mm e 0,2 mm, sendo classificada como areia fina, de acordo com a ABNT NBR 7211 (2005). A Figura 26 apresenta os agregados miúdos utilizados.

Figura 26 – Agregados miúdos utilizados. (a) pó de pedra, (b) areia média e (c) areia fina



Fonte: Autor

3.1.4 Água proveniente do escoamento superficial

A fim de verificar se a estrutura do pavimento intertravado de concreto permeável apresenta a capacidade de remover contaminantes contidos na água, os ensaios de permeabilidade foram realizados com uma água coletada do escoamento superficial.

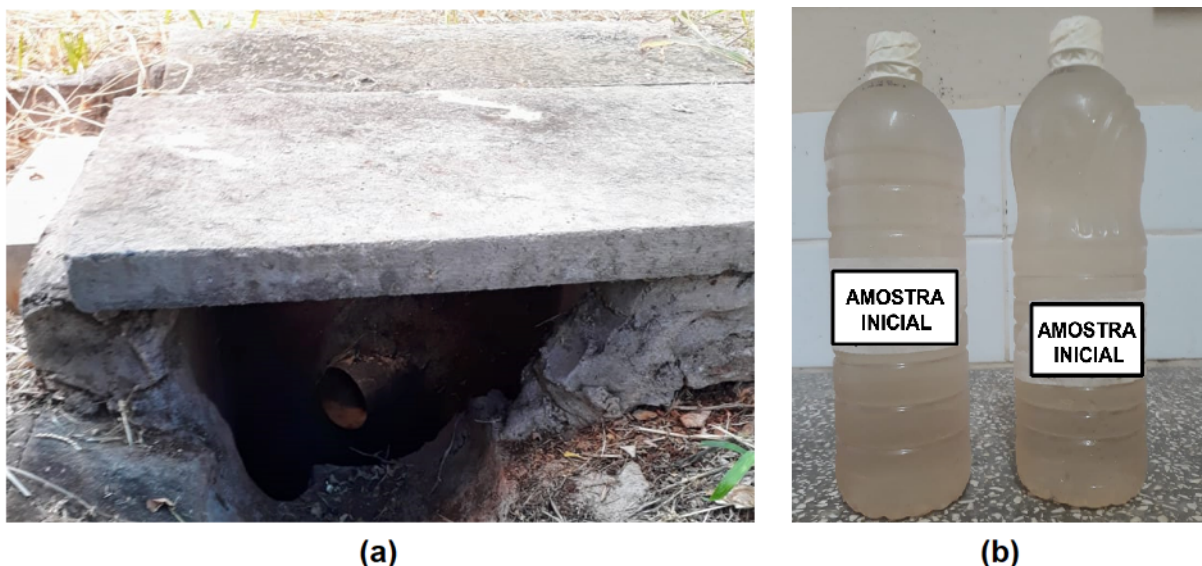
A água utilizada foi coletada em uma boca de lobo localizada às margens de uma via que se localiza ao lado do lago Igapó, na cidade de Londrina. Optou-se pela coleta da água neste local, pois, é uma via com grande movimento de

veículos, onde a água proveniente da chuva escoa pelas margens da via até as bocas de lobo, caindo direto no lago Igapó, sem nenhum tipo de tratamento.

Foram coletados, aproximadamente, 200 litros de água do escoamento superficial. A coleta foi realizada em dois dias distintos, ambos com intervalo de dois dias após um evento de grande precipitação. A água coletada foi armazenada em uma geladeira para que não tivesse suas propriedades alteradas até a realização dos ensaios.

A Figura 27a apresenta a boca de lobo onde foi coletada a água utilizada na realização dos ensaios e a Figura 27b ilustra duas amostras da água coletada.

Figura 27 – Local de coleta da água e amostras coletadas



Fonte: Autor

Observando a Figura 27b, é possível verificar que a água coletada é turva e apresenta coloração amarronzada, em virtude de solo e sedimentos adquiridos durante o escoamento na superfície, visto que o solo da cidade de Londrina é caracterizado como um solo argiloso de coloração marrom a avermelhada.

3.1.5 Manta geotêxtil

As mantas geotêxteis utilizadas são compostas por filamentos de polipropileno, com 1 mm de espessura e abertura de malha de 120 μm , de acordo com as especificações do fabricante. As mantas geotêxteis foram utilizadas com a

finalidade de separar e evitar migração do material de uma camada para outra no interior dos corpos de prova. Na Figura 28 pode ser vista uma das mantas geotêxteis utilizadas no presente trabalho.

Figura 28 – Manta geotêxtil utilizada



Fonte: Autor

3.1.6 Caixas de polietileno (corpos de prova)

Para a escolha dos corpos de prova, algumas premissas foram levadas em consideração: os corpos de prova deveriam ser compostos por um material que permitisse o escoamento da água sem interferências durante o ensaio, deveriam ser de tamanho adequado para abranger as espessuras de todas as camadas que compõem a estrutura do pavimento e a água deveria ser coletada após o procedimento de ensaio.

A partir disto, os corpos de prova escolhidos para realização dos ensaios foram quatro caixas de polietileno, retangulares e transparentes, ambas com dimensões de 66 cm de comprimento, 44 cm de largura e 45 cm de profundidade. A utilização destes corpos de prova possibilitou a montagem e execução das estruturas em seu interior para a posterior realização do ensaio de permeabilidade. Foram adaptados quatro corpos de prova, de modo que todos pudessem ser utilizados simultaneamente para cada ensaio realizado no Estudo II.

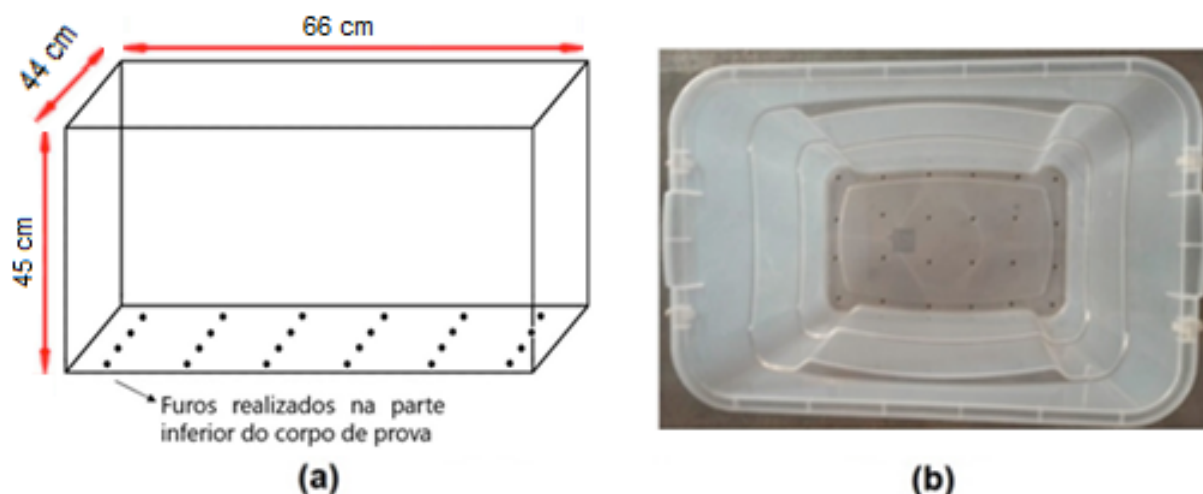
A escolha e adaptações feitas nos corpos de prova utilizados no presente trabalho foram realizadas levando em consideração os trabalhos realizados por Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011), Kazemi; Hill (2015) e Nnadi *et al.* (2015),

que realizaram simulações da estrutura de pavimentos permeáveis em corpos de prova, vide item 2.5.

A seguir, são detalhados os procedimentos de adaptação dos corpos de prova:

- I. Na parte de baixo dos corpos de prova, foram realizados furos circulares com diâmetro de 1 cm, distantes 10 cm entre si, de modo a viabilizar a coleta da água transpassada pela realização do ensaio. A Figura 29a apresenta uma ilustração esquemática do processo de adaptação, enquanto que, na Figura 29b, pode ser visto o procedimento realizado em um dos corpos de prova;

Figura 29 – Passo I do procedimento de adaptação dos corpos de prova



Fonte: Autor

- II. Abaixo dos corpos de prova, foram instalados coletores com dimensões de 60 cm de comprimento, 50 cm de largura e 8 cm de profundidade, para a coleta da água após a realização do ensaio. A Figura 30a representa uma ilustração esquemática do processo, enquanto que, na Figura 30b, está demonstrada uma fotografia de detalhe da água saindo do corpo de prova e sendo coletada pelo coletor instalado abaixo do corpo de prova.

Figura 30 – Passo II do procedimento de adaptação dos corpos de prova



Fonte: Autor

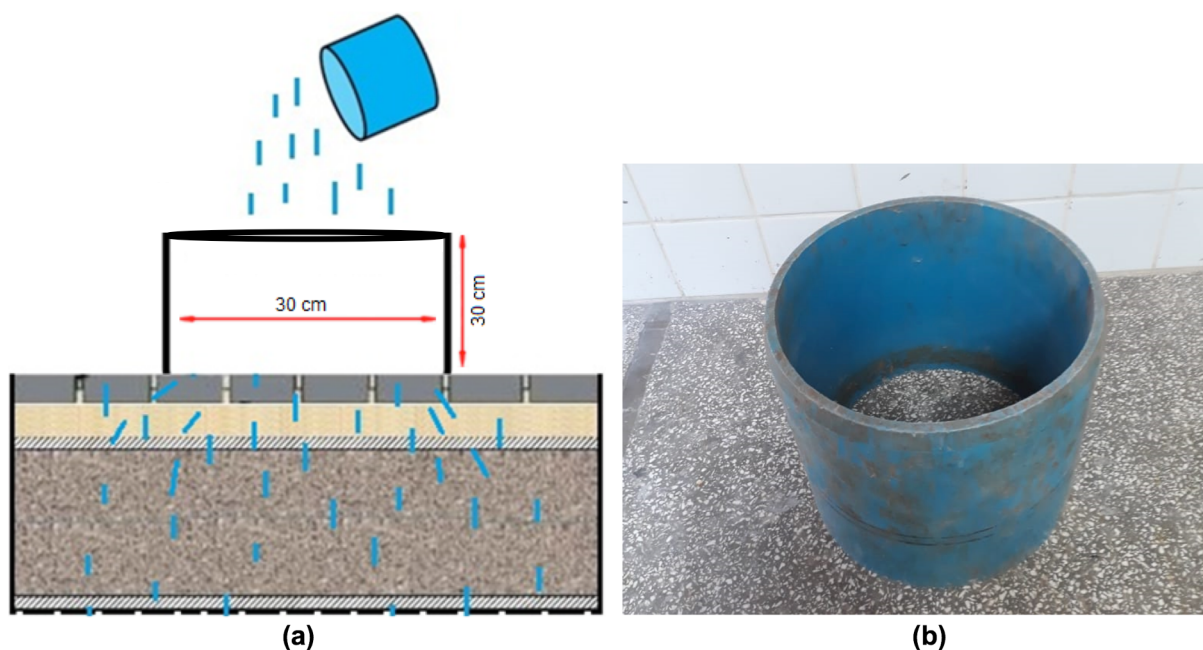
3.1.7 Anel de PVC

Para que ocorresse uma uniformidade na distribuição da água no interior dos corpos de prova durante o ensaio, foi utilizado um anel composto de PVC com dimensões de 30 cm de diâmetro e 30 cm de altura, seguindo as especificações da ASTM C1701 (2009). O anel foi instalado acima dos blocos de concreto permeável na parte central dos corpos de prova. Para garantir a estanqueidade do conjunto, foi colocado, ao redor do anel, tanto na parte interna quanto na parte externa, silicone acético para evitar que a água saísse pelos espaços vazios entre o anel e os blocos de concreto permeável.

Durante o processo de saturação do material, bem como durante os ensaios, observou-se que não ocorreu vazamento da água, garantindo assim, que toda a água do ensaio se infiltrou pela estrutura de revestimento composta pelos blocos de concreto permeável.

A Figura 31a ilustra, de forma esquemática, como o anel uniformiza a distribuição da água durante a realização do ensaio, enquanto que, a Figura 31b, mostra o anel utilizado no presente trabalho.

Figura 31 – Anel de infiltração utilizado e ilustração do respectivo ensaio

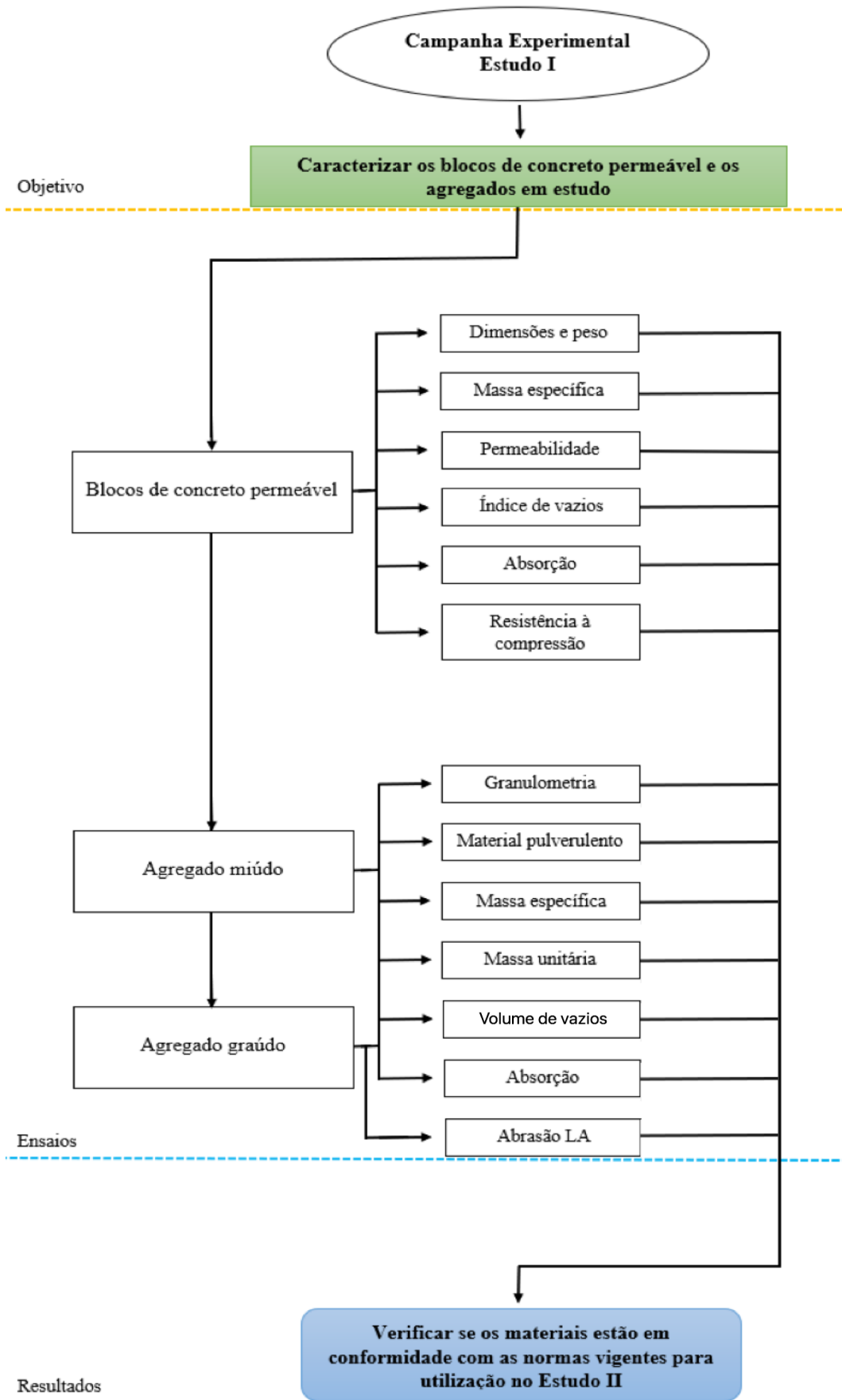


Fonte: Autor

3.2 ESTUDO I

O objetivo do Estudo I foi realizar a caracterização dos blocos de concreto permeável e dos agregados utilizados no presente trabalho a fim de verificar se os mesmos estavam aptos a serem utilizados para pavimentação a partir das normas vigentes. Os ensaios do Estudo I foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Londrina. A Figura 32 ilustra os procedimentos realizados no Estudo I para atingir os objetivos desejados.

Figura 32 – Fluxograma do Estudo I



Fonte: Autor

3.2.1 Blocos de concreto permeável

Para caracterização dos blocos de concreto permeável foram realizados ensaios de forma, ensaios físicos, ensaios hidráulicos e ensaios mecânicos. O Quadro 11 apresenta os ensaios de caracterização realizados, juntamente com os seus respectivos procedimentos normativos utilizados.

Quadro 11 – Ensaio de caracterização dos blocos de concreto permeável e seus respectivos procedimentos normativos utilizados

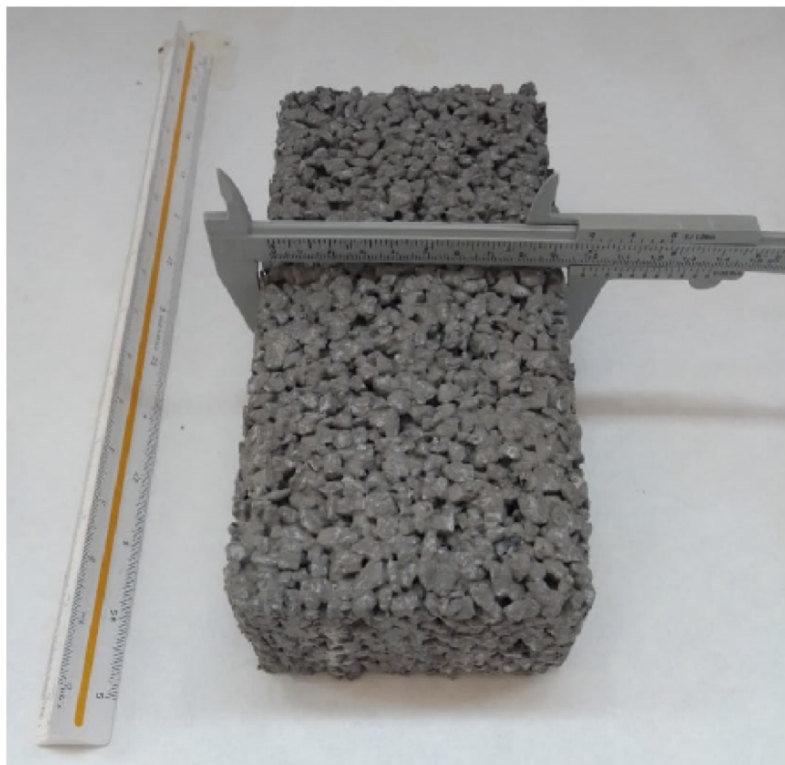
Ensaio	Procedimento normativo
Forma	ABNT NBR 16416 (2015)
Massa específica seca	ABNT NBR 9778 (2009)
Massa específica saturada	ABNT NBR 9778 (2009)
Permeabilidade	ASTM C1701 (2009)
Índice de vazios	Batezini (2013)
Absorção	ABNT NBR 9781 (2013)
Resistência à compressão	ABNT NBR 9781 (2013)

Fonte: Autor

3.2.1.1 Ensaio de forma

Para determinação das dimensões dos blocos, foi utilizado um paquímetro analógico de 200 mm. Foram determinadas as medidas de comprimento, largura e espessura de 10 blocos de concreto permeável escolhidos aleatoriamente. Os resultados foram calculados como sendo a média das medidas. A ABNT NBR 16416 (2015) estabelece que os blocos de concreto permeável devem possuir dimensões limites de ± 3 mm dos valores especificados pelo fabricante. A Figura 33 ilustra a realização dos ensaios de forma.

Figura 33 – Realização dos ensaios de forma



Fonte: Autor

3.2.1.2 Ensaio físicos

A determinação da massa específica na condição seca e na condição saturada foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 9778 (2009). A determinação foi realizada a partir da amostragem de 4 blocos escolhidos aleatoriamente, de acordo com o respectivo procedimento normativo.

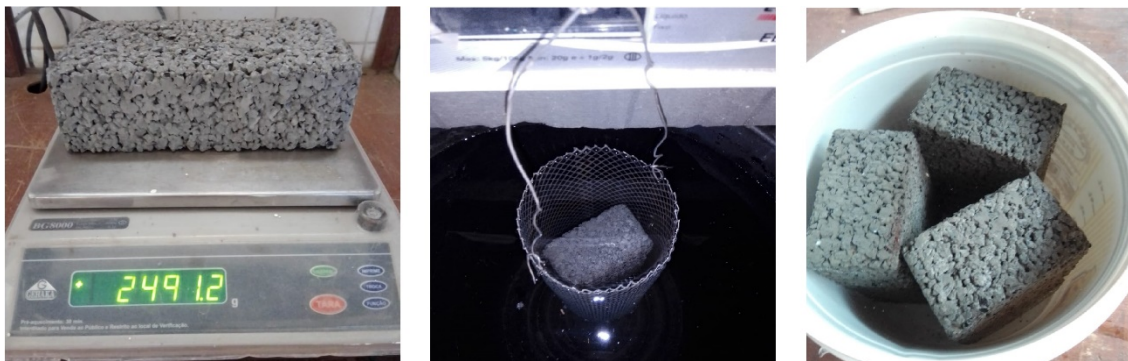
A norma ABNT NBR 16416 (2015) especifica que o valor mínimo para a massa específica, especificado em projeto de pavimentos permeáveis, deve ser de 1600 Kg/m^3 ($1,6 \text{ g/cm}^3$), com tolerância de 80 Kg/m^3 ($0,8 \text{ g/cm}^3$).

3.2.1.3 Propriedades hidráulicas

A determinação do índice de vazios dos blocos de concreto permeável foi realizada seguindo a metodologia adotada por Batezini (2013), descrita no item 2.1.2.2.1, enquanto que os ensaios de absorção e permeabilidade foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 9781 (2013) e ASTM C1701 (2009), respectivamente. Os resultados foram expressos como sendo a média resultante de quatro ensaios realizados, de acordo com o respectivo procedimento normativo. A

Figura 34 ilustra a realização de alguns dos ensaios hidráulicos.

Figura 34 – Realização dos ensaios hidráulicos dos blocos de concreto permeável



Fonte: Autor

Tennis; Leming; Akers (2004) e a ACI 522R (2010) sugerem que se utilizem concretos permeáveis com índice de vazios na ordem de 20% para garantir bons valores de permeabilidade e resistência.

A ABNT NBR 16416 (2015) estabelece que o pavimento permeável, independentemente do tipo de revestimento adotado, deve apresentar, quando recém-construído, um coeficiente de permeabilidade maior que 1 mm/s.

De acordo com a norma brasileira, ABNT NBR 16416 (2015), e a norma americana, ACI 522R (2010), não são especificados valores recomendados de absorção para o concreto permeável.

3.2.1.4 Propriedades mecânicas

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 9781 (2013). Os resultados foram expressos como sendo a média dos ensaios de quatro blocos de concreto permeável escolhidos aleatoriamente, de acordo com o respectivo procedimento normativo. A Figura 35 ilustra o procedimento de realização do ensaio.

Figura 35 – Ensaio de resistência à compressão de um dos blocos de concreto permeável



Fonte: Autor

Segundo a norma ABNT NBR 16416 (2015), os blocos de concreto permeável para pavimentação devem possuir resistência à compressão ≥ 20 MPa. Já a norma americana ACI 522R (2010), recomenda que os valores médios sejam de cerca de 17 MPa.

3.2.2 Agregados

A caracterização dos agregados graúdo e miúdo seguiram os ensaios e procedimentos normativos apresentados no Quadro 12. Todos os resultados foram expressos como sendo a média resultante entre dois ensaios realizados, de acordo com o respectivo procedimento normativo utilizado.

Quadro 12 – Ensaio de caracterização dos agregados graúdo e miúdo e seus respectivos procedimentos normativos utilizados

Ensaio	Agregado graúdo	Agregado miúdo
	Procedimento normativo	Procedimento normativo
Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248 (2003)	ABNT NBR NM 248 (2003)
Material pulverulento	ABNT NBR NM 46 (2003)	ABNT NBR NM 46 (2003)
Massa específica	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR 9776 (1987)
Massa específica saturada superfície seca	ABNT NBR NM 53 (2009)	-
Massa específica aparente	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR NM 52 (2003)
Massa unitária em estado solto	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)
Massa unitária em estado compactado	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)
Volume de vazios	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)
Absorção	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR NM 30 (2001)
Abração Los Angeles	ABNT NBR NM 51 (2001)	-

Fonte: Autor

3.2.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados graúdo e miúdo foram realizadas conforme a norma ABNT NBR NM 248 (2003) e tiveram como objetivo a determinação da distribuição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima dos agregados.

Também foram calculados o coeficiente de não uniformidade e o coeficiente de curvatura dos agregados. Segundo Pinto (2000), quando o coeficiente de não uniformidade for menor que 5, os solos são considerados uniformes. Valores entre 5 e 15, são chamados de mediamente uniformes. E valores maiores que 15, são considerados desuniformes. O mesmo autor cita que o coeficiente de curvatura mede a graduação dos solos. Se o solo apresenta valores entre 1 e 3, ele é bem graduado. Valores maiores do que 3, indicam um solo mal graduado.

A ABNT NBR 16416 (2015) recomenda que os agregados utilizados para a camadas de assentamento possuam granulometria entre 9,5 e 1,16 mm, com dimensão máxima de 9,5 mm. Para a camada de base, é recomendado que os agregados utilizados estejam na faixa granulométrica entre 25 e 2,36 mm, com dimensão máxima de 25 mm. Já para a camada de sub-base, o recomendado é que

a granulometria dos agregados seja de valores entre 63 e 19 mm, com dimensão máxima de 63 mm.

3.2.2.2 Material pulverulento

O ensaio de material pulverulento para os agregados graúdo e miúdo foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 46 (2003), através do método A. A ABNT NBR 16416 (2015) estabelece que os agregados utilizados para as camadas de assentamento, base e sub-base da estrutura de pavimentos de concreto permeável devem possuir quantidade de material pulverulento $\leq 2\%$ do total de material utilizado.

3.2.2.3 Índices físicos

A determinação da massa específica, massa específica saturada superfície seca, massa específica aparente, absorção, massa unitária e volume de vazios dos agregados graúdo e miúdo, foram baseadas nas normas especificadas no Quadro 13.

Quadro 13 – Ensaio de caracterização dos índices físicos dos agregados graúdo e miúdo e seus respectivos procedimentos normativos utilizados

	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Índices físicos	Procedimento normativo	Procedimento normativo
Massa específica	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR 9776 (1987)
Massa específica saturada superfície seca	ABNT NBR NM 53 (2009)	-
Massa específica aparente	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR NM 52 (2003)
Massa unitária em estado solto	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)
Massa unitária em estado compactado	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)
Volume de vazios	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)
Absorção	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR NM 30 (2001)

Fonte: Autor

A Figura 36 ilustra os ensaios físicos realizados para os agregados graúdo e miúdo.

Figura 36 – Realização dos ensaios físicos. Em (a) agregado graúdo e (b) agregado miúdo



Fonte: Autor

3.2.2.4 Índices mecânicos – Abrasão Los Angeles

A fim de avaliar a abrasão dos agregados graúdos, foi realizado o ensaio de abrasão Los Angeles, conforme a ABNT NBR NM 51 (2001). A Figura 37 ilustra o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 37 – Equipamento utilizado no ensaio de abrasão Los Angeles



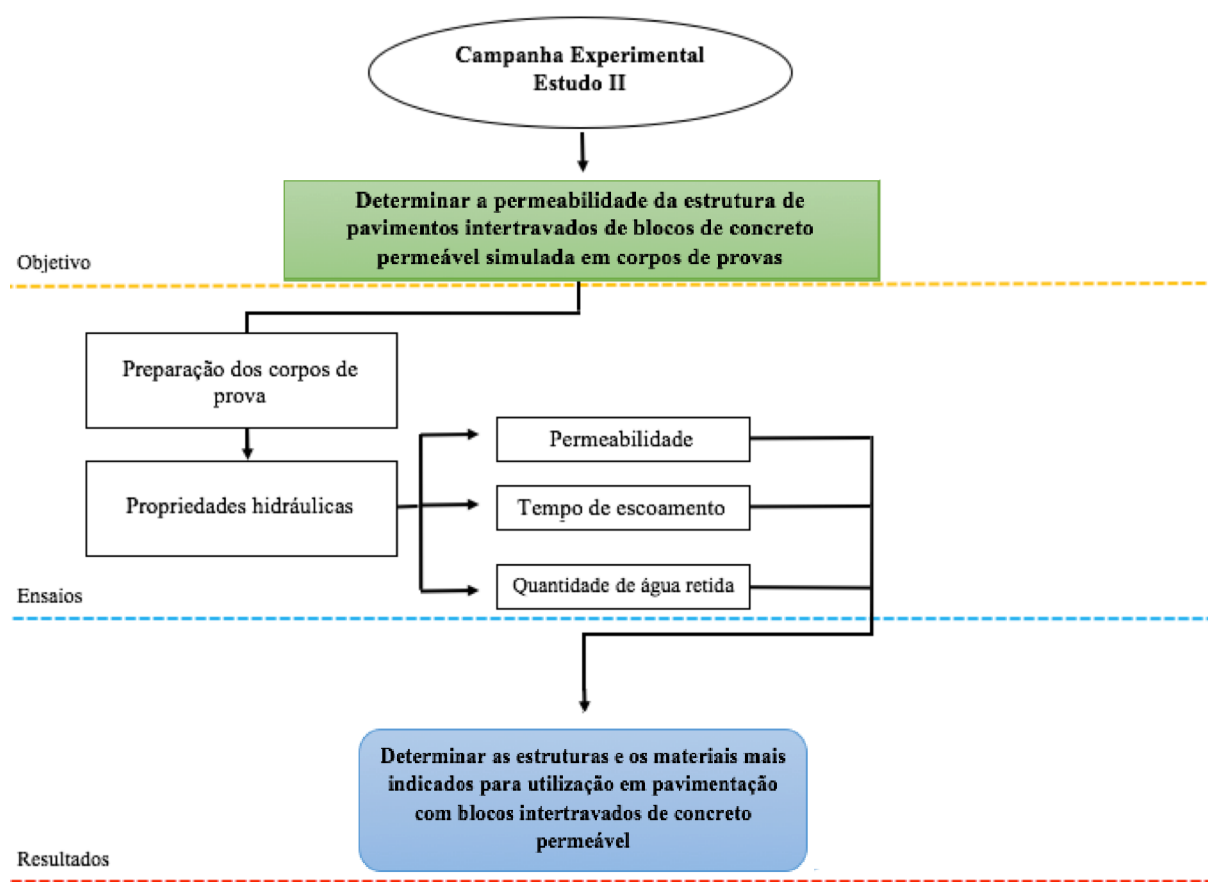
Fonte: Autor

Segundo a norma ABNT NBR 16416 (2015), os agregados utilizados para as camadas de assentamento, base e sub-base da estrutura de pavimentos de concreto permeável devem possuir resultados de abrasão $< 40\%$.

3.3 ESTUDO II

O Estudo II teve como objetivo determinar a permeabilidade da estrutura do pavimento intertravado permeável, formada pelos blocos de concreto permeável mais suas respectivas camadas de assentamento, base e sub-base (quando utilizada). Para atingir os objetivos propostos pela pesquisa, foram simuladas, em corpos de prova, doze estruturas compostas pela variação dos diferentes materiais que são utilizados para compor as camadas da estrutura do pavimento intertravado de blocos de concreto permeável. A partir da realização dos ensaios, foi obtida a permeabilidade da estrutura e a quantidade de água que ficou retida em seu interior. Através disto, foram determinadas as estruturas e materiais mais indicados para serem utilizados para pavimentação com blocos intertravados de concreto permeável. A Figura 38 ilustra os procedimentos realizados no Estudo II para atingir os objetivos propostos.

Figura 38 – Fluxograma do Estudo II



Fonte: Autor

3.3.1 Planejamento experimental

A seguir, é apresentado o planejamento experimental utilizado na pesquisa. Primeiramente, é detalhada a delimitação das camadas que compõem as diferentes estruturas testadas, em seguida, é explicada a nomenclatura adotada para os corpos de prova e, por fim, são apresentados os diferentes tipos de materiais utilizados, bem como as suas respectivas espessuras e combinações de camadas que foram testadas.

3.3.1.1 Estruturação das camadas que compõem a estrutura do pavimento permeável

Os corpos de prova utilizados foram as caixas descritas no item 3.1.6. A camada de revestimento foi composta pelos blocos de concreto permeável, descritos no item 3.1.1. A camada de assentamento utilizada foi composta pela variação entre areia média e areia fina, descritas no item 3.1.3, com uma espessura de 5 cm. Entre a camada de assentamento e a camada de base, foi instalada uma manta geotêxtil com 1 mm de espessura, de modo a evitar a perda de material entre as camadas, conforme o item 3.1.5. As camadas de base e sub-base utilizadas foram compostas pela variação dos agregados graúdo, miúdo e pó de pedra, citados nos itens 3.1.2 e 3.1.3.

Conforme especificado no item 2.3.3, a estrutura do pavimento permeável pode ser construída contendo três camadas (revestimento, assentamento e base) ou otimizada contendo quatro camadas (revestimento, assentamento, base e sub-base), de acordo com as recomendações e exigências do projeto. Desta forma, no presente trabalho, foram realizados ensaios em estruturas contendo três e quatro camadas.

Quando se utilizou somente a camada de base (sem sub-base), a mesma foi composta por uma espessura fixa de 30 cm. Quando foram usadas as duas camadas (base e sub-base), a camada de base foi composta por uma espessura fixa de 10 cm, enquanto que a espessura da camada de sub-base também foi fixa, sendo igual a 20 cm, de acordo com o item 2.3.3. Assim, a soma das espessuras das camadas de base e sub-base deveriam ser de 30 cm.

3.3.1.2 Nomenclatura adotada para os corpos de prova

Para a nomenclatura dos corpos de prova, foram utilizadas as iniciais dos materiais que foram usados na composição da estrutura. O Quadro 14 apresenta as iniciais que foram adotadas para identificar os respectivos corpos de prova.

Quadro 14 – Iniciais adotadas para identificação dos corpos de prova

E	Estrutura
Ref	Referência
B1	Brita 1
B0	Brita 0
P	Pó de pedra
AM	Areia média
AF	Areia fina

Fonte: Autor

O Quadro 15 ilustra a nomenclatura adotada para todos os corpos de prova ensaiados. A determinação do nome levou em consideração os materiais utilizados na composição da estrutura, seguindo a ordem do assentamento para a base, ou sub-base, quando utilizada.

Quadro 15 – Nomenclatura adotada para identificação dos corpos de prova

Nomenclatura	Composição da estrutura
E.Ref	Areia média, pó de pedra
E.AM.B1	Areia média, brita 1
E.AM.B0	Areia média, brita 0
E.AF.P	Areia fina, pó de pedra
E.AF.B1	Areia fina, brita 1
E.AF.B0	Areia fina, brita 0
E.AM.B0.B1	Areia média, brita 0, brita 1
E.AM.P.B1	Areia média, pó de pedra, brita 1
E.AM.P.B0	Areia média, pó de pedra, brita 0
E.AF.B0.B1	Areia fina, brita 0, brita 1
E.AF.P.B1	Areia fina, pó de pedra, brita 1
E.AF.P.B0	Areia fina, pó de pedra, brita 0

Fonte: Autor

A estrutura de Referência (E.Ref) foi baseada nos materiais e na estrutura que são atualmente utilizados pela empresa fornecedora dos materiais em seus projetos de pavimentação permeável. Essa estrutura foi escolhida como referência para fins de comparação e correlação entre os materiais e a estrutura que são utilizados atualmente com novas possibilidades exploradas na presente pesquisa.

3.3.1.3 Materiais e estruturas projetadas

Foram utilizados diferentes tipos de materiais (brita 1, brita 0, pó de pedra, areia média e areia fina) e foram testadas variações destes materiais para a composição das camadas (assentamento, base e sub-base), a fim de determinar quais as estruturas e os respectivos materiais mais recomendadas para serem utilizados em pavimentação de blocos intertravados de concreto permeável. Os parâmetros utilizados para determinação das estruturas e materiais mais indicados para uso em pavimentação permeável foram baseados nos ensaios de permeabilidade, tempo de escoamento, quantidade de água retida na estrutura e capacidade da estrutura de remover contaminantes contidos na água, todos realizados em corpos de prova. As variações de materiais e espessuras testadas foram baseadas nas normas ACI 522R (2010), ABNT NBR 15953 (2011), ACI 522.1M (2013) e ABNT NBR 16416 (2015), e nos estudos realizados por ABCP (2010b), Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011), ABCP (2013), Drake; Bradford; Van Seters (2014), Kazemi; Hill (2015), Selbig; Buer; Danz (2019) e Singh *et al.* (2019).

Os materiais utilizados para compor cada uma das camadas deveriam estar dentro dos parâmetros exigidos pela legislação vigente. Por este motivo, levando em consideração os resultados encontrados no Estudo I, alguns materiais, como o pó de pedra, foram utilizados somente para compor a camada de base, não podendo ser utilizados para a camada de sub-base, pois as normas vigentes, ACI 522R (2010) e ABNT NBR 16416 (2015), indeferem seu uso devido aos parâmetros estabelecidos.

O planejamento experimental para os diferentes tipos de materiais utilizados, bem como as suas respectivas espessuras e combinações de camadas que foram testadas, estão apresentados no Quadro 16.

Quadro 16 – Planejamento experimental

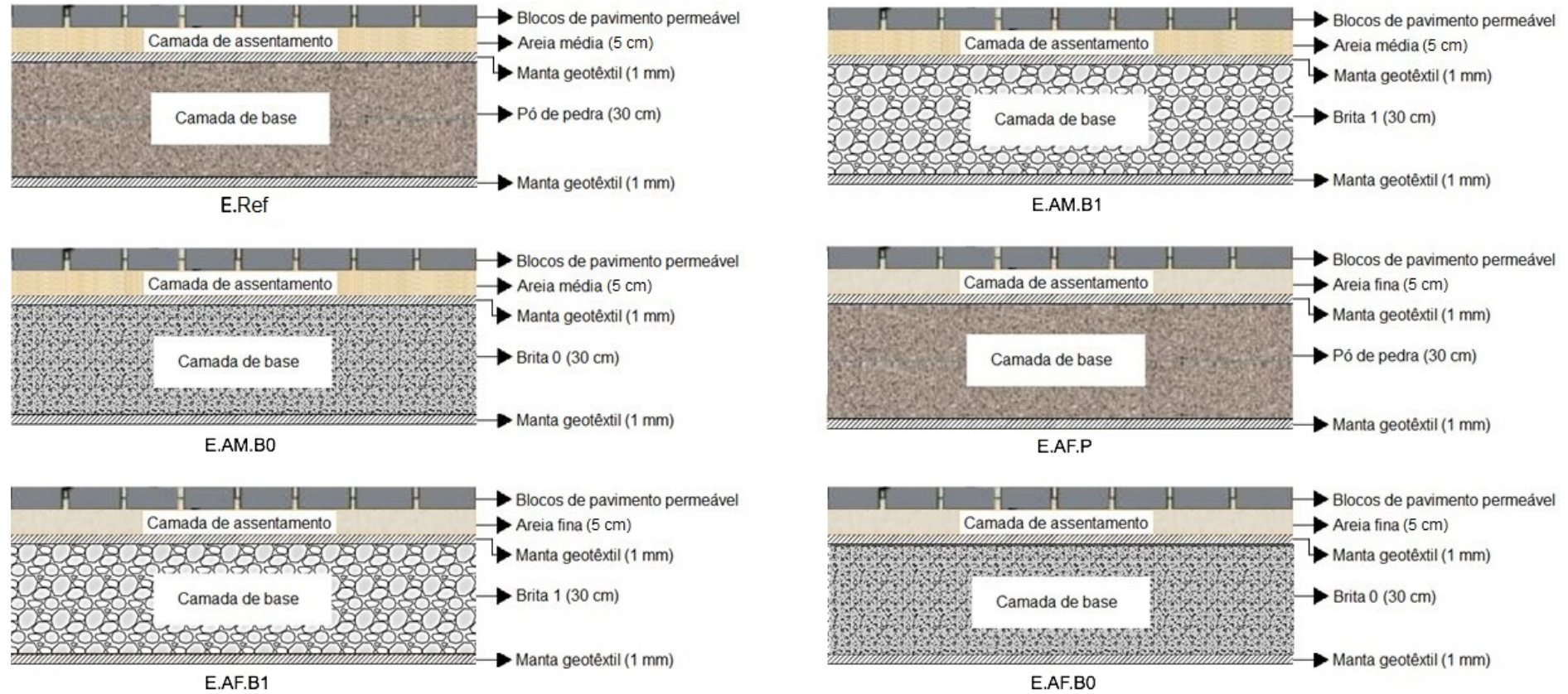
Estrutura	Revestimento		Assentamento		Base		Sub-base	
	Material	Espessura	Material	Espessura	Material	Espessura	Material	Espessura
E.Ref	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia média	5 cm	Pó de pedra	30 cm	-	-
E.AM.B1	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia média	5 cm	Brita 1	30 cm	-	-
E.AM.B0	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia média	5 cm	Brita 0	30 cm	-	-
E.AF.P	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia fina	5 cm	Pó de pedra	30 cm	-	-
E.AF.B1	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia fina	5 cm	Brita 1	30 cm	-	-
E.AF.B0	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia fina	5 cm	Brita 0	30 cm	-	-
E.AM.B0.B1	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia média	5 cm	Brita 0	10 cm	Brita 1	20 cm
E.AM.P.B1	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia média	5 cm	Pó de pedra	10 cm	Brita 1	20 cm
E.AM.P.B0	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia média	5 cm	Pó de pedra	10 cm	Brita 0	20 cm
E.AF.B0.B1	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia fina	5 cm	Brita 0	10 cm	Brita 1	20 cm
E.AF.P.B1	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia fina	5 cm	Pó de pedra	10 cm	Brita 1	20 cm
E.AF.P.B0	Blocos de concreto permeável	6 cm	Areia fina	5 cm	Pó de pedra	10 cm	Brita 0	20 cm

Fonte: Autor

O sistema de infiltração adotado nos ensaios foi o sistema sem infiltração, conforme item 2.3.7.3. Optou-se pela adoção deste sistema, pois, os corpos de prova deveriam ter tamanho suficiente para abrangerem todas as camadas que compõem a estrutura do pavimento permeável em seu interior. Desta forma, caso fosse utilizado o sistema de infiltração total ou parcial, a camada de subleito deveria ser adicionada à estrutura. Devido à espessura da camada de subleito geralmente ser maior do que a soma das espessuras das camadas de base e sub-base, não foi encontrado um corpo de prova com dimensões que permitissem a instalação de uma estrutura de pavimento contendo o subleito.

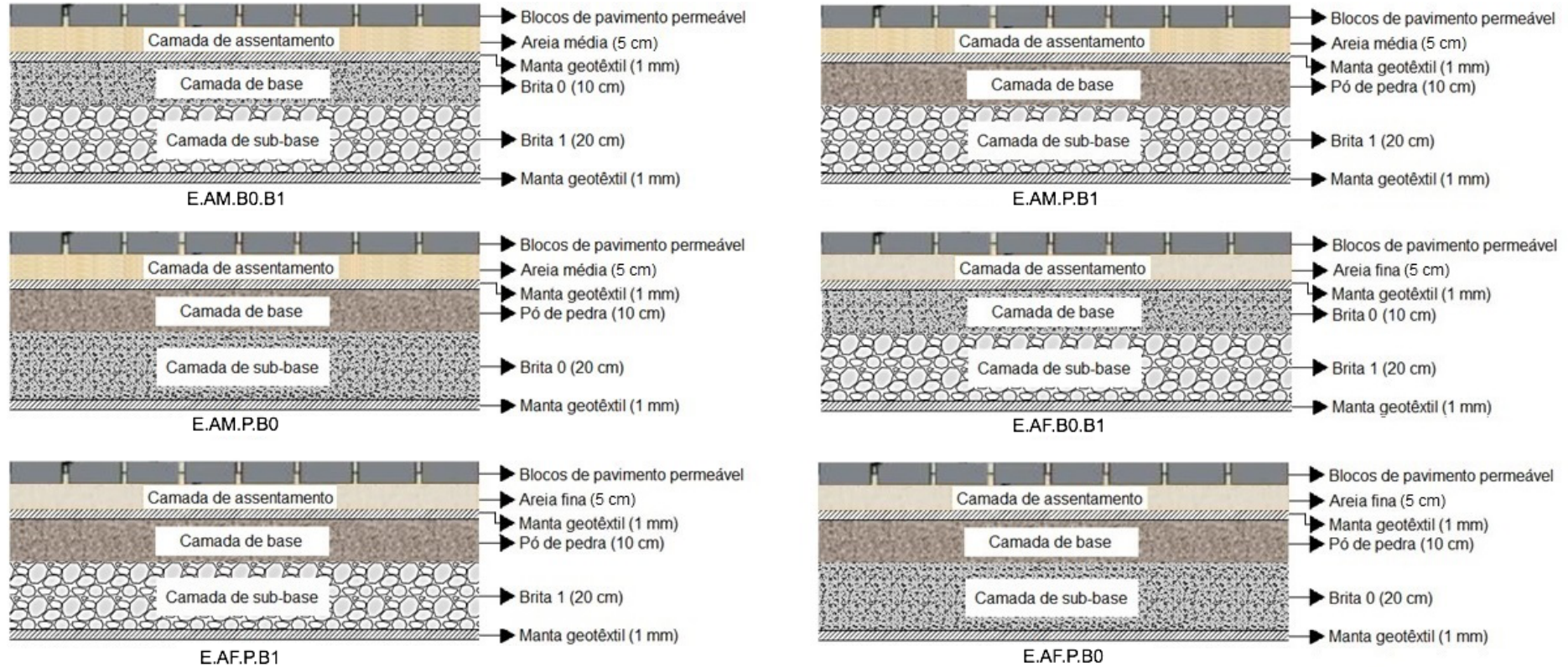
A Figura 39 apresenta os croquis das estruturas de pavimentos permeáveis testadas contendo três camadas (revestimento, assentamento e base). Já a Figura 40 apresenta os croquis das estruturas de pavimentos testadas contendo quatro camadas (revestimento, assentamento, base e sub-base).

Figura 39 – Croquis das estruturas do pavimento testadas contendo três camadas



Fonte: Autor

Figura 40 – Croquis das estruturas do pavimento testadas contendo quatro camadas



Fonte: Autor

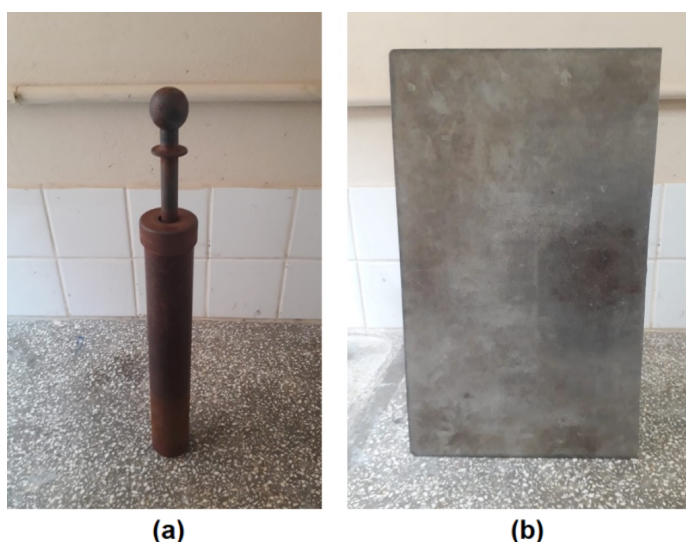
3.3.2 Preparação dos corpos de prova

A seguir, são detalhados os procedimentos de preparação dos corpos de prova. Primeiramente, é detalhada a compactação das camadas, bem como as etapas realizadas para determinação do número de golpes utilizados para a realização do procedimento de compactação, e, em seguida, são apresentados os procedimentos de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova.

3.3.2.1 Compactação das camadas

Para a compactação das camadas no interior dos corpos de prova, foi utilizado o método que faz uso do cilindro Proctor Hammer, a partir da metodologia adotada por Risson (2017). Este método foi escolhido por permitir a operação com menor interferência humana, resultando em menores variações nos diferentes corpos de prova, obtendo assim, resultados mais representativos. Para a compactação ao longo de toda a camada, utilizou-se uma chapa metálica com dimensões de 60 cm de comprimento, 40 cm de largura, 0,5 cm de espessura e peso de 3,2 Kg, e o equipamento Proctor de 2,5 Kg para aplicar os golpes. Na Figura 41a está ilustrado o equipamento Proctor Hammer, enquanto que, na Figura 41b, pode ser visualizada a chapa metálica.

Figura 41 – Equipamentos e acessórios utilizados para compactação das camadas



Fonte: Autor

A compactação foi realizada nas camadas de base e sub-base a cada 10 cm de espessura. Desta forma, quando a camada possuiu 10 cm de espessura, foi realizada uma compactação (aplicação de 4 golpes). Quando a camada possuiu 20 cm de espessura, foram realizadas duas compactações, sendo uma a cada 10 cm. E, quando a camada foi composta por 30 cm de espessura, foram realizadas três compactações, uma a cada 10 cm.

A compactação foi realizada em um único ponto localizado no centro do corpo de prova, seguindo a metodologia adotada por Risson (2017). Segundo a autora, a compactação com golpes centrados compacta mais uniformemente a camada em comparação com golpes distribuídos ao longo da chapa metálica.

Para determinação do número de golpes necessários para a compactação das camadas, foram utilizados dois parâmetros de calibração: massa unitária e permeabilidade.

3.3.2.1.1 Massa unitária

A massa unitária foi utilizada como parâmetro de calibração do número de golpes, pois, expressa a relação entre massa e volume do agregado, incluindo os vazios permeáveis. A massa unitária foi medida a partir da relação massa/volume do material no interior do corpo de prova, sendo realizada da seguinte maneira:

- Foram colocados 10 cm de material em estado seco, correspondente à espessura de compactação da camada, no interior de um corpo de prova. Inicialmente, o corpo de prova foi pesado para a determinação da massa de agregado colocada. A massa utilizada para determinação da massa unitária levou em consideração apenas o peso do agregado, excluindo o peso do corpo de prova;

- Em seguida, determinou-se o volume do agregado, levando em consideração as dimensões do corpo de prova, especificadas no item 3.1.6. A partir disto, mediu-se a massa unitária da camada sem nenhuma compactação;

- Posteriormente, foi aplicado um golpe e realizadas as mesmas medidas: massa e volume do agregado no interior do corpo de prova. Constatou-se que não houve variação na massa do agregado após o primeiro golpe, porém, ocorreu uma diminuição na espessura da camada, pois a compactação causou uma diminuição dos espaços vazios, gerando assim, uma conseqüente diminuição da

espessura. Assim, determinou-se o quanto a compactação reduziu na espessura da camada para, em seguida, realizar o cálculo da massa unitária após a compactação com um golpe;

- O processo se repetiu com o aumento de mais um golpe por vez, até que a massa unitária atingisse a máxima compactação, ou seja, não apresentasse variação. Estes ensaios foram realizados para a brita 1, brita 0 e pó de pedra. Os resultados dos ensaios de massa unitária estão ilustrados na Tabela 8.

A compactação de uma camada localizada acima de outra, já compactada, não interferiu no processo de compactação, pois, a camada localizada abaixo já havia atingido a sua máxima compactação.

3.3.2.1.2 Permeabilidade

Este parâmetro foi utilizado para determinar o quanto cada golpe de compactação interferiu na permeabilidade da camada. O ensaio de permeabilidade consistiu em derramar um volume pré-determinado de 3,6 litros de água no interior do corpo de prova e medir o tempo necessário para a água atravessar a respectiva camada. O ensaio de permeabilidade foi realizado com os materiais em condição saturada, seguindo o procedimento descrito pela ASTM C1701 (2009).

Este ensaio foi realizado concomitantemente ao ensaio de massa unitária, descrito anteriormente, sendo realizado da seguinte forma:

- Em todos os corpos de prova, após a determinação da massa unitária da camada, foi realizada a saturação do material. A saturação consistiu em derramar 3,6 litros de água no interior da estrutura e aguardar até que todo o excesso da água saísse pela parte inferior do corpo de provas. O ensaio de permeabilidade foi iniciado imediatamente após constatar-se que o excesso de água havia sido eliminado do interior dos corpos de prova;

- Após a determinação da massa unitária da camada sem nenhuma compactação, foi realizado o ensaio de permeabilidade da respectiva camada;

- Em seguida, foi aplicado um golpe e realizada a medida da massa unitária, e, logo em seguida, foi realizado o ensaio de permeabilidade da mesma camada;

- O processo se repetiu, sempre realizando o ensaio de permeabilidade para cada camada após a determinação da massa unitária, a medida

que iam aumentando o número de golpes, até que a massa unitária atingisse a máxima compactação.

A Tabela 8 apresenta os resultados dos ensaios de calibração realizados para determinação do número de golpes utilizados para a compactação das camadas.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de calibração

Agregado	Número de golpes	Massa unitária (g/cm ³)	Permeabilidade (mm/s)
Brita 1	0	1,63	5,90
	1	1,64	5,89
	2	1,69	5,64
	3	1,71	5,28
	4	1,73	5,13
	5	1,73	4,97
Brita 0	0	1,71	2,61
	1	1,73	2,53
	2	1,75	2,47
	3	1,77	2,33
	4	1,79	2,27
	5	1,79	2,22
Pó de pedra	0	1,71	1,36
	1	1,73	1,20
	2	1,74	1,18
	3	1,75	1,11
	4	1,77	1,10
	5	1,77	1,02

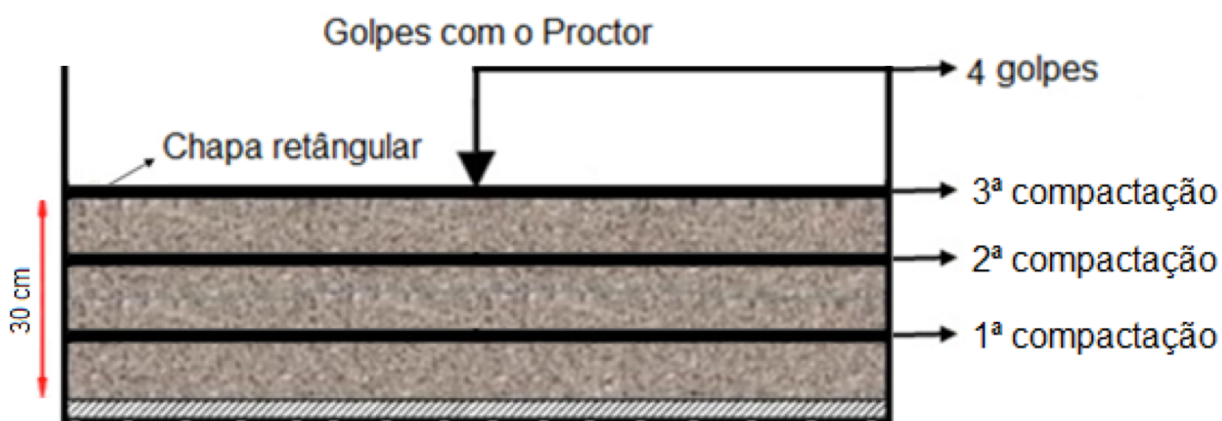
Fonte: Autor

Observando a Tabela 8, é possível verificar que, a medida que foram aumentando o número de golpes, ocorreu um aumento da massa unitária e uma consequente diminuição da permeabilidade. Porém, em todas as camadas, constatou-se que, no quarto golpe, ocorreu a máxima compactação. Desta forma, após o quarto golpe, ocorreu uma estabilização da massa unitária.

A partir dos ensaios de calibração, foi determinado o número de 4 golpes para compactação das camadas a cada 10 cm, pois, observou-se que, após o quarto golpe, a massa unitária não alterava seu valor, ocorrendo apenas a diminuição da permeabilidade. Desta forma, caso fossem aplicados mais de 4 golpes, a camada poderia ficar com uma permeabilidade abaixo do valor mínimo estipulado pela norma, comprometendo assim, toda a funcionalidade da estrutura do pavimento permeável.

A Figura 42 apresenta uma ilustração esquemática especificando a metodologia de compactação da estrutura E.Ref utilizando o Proctor Hammer.

Figura 42 – Metodologia de compactação da estrutura E.Ref



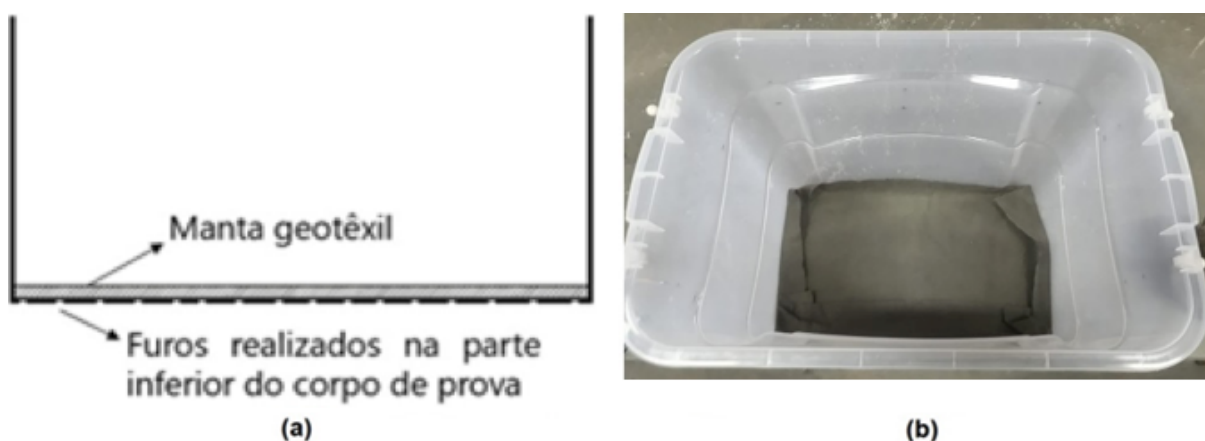
Fonte: Autor

3.3.2.2 Montagem da estrutura no interior dos corpos de prova

A montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova foi realizada da seguinte forma:

- I. Colocou-se uma manta geotêxtil permeável, especificada no item 3.1.5, no fundo dos corpos de prova, para evitar a perda de material nos furos durante a realização do ensaio. A Figura 43a apresenta uma ilustração esquemática do processo, enquanto que, a Figura 43b, ilustra a alocação da manta geotêxtil na parte inferior de um dos corpos de prova;

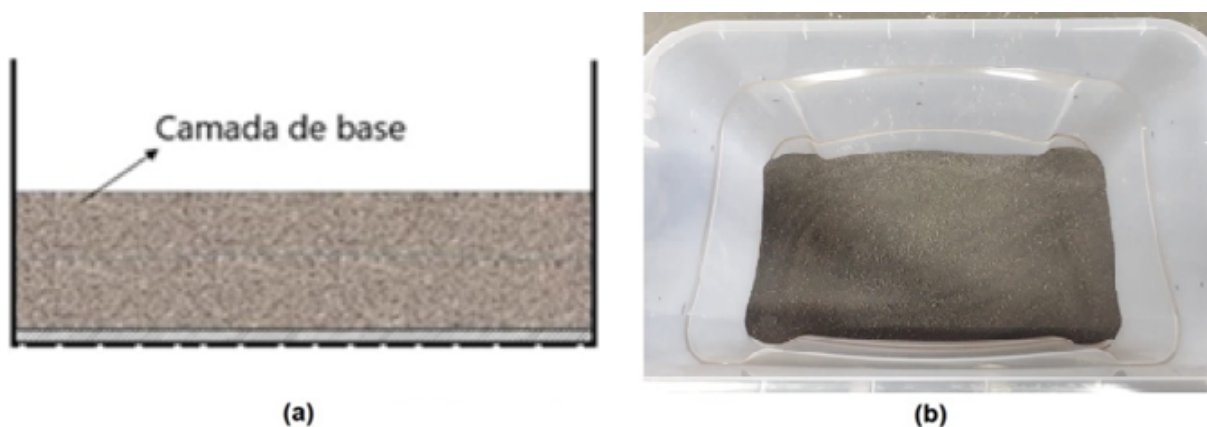
Figura 43 – Passo I do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova



Fonte: Autor

- II. Foi colocado o material da camada de base (ou sub-base) no interior do corpo de prova, de acordo com a espessura da respectiva camada em estudo, conforme mencionado anteriormente. Na Figura 44a, está ilustrado o procedimento esquemático realizado, enquanto que, na Figura 44b, está exemplificada a colocação da camada de base da estrutura E.Ref no interior de um dos corpos de prova;

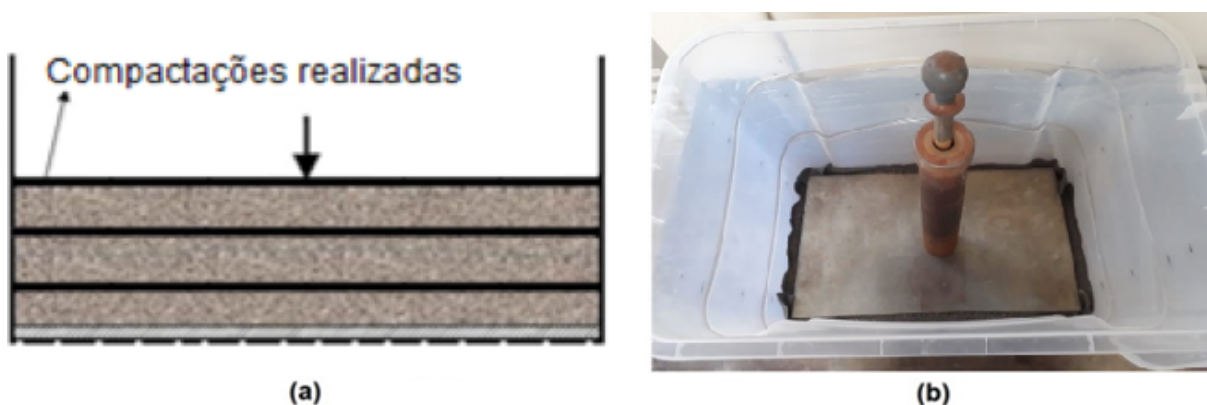
Figura 44 – Passo II do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova



Fonte: Autor

- III. Em seguida, foi realizada a compactação da respectiva camada, de acordo com o item 3.3.2.1. O abatimento causado pela compactação do material da camada compactada foi preenchido pelo material da camada seguinte, que foi adicionado sequencialmente. As Figuras 45a e 45b demonstram, respectivamente, uma ilustração esquemática do processo e o procedimento de compactação da camada da estrutura E.Ref;

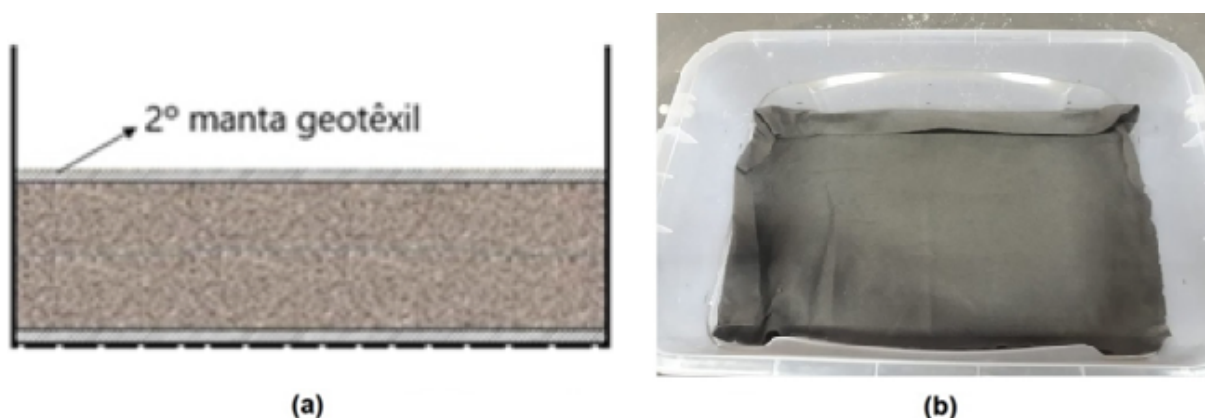
Figura 45 – Passo III do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova



Fonte: Autor

- IV. Colocou-se uma segunda manta geotêxtil acima da camada de base, para evitar a perda de material da camada de assentamento. As Figuras 46a e 46b apresentam, respectivamente, uma ilustração esquemática do processo e a colocação da segunda manta geotêxtil acima da camada de base em um dos corpos de prova da estrutura E.Ref;

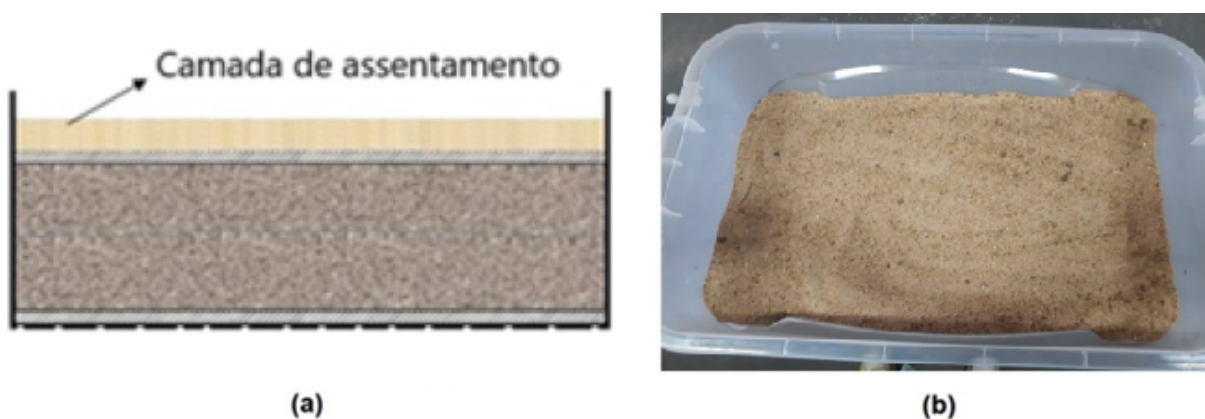
Figura 46 – Passo IV do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova



Fonte: Autor

- V. Acima da manta geotêxtil inserida na etapa anterior, foi colocada a areia que compôs a camada de assentamento. A espessura desta camada foi de 5 cm. A Figuras 47a ilustra, de forma esquemática, o procedimento, enquanto que, na Figura 47b, está apresentado o processo de colocação da camada de assentamento da estrutura E.Ref acima da manta geotêxtil citada anteriormente;

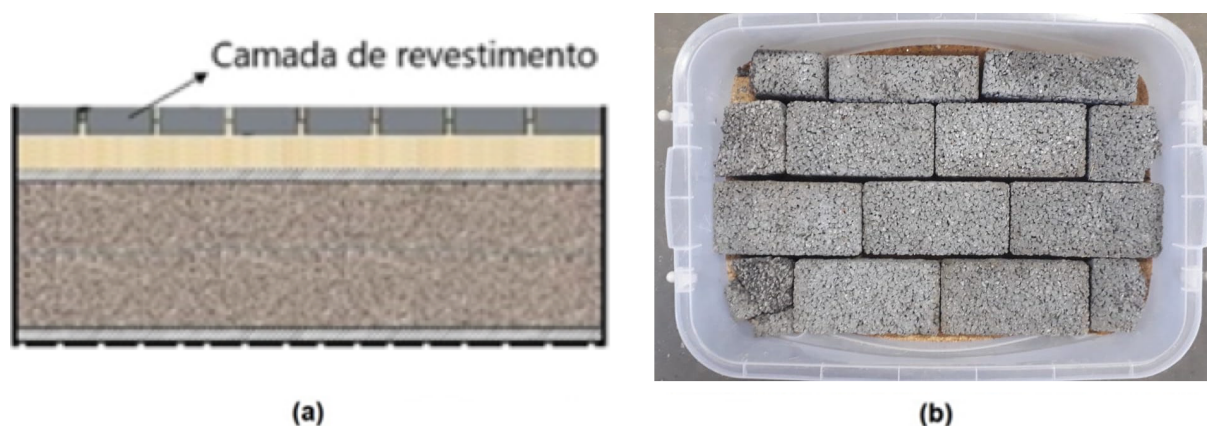
Figura 47 – Passo V do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova



Fonte: Autor

- VI. Em seguida, alocou-se os blocos de concreto permeável acima da camada de assentamento, de modo que os mesmos ficassem intertravados, vide Figuras 48a, ilustração esquemática, e 48b, procedimento em um dos corpos de prova da estrutura E.Ref. De acordo com o comprimento e largura da caixa, especificados no item 3.1.6, bem como o comprimento e largura dos blocos de concreto permeável, vide item 3.1.1, puderam ser alocados 10 blocos de concreto permeável no interior do corpo de prova. A configuração de assentamento das peças seguiu o arranjo tipo fileira, conforme descrito no item 2.2.1.1.1. Durante o processo de intertravamento, também foi realizado o rejuntamento dos blocos.

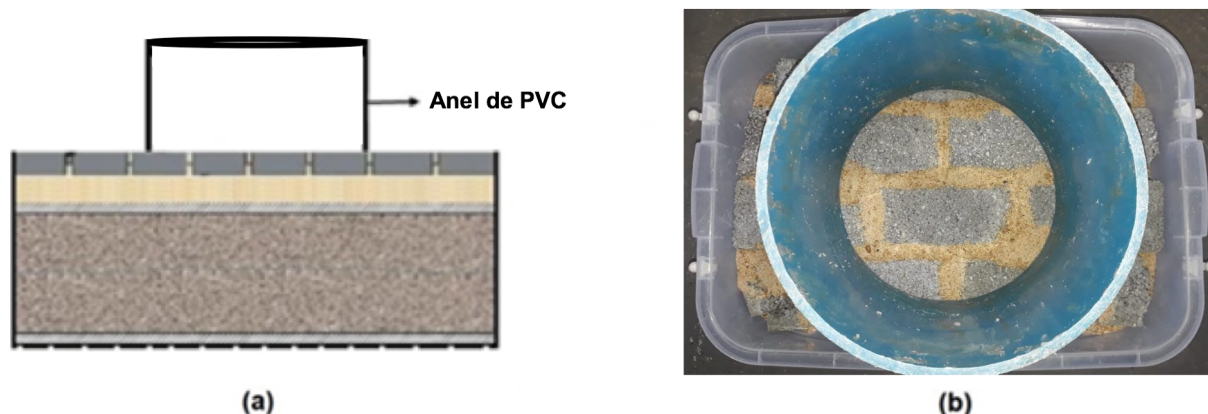
Figura 48 – Passo VI do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova



Fonte: Autor

- VII. Por fim, foi fixado o anel de PVC acima dos blocos de concreto permeável, conforme as Figuras 49a e 49b, e suas bordas foram seladas com silicone acético. Como especificado no item 3.1.7, o anel serviu para uniformizar a distribuição da água durante o ensaio.

Figura 49 – Passo VII do procedimento de montagem da estrutura do pavimento permeável no interior dos corpos de prova



Fonte: Autor

Não foi utilizada escala reduzida no procedimento de montagem dos corpos de prova, desta forma, os blocos de concreto permeável foram utilizados em tamanho real.

3.3.3 Ensaio realizados nos corpos de prova

O ensaio de permeabilidade foi executado nos corpos de prova a fim de determinar a permeabilidade da estrutura formada pelo pavimento permeável mais as camadas de assentamento, base e sub-base (quando utilizada). Também foram medidos o tempo de escoamento da água e a quantidade de água retida na estrutura, de modo a determinar quais os materiais que permitem a maior e mais rápida infiltração da água pela estrutura do pavimento até sua coleta na parte externa dos corpos de prova. O ensaio de permeabilidade foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Londrina.

3.3.3.1 Ensaio de permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da estrutura do pavimento intertravado permeável, foi utilizado o método de ensaio descrito pela ASTM C1701 (2009), com algumas adaptações.

A norma ASTM C1701 – Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete (2009), estabelece que, para determinação do coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável, deve ser utilizado um anel com diâmetro de 300 mm, com um volume de água pré-determinado que é despejado a uma altura

de 1,0 a 1,5 cm. A norma estipula um total de $3,6 \pm 0,05$ kg de água para a pré-molhagem (processo realizado para saturação dos materiais). O tempo de infiltração é iniciado assim que a água atinge a superfície do pavimento permeável e finalizado quando não houver mais lâmina de água na superfície. Segundo a norma, se o tempo de infiltração da pré-molhagem for inferior a 30 s, utiliza-se para o ensaio o total de $18 \pm 0,05$ kg de água. Se o tempo for superior a 30 s, utiliza-se $3,60 \pm 0,05$ kg de água, mantendo-se a carga hidráulica despejada a uma altura de 1,0 a 1,5 cm.

O teste de infiltração é iniciado em até 2 minutos depois da pré-molhagem, conforme estipulado pela norma. Para a determinação taxa de infiltração dos blocos de concreto permeável, utiliza-se a Equação 4.

$$K = \frac{C \cdot m}{(d^2 \cdot t)}$$

Eq. 4

Onde:

K = Taxa de infiltração dos blocos de concreto permeável, em mm/h;

m = Massa de água infiltrada, em kg;

d = Diâmetro interno do anel, em mm;

t = Tempo necessário para toda a água percolar, em s;

C = Fator de conversão de unidades do SI, com valor igual a $4.583.666.000 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}/\text{kg} \cdot \text{h}$.

As seguintes adaptações foram feitas para a realização dos ensaios de permeabilidade no presente trabalho:

- O anel foi instalado acima dos blocos de concreto permeável, no topo dos corpos de prova;
- A norma estabelece que o ensaio de permeabilidade deve ser executado com os materiais em condição saturada. Desta forma, foi utilizado um volume pré-determinado de 18 litros de água, em todos os ensaios, para a saturação dos materiais que compõem as camadas da estrutura. Despejou-se a água no interior do corpo de prova e esperou-se até que o excesso fosse eliminado nos furos realizados na parte de baixo do mesmo. O ensaio de permeabilidade foi iniciado imediatamente após constatar-se que não havia mais água sendo eliminada do corpo de prova;
- Para a realização do ensaio de permeabilidade, foi utilizado um

volume pré-determinado de 3,6 litros de água que foi despejado a uma altura de 1,0 a 1,5 cm dos blocos de concreto permeável;

- O tempo foi iniciado a partir do momento em que a água foi lançada no interior do anel e o mesmo foi finalizado quando não houve mais água saindo pelos furos localizados no fundo dos corpos de prova. O tempo foi medido através de um cronômetro digital;

- O resultado do ensaio expressa a permeabilidade de toda a estrutura, formada pelos blocos de concreto permeável mais suas respectivas camadas de assentamento, base e sub-base (quando utilizada).

A seguir é apresentada a Equação 5, que foi utilizada para determinação da taxa de infiltração da estrutura dos pavimentos permeáveis no presente trabalho.

$$K = \frac{C \cdot m}{(d^2 \cdot t)}$$

Eq. 5

Onde:

K = Taxa de infiltração da estrutura do pavimento permeável, em mm/h;

m = Massa de água infiltrada, em kg;

d = Diagonal interna do corpo de prova, em mm;

t = Tempo necessário para toda a água percolar, em s;

C = Fator de conversão de unidades do SI, com valor igual a 4.583.666.000 mm³.s/kg.h.

Os resultados de permeabilidade foram expressos como sendo a média entre quatro ensaios realizados. Foi utilizado um corpo de prova distinto para cada um dos quatro ensaios realizados com a mesma estrutura e os ensaios foram realizados simultaneamente.

3.3.3.2 Quantidade de água retida na estrutura do pavimento permeável

Após a finalização do ensaio, foi medida a quantidade de água retida no interior da estrutura. A análise foi baseada na diferença entre a quantidade de água inicial que foi utilizada no ensaio e a quantidade de água retida nos coletores. A diferença entre ambas, expressa a quantidade de água que ficou retida no interior da

estrutura. Além disto, foi utilizada análise visual para verificar em quais camadas ocorreu uma maior retenção da água no interior da estrutura.

Este ensaio é de extrema importância, pois, a estrutura dos pavimentos permeáveis deve permitir a infiltração da água por toda a sua estrutura. Caso a água fique acumulada no interior da mesma, pode comprometer a funcionalidade do pavimento permeável e de sua estrutura, podendo causar problemas de erosão das camadas.

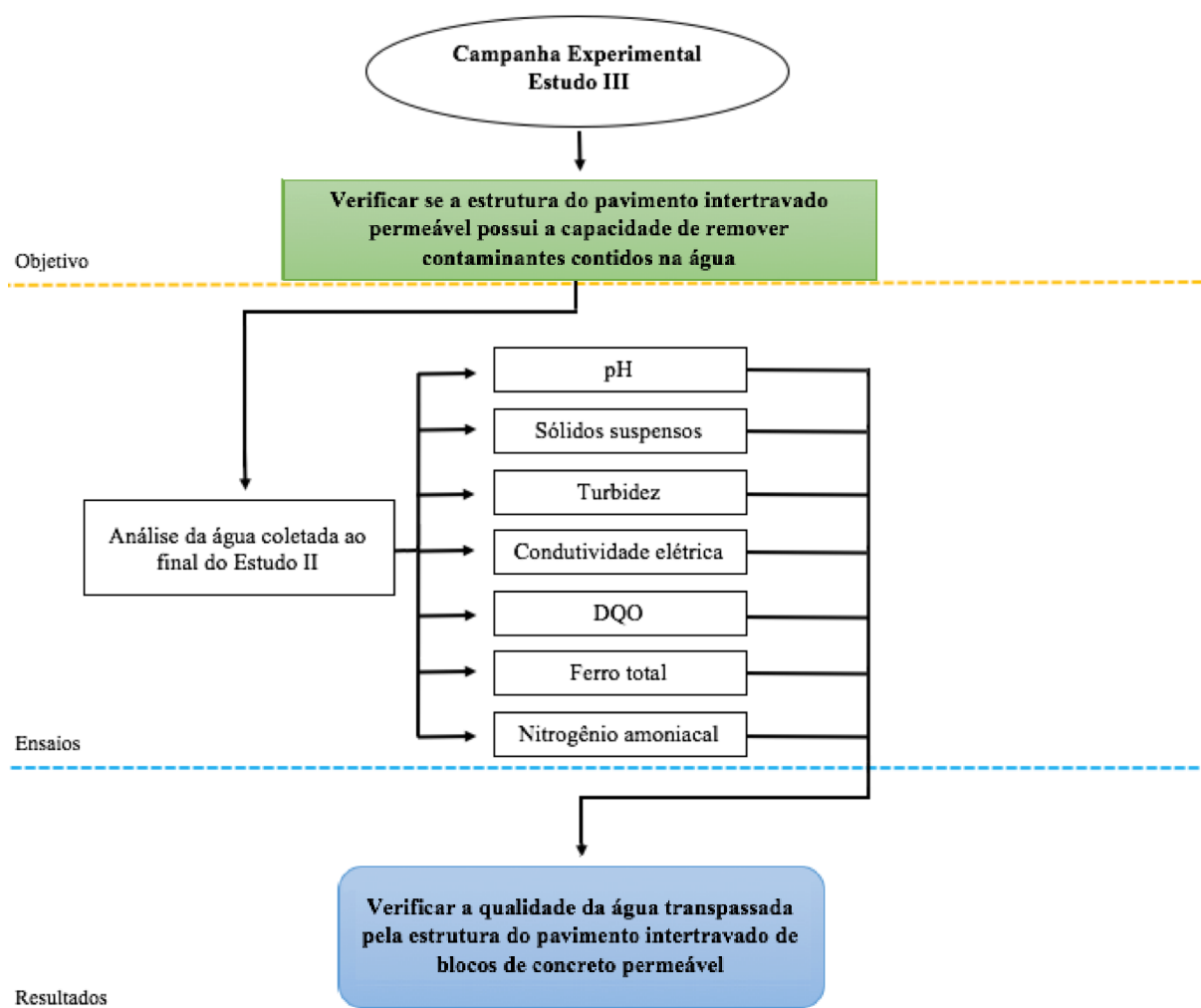
A partir dos resultados desta análise, foram determinados quais materiais são mais susceptíveis ao acúmulo de água no interior da estrutura do pavimento permeável.

3.4 ESTUDO III

Após realizados os ensaios do Estudo II, foi realizada a análise da água coletada. O Estudo III teve como objetivos: determinar se a estrutura do pavimento possui a capacidade de remover contaminantes encontrados na água e verificar a qualidade da água após passar pela estrutura do pavimento.

Para atingir os objetivos propostos, foram realizadas análises da água coletada do escoamento superficial, vide item 3.1.4, antes e depois da realização do ensaio de permeabilidade. Desta forma, foi possível realizar uma comparação entre os valores iniciais e os valores finais das águas em estudo. A análise da água foi realizada no Laboratório de Saneamento da Universidade Estadual de Londrina. A Figura 50 ilustra os procedimentos realizados no Estudo III para atingir os objetivos propostos.

Figura 50 – Fluxograma do Estudo III



Fonte: Autor

Os parâmetros analisados foram: potencial hidrogeniônico (pH), sólidos suspensos (totais, fixos e voláteis), turbidez, condutividade elétrica, demanda química de oxigênio (DQO), ferro total e nitrogênio amoniacal. Estes parâmetros foram escolhidos, pois, foram encontrados na literatura, trabalhos que realizaram a medição destas propriedades da água antes e após a passagem pela estrutura de pavimentos permeáveis. Desta forma, pôde-se realizar uma comparação entre os resultados.

Com exceção do ensaio de determinação do nitrogênio amoniacal, foram realizadas duas análises de cada um dos parâmetros, sendo que o resultado foi calculado como sendo a média entre os dois ensaios. O Quadro 17 apresenta os parâmetros analisados bem como seus respectivos procedimentos normativos.

Quadro 17 – Parâmetros analisados e seus respectivos procedimentos normativos

Ensaio	Procedimento normativo
pH	APHA (2005)
Sólidos suspensos	APHA (2005)
Turbidez	APHA (2005)
Condutividade elétrica	APHA (2005)
DQO	APHA (2005)
Ferro total	ALFA (2020)
Nitrogênio amoniacal	APHA (2005)

Fonte: Autor

3.4.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

Para determinação do potencial hidrogeniônico (pH) da água, foi utilizado o método descrito pela APHA (2005), na qual a determinação é feita através do equipamento peagâmetro. A Figura 51 ilustra o equipamento utilizado, bem como o procedimento para determinação do parâmetro.

Figura 51 – Peagâmetro utilizado e procedimento de ensaio do pH

Fonte: Autor

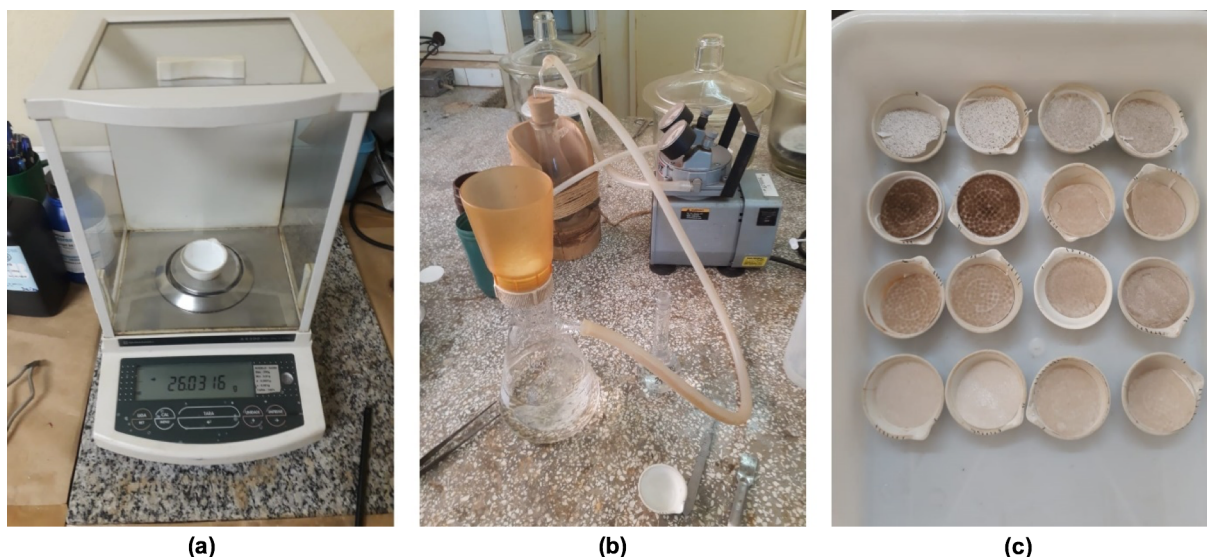
O ensaio consiste em mergulhar o eletrodo do peagâmetro na água a ser analisada, que foi colocada dentro de um becker, como pode ser observado na Figura 51. Em seguida, espera-se o equipamento estabilizar e assim realizar a leitura

do pH da amostra.

3.4.2 Sólidos suspensos

O ensaio de determinação dos sólidos suspensos foi realizado de acordo com a metodologia descrita pela APHA (2005), segundo a qual, o ensaio deve ser realizado utilizando um filtro de fibra de vidro com abertura de malha de $1,2\ \mu\text{m}$ e diâmetro de 47 mm. Os resultados são expressos em miligramas por litro (mg/L). Foram determinadas as quantidades de sólidos suspensos totais, sólidos suspensos fixos e sólidos suspensos voláteis. A Figura 52 ilustra os procedimentos realizados para determinação dos sólidos suspensos.

Figura 52 – Procedimentos realizados para determinação dos sólidos suspensos



Fonte: Autor

O procedimento para determinação da quantidade de sólidos suspensos contidos na água é realizado da seguinte maneira:

- i. Coloca-se as cápsulas com os filtros ao forno Mufla, à temperatura de 500°C , por 60 minutos. Em seguida, os materiais são deixados no dessecador até esfriarem e, posteriormente, são pesados, de acordo com a Figura 52a;
- ii. O filtro é colocado sobre um frasco Erlenmeyer e são derramados 100 ml da amostra para realização da filtragem dos sólidos suspensos contidos na água, como pode ser visto na Figura 52b;
- iii. Em seguida, os filtros são colocados em uma estufa com temperatura de 105°C , por 60 minutos, para secagem;

- iv. Após esse tempo, o material é colocado novamente no dessecador até esfriar e, em seguida, é realizada a pesagem dos filtros, vide Figura 52c;
- v. Por fim, são realizados os cálculos para determinação da quantidade de sólidos suspensos totais, fixos e voláteis.

3.4.3 Turbidez

A turbidez da água foi determinada de acordo com o método descrito pela APHA (2005). O ensaio foi realizado utilizando o equipamento turbidímetro, através da metodologia nefelométrica. Os resultados são expressos em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU) ou mgSiO_2/L . A Figura 53 ilustra o equipamento utilizado, bem como o procedimento de ensaio para determinação da turbidez.

Figura 53 – Turbidímetro utilizado e procedimento de ensaio da turbidez



Fonte: Autor

Este ensaio é realizado colocando as amostras de água a serem analisadas nos tubos de ensaio, como pode ser visto na Figura 53, e, posteriormente, no interior do turbidímetro para realização da leitura da turbidez.

3.4.4 Condutividade elétrica

Para determinação da condutividade elétrica da água foi utilizado o método descrito pela APHA (2005). Segundo a norma, a determinação da condutividade elétrica é realizada pelo aparelho condutivímetro, através do método que se baseia na medição da resistência da amostra e dado em condutância específica. Os resultados são expressos em microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Na Figura 54, pode ser observado o equipamento utilizado, bem como o procedimento para determinação deste parâmetro.

Figura 54 – Condutivímetro utilizado e procedimento de ensaio da condutividade elétrica



Fonte: Autor

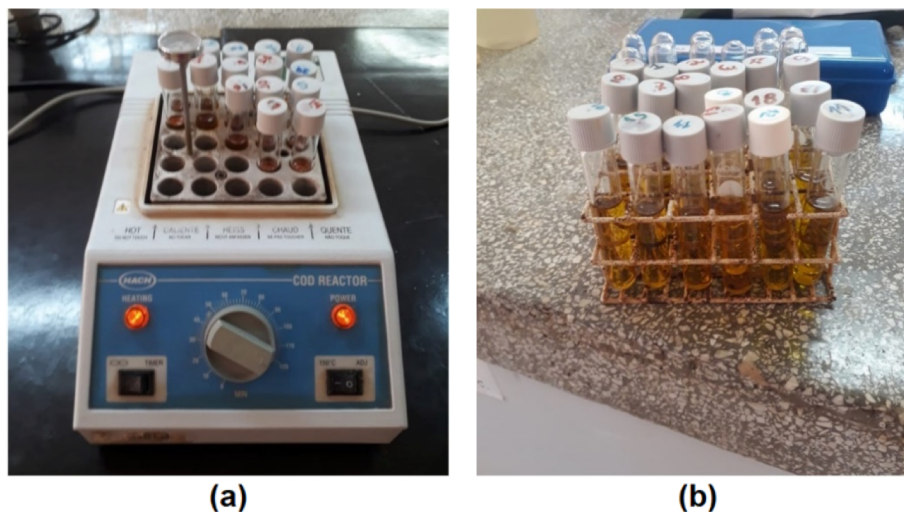
O ensaio de condutividade elétrica consiste em mergulhar a célula de condutividade do aparelho condutivímetro na água a ser analisada, como pode ser observado na Figura 54. Em seguida, espera-se o equipamento estabilizar e realizar a leitura da condutividade elétrica da amostra.

3.4.5 Demanda química de oxigênio (DQO)

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi determinada através da norma descrita pela APHA (2005), na qual se utilizou o Método Colorímetro / Método do Refluxo Fechado. Os resultados são expressos em miligramas de oxigênio por litro (mgO_2/L). A Figura 55 ilustra o equipamento e os procedimentos realizados para

determinação da DQO das amostras.

Figura 55 – Procedimentos do ensaio de determinação da DQO



Fonte: Autor

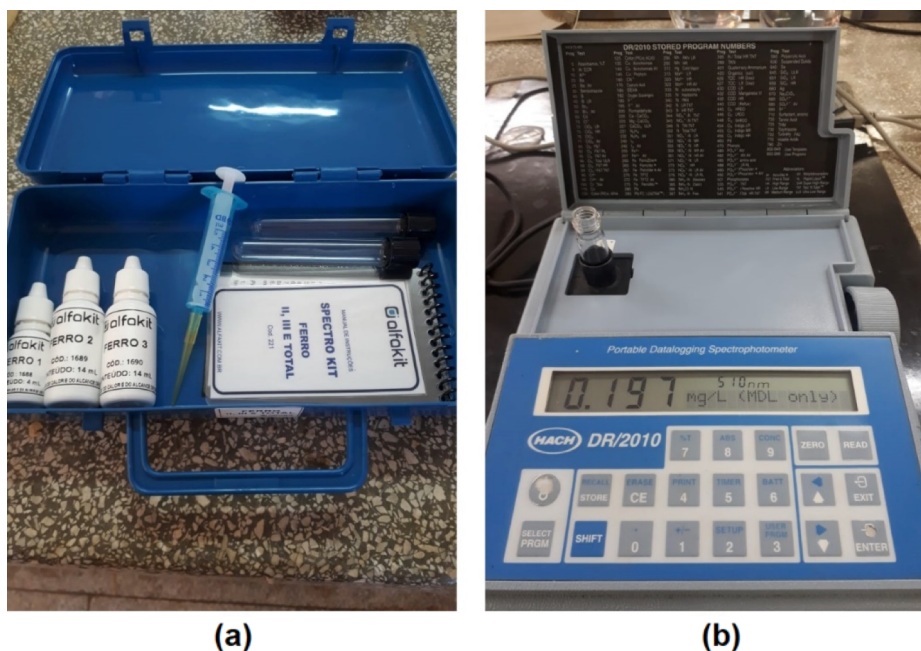
O procedimento para determinação da DQO da água é realizado da seguinte maneira:

- i. Inicialmente, é realizada a digestão da amostra, vide Figura 55a. Para isto, são utilizados os seguintes reagentes: dicromato de potássio, ácido sulfúrico e sulfato de mercúrio. Estes reagentes são misturados, juntamente com a amostra de água a ser analisada, em tubos de ensaio, que são aquecidos a 120°C por 120 minutos;
- ii. Em seguida, após as amostras esfriarem, as mesmas são colocadas no espectrofotômetro para leitura da absorbância, de acordo com a Figura 55b;
- iii. Por fim, são realizados os cálculos para determinação da DQO das amostras.

3.4.6 Ferro total

A quantidade de ferro total foi determinada utilizando a metodologia ALFA 093 (2020). Segundo este método, a medida da quantidade de ferro presente na amostra é realizada utilizando um espectrofotômetro. Os resultados são expressos em miligramas por litro (mg/L). A Figura 56 apresenta os materiais e equipamentos utilizados no ensaio.

Figura 56 – Materiais e equipamentos utilizados no ensaio de determinação do ferro total



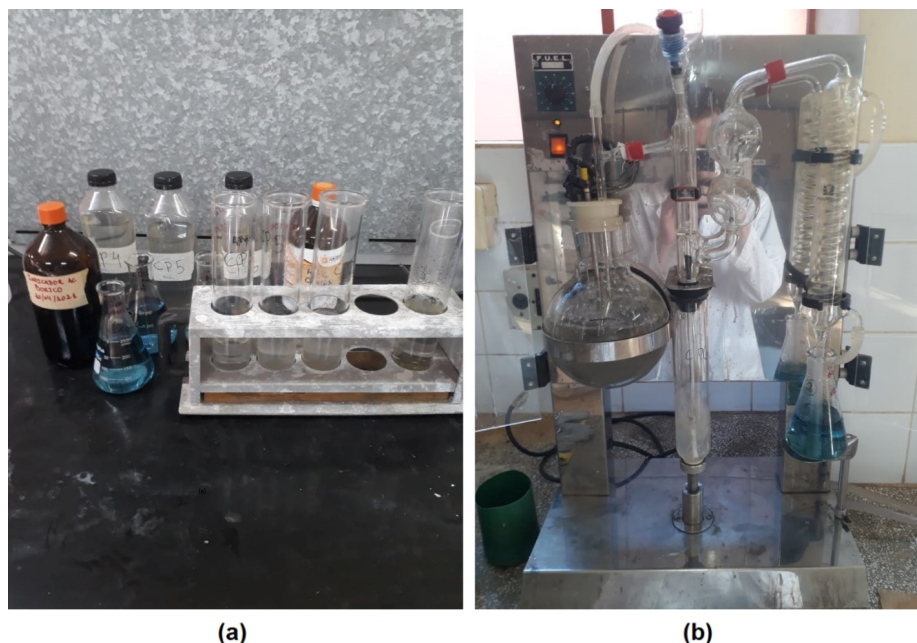
Fonte: Autor

Para determinação da quantidade de ferro total da água, foi utilizado um kit específico para determinação do parâmetro da amostra. A água é colocada em um tubo de ensaio e são aplicadas nela as soluções do kit, demonstrados na Figura 56a. Em seguida, o tubo de ensaio é colocado no equipamento espectrofotômetro que faz a leitura e determinação da quantidade de ferro total presente na amostra analisada, como pode ser verificado na Figura 56b.

3.4.7 Nitrogênio amoniacal

Para determinação da quantidade de nitrogênio amoniacal presente na amostra, foi utilizada a metodologia APHA (2005). Os resultados são expressos em miligramas de nitrogênio amoniacal por litro (mgN-NH₃L). Segundo esta metodologia, a determinação é realizada a partir da titulação com ácido sulfúrico. Na Figura 57, podem ser observados alguns dos procedimentos realizados para determinação do nitrogênio amoniacal das amostras.

Figura 57 – Realização do ensaio de determinação do nitrogênio amoniacal



Fonte: Autor

O procedimento para determinação da quantidade de nitrogênio amoniacal da água é realizado da seguinte maneira:

- i. Em um balão Kjeldahl, são colocados 100 ml de amostra de água, solução tampão de borato e hidróxido de sódio para ajuste do pH, que deve ser de 9,5. A Figura 57a mostra os materiais e reagentes utilizados;
- ii. O balão Kjeldahl deve ser colocado no destilador, para realização da destilação, enquanto que, um frasco Erlenmeyer, deve ser conectado ao tudo de saída do material destilado, como pode ser verificado na Figura 57b;
- iii. Após o frasco Erlenmeyer coletar 250 ml do material destilado, é adicionado ácido bórico na amostra;
- iv. Em seguida, é realizada a titulação da amostra com ácido sulfúrico até atingir o pH padrão;
- v. Por fim, são realizados os cálculos para determinação da quantidade de nitrogênio amoniacal presente na amostra.

3.5 ANÁLISES E CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS

A fim de alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizadas análises e correlações estatísticas dos resultados obtidos no Estudo II, a fim de verificar se ocorreram mudanças significativas nos resultados através da

variação entre os materiais e as estruturas estudadas. Para a análise estatística, foi utilizado o *software* STATISTICA e aplicou-se a *Analysis of variance* (ANOVA) e o Teste de *Tukey*.

As análises foram feitas em três grupos: I – estruturas compostas por três camadas (revestimento/assentamento/base), II - estruturas compostas por quatro camadas (revestimento/assentamento/base/sub-base) e III – todas as estruturas.

A análise da ANOVA teve como objetivo verificar se existe variações significativas entre os resultados dos ensaios e a variação dos materiais e da estrutura. Todos os testes realizados possuem um nível de significância igual a 0,05, ou seja, para um p-valor menor que 0,05, existem diferenças significativas entre as propriedades avaliadas. Foram calculados os graus de liberdade (GL), a soma dos quadrados (SQ) e os quadrados médios (QM). O valor de F é obtido através do produto entre o quadrado médio (QM) dos tratamentos e o quadrado médio (QM) dos resíduos. Quando F for maior que F crítico, existem diferenças significativas entre as os tratamentos e os resíduos.

A ANOVA fornece se existem, ou não, diferenças entre as propriedades avaliadas. Porém, não diz quais resultados se diferem. Para isso, foi utilizado o Teste de *Tukey*, que teve como objetivo realizar a comparação por pares entre os resultados obtidos, a fim de determinar quais estruturas diferem das demais. Da mesma maneira que na análise da ANOVA, o Teste de *Tukey* possui um nível de significância igual a 0,05, ou seja, nos valores de combinação por pares menores que 0,05, existem diferenças significativas entre os respectivos pares.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados. Primeiramente, são apresentados os resultados e discussões do Estudo I, que teve como objetivo realizar a caracterização do material em estudo e verificar se os mesmos estavam de acordo com os valores estipulados pelas normas vigentes. Em seguida, são abordados os resultados e discussões do Estudo II, que objetivou a determinação da permeabilidade da estrutura do pavimento intertravado de blocos de concreto permeável simulada em corpos de prova. Por fim, são descritos os resultados encontrados no Estudo III, cujo objetivo foi verificar se as estruturas ensaiadas possuem a capacidade de remover contaminantes através da análise da água coletada após a realização do Estudo II.

4.1 ESTUDO I

Neste estudo, foram determinadas as propriedades dos blocos de concreto permeável e dos diferentes materiais granulares utilizados no presente trabalho. As propriedades foram determinadas através de ensaios laboratoriais e foram verificadas se estas propriedades estavam de acordo com os valores exigidos pelas normas vigentes.

4.1.1 Blocos de concreto permeável

Foram avaliadas a forma dos blocos e suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas. A avaliação destas propriedades teve como objetivo a verificação do cumprimento das normas ACI 522R (2010) e ABNT NBR 16416 (2015).

4.1.1.1 Ensaio de forma

Para determinação dos ensaios de forma, foram utilizados 10 blocos de concreto permeável e os resultados estão expressos como sendo a média dos valores encontrados nos ensaios. A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de forma encontrados.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de forma encontrados a partir dos blocos ensaiados

Ensaio	Resultado	Limites estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015)	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Comprimento	19,9 cm	± 3 mm	0,012	0,11	0,55%
Largura	9,88 cm	± 3 mm	0,001	0,04	0,40%
Espessura	5,92 cm	± 3 mm	0,012	0,11	1,86%

Fonte: Autor

De acordo com os valores estipulados pela norma ABNT NBR 16416 (2015), vide Tabela 9, os blocos de concreto permeável em estudo estão em conformidade com a norma. Segundo a mesma norma, de acordo com os valores estabelecidos para espessura mínima, conforme citado no Quadro 3, os blocos de concreto permeável em estudo estão aptos para serem utilizados em pavimentações para o tráfego de pedestres.

4.1.1.2 Ensaio físicos

As propriedades físicas avaliadas foram massa específica seca e massa específica saturada dos blocos de concreto permeável. Para o ensaio, foram utilizados 4 blocos de concreto permeável e os resultados estão expressos como sendo a média dos valores encontrados. A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios de físicos encontrados.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios físicos dos blocos de concreto permeável

Ensaio	Resultado	Limites estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015)	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Massa específica seca	2010 kg/m ³	> 1600 kg/m ³	0,001	0,04	1,99%
Massa específica saturada	2150 kg/m ³	> 1600 kg/m ³	0,001	0,04	1,86%

Fonte: Autor

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o valor mínimo para a massa específica, especificado em projeto de pavimentos permeáveis, deve ser de 1600 kg/m³, com tolerância no estado fresco e endurecido de 80 kg/m³. A partir dos resultados encontrados, é possível concluir que os blocos de concreto permeável em estudo estão em conformidade com a norma vigente.

4.1.1.3 Ensaio hidráulicos

Nos ensaios hidráulicos, as propriedades avaliadas foram

permeabilidade, índice de vazios e absorção dos blocos de concreto permeável. Para a realização de cada ensaio, foram utilizados 4 blocos de concreto permeável e os resultados estão expressos como sendo a média dos valores encontrados. A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de hidráulicos encontrados.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios hidráulicos dos blocos de concreto permeável

Ensaio	Resultado	Limites estabelecidos	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Índice de vazios	20,38%	20% (ACI 522R, 2010)	19,06	4,36	21,39%
Absorção	6,90%	-	0,003	0,05	0,72%
Permeabilidade	15,45 mm/s	1 mm/s (ABNT NBR 16416, 2015)	2,96	1,72	11,13%

Fonte: Autor

Tennis; Leming; Akers (2004) e a ACI 522R (2010) sugerem que se utilizem índices de vazios na ordem de 20% para garantir bons valores de permeabilidade do concreto. A partir dos valores encontrados, conclui-se que os blocos de concreto permeável em estudo apresentam índice de vazios semelhantes aos recomendados.

A ABNT NBR 16416 (2015) estabelece que o pavimento permeável, independentemente do tipo de revestimento adotado, deve apresentar, quando recém-construído, um coeficiente de permeabilidade maior que 1 mm/s. A partir dos valores de permeabilidade encontrados nos blocos de concreto permeável em estudo, verifica-se que o material apresenta valores dentro dos limites prescritos pela norma.

4.1.1.4 Ensaio mecânicos

A propriedade mecânica avaliada foi a resistência à compressão dos blocos de concreto permeável. Para a realização do ensaio, foram utilizados 4 blocos de concreto permeável e os resultados estão expressos como sendo a média dos valores encontrados. A Tabela 12 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão.

Tabela 12 - Resultados do ensaio mecânico dos blocos de concreto permeável

Ensaio	Resultado	Limites estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015)	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Resistência à compressão	20,75 MPa	≥ 20 MPa	8,21	2,86	13,78%

Fonte: Autor

De acordo com os valores de resistência à compressão estabelecidos na norma ABNT NBR 16416 (2015), os blocos de concreto permeável em estudo estão aptos para serem utilizados em pavimentações para o tráfego de pedestres. A norma ACI 522R (2010) recomenda que os valores médios de resistência à compressão sejam de cerca de 17 MPa. A partir dos resultados encontrados, é possível concluir que os blocos de concreto permeável em estudo estão em conformidade com esta norma.

4.1.2 Agregados

Para determinação das características dos agregados graúdos, foram realizados ensaios de análise granulométrica, material pulverulento, ensaios físicos e mecânicos. Já para a caracterização dos agregados miúdos, foram realizados ensaios de análise granulométrica, material pulverulento e ensaios físicos. A avaliação destas propriedades teve como objetivo a verificação do cumprimento da norma ABNT NBR 16416 (2015).

4.1.2.1 Agregado graúdo

A seguir, são apresentados os resultados encontrados nos ensaios de caracterização dos agregados graúdos. Todos os resultados estão expressos como sendo a média entre dois ensaios realizados.

4.1.2.1.1 Análise granulométrica

As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados do ensaio de granulometria para os agregados graúdos.

Tabela 13 - Análise granulométrica da brita 1

Peneira nº	Tamanho (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada
1/2*	12,5	3079,9	52,78	52,78
3/8*	9,5	2207,25	37,83	90,61
4	4,8	521,25	8,95	99,56
8	2,4	6,6	0,11	99,67
16	1,2	2,6	0,04	99,71
30	0,6	2,55	0,04	99,75
50	0,3	6,15	0,1	99,85
100	0,15	2,8	0,05	99,9
Fundo	<0,15	5,5	0,1	100
Total		5834,6	100	
Módulo de finura			6,89	
Dimensão máxima			19 mm	
Coefficiente de não uniformidade			1,33	
Coefficiente de curvatura			0,75	

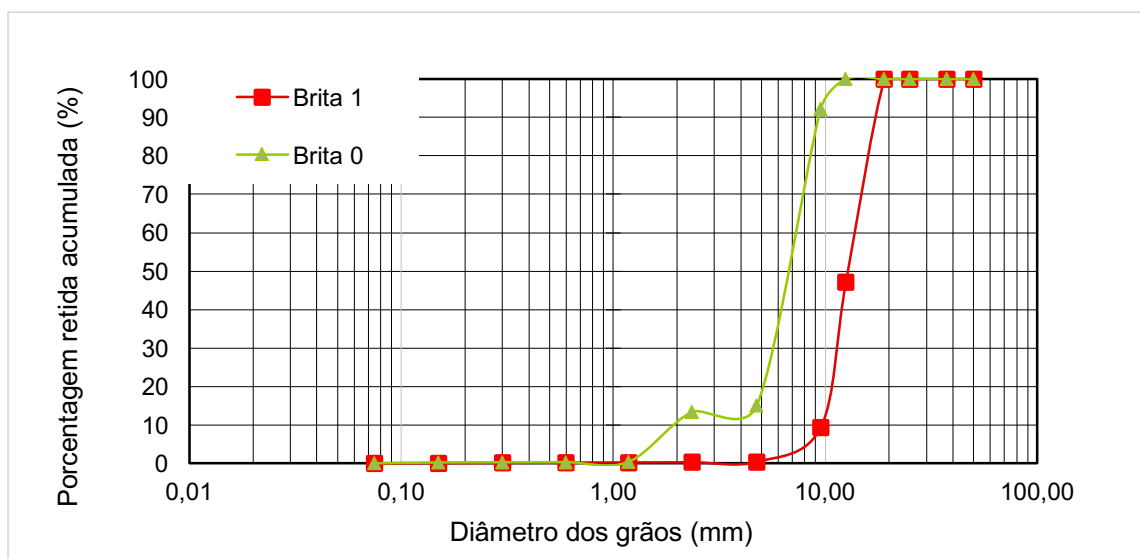
Fonte: Autor

Tabela 14 - Análise granulométrica da brita 0

Peneira nº	Tamanho (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada
3/8*	9,5	191,1	7,8	7,8
4	4,8	1889,85	77,14	84,94
8	2,4	41,35	1,69	86,63
16	1,2	318,7	13,01	99,64
30	0,6	1,95	0,08	99,72
50	0,3	0,85	0,03	99,75
100	0,15	1,35	0,05	99,8
Fundo	<0,15	5	0,2	100
Total		2450,15	100	
Módulo de finura			5,78	
Dimensão máxima			12,5 mm	
Coefficiente de não uniformidade			3,55	
Coefficiente de curvatura			2,36	

Fonte: Autor

A partir dos dados obtidos, verifica-se que a brita 1 possui módulo de finura 6,89, dimensão máxima 19 mm, coeficiente de não uniformidade 1,33 e coeficiente de curvatura 0,75, enquanto que a brita 0 possui módulo de finura 5,78, dimensão máxima 12,5 mm, coeficiente de não uniformidade 3,55 e coeficiente de curvatura 2,36. A partir dos resultados, verifica-se que ambas as britas são classificadas como uniformes e bem graduadas. Em seguida, foi plotada a curva granulométrica. As curvas granulométricas dos agregados graúdos estão apresentadas na Figura 58.

Figura 58 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos

Fonte: Autor

A brita 1 e a brita 0 apresentam granulometrias descontínuas. De acordo com as especificações recomendadas pela ABNT NBR 16416 (2015), a brita 1 pode ser utilizada para compor a camada de sub-base da estrutura de pavimentos permeáveis, enquanto que a brita 0 possui potencial de utilização para compor a camada de base e sub-base da estrutura de pavimentos permeáveis.

4.1.2.1.2 Material pulverulento

A Tabela 15 apresenta os resultados do ensaio de material pulverulento realizado para os agregados graúdos.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de material pulverulento dos agregados graúdos

Agregado	Resultado	Limites estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015)	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Brita 1	0,42%	≤ 2%	0,03	0,18	42,86%
Brita 0	0,12%	≤ 2%	0,07	0,26	66,66%

Fonte: Autor

Segundo a norma ABNT NBR 16416 (2015), o valor máximo recomendado de material pulverulento para uso do agregado em obras de pavimentos permeáveis é de 2%. A partir dos resultados encontrados, conclui-se que ambos os agregados estão em conformidade com a norma vigente.

4.1.2.1.3 Índices físicos

Os resultados dos ensaios físicos dos agregados graúdos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios físicos dos agregados graúdos

Ensaio	Agregado	Resultado	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Massa específica	Brita 1	2,82 g/cm ³	0,0002	0,01	0,35%
	Brita 0	2,81 g/cm ³	0,0004	0,02	0,71%
Massa específica saturada superfície seca	Brita 1	2,77 g/cm ³	0,00005	0,007	0,25%
	Brita 0	2,74 g/cm ³	0,00005	0,007	0,25%
Massa específica aparente	Brita 1	2,73 g/cm ³	0,00005	0,007	0,26%
	Brita 0	2,72 g/cm ³	0,001	0,04	1,47%
Massa unitária solta	Brita 1	1,63 g/cm ³	0,001	0,04	2,45%
	Brita 0	1,71 g/cm ³	0,0002	0,01	2,34%
Massa unitária compactada	Brita 1	1,83 g/cm ³	0,007	0,08	4,37%
	Brita 0	1,89 g/cm ³	0,003	0,05	4,23%
Volume de vazios	Brita 1	0,05%	0	0	-
	Brita 0	0,06%	0	0	-
Absorção	Brita 1	1,13%	0,05	0,24	21,23%
	Brita 0	1,29%	0,08	0,29	22,48%

Fonte: Autor

A norma brasileira, ABNT NBR 16416 (2015), e a norma americana, ACI 522R (2010), não especificam valores limites que os agregados graúdos devem possuir nos ensaios físicos para seu uso em obras de pavimentos permeáveis.

4.1.2.1.4 Índices mecânicos – Abrasão Los Angeles

Os resultados do ensaio de abrasão Los Angeles dos agregados graúdos estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles

Agregado	Resultado	Limites estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015)	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Brita 1	9,28%	< 40%	0,58	0,76	8,19%
Brita 0	26,73%	< 40%	15,23	3,9	14,59%

Fonte: Autor

De acordo com os limites recomendados pela ABNT NBR 16416 (2015), verifica-se, na Tabela 17, que os agregados graúdos estão em conformidade com os valores estabelecidos pela norma vigente, podendo ambos serem utilizados em obras de pavimentação permeável.

4.1.2.2 Agregado miúdo

A seguir, são apresentados os resultados encontrados nos ensaios de caracterização dos agregados miúdos. Todos os resultados estão expressos como sendo a média entre dois ensaios realizados.

4.1.2.2.1 Análise granulométrica

Os resultados do ensaio de análise granulométrica realizados para os agregados miúdos estão apresentados nas Tabelas 18, 19 e 20.

Tabela 18 - Análise granulométrica do pó de pedra

Peneira nº	Tamanho (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada
4	4,8	1	0,1	0,1
8	2,4	105,55	10,49	10,59
16	1,2	193,95	19,27	29,86
30	0,6	266,8	26,51	56,37
50	0,3	222,65	22,12	78,49
100	0,15	185,7	18,45	96,94
Fundo	<0,15	30,75	3,06	100
Total		1006,4	100	
Módulo de finura			2,72	
Dimensão máxima			4,8 mm	
Coefficiente de não uniformidade			4,5	
Coefficiente de curvatura			1,02	

Fonte: Autor

Tabela 19 - Análise granulométrica da areia média

Peneira nº	Tamanho (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada
4	4,8	18,9	1,88	1,88
8	2,4	36,6	3,63	5,51
16	1,2	119,2	11,83	17,34
30	0,6	309,9	30,77	48,11
50	0,3	297,9	29,58	77,69
100	0,15	201,7	20,03	97,72
Fundo	<0,15	22,95	2,28	100
Total		1007,15	100	
Módulo de finura			2,48	
Dimensão máxima			4,8 mm	
Coefficiente de não uniformidade			3,5	
Coefficiente de curvatura			0,92	

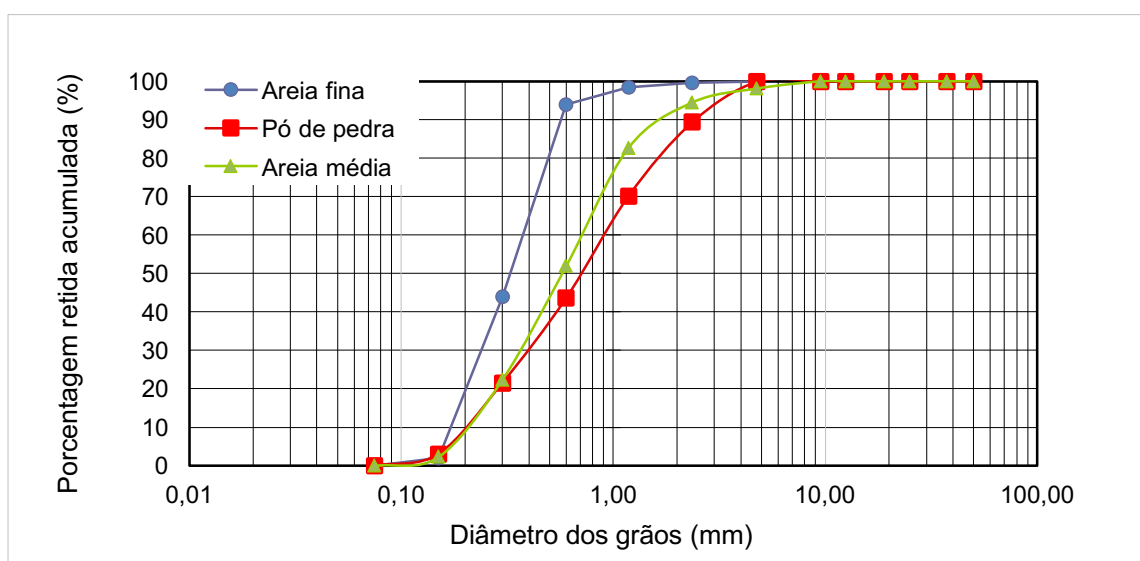
Fonte: Autor

Tabela 20 - Análise granulométrica da areia fina

Peneira nº	Tamanho (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada
8	2,4	3,4	0,34	0,34
16	1,2	12,7	1,27	1,61
30	0,6	44,95	4,49	6,1
50	0,3	499,15	49,89	55,99
100	0,15	420,8	42,06	98,05
Fundo	<0,15	19,5	1,95	100
Total		1000,5	100	
Módulo de finura			1,62	
Dimensão máxima			1,2 mm	
Coefficiente de não uniformidade			2,1	
Coefficiente de curvatura			0,84	

Fonte: Autor

A partir dos dados obtidos, é possível verificar que o pó de pedra possui módulo de finura 2,72, dimensão máxima 4,8 mm, coeficiente de não uniformidade 4,5 e coeficiente de curvatura 1,02, a areia média possui módulo de finura 2,48, dimensão máxima 4,8 mm, coeficiente de não uniformidade 3,5 e coeficiente de curvatura 0,92 e a areia fina possui módulo de finura 1,62, dimensão máxima 1,2 mm, coeficiente de não uniformidade 2,1 e coeficiente de curvatura 0,84. A partir dos resultados, verifica-se que os agregados miúdos são classificados como uniformes e bem graduados. Em seguida, foi plotada a curva granulométrica dos agregados miúdos, que estão apresentadas na Figura 59.

Figura 59 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos

Fonte: Autor

O pó de pedra e a areia média apresentam granulometrias contínuas, enquanto que a areia fina apresenta uma granulometria descontínua. De acordo com

as especificações recomendadas pela ABNT NBR 16416 (2015), todos os agregados miúdos possuem potencial de utilização para a camada de base da estrutura de pavimentos permeáveis. Porém, em função do pó de pedra ser utilizado pela empresa fornecedora dos materiais para compor a camada de base em seus projetos de pavimentos permeáveis, optou-se por utilizar somente o respectivo material para compor a camada de base. Por outro lado, os demais agregados miúdos, areia média e areia fina, estão aptos para serem utilizados na composição da camada de assentamento da estrutura, sendo que ambos foram utilizados na composição da mesma.

4.1.2.2.2 Material pulverulento

A Tabela 21 apresenta os resultados do ensaio de material pulverulento realizado para os agregados miúdos.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de material pulverulento dos agregados miúdos

Agregado	Resultado	Limites estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015)	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Pó de pedra	3,84%	≤ 2%	0,99	0,99	25,85%
Areia média	0,18%	≤ 2%	0,01	0,1	22,22%
Areia fina	0,22%	≤ 2%	0,14	0,12	66,66%

Fonte: Autor

De acordo com os limites máximos recomendados pela ABNT NBR 16416 (2015), verifica-se, na Tabela 21, que o pó de pedra apresenta valor superior ao limite máximo estabelecido pela norma, que é de 2%. No entanto, por este ser o material que mais é utilizado atualmente pela empresa fornecedora dos materiais para compor a camada de base em seus projetos de pavimentos permeáveis, não foi realizado nenhum beneficiamento para eliminação dos finos e o material foi utilizado, apesar de não estar em conformidade com a norma. Os demais agregados estão de acordo com a norma.

4.1.2.2.3 Índices físicos

Os resultados do ensaio físicos realizados para os agregados miúdos estão apresentados nas Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios físicos dos agregados miúdos

Ensaio	Agregado	Resultado	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Massa específica	Pó de pedra	2,91 g/cm ³	0,001	0,03	1,03%
	Areia média	2,64 g/cm ³	0,0002	0,01	1,13%
	Areia fina	2,63 g/cm ³	0,0009	0,03	1,14%
Massa específica aparente	Pó de pedra	2,46 g/cm ³	0,0008	0,02	0,81%
	Areia média	2,38 g/cm ³	0,0002	0,01	0,84%
	Areia fina	2,38 g/cm ³	0,0004	0,02	1,84%
Massa unitária solta	Pó de pedra	1,71 g/cm ³	0,003	0,05	2,92%
	Areia média	1,61 g/cm ³	0,0008	0,02	1,24%
	Areia fina	1,5 g/cm ³	0	0	-
Massa unitária compactada	Pó de pedra	1,88 g/cm ³	0,003	0,05	2,66%
	Areia média	1,66 g/cm ³	0,0002	0,01	0,60%
	Areia fina	1,6 g/cm ³	0,0002	0,01	0,62%
Volume de vazios	Pó de pedra	0,05%	0	0	-
	Areia média	0,06%	0	0	-
	Areia fina	0,05%	0	0	-
Absorção	Pó de pedra	1,54%	0,08	0,28	18,18%
	Areia média	0,56%	0,08	0,28	50,00%
	Areia fina	0,90%	0	0	-

Fonte: Autor

A norma brasileira, ABNT NBR 16416 (2015), e a norma americana, ACI 522R (2010), não especificam valores de referência que os agregados miúdos devem possuir nos ensaios físicos para que possam ser utilizados em obras de pavimentação permeável.

4.2 ESTUDO II

O Estudo II teve como objetivo determinar a permeabilidade da estrutura do pavimento intertravado de blocos permeáveis através de ensaios realizados em corpos de prova. Além da permeabilidade, foram determinados o tempo de escoamento e a quantidade de água retida no interior da estrutura. Os resultados estão expressos como sendo a média entre quatro repetições realizadas. Na Tabela 23, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados. As repetições dos ensaios realizados em cada uma das respectivas estruturas, estão apresentadas nos APÊNDICES A₁ a A₁₂.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios realizados

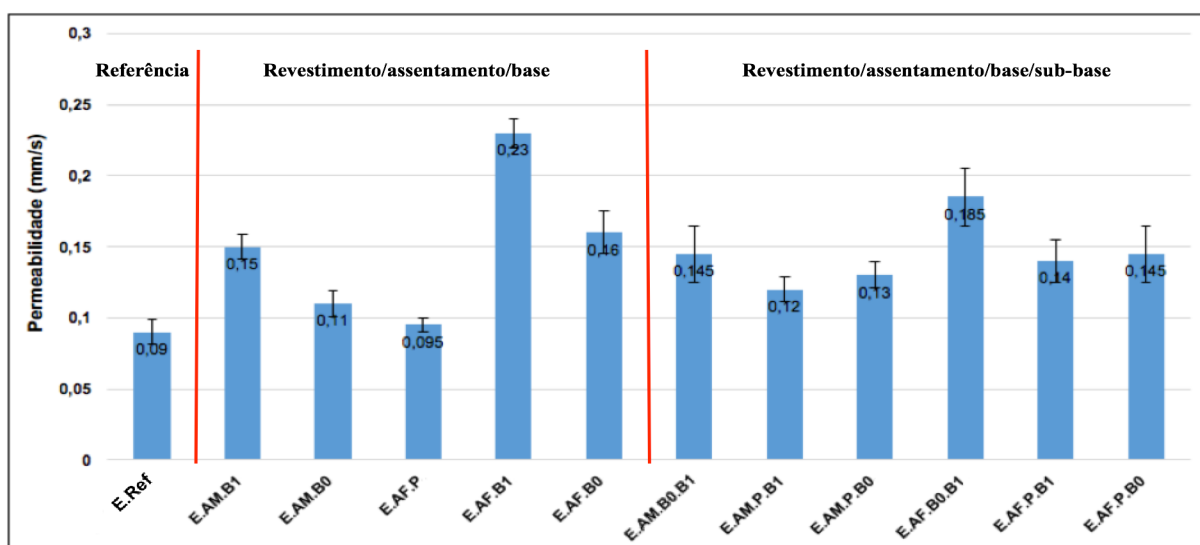
Amostra	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida nas camadas (L)
E.Ref	0,09	5755,25	0,105
E.AM.B1	0,15	3618,25	0,065
E.AM.B0	0,11	4493,25	0,18
E.AF.P	0,095	5465,50	0,08
E.AF.B1	0,23	2312,00	0,02
E.AF.B0	0,16	3293,25	0,035
E.AM.B0.B1	0,145	3558,75	0,19
E.AM.P.B1	0,12	4398,75	0,055
E.AM.P.B0	0,13	4072,25	0,04
E.AF.B0.B1	0,185	2903,50	0,08
E.AF.P.B1	0,14	3970,50	0,03
E.AF.P.B0	0,145	3766,75	0,03

Fonte: Autor

A seguir, são apresentados, em detalhes, os resultados dos ensaios realizados em cada uma das estruturas, bem como, as respectivas análises estatísticas realizadas.

4.2.1 Permeabilidade

A Figura 60 apresenta um gráfico ilustrando os resultados encontrados, juntamente com a variação da permeabilidade nas estruturas ensaiadas nos diferentes corpos de prova.

Figura 60 – Variação da permeabilidade dos corpos de prova ensaiados

Fonte: Autor

Observando a Figura 60, é possível concluir que a estrutura E.AF.B1 apresentou o maior valor de permeabilidade entre todos os ensaios. O valor de permeabilidade encontrado foi 24,32% maior em relação à estrutura E.AF.B0.B1, que registrou o segundo maior valor de permeabilidade e 2,5 vezes maior do que a estrutura E.Ref, que registrou o menor valor de permeabilidade.

Este valor de permeabilidade encontrado, ocorreu em função da utilização de areia fina e brita 1 na composição das respectivas camadas de base e assentamento, pois, ambos os materiais possuem uma granulometria descontínua e foram classificados como uniformes, de acordo com os resultados de caracterização especificados nos itens 4.1.2.1.1 e 4.1.2.2.1, facilitando assim, a passagem da água pelas camadas. Já a estrutura E.Ref, apresentou o menor resultado de permeabilidade, em função de ser composta por areia média e pó de pedra nas camadas de assentamento e base, respectivamente, dois agregados com granulometria contínua e bem graduados, vide item 4.1.2.2.1, o que dificulta a passagem da água pelas camadas.

Verificou-se ainda que, todas as estruturas que utilizaram areia fina na camada de assentamento, obtiveram resultados maiores de permeabilidade em comparação com as mesmas estruturas onde foi utilizada areia média na respectiva camada. Isto ocorreu em função da utilização da areia fina na respectiva camada que, apesar de ter uma dimensão máxima menor do que a areia média, apresenta uma distribuição granulométrica descontínua.

Durante o ensaio, através de observação visual, verificou-se que, nas estruturas E.AF.B0, E.AM.B0, E.AM.P.B0 e E.AF.P.B0, a água não infiltrou uniformemente ao longo de todo o corpo de prova durante a realização do ensaio, pois foi constatado que, o gotejamento ocorreu em maior quantidade nos furos laterais. Desta forma, as direções de fluxo da água no interior dos corpos de prova destas estruturas não foram bem distribuídas. Através disto, foi possível concluir que a brita 0 causou a má distribuição do fluxo no interior dos corpos de prova.

Nas demais estruturas, verificou-se que a água infiltrou uniformemente ao longo de todos os corpos de prova, pois foi constatado que o gotejamento ocorreu ao longo de todos os furos. Desta forma, as direções de fluxo da água no interior dos corpos de prova destas estruturas foram bem distribuídas.

Analisando a Figura 60 e os Apêndices A₁ a A₁₂, verifica-se que o desvio padrão e o coeficiente de variação foram baixos em todos os ensaios. Com

isso, conclui-se que os corpos de provas foram homogêneos, aumentando a representatividade dos dados.

Em seus estudos, Singh *et al.* (2019) encontraram resultados de 0,215 cm/s (2,15 mm/s) de permeabilidade em sua estrutura de pavimento permeável. Porém, a estrutura utilizada pelos autores era composta por concreto permeável moldado no local e, por isso, não continha a camada de assentamento. Já a camada de sub-base, foi constituída por agregados com dimensões entre 1,18 e 12,5 mm. Desta forma, a utilização de blocos de concreto permeável, que necessitam da camada de assentamento, apresentaram uma permeabilidade menor do que quando foi utilizado concreto permeável moldado no local.

Os resultados da ANOVA dos ensaios de permeabilidade estão ilustrados nos Apêndice B₁ a B₃.

A partir dos resultados das estruturas do grupo I, Apêndice B₁, observa-se que o valor de F encontrado (85,26) é 30,78 vezes maior em relação ao F crítico (2,77), enquanto que o resultado do p-valor foi de $6,85 \times 10^{-12}$, sendo $< 0,05$. A partir disto, é possível determinar que existem diferenças significativas entre os resultados de permeabilidade das estruturas do grupo I, em função do tipo de material utilizado. Também foi possível determinar que a permeabilidade das estruturas do grupo I é influenciada em 95,96% pelo tipo de material utilizado, enquanto que outros fatores correspondem a 4,04% de influência.

A partir dos resultados da ANOVA das estruturas do grupo II, vide Apêndice B₂, verifica-se que o resultado de F (7,37) é 2,66 vezes maior em relação ao F crítico (2,77) e o p-valor encontrado foi $6,42 \times 10^{-4}$, sendo $< 0,05$. A partir desta análise, é possível determinar que existem diferenças significativas entre os resultados de permeabilidade das estruturas do grupo II, em função do tipo de material utilizado. Seguindo a análise da variância, pode-se determinar que a permeabilidade das estruturas do grupo II é influenciada em 67,20% pelo tipo de material utilizado, enquanto outros fatores influenciam em 32,80%.

Com relação aos resultados das estruturas do grupo III, ilustrados no Apêndice B₃, observa-se que o valor de F encontrado (31,88) é 15,47 vezes maior do que o F crítico (2,06). Já o p-valor encontrado foi de $2,91 \times 10^{-15}$, sendo $< 0,05$. A partir disto, é possível determinar que existem diferenças significativas entre os resultados de permeabilidade de todas as estruturas ensaiadas, em função do tipo de material utilizado, bem como, da configuração da estrutura. Através da ANOVA, foi possível

determinar que a permeabilidade de todas as estruturas, é influenciada em 90,69% pelo tipo de material e estrutura utilizada, enquanto outros fatores correspondem a 9,31% de influência.

Os resultados do Teste de *Tukey* para os ensaios de permeabilidade estão ilustrados nos Apêndice B₄ a B₆.

Para as estruturas do grupo I, os pares utilizados para comparação foram as estruturas feitas com três camadas, a fim de verificar quais estruturas apresentam diferenças significativas de permeabilidade entre si. De acordo com os resultados, ilustrados no Apêndice B₄, observa-se que a estrutura E.AF.B1 apresenta diferenças quando comparada às demais estruturas do grupo I, pois o p-valor encontrado foi $< 0,05$ em todas as comparações. Já as estruturas E.AF.B0 e E.AM.B1, não apresentam grandes diferenças entre si, porém, apresentam diferenças em relação às outras estruturas testadas. Com isso, conclui-se que os diferentes tipos de materiais utilizados nas estruturas do grupo I, ocasionaram diferenças nos valores de permeabilidade encontrados.

Nas estruturas do grupo II, os pares utilizados para comparação foram as estruturas feitas com quatro camadas, para verificar quais estruturas apresentam diferenças significativas entre si. A partir dos resultados, vide Apêndice B₅, verifica-se que a estrutura E.AF.B0.B1 apresenta diferenças quando comparada às demais estruturas do grupo II, pois o p-valor encontrado foi $< 0,05$ em todas as comparações. Assim, conclui-se que os tipos de materiais utilizados (areia fina, brita 0 e brita 1), resultaram em uma maior permeabilidade desta estrutura em relação às demais.

Com relação às estruturas do grupo III, os pares utilizados para comparação foram todas as estruturas ensaiadas. Verificando os resultados, Apêndice B₆, podem ser observadas diferenças entre as estruturas compostas por três e por quatro camadas, além das diferenças entre os próprios grupos, citados anteriormente. A partir disto, é possível concluir que ocorrem diferenças significativas entre as estruturas testadas, quando comparadas entre si, seja em um mesmo grupo, ou não. Desta forma, conclui-se que, a alteração da configuração de estrutura utilizada (revestimento/assentamento/base ou revestimento/assentamento/base/sub-base) bem como a alteração do tipo de material de composição das camadas, ocasionaram diferenças significativas nos resultados de permeabilidade dos corpos de prova estudados.

Assim, a partir dos resultados, conclui-se que a utilização de areia fina

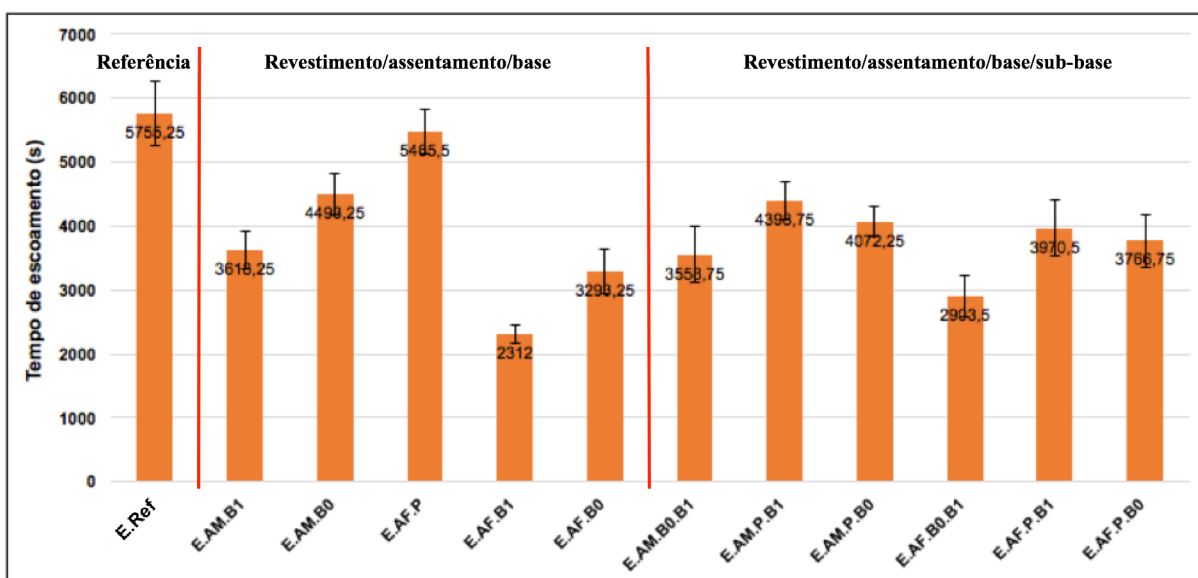
na camada de assentamento resultou em maior permeabilidade da estrutura, quando comparada à areia média, corroborando com os resultados da Figura 60.

Analisando os resultados e as análises estatísticas, conclui-se que a estrutura que obteve os melhores resultados de permeabilidade, tanto no grupo I quanto entre todas as estruturas, foi a E.AF.B1. Com relação às estruturas do grupo II, a estrutura E.AF.B0.B1 apresentou os resultados mais satisfatórios.

4.2.2 Tempo de escoamento

Na Figura 61, estão apresentados os resultados de tempo de escoamento, através de um gráfico comparativo entre os resultados dos ensaios realizados para as diferentes estruturas.

Figura 61 – Variação do tempo de escoamento dos corpos de prova ensaiados



Fonte: Autor

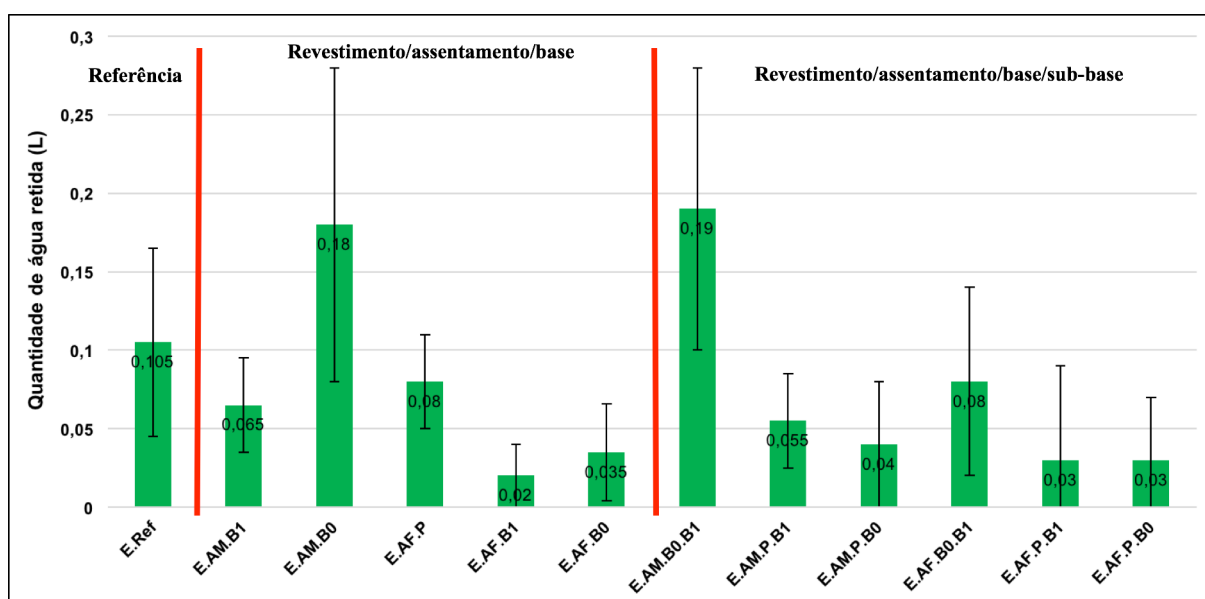
O gráfico de tempo de escoamento é inversamente proporcional ao gráfico de permeabilidade, pois o tempo de escoamento é uma das variáveis utilizada na fórmula para determinação da permeabilidade. Assim, quanto maior for o tempo de escoamento, menor será a permeabilidade.

Desta forma, a estrutura E.Ref, que apresentou o menor resultado de permeabilidade, apresentou o maior valor de tempo de escoamento, enquanto que a estrutura E.AF.B1, que apresentou o maior valor de permeabilidade, apresentou o menor resultado de tempo de escoamento.

4.2.3 Quantidade de água retida no interior da estrutura

A Figura 62 ilustra um gráfico que demonstra os resultados da variação da quantidade de água retida no interior da estrutura nos diferentes corpos de prova ensaiados.

Figura 62 – Variação da quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova ensaiados



Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, é possível verificar que a estrutura de E.AF.B1 apresentou a menor quantidade de água retida em seu interior, enquanto que a estrutura de E.AM.B0.B1 apresentou a maior quantidade de água retida. A estrutura E.AF.B1 registrou uma quantidade de água retida no interior da estrutura 33,33% menor em relação às estruturas E.AF.P.B1 e E.AF.P.B0, que registraram o segundo menor valor de quantidade de água retida no interior da estrutura, e 89,47% menor do que a estrutura E.AM.B0.B1, que registrou o maior resultado de quantidade de água retida no interior da estrutura.

Realizando uma comparação entre os resultados das estruturas, conclui-se que, as estruturas que utilizaram areia fina na camada de assentamento, obtiveram resultados menores de água retida em seu interior em relação às estruturas que utilizaram areia média.

A partir deste ensaio, é possível indicar que deve-se ter cautela ao utilizar as estruturas E.AM.B0 e E.AM.B0.B1, pois, a estrutura do pavimento

permeável deve ser dimensionada de modo a permitir a infiltração de todo o fluxo. Através deste acúmulo de água, podem ocorrer problemas como erosão das camadas e inutilidade da estrutura permeável à longo prazo.

Os resultados da ANOVA da quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova estudados, estão apresentados nos Apêndice B₇ a B₉.

A partir dos resultados do grupo I, Apêndice B₇, verifica-se que o valor de F encontrado (4,17) é 1,5 vezes maior em relação ao F crítico (2,77) e o p-valor foi de 0,01, sendo $< 0,05$. A partir desta análise, é possível determinar que existem diferenças significativas entre as estruturas do grupo I, com relação à quantidade de água retida na estrutura, em função do tipo de material utilizado. Seguindo a análise da ANOVA, determinou-se que, para as estruturas do grupo I, a quantidade de água retida na estrutura é influenciada em 53,69% pelo tipo de material utilizado, enquanto outros fatores correspondem a 46,31% da influência.

Analisando os resultados encontrados para o grupo II, ilustrados no Apêndice B₈, observa-se que o valor de F encontrado (4,18) é 1,51 vezes maior em relação ao F crítico (2,77), enquanto que o p-valor foi de 0,01, sendo $< 0,05$. A partir disto, é possível determinar que existem diferenças significativas entre as estruturas do grupo II, com relação à quantidade de água retida na estrutura, em função do tipo de material utilizado. Também é possível determinar que a quantidade de água retida na estrutura é influenciada em 53,73% pelo tipo de material utilizado, enquanto que a influência de outros fatores corresponde a 46,27%.

Com relação aos resultados das estruturas do grupo III, vide Apêndice B₉, observa-se que o resultado de F (3,83) é 1,86 vezes maior em relação ao F crítico (2,06) e o p-valor encontrado foi de 0,001, sendo $< 0,05$. A partir desta análise, é possível determinar que existem diferenças significativas entre os resultados de quantidade de água retida na estrutura dos ensaios realizados, em função do tipo de material utilizado, bem como, da configuração da estrutura. Seguindo a análise da variância, determinou-se que a quantidade de água retida na estrutura é influenciada em 53,95% pelo tipo de material e estrutura utilizada, enquanto outros fatores correspondem a 46,05% de influência.

Os resultados do Teste de *Tukey* para os ensaios de quantidade de água retida na estrutura estão apresentados nos Apêndice B₁₀ a B₁₂.

Para as estruturas do grupo I, os pares utilizados para comparação foram as estruturas feitas com três camadas. De acordo com os resultados, ilustrados

no Apêndice B₁₀, verifica-se que a estrutura E.AM.B0 registrou diferenças significativas em relação às estruturas E.AF.B1 e E.AF.B0. Com isso, conclui-se que a alteração do material da camada de assentamento (areia média por areia fina), bem como a alteração do material da camada de base (brita 1 por brita 0), causaram diferenças nos resultados de quantidade de água retida no interior da estrutura.

Nas estruturas do grupo II, os pares utilizados para comparação foram as estruturas feitas com quatro camadas. A partir dos resultados, vide Apêndice B₁₁, observa-se que a estrutura E.AM.B0.B1 registrou diferenças significativas em relação às estruturas E.AM.P.B0, E.AF.P.B1 e E.AF.P.B0. Através disto, conclui-se que a alteração do material da camada de base (brita 0 por pó de pedra), ocasionou significativas diferenças nos resultados de quantidade de água retida no interior da estrutura.

Com relação às estruturas do grupo III, os pares utilizados para comparação foram todas as estruturas ensaiadas. Verificando os resultados, Apêndice B₁₂, podem ser observadas algumas diferenças entre as estruturas compostas por três e por quatro camadas, porém, as maiores diferenças ocorrem entre os próprios grupos, citados anteriormente. Desta forma, conclui-se que, a alteração do tipo de material de composição das camadas, ocasionou diferenças significativas nos resultados de quantidade de água retida no interior da estrutura. A configuração da estrutura também ocasionou algumas diferenças, porém, menores, em comparação com as diferenças ocasionadas na permeabilidade.

Assim, a partir dos resultados, determinou-se que a mudança da camada de assentamento de areia média para areia fina, e a mudança de brita 0 para pó de pedra na camada de base, influenciaram nos resultados dos ensaios de quantidade de água retida no interior da estrutura. Desta forma, a troca dos materiais resultou em quantidades menores de água acumulada no interior da estrutura.

Analisando os resultados e as análises estatísticas, conclui-se que a estrutura que obteve resultados mais satisfatórios de quantidade de água retida no interior da estrutura, tanto no grupo I quanto entre todas as estruturas, foi a E.AF.B1. Com relação às estruturas do grupo II, as estruturas E.AF.P.B1 e E.AF.P.B0 apresentaram os melhores resultados.

4.3 ESTUDO III

Neste estudo, foi realizada a análise da água coletada ao final do Estudo II. As análises tiveram como objetivos: determinar se a estrutura do pavimento permeável estudada possui a capacidade de reduzir contaminantes encontrados na água e verificar a qualidade da água após a passagem pela estrutura do pavimento. A seguir, são apresentados os resultados da análise da água.

4.3.1 Análise da água

A Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios de análise de água realizados. Os resultados de cada repetição de ensaio de análise de água realizado para todas as estruturas, estão apresentados nos Apêndices C₁ a C₁₃.

Tabela 24 - Resultados das análises de água

Amostra	pH	Sólidos suspensos	Turbidez	Condutividade elétrica	DQO	Ferro total	Nitrogênio amoniacal
Amostra inicial	7,37	25,0 mg/L	188,85 NTU	176,1 µS/cm	20,50 mgO ₂ /L	0,118 mg/L	52,33 mgN-NH ₃ /L
E.Ref	7,96	9,0 mg/L	54,68 NTU	300,0 µS/cm	29,25 mgO ₂ /L	0,136 mg/L	26,16 mgN-NH ₃ /L
E.AM.B1	7,54	111,5 mg/L	30,17 NTU	281,0 µS/cm	143,00 mgO ₂ /L	0,032 mg/L	0 mgN-NH ₃ /L
E.AM.B0	7,70	46,0 mg/L	20,59 NTU	253,0 µS/cm	135,50 mgO ₂ /L	0,053 mg/L	2,26 mgN-NH ₃ /L
E.AF.P	8,06	8,0 mg/L	202,37 NTU	325,0 µS/cm	93,00 mgO ₂ /L	0,120 mg/L	26,16 mgN-NH ₃ /L
E.AF.B1	7,61	80,0 mg/L	76,99 NTU	274,0 µS/cm	121,75 mgO ₂ /L	0,102 mg/L	6,80 mgN-NH ₃ /L
E.AF.B0	7,42	66,5 mg/L	17,94 NTU	282,0 µS/cm	169,25 mgO ₂ /L	0,125 mg/L	7,18 mgN-NH ₃ /L
E.AM.B0.B1	8,03	245,0 mg/L	218,00 NTU	232,5 µS/cm	103,00 mgO ₂ /L	0,163 mg/L	6,42 mgN-NH ₃ /L
E.AM.P.B1	7,67	43,0 mg/L	126,50 NTU	277,0 µS/cm	94,25 mgO ₂ /L	0,154 mg/L	7,56 mgN-NH ₃ /L
E.AM.P.B0	7,71	74,5 mg/L	154,50 NTU	384,5 µS/cm	166,75 mgO ₂ /L	0,189 mg/L	0,76 mgN-NH ₃ /L
E.AF.B0.B1	7,47	61,0 mg/L	110,50 NTU	275,0 µS/cm	103,00 mgO ₂ /L	0,145 mg/L	1,13 mgN-NH ₃ /L
E.AF.P.B1	7,66	14,5 mg/L	15,80 NTU	323,5 µS/cm	103,00 mgO ₂ /L	0,107 mg/L	1,51 mgN-NH ₃ /L
E.AF.P.B0	7,47	27,0 mg/L	68,85 NTU	272,0 µS/cm	161,75 mgO ₂ /L	0,182 mg/L	1,89 mgN-NH ₃ /L

Fonte: Autor

A seguir, são apresentados, em detalhes, os resultados e discussões de todas as análises de água realizadas.

4.3.1.1 Amostra inicial

Foi nomeada de Amostra inicial, as amostras de água coletadas do escoamento superficial, conforme apresentado no item 3.1.4. Os resultados das análises dos parâmetros da água da Amostra inicial estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de análise da água da Amostra inicial

Amostra inicial	Resultados	Valor limítrofe estabelecido
pH	7,37	6 - 9 (CONAMA, 2005)
Sólidos suspensos totais	25 mg/L	1000 mg/L (FUNASA, 2014)
Turbidez	188,85 NTU	3 - 500 NTU (FUNASA, 2014)
Condutividade elétrica	176,1 μ S/cm	-
DQO	20,5 mgO ₂ /L	250 mgO ₂ /L (ISO 15705, 2002)
Ferro total	0,118 mg/L	0,3 mg/L (BRASIL, 2011)
Nitrogênio amoniacal	52,33 mgN-NH ₃ /L	20 mgN-NH ₃ /L (CONAMA, 2011)

Fonte: Autor

Analisando os resultados da Amostra inicial, é possível verificar que os parâmetros pH, sólidos suspensos totais, turbidez, condutividade elétrica, DQO e ferro total estão em conformidade com os valores especificados pelas normas. Por outro lado, o valor do nitrogênio amoniacal encontrado na amostra, apresenta concentração acima dos limites estabelecidos pela norma vigente.

O nitrogênio amoniacal é considerado um contaminante nocivo para os organismos e para o meio ambiente. Isto ocorre, pois, quando em excesso, o nitrogênio amoniacal apresenta toxicidade aos organismos vivos, além de promover o crescimento abundante de algas e plantas aquáticas, gerando um déficit de oxigênio para os seres vivos (CONAMA, 2011).

A partir disto, pode-se concluir que a água do escoamento superficial coletada, não deveria ser despejada no meio ambiente sem um devido tratamento, pois, devido à concentração de nitrogênio amoniacal acima do limite estabelecido pela lei, esta água pode vir a causar graves danos ambientais aos organismos aquáticos e terrestres.

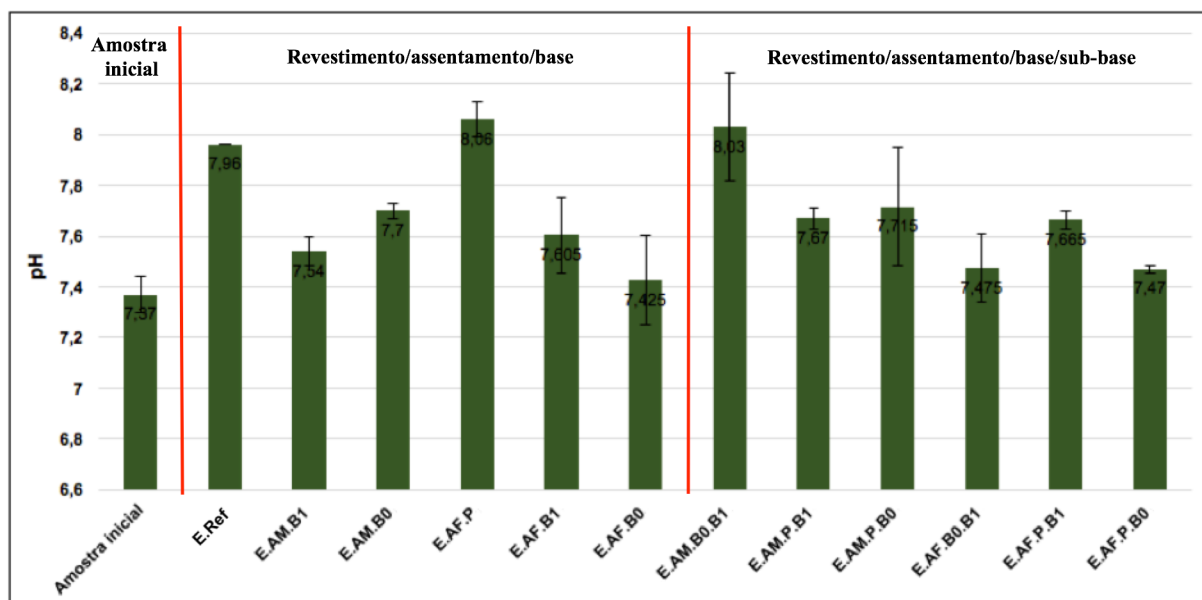
4.3.1.2 Potencial hidrogeniônico (pH)

Os ensaios de pH foram realizados de acordo com a metodologia descrita em 3.4.1. Na Tabela 26, estão apresentados os resultados de pH encontrados para as águas analisadas. Já a Figura 63, ilustra um gráfico comparativo entre os resultados de pH encontrados para todas as amostras ensaiadas.

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de pH das amostras analisadas

pH			
Estrutura	Parâmetro inicial	Parâmetro final	Diferença
E.Ref	7,37	7,96	8,89%
E.AM.B1	7,37	7,54	3,14%
E.AM.B0	7,37	7,70	5,33%
E.AF.P	7,37	8,06	10,26%
E.AF.B1	7,37	7,61	4,04%
E.AF.B0	7,37	7,42	1,57%
E.AM.B0.B1	7,37	8,03	9,85%
E.AM.P.B1	7,37	7,67	4,92%
E.AM.P.B0	7,37	7,71	5,54%
E.AF.B0.B1	7,37	7,47	2,26%
E.AF.P.B1	7,37	7,66	4,86%
E.AF.P.B0	7,37	7,47	2,19%

Fonte: Autor

Figura 63 – Variação do pH da água nos corpos de prova ensaiados

Fonte: Autor

A partir dos dados obtidos, é possível verificar que ocorreu aumento no valor do pH em todas as amostras dos ensaios realizados nos corpos de prova, em relação à Amostra inicial. O aumento médio do pH foi de 0,32 (4,34%). A estrutura E.AF.P apresentou o maior aumento no valor do pH (10,26%), enquanto que a

estrutura E.AF.B0, apresentou o menor aumento (1,57%) do parâmetro

A Resolução CONAMA nº 357 (2005) indica que alterações nos valores de pH podem aumentar o efeito de substâncias químicas que são tóxicas para os organismos aquáticos, tais como os metais pesados. A mesma resolução estabelece que, para a proteção da vida aquática, o pH deve estar entre 6 e 9.

Analisando os resultados obtidos, foi possível concluir que todas as amostras ensaiadas estão dentro dos parâmetros exigidos pela legislação vigente. Desta forma, o aumento do pH da água causado pela passagem da água pela estrutura do pavimento permeável, não apresentou mudanças significativas que afetem a qualidade da água, do solo e dos organismos.

Alguns autores realizaram estudos onde mediram o pH da água antes e depois da mesma ter passado pela estrutura do pavimento permeável, vide Tabelas 6 e 7. A partir dos dados encontrados na literatura, podemos verificar que Legret; Colandini; Le Marc (1996) e Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011) não registraram mudanças nos valores do pH das amostras ensaiadas. Por outro lado, Jiang *et al.* (2012) registraram aumento de 0,14% no valor do pH em seus estudos, enquanto Kazemi; Hill (2015) obtiveram uma diminuição de 6,5% nos valores de pH.

A partir destes resultados, conclui-se que podem ocorrer diferentes variações na concentração do pH da água em virtude da utilização de diferentes materiais e estruturas para pavimentação permeável. Também verifica-se que, os resultados de pH encontrados pelos autores, estão em conformidade com os valores estabelecidos pela legislação vigente.

4.3.1.3 Sólidos suspensos

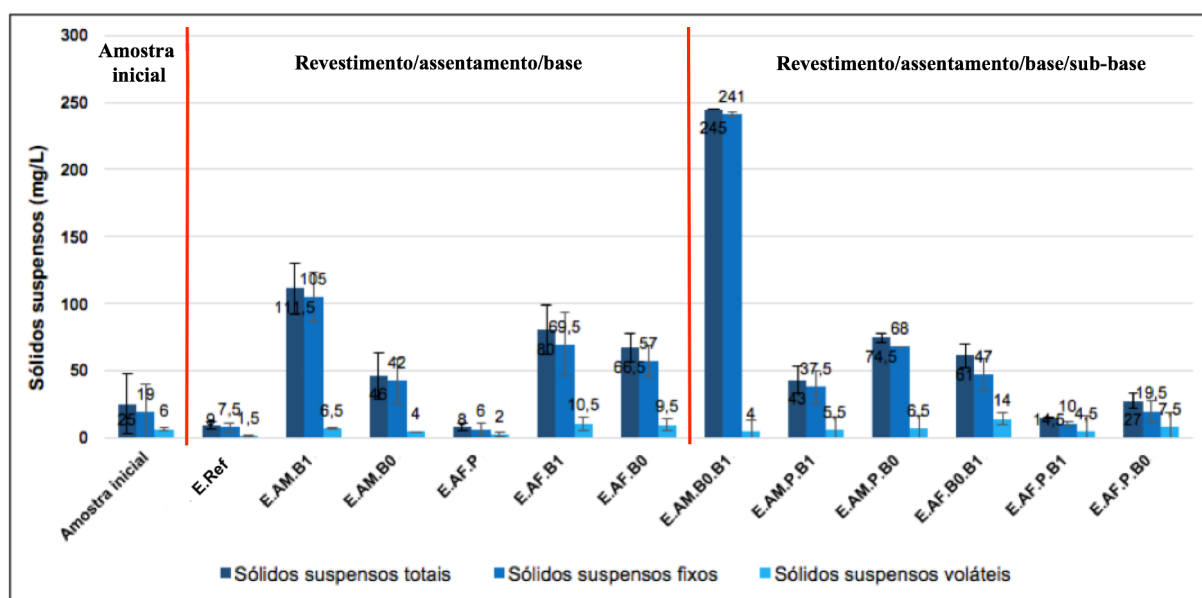
Os ensaios de sólidos suspensos foram realizados de acordo com a metodologia descrita em 3.4.2. Na Tabela 27, estão apresentados os resultados dos sólidos suspensos totais encontrados para as águas analisadas. Já na Figura 64, está ilustrado um gráfico de comparação entre os parâmetros sólidos suspensos totais, sólidos suspensos fixos e sólidos suspensos voláteis das águas ensaiadas. As repetições de análises realizadas para cada um dos corpos de prova, estão ilustradas nos Apêndices C₁₄ e C₁₅.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios de sólidos suspensos totais das amostras analisadas

Sólidos suspensos totais			
Estrutura	Concentração inicial	Concentração final	Diferença
E.Ref	25,0 mg/L	9,0 mg/L	-64%
E.AM.B1	25,0 mg/L	111,5 mg/L	346%
E.AM.B0	25,0 mg/L	46,0 mg/L	84%
E.AF.P	25,0 mg/L	8,0 mg/L	-80%
E.AF.B1	25,0 mg/L	80,0 mg/L	220%
E.AF.B0	25,0 mg/L	66,5 mg/L	166%
E.AM.B0.B1	25,0 mg/L	245,0 mg/L	880%
E.AM.P.B1	25,0 mg/L	43,0 mg/L	72%
E.AM.P.B0	25,0 mg/L	74,5 mg/L	198%
E.AF.B0.B1	25,0 mg/L	61,0 mg/L	144%
E.AF.P.B1	25,0 mg/L	14,5 mg/L	-42%
E.AF.P.B0	25,0 mg/L	27,0 mg/L	8%

Fonte: Autor

Figura 64 – Variação dos sólidos suspensos totais, sólidos suspensos fixos e sólidos suspensos voláteis da água nos corpos de prova ensaiados



Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que, nove amostras apresentaram aumento na concentração de sólidos suspensos totais em relação à Amostra inicial, enquanto outras três apresentaram diminuição na concentração do respectivo parâmetro. Desta forma, a amostra que apresentou a maior diminuição da

quantidade de sólidos suspensos totais, foi a estrutura E.AF.P, com uma diminuição de 80%, enquanto que, o maior aumento na concentração do parâmetro, ocorreu na estrutura E.AM.B0.B1, registrando aumento de 9,8 vezes.

Verificou-se que, as três estruturas onde ocorreu diminuição na concentração da quantidade de sólidos suspensos totais (E.Ref, E.AF.P e E.AF.P.B1), possuíam pó de pedra em sua estrutura. Também verificou-se que, as estruturas onde ocorreu maior aumento na concentração do parâmetro (E.AM.B0.B1, E.AM.B1 e E.AF.B1), possuíam brita 1 em sua estrutura.

As mantas geotêxteis instaladas na estrutura do pavimento tiveram a finalidade de reter o material, evitando a migração de partículas de uma camada para outra. Da mesma forma, as mantas geotêxteis possuem a capacidade de filtrar os sólidos suspensos contidos na água. A partir disto, a diminuição da concentração de sólidos suspensos totais pode ser explicada em função da filtragem por parte da estrutura, muito possivelmente pelas mantas geotêxteis instaladas. Por outro lado, em algumas amostras, ocorreu um aumento na quantidade de sólidos suspensos totais após os ensaios.

De acordo com as especificações do fabricante, as mantas geotêxteis utilizadas possuem abertura de malha de 120 μm . Já as membranas utilizadas no ensaio de sólidos suspensos, possuem abertura de 1,2 μm . Desta forma, no ensaio de sólidos suspensos, foram capturadas as partículas contidas no intervalo de 120 até 1,2 μm . Assim, as partículas compreendidas entre este intervalo, foram transportadas pela água através das mantas geotêxteis, sendo posteriormente filtradas pelas membranas, explicando assim, o aumento na concentração de sólidos suspensos totais em algumas amostras em relação à Amostra inicial.

De acordo com a FUNASA (2014), o padrão de potabilidade refere-se apenas aos sólidos totais dissolvidos, cujo limite é de 1000 mg/L, já que esta parcela reflete a influência de lançamento de esgotos, além de afetar a qualidade organoléptica da água. Analisando os resultados obtidos, foi possível concluir que todas as águas analisadas apresentaram valores de sólidos suspensos abaixo dos valores limites estabelecidos, estando assim, dentro dos parâmetros exigidos pela legislação vigente.

Legret; Colandini; Le Marc (1996), Brown *et al.* (2009), Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011), Jiang *et al.* (2012) e Beecham *et al.* (2012) realizaram a medição da quantidade de sólidos suspensos contidos na água antes e após a

passagem pela estrutura de pavimentos permeáveis.

Todos os autores observaram redução na concentração de sólidos suspensos, com resultados de redução variando de 37,8 até 94%. Os resultados encontrados por Legret; Colandini; Le Marc (1996), Brown *et al.* (2009), Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011) e Beecham *et al.* (2012) estão dentro dos limites aceitos pela legislação vigente. Por outro lado, os resultados encontrados por Jiang *et al.* (2012), estão acima dos limites aceitos.

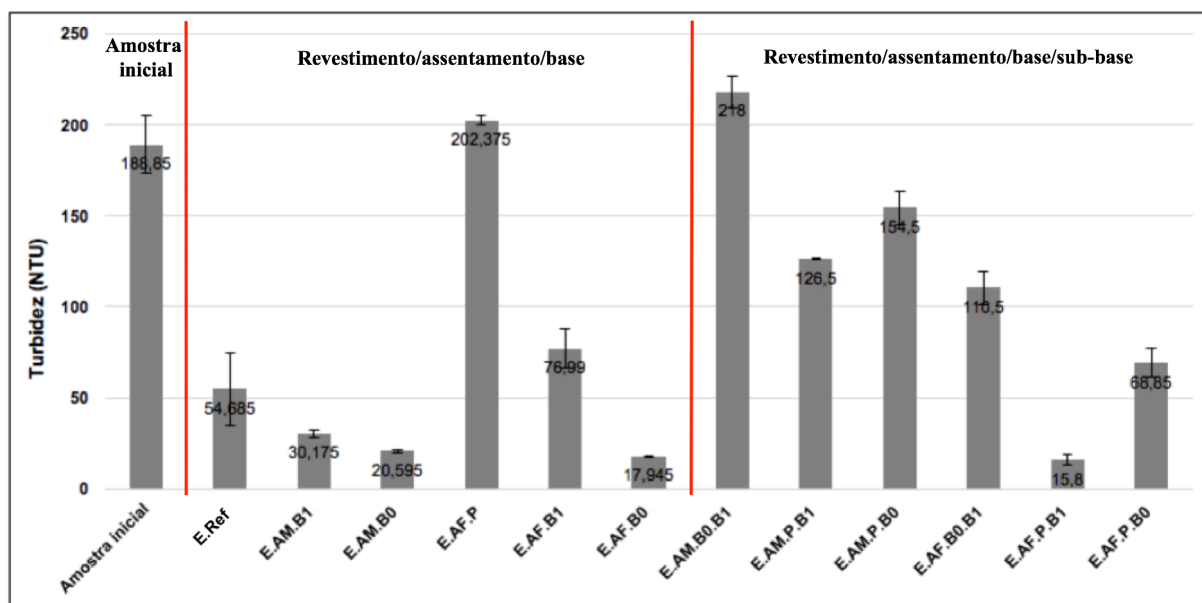
4.3.1.4 Turbidez

Os ensaios de turbidez foram realizados de acordo com a metodologia descrita em 3.4.3. Na Tabela 28, estão ilustrados os resultados dos ensaios de turbidez encontrados. O gráfico dos resultados de turbidez encontrados nos corpos de prova ensaiados, está ilustrado na Figura 65.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios de turbidez das amostras analisadas

Turbidez			
Estrutura	Concentração inicial	Concentração final	Diferença
E.Ref	188,85 NTU	54,68 NTU	-71,04%
E.AM.B1	188,85 NTU	30,17 NTU	-84,02%
E.AM.B0	188,85 NTU	20,59 NTU	-89,09%
E.AF.P	188,85 NTU	202,37 NTU	7,16%
E.AF.B1	188,85 NTU	76,99 NTU	-59,23%
E.AF.B0	188,85 NTU	17,94 NTU	-90,48%
E.AM.B0.B1	188,85 NTU	218,00 NTU	15,43%
E.AM.P.B1	188,85 NTU	126,50 NTU	-33,02%
E.AM.P.B0	188,85 NTU	154,50 NTU	-18,19%
E.AF.B0.B1	188,85 NTU	110,50 NTU	-41,49%
E.AF.P.B1	188,85 NTU	15,80 NTU	-91,63%
E.AF.P.B0	188,85 NTU	68,85 NTU	-63,54%

Fonte: Autor

Figura 65 – Variação da turbidez da água nos corpos de prova ensaiados

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, pode-se verificar que, em dez das doze estruturas testadas, ocorreu uma diminuição da turbidez, em comparação com a Amostra inicial. Somente duas estruturas, E.AF.P e E.AM.B0.B1, apresentaram aumento da turbidez. A estrutura E.AF.P.B1 registrou a maior diminuição na turbidez (91,63%), sendo que também foi considerada a água visualmente mais limpa após a realização dos ensaios.

As principais causas da alta na turbidez da água são a presença de materiais sólidos em suspensão (silte, argila, sílica, coloides), matéria orgânica e inorgânica, organismos microscópicos e algas. A diminuição da turbidez em dez dos doze corpos de prova, pode ter ocorrido em função da utilização das mantas geotêxteis na estrutura. As mantas geotêxteis promovem uma filtragem de material maior que 120 μm . Estas partículas que ficaram retidas nas mantas geotêxteis, poderiam ser a causa de uma maior turbidez da água.

Um parâmetro não menos importante que está diretamente associado à turbidez, é a transparência da água (FUNASA, 2014). A partir disto, verifica-se que a estrutura que apresentou a menor turbidez, E.AF.P.B1, também registrou a água visualmente mais limpa. Em contrapartida, a estrutura E.AM.B0.B1 apresentou os maiores resultados de turbidez, sendo também considerada, visualmente, como a água mais suja.

Muito embora os parâmetros turbidez e sólidos suspensos estejam

associados, eles não são absolutamente equivalentes (FUNASA, 2014). Baseado nisso, não é possível realizar uma correlação direta entre os resultados de sólidos suspensos e turbidez. Isto pode ser verificado nas amostras de E.AF.P e E.AM.B0.B1. Enquanto que a amostra de E.AM.B0.B1 apresentou um aumento, tanto de sólidos suspensos quanto de turbidez em relação à Amostra inicial, a amostra de E.AF.P também apresentou um aumento de turbidez, mas registrou diminuição na concentração de sólidos suspensos.

O aumento da turbidez faz com que uma quantidade maior de produtos químicos sejam utilizados nas estações de tratamento de águas, aumentando os custos de tratamento. Além disso, a alta turbidez também afeta a preservação dos organismos aquáticos, o uso industrial e as atividades de recreação (ANA, 2021). Segundo a FUNASA (2014), a turbidez natural das águas está compreendida na faixa de 3 a 500 NTU. Para fins de potabilidade, a turbidez deve ser inferior a 1 NTU.

Analisando os resultados obtidos, é possível concluir que todas as águas analisadas apresentaram valores de turbidez dentro dos valores limites estabelecidos pela legislação vigente, estando compreendidos entre os valores naturais das águas. Também verificou-se que, dez das doze estruturas testadas, possuíam potencial para a redução da turbidez das águas do escoamento superficial, podendo ser utilizadas como uma importante ferramenta de controle deste parâmetro.

Jiang *et al.* (2012) realizaram a análise da turbidez da água do escoamento superficial em laboratório antes e após a mesma ter passado pela estrutura do pavimento permeável. Em seus resultados, registraram uma diminuição de 74,4% na turbidez da água, com resultado inicial de 785 mgSiO₂/L e resultado final de 77 mgSiO₂/L. Este valor está compreendido entre os valores naturais das águas pela legislação.

4.3.1.5 Condutividade elétrica

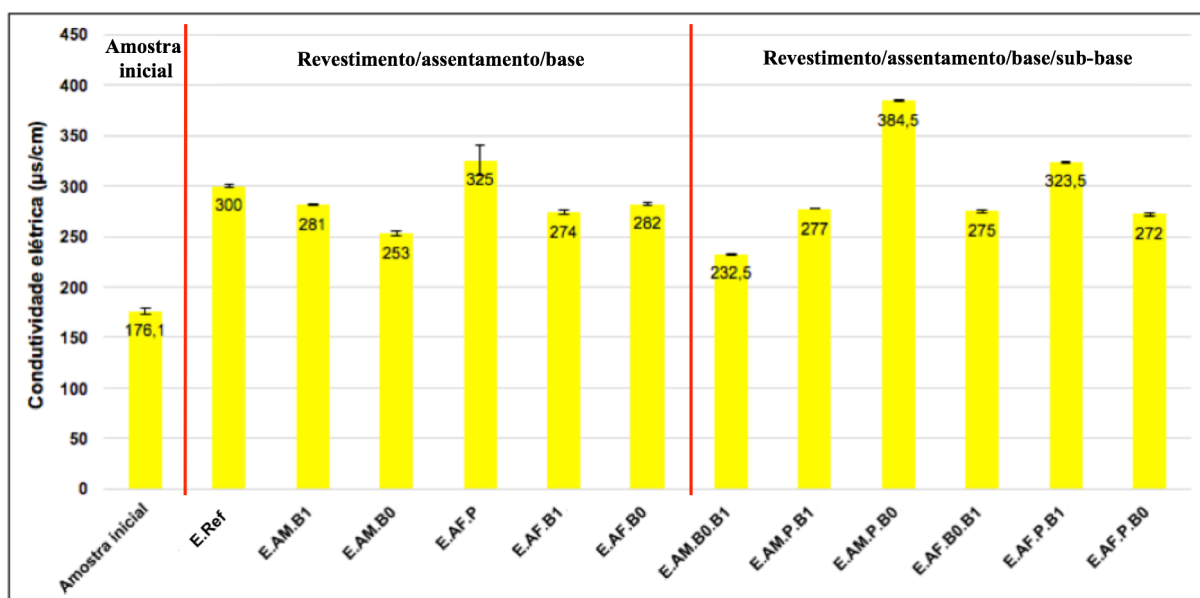
Os ensaios de determinação da condutividade elétrica foram realizados de acordo com a metodologia descrita em 3.4.4. Na Tabela 29, estão apresentados os resultados de condutividade elétrica encontrados. Já a Figura 66, ilustra o gráfico dos resultados de condutividade elétrica encontrados para as águas analisadas.

Tabela 29 - Resultados dos ensaios de condutividade elétrica das amostras analisadas

Condutividade elétrica			
Estrutura	Concentração inicial	Concentração final	Diferença
E.Ref	176,1 $\mu\text{S/cm}$	300,0 $\mu\text{S/cm}$	70,35%
E.AM.B1	176,1 $\mu\text{S/cm}$	281,0 $\mu\text{S/cm}$	59,57%
E.AM.B0	176,1 $\mu\text{S/cm}$	253,0 $\mu\text{S/cm}$	43,66%
E.AF.P	176,1 $\mu\text{S/cm}$	325,0 $\mu\text{S/cm}$	84,55%
E.AF.B1	176,1 $\mu\text{S/cm}$	274,0 $\mu\text{S/cm}$	55,59%
E.AF.B0	176,1 $\mu\text{S/cm}$	282,0 $\mu\text{S/cm}$	60,13%
E.AM.B0.B1	176,1 $\mu\text{S/cm}$	232,5 $\mu\text{S/cm}$	32,03%
E.AM.P.B1	176,1 $\mu\text{S/cm}$	277,0 $\mu\text{S/cm}$	57,30%
E.AM.P.B0	176,1 $\mu\text{S/cm}$	384,5 $\mu\text{S/cm}$	118,34%
E.AF.B0.B1	176,1 $\mu\text{S/cm}$	275,0 $\mu\text{S/cm}$	56,16%
E.AF.P.B1	176,1 $\mu\text{S/cm}$	323,5 $\mu\text{S/cm}$	83,70%
E.AF.P.B0	176,1 $\mu\text{S/cm}$	272,0 $\mu\text{S/cm}$	54,46%

Fonte: Autor

Figura 66 – Variação da condutividade elétrica da água nos corpos de prova ensaiados



Fonte: Autor

Observando o gráfico, conclui-se que ocorreu um aumento da condutividade elétrica em todas as amostras ensaiadas, em relação à Amostra inicial. O aumento médio foi de 113,86 $\mu\text{S/cm}$ (64,65%). Isto ocorreu em função da água do

ensaio adquirir íons dos materiais que compõem as camadas, visto que a condutividade elétrica aumenta à medida que aumenta a concentração de íons oriundos dos diversos materiais. Verificou-se também, que os maiores aumentos na condutividade elétrica ocorreram nas estruturas que possuíam pó de pedra na composição de uma camada. O pó de pedra, por possuir uma dimensão máxima menor do que a brita 1 e a brita 0, permite que a água do ensaio interaja com uma quantidade maior de partículas, fazendo com que uma quantidade maior de íons seja adquirida pela água.

Enquanto que as águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais, os valores podem chegar a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FUNASA, 2014). A partir dos resultados obtidos, é possível chegar à conclusão de que as águas analisadas apresentam valores acima da faixa considerada águas naturais, porém, apresentam valores bem abaixo do intervalo considerado poluído. Desta forma, baseado no ensaio de condutividade elétrica, todas as estruturas apresentaram valores aceitáveis.

Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011) e Kazemi; Hill (2015) realizaram a medida da condutividade elétrica da água antes e após a passagem pela estrutura de pavimento permeável. Myers; Beecham; Van Leeuwen (2011) obtiveram um aumento de 88% na condutividade elétrica da água transpassada pela estrutura permeável, com resultado inicial de 375 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e resultado final de 708 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor menor em relação aos valores de esgotos domésticos e industriais. Por outro lado, Kazemi; Hill (2015) verificaram que ocorreu uma diminuição de 33,41% na condutividade elétrica da água transpassada pela estrutura permeável em relação à amostra inicial, obtendo resultado inicial de 512,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e resultado final de 341,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores considerados aceitáveis pela legislação.

4.3.1.6 Demanda química de oxigênio (DQO)

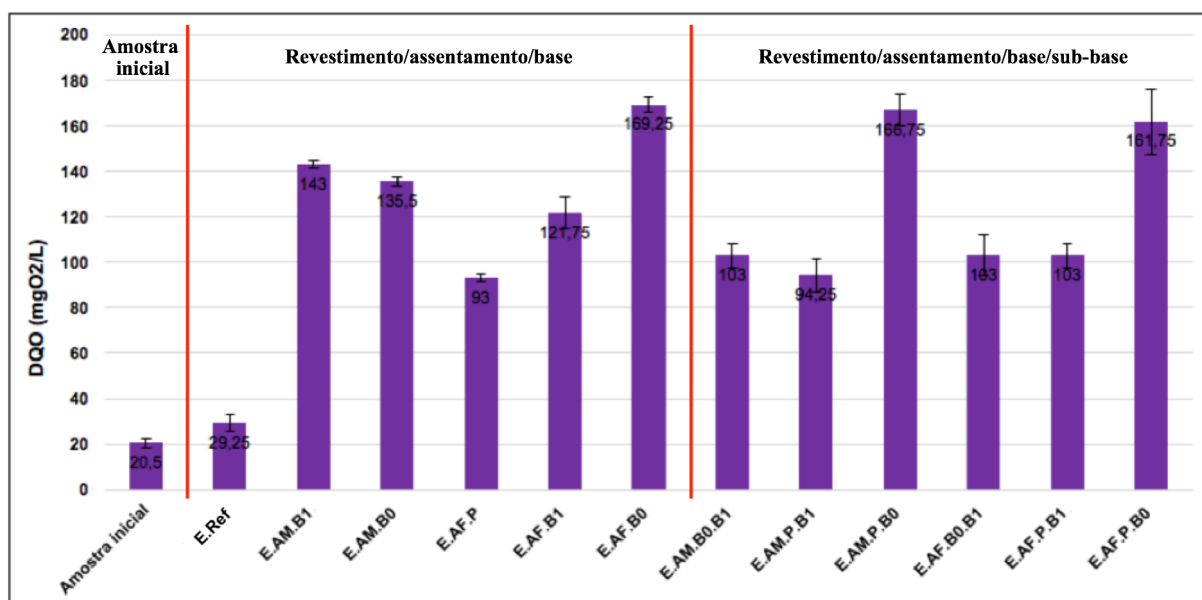
Os ensaios de DQO foram realizados de acordo com a metodologia descrita em 3.4.5. A Tabela 30 ilustra os resultados de DQO. Enquanto isso, na Figura 67, é apresentado o gráfico dos resultados dos ensaios de DQO encontrados para as águas analisadas.

Tabela 30 - Resultados dos ensaios de DQO das amostras analisadas

DQO			
Estrutura	Concentração inicial	Concentração final	Diferença
E.Ref	20,50 mgO ₂ /L	29,25 mgO ₂ /L	42,68%
E.AM.B1	20,50 mgO ₂ /L	143,00 mgO ₂ /L	597,56%
E.AM.B0	20,50 mgO ₂ /L	135,50 mgO ₂ /L	560,98%
E.AF.P	20,50 mgO ₂ /L	93,00 mgO ₂ /L	353,65%
E.AF.B1	20,50 mgO ₂ /L	121,75 mgO ₂ /L	493,90%
E.AF.B0	20,50 mgO ₂ /L	169,25 mgO ₂ /L	725,61%
E.AM.B0.B1	20,50 mgO ₂ /L	103,00 mgO ₂ /L	402,44%
E.AM.P.B1	20,50 mgO ₂ /L	94,25 mgO ₂ /L	359,76%
E.AM.P.B0	20,50 mgO ₂ /L	166,75 mgO ₂ /L	713,41%
E.AF.B0.B1	20,50 mgO ₂ /L	103,00 mgO ₂ /L	402,44%
E.AF.P.B1	20,50 mgO ₂ /L	103,00 mgO ₂ /L	402,44%
E.AF.P.B0	20,50 mgO ₂ /L	161,75 mgO ₂ /L	689,02%

Fonte: Autor

Figura 67 – Variação da DQO da água nos corpos de prova ensaiados



Fonte: Autor

Verifica-se, através do gráfico, que todas as amostras estudadas apresentaram valor de DQO maior em relação à Amostra inicial. O aumento médio foi de 93,9 mgO₂/L (4,58 vezes). A DQO aumenta em razão da presença de matéria orgânica. Assim, o aumento da DQO pode ser explicado em função de que os blocos

de concreto permeáveis e alguns dos agregados utilizados no presente estudo, são armazenados em uma parte externa dos laboratórios, estando expostas aos diferentes climas, ao solo e também a animais e microrganismos. Desta forma, os materiais estão sujeitos ao acúmulo de matéria orgânica, que pode ser transferida para a água durante a realização dos ensaios.

Segundo a FUNASA (2014), a matéria orgânica da água é necessária aos seres heterótrofos, na sua nutrição, e aos autótrofos, como fonte de sais nutrientes e gás carbônico. No entanto, em grandes quantidades, podem causar alguns problemas, como cor, odor, turbidez e consumo do oxigênio dissolvido pelos organismos decompositores. A legislação brasileira não estipula valores limites para a DQO de águas lançadas ao meio ambiente.

De acordo com a norma internacional ISO 15705 (2002), as águas residuais urbanas devem ter uma DQO máxima de 125 mgO₂/L, enquanto que os efluentes descartados no ambiente devem ter valor máximo de 250 mgO₂/L. Assim, apesar do expressivo aumento da DQO de todas as amostras, os resultados encontrados confirmam que todas as amostras ensaiadas estão abaixo do valor limite estabelecido para efluentes descartados no ambiente. Por outro lado, cinco estruturas (E.AM.B1, E.AM.B0, E.AF.B0, E.AM.P.BO e E.AF.P.BO) apresentaram valores acima dos estipulados para águas residuais urbanas.

Jiang *et al.* (2012) realizaram a análise da DQO da água do escoamento superficial antes e após a passagem pela estrutura de pavimento permeável. As concentrações iniciais e finais de DQO dos autores foram de 532 mg/L e 226 mg/L, respectivamente, estando em conformidade com a ISO 15705 (2002), que estabelece que efluentes descartados no ambiente devem ter valor máximo de 250 mgO₂/L.

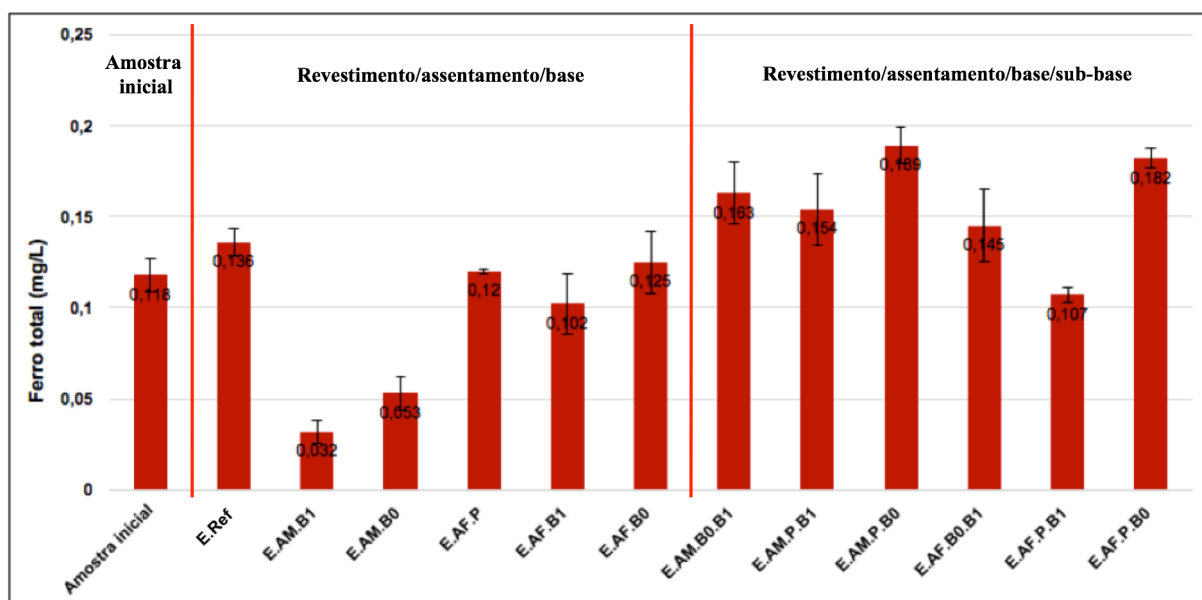
4.3.1.7 Ferro total

Os ensaios de ferro total foram realizados de acordo com a metodologia descrita em 3.4.6. A Tabela 31 apresenta os resultados dos ensaios. Enquanto isso, na Figura 68, está ilustrado o gráfico dos resultados de ferro total encontrados nos corpos de prova ensaiados.

Tabela 31 - Resultados dos ensaios de ferro total das amostras analisadas

Ferro total			
Estrutura	Concentração inicial	Concentração final	Diferença
E.Ref	0,118 mg/L	0,136 mg/L	15,25%
E.AM.B1	0,118 mg/L	0,032 mg/L	-72,88%
E.AM.B0	0,118 mg/L	0,053 mg/L	-55,08%
E.AF.P	0,118 mg/L	0,120 mg/L	1,69%
E.AF.B1	0,118 mg/L	0,102 mg/L	-13,60%
E.AF.B0	0,118 mg/L	0,125 mg/L	5,93%
E.AM.B0.B1	0,118 mg/L	0,163 mg/L	38,14%
E.AM.P.B1	0,118 mg/L	0,154 mg/L	30,51%
E.AM.P.B0	0,118 mg/L	0,189 mg/L	60,17%
E.AF.B0.B1	0,118 mg/L	0,145 mg/L	22,88%
E.AF.P.B1	0,118 mg/L	0,107 mg/L	-9,32%
E.AF.P.B0	0,118 mg/L	0,182 mg/L	54,24%

Fonte: Autor

Figura 68 – Variação do ferro total da água nos corpos de prova ensaiados

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que, nas amostras ensaiadas, ocorreu tanto um aumento quanto uma diminuição na concentração de ferro total em relação à Amostra inicial. A estrutura de E.AM.B1 apresentou a maior diminuição na concentração (72,88%), enquanto que a estrutura de E.AM.P.B0

apresentou o maior aumento na concentração (60,17%). Este aumento na concentração pode ter ocorrido em função dos agregados utilizados nas camadas de base e sub-base serem oriundos de rocha basáltica. A rocha basáltica é rica em minerais de ferro, sendo que a água pode ter absorvido estes minerais, aumentando assim, a sua concentração de ferro.

De acordo com a Portaria Nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011), o valor limite de ferro total estabelecido para emissão de esgoto em águas naturais é de 0,3 mg/L. A partir deste valor, conclui-se que os valores encontrados estão abaixo do valor limite estabelecido pela norma vigente.

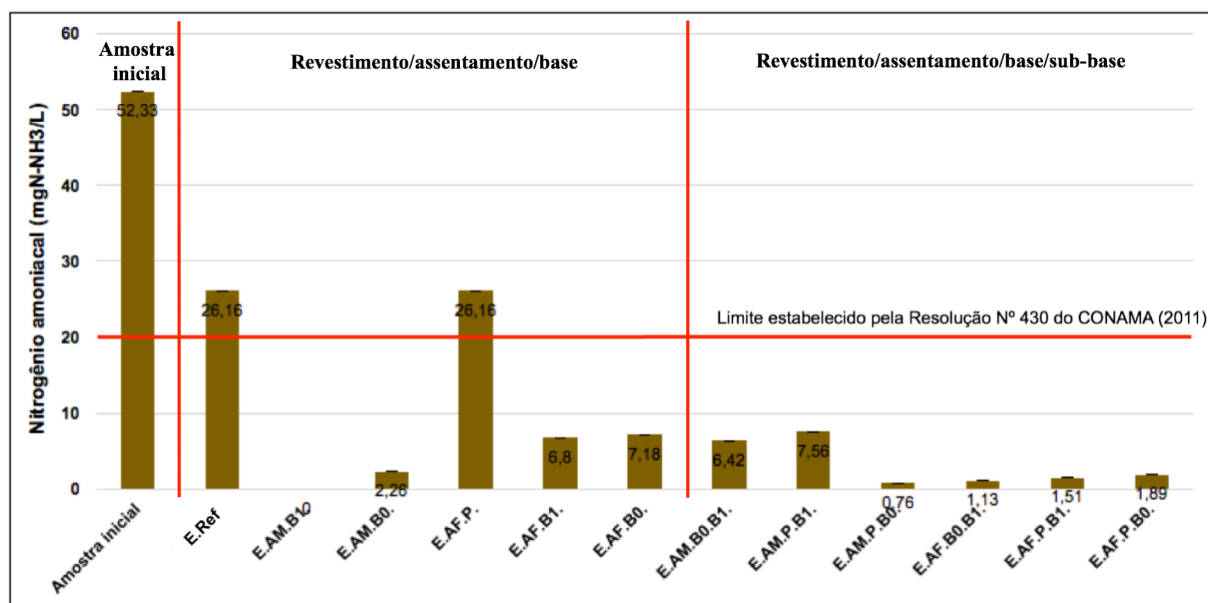
4.3.1.8 Nitrogênio amoniacal

Os ensaios de determinação do nitrogênio amoniacal contido nas amostras foram realizados de acordo com a metodologia descrita em 3.4.7. Na Tabela 32, estão apresentados os resultados encontrados. A Figura 69 apresenta o gráfico com os resultados encontrados para todos os corpos de prova ensaiados.

Tabela 32 - Resultados dos ensaios de nitrogênio amoniacal das amostras analisadas

Nitrogênio amoniacal			
Estrutura	Concentração inicial	Concentração final	Diferença
E.Ref	52,33 mgN-NH ₃ /L	26,16 mgN-NH ₃ /L	-50,00%
E.AM.B1	52,33 mgN-NH ₃ /L	0 mgN-NH ₃ /L	-100,00%
E.AM.B0	52,33 mgN-NH ₃ /L	2,26 mgN-NH ₃ /L	-95,68%
E.AF.P	52,33 mgN-NH ₃ /L	26,16 mgN-NH ₃ /L	-50,00%
E.AF.B1	52,33 mgN-NH ₃ /L	6,80 mgN-NH ₃ /L	-87,00%
E.AF.B0	52,33 mgN-NH ₃ /L	7,18 mgN-NH ₃ /L	-86,30%
E.AM.B0.B1	52,33 mgN-NH ₃ /L	6,42 mgN-NH ₃ /L	-87,73%
E.AM.P.B1	52,33 mgN-NH ₃ /L	7,56 mgN-NH ₃ /L	-85,55%
E.AM.P.B0	52,33 mgN-NH ₃ /L	0,76 mgN-NH ₃ /L	-98,55%
E.AF.B0.B1	52,33 mgN-NH ₃ /L	1,13 mgN-NH ₃ /L	-97,84%
E.AF.P.B1	52,33 mgN-NH ₃ /L	1,51 mgN-NH ₃ /L	-97,11%
E.AF.P.B0	52,33 mgN-NH ₃ /L	1,89 mgN-NH ₃ /L	-96,39%

Fonte: Autor

Figura 69 – Variação do nitrogênio amoniacal da água nos corpos de prova ensaiados

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, pode ser verificado que, em todas as amostras ensaiadas, ocorreu uma diminuição na concentração de nitrogênio amoniacal em relação à Amostra inicial, sendo que a estrutura de E.AM.B1 apresentou uma total eliminação do contaminante contido na água. Com exceção das estruturas E.Ref e E.AF.P, que reduziram a concentração de nitrogênio amoniacal em 50%, as demais estruturas reduziram as concentrações em mais de 85%.

De acordo com a Resolução Nº 430 do CONAMA (2011), os efluentes lançados ao meio ambiente devem ter valor máximo de 20 mgN-NH₃/L. Efluentes com valor acima do limite, podem causar danos à vida dos organismos aquáticos. A partir disto, pode-se concluir que, as estruturas E.Ref e E.AF.P, apesar de terem registrado uma diminuição de 50% na concentração, ainda apresentaram valores acima dos estabelecidos pela norma vigente. Porém, apesar dos índices acima do valor estipulado pela norma, as estruturas demonstraram potencial de redução da concentração do contaminante de 50%.

O nitrogênio amoniacal pode ser considerado o parâmetro mais nocivo para o meio ambiente dentre todos os parâmetros analisados no presente trabalho. Desta forma, verifica-se que as estruturas de pavimentos intertravados de concreto permeável se mostraram muito eficazes na remoção deste contaminante, uma vez que todas as estruturas testadas removeram, ao menos, 50% da concentração inicial.

Jiang *et al.* (2012) realizaram a medida da quantidade de nitrogênio amoniacal de uma água de escoamento superficial antes e após a passagem pela estrutura de pavimento permeável. Os autores registraram uma diminuição de 34% na concentração de nitrogênio amoniacal, com resultado inicial de 0,929 mgN-NH₃/L e resultado final de 0,602 mgN-NH₃/L, valor em conformidade com a norma vigente.

4.3.1.9 Análise visual da água

A seguir, são apresentadas imagens comparativas entre a água da Amostra inicial com as águas coletadas de cada um dos corpos de prova ensaiados. A Figura 70 demonstra uma comparação entre a Amostra inicial e todas as águas coletadas de cada um dos corpos de prova ensaiados.

Figura 70 – Comparação entre a Amostra inicial e as águas coletadas dos corpos de prova ensaiados



Fonte: Autor

Observando a Figura 70, é possível concluir que as estruturas E.AF.P e E.AM.B0.B1 apresentaram uma água mais escura e turva em relação à Amostra inicial. Isto ocorreu em função da interação entre a água e os materiais do interior da estrutura. As demais estruturas resultaram em uma água com melhora do aspecto visual em relação à Amostra inicial. As águas ficaram mais limpas e menos turvas após a passagem pela estrutura do pavimento.

A estrutura E.AF.P.B1 foi a que apresentou a água mais limpa entre todas as amostras ensaiadas. Assim, como ocorreu na comparação visual da água, a estrutura E.AF.P.B1 apresentou os melhores resultados nos parâmetros da água entre todas as outras estruturas testadas.

Realizando uma comparação entre os resultados da análise da água e o aspecto das águas após os ensaios, é possível concluir que, as estruturas que utilizaram três camadas, apresentaram uma água com aspecto mais limpo do que as estruturas que utilizaram quatro camadas. Com relação aos ensaios de análise de água, ambas as estruturas demonstraram um grande potencial na eliminação de contaminantes contidos na água. Por outro lado, a estrutura que apresentou a água com melhor aspecto e melhores resultados nos parâmetros analisados, foi a estrutura E.AF.P.B1, composta por base e sub-base.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados, concluiu-se que a questão de pesquisa levantada no trabalho foi respondida, a partir da constatação de que o tipo de material utilizado na execução das camadas de pavimentos intertravados de blocos de concreto permeável interferiu na permeabilidade da estrutura, bem como na capacidade da remoção de contaminantes contidos na água.

A hipótese foi comprovada, pois, através dos ensaios realizados na estrutura do pavimento intertravado de blocos de concreto permeável simulada em corpos de prova, determinou-se os materiais e as estruturas mais recomendadas para serem utilizadas em pavimentação com blocos de concreto permeável.

Foi realizada com sucesso a execução das estruturas do pavimento intertravado de blocos de concreto permeável simulada em corpos de prova, seguindo as especificações recomendadas pelas normas vigentes, juntamente com dados de trabalhos encontrados na literatura relacionados com a temática do trabalho.

Os corpos de provas construídos permitiram a realização dos ensaios para determinação das propriedades das diferentes estruturas testadas. Para o sistema de infiltração, optou-se pelo uso do sistema sem infiltração, pois, foi o que melhor se adequou as dimensões dos corpos de prova e as espessuras das camadas.

A utilização da manta geotêxtil na estrutura do pavimento permeável se mostrou essencial para o desenvolvimento do trabalho, pois, a mesma evitou com sucesso a migração de material maior que 120 μm de uma camada para outra, evitando assim qualquer tipo de dano à estrutura.

A estrutura E.AF.B1 apresentou os maiores resultados de permeabilidade (0,23 mm/s) e também a menor quantidade de água retida em seu interior (0,2 L). Esta estrutura não utiliza camada de sub-base, sendo a base composta por brita 1 e a camada de assentamento por areia fina.

Por outro lado, a estrutura E.Ref apresentou os menores valores de permeabilidade (0,09 mm/s), enquanto que a estrutura E.AM.B0.B1 apresentou a maior quantidade de água retida no interior da estrutura (0,19 L). Assim, a escolha destas estruturas para utilização em obras de pavimentação permeável deve ser criteriosa, pois a estrutura deve ser dimensionada de modo a permitir a infiltração de todo o fluxo e, a baixa permeabilidade e o acúmulo de água registrados nas estruturas, podem vir a causar problemas a longo prazo, como erosão das camadas e inutilidade

da estrutura permeável.

A areia fina foi o material que melhor se adequou à camada de assentamento, pois, nas estruturas onde a mesma foi utilizada, ocorreu uma maior permeabilidade e uma menor quantidade de água retida no interior da estrutura. Em relação à permeabilidade, o pó de pedra foi o material que menos se adequou na estrutura, pois, nos corpos de prova onde o mesmo foi utilizado, registrou-se uma permeabilidade menor. Já a brita 0, foi o material menos satisfatório utilizado em relação à quantidade de água retida no interior da estrutura, pois, o mesmo causou a má distribuição do fluxo no interior da estrutura.

Através da análise estatística, foi possível concluir que a alteração do tipo de material de composição das camadas da estrutura, ocasionou diferenças significativas nos resultados dos corpos de prova ensaiados. Também concluiu-se que a substituição de areia média por areia fina na camada de assentamento e de brita 0 por pó de pedra na camada de base, resultou em uma menor quantidade de água retida no interior da estrutura.

A estrutura que apresentou a água com melhor qualidade após a realização dos ensaios, foi a estrutura E.AF.P.B1. A água apresentou melhoras no aspecto visual e registrou diminuição na concentração de sólidos suspensos, turbidez, ferro total e nitrogênio amoniacal. Ocorreu aumento do pH, condutividade elétrica e DQO, porém, a concentração encontrada destes parâmetros não é capaz de causar danos ao meio ambiente e a vida aquática.

Com exceção de E.Ref e E.AF.P, as demais estruturas apresentaram uma água dentro dos padrões exigidos pela legislação. Em função da Amostra inicial apresentar uma concentração de nitrogênio amoniacal acima do valor estipulado pela Resolução N° 430 do CONAMA (2011), estas duas estruturas não obtiveram redução suficiente para estarem dentro dos valores aceitos. Porém, as duas estruturas apresentaram um grande potencial na redução da concentração do nitrogênio amoniacal presente na água. Por isso, o uso destas estruturas não pode ser descartado em função destes resultados.

Com base nos resultados, concluiu que, as estruturas que utilizaram três camadas (revestimento/assentamento/base) apresentaram uma água com aspecto mais limpo do que as estruturas que utilizaram quatro camadas (revestimento/assentamento/base/sub-base). Ambas as estruturas demonstraram um grande potencial na eliminação de contaminantes contidos na água. Por outro

lado, a estrutura que apresentou a água com melhor aspecto e melhores resultados nos parâmetros analisados, foi a estrutura E.AF.P.B1, composta por quatro camadas.

A partir dos resultados encontrados, concluiu-se que a estrutura E.AF.B1 é a mais indicada para ser utilizada em pavimentação com blocos de concreto permeável cujo objetivo é diminuir o escoamento superficial, evitando acúmulo de água. Por outro lado, quando o objetivo for diminuir a concentração de poluentes e contaminantes contidos na água, a estrutura mais recomendada para ser utilizada é a E.AF.P.B1.

Por fim, a determinação da estrutura e dos tipos de materiais que irão compor uma obra de pavimentação permeável impescinde a realização de ensaios de caracterização tecnológica. A escolha dos materiais deve levar em consideração seu desempenho e sua disponibilidade, enquanto que a escolha da estrutura deve levar em consideração o objetivo do pavimento permeável, devendo ser consideradas as características do local de implantação.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa e visando a complementação e otimização da mesma, sugere-se:

- Realizar os mesmos ensaios feitos neste trabalho, em condições de campo, para determinar as diferenças em relação aos resultados encontrados nos ensaios laboratoriais;
- Utilizar os demais sistemas de infiltração que não foram utilizados neste trabalho, para determinação das propriedades das estruturas com sistema de infiltração total e sistema de infiltração parcial;
- Utilizar os demais revestimentos de pavimentação permeável (concreto permeável moldado no local e asfalto poroso) para determinar suas propriedades e suas diferenças em relação ao revestimento utilizado no presente trabalho (blocos de concreto permeável);
- Realizar ensaios utilizando líquidos coloridos para determinação das direções de fluxo no interior da estrutura do pavimento permeável;
- Desenvolver um modelo matemático a fim de determinar uma equação específica para cálculo da permeabilidade da estrutura de pavimentos de concreto permeável.

REFERÊNCIAS

ABCP. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. ET-27. 32 p. 4ª edição. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1998.

ABCP. **Pavimento intertravado**. 115p. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 2001.

ABCP. **Execução e manutenção de pavimento intertravado**. 63p. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 2010a.

ABCP. **Pavimento intertravado permeável - Melhores práticas**. 24p. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 2010b.

ABCP. **Projeto técnico: Pavimento permeável**. 21p. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 2013.

ABCP. **Pavimentos permeáveis de concreto**. 43p. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 2015.

ABINT. **Tecidos técnicos, manual de não-tecidos, classificação, identificação e aplicações**. 36p. Associação Brasileira das Indústrias de Não-tecidos, 1999.

ABNT. **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - Método de ensaio – NBR 9776**. 3p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. **Agregado Graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles - NBR NM 51**. 6p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água – NBR NM 30**. 3p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica**

aparente – NBR NM 52. 6p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Agregados - Determinação da composição granulométrica - NBR NM 248. 6p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem - NBR NM 46. 6p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Agregados para concreto – Especificação - NBR 7211. 15p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios - NBR NM 45. 8p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção - NBR NM 53. 8p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica - NBR 9778. 4p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução – NBR 15953. 13p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio – NBR 9781. 21p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento - NBR 6118. 238p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. **Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos - NBR 16416**. 25p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2015.

ACI. **Pervious concrete - ACI 522.1R**. 25p. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 2006.

ACI. **Report on pervious concrete - ACI 522R**. 42p. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 2010.

ACI. **Specification for pervious concrete pavement - ACI 522.1M**. 11p. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 2013.

ACIOLI, L.A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

ALENCAR, P.C.D. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. 175p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, 2013.

ALFA. **Kit para determinação de ferro total, II e III em água e efluente**. ALFA 023. Alfakit. 2020. Disponível em: <<https://alfakit.com.br/>>. Acesso: Março 2021.

ANA. **Indicadores de qualidade – Índice de qualidade das águas (IQA)**. Agência Nacional de Águas, Portal de Qualidade das Águas, Brasília, 2021. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn6>. Acesso: Abril 2021.

ANTUNES, L.N.; GHISI, E.; SEVERIS, R.M. **Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building**. Science of The Total Environment, v. 746, 141087, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141087.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American

Water Works Association, American Public Health Association, Water Environment Deferation, 2005.

ARAUJO, P.M; TUCCI, C.E.M; GOLDENFUM, J.A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, p. 21-29, v. 5, 2000.

ASCE. **Design and construction of urban stormwater management systems**. 724p. American Society of Civil Engineers, New York, 1992.

ASTM C1701/C1701M. **Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete**. 3p. West Conshohocken, PA, USA, 2009.

AZAÑEDO, W.H.M.; HELARD, C.H.; MUÑOZ, R.G.V. **Diseño de mezcla de concreto poroso com agregados de la cantera La Victoria, cemento pórtland tipo i con adición de tiras de plástico, y su aplicación en pavimentos rígidos, en la Ciudad de Cajamarca**. Universidade Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2007.

AZZOUT, Y., BARRAUD, S., CRES, F. N., ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. 372p. Paris: Technique et Documentation – Lavoisier, 1994.

BALBO, J.T. **Pavimentos de concreto permeáveis: Uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente**. 176 p. Editora Oficina de Textos, 1ª edição, agosto 2020.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A. **Field survey of pavement surface infiltration rates**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 133, n. 3, June, 2007.

BEECHAM, S.; PEZZANITI, D.; KANDASAMY, J. **Stormwater treatment using permeable pavements**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management, v. 165, n. 3, p. 161–170, 2012. doi:10.1680/wama.2012.165.3.161.

BECKER, N.; PINHEIRO, I. G. **Potencialidade dos pavimentos permeáveis na melhoria da qualidade da água do escoamento superficial: Uma revisão**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, e20180009, 2019. doi:10.1590/2175-3369.011.002.AO07.

Bidim Indústria e Comércio Ltda. **Manuais técnicos, catálogos e acervo fotográfico**. São Paulo, 1999.

BRASIL. **Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade – Portaria Nº 2.914**. Ministério da Saúde, Brasília, 2011. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso: Abril 2021.

BROWN, C.; CHU, A.; VAN DUIN, B.; VALEO, C. **Characteristics of sediment removal in two types of permeable pavement**. Water Quality Research Journal, v. 44, n. 1, p. 59–70, 2009. doi:10.2166/wqrj.2009.007.

BURAK, R. **Bedding sand for segmental concrete pavements**. Interlocking Concrete Pavement Magazine, v. 9, p. 12-16, August, 2002.

BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban drainage**. 2ª ed. London: Spon Press, 2004.

CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CANHOLI J.F. **Medidas de controle “in situ” do escoamento superficial em áreas urbanas: Análise de aspectos técnicos e legais**. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CARRENHO, S. D.; SILVA, G. C. O.; ROSA, T. **Pavimento permeável intertravado – Estudo de caso: Condomínio residencial Porto das Pedras em Várzea Grande - MT.** In: C Encontro Nacional de Águas Urbanas. São Paulo, 2014.

CHANDRAPP, A. K.; BILIGIRI, K. P. **Pervious concrete as a sustainable pavement material - Research findings and future prospects: A state-of-the-art review.** Construction & Building Materials, v. 111, p. 262-274, 2016. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.

CHANDRAPP, K.; MAURYA, R.; BILIGIRI, K.P.; RAO, J.R.; NATH, S. **Laboratory investigations and field implementation of pervious concrete paving mixtures.** Advances in Civil Engineering Materials, v. 7, n. 1, p. 447-462, 2018. doi:10.1520/ACEM20180039.

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W. **Strength, fracture and fatigue of pervious concrete.** Construction and Building Materials, v. 42, p. 97–104. 2013. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006.

CHOCAT, B. **Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement.** 1136p. Ed. Paris, 1997.

CHOPRA, M.; KAKUTURU, S.; BALLOCK, C.; SPENCE, J.; WANIELISTA, M. **Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 15, n. 6, p. 426–433, 2010. doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0000117.

CONAMA. **Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelecimento das condições e padrões de lançamento de efluentes – Resolução nº 357.** 27p. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 2005.

CONAMA. **Condições e padrões de lançamento de efluentes – Resolução nº 430.** 9p. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 2011.

COUTINHO, A.P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

CRMCA. **Specifier's guide for pervious concrete pavement design - Version 1.2**. 24p. Colorado Ready Mixed Concrete Association, Centennial, 2009.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 281p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. **Pervious concrete as an alternative pavement strategy: A state-of-the-art review**. International Journal of Pavement Engineering, p. 1–16, 2018. doi: 10.1080/10298436.2018.1554217.

DIERKES, C.; KUHLMANN, L.; KANDASAMY, J.; ANGELIS, G. **Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements**. 13p. Global Solutions for Urban Drainage, American Society of Civil Engineers, Reston, Virgínia, 2002. doi: 10.1061/40644(2002)40.

DNIT. **Pavimentação – Regularização do subleito - Especificação de serviço – DNIT 137**. 7p. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010.

DRAKE, J.; BRADFORD, A.; VAN SETERS, T. **Winter effluent quality from partial-infiltration permeable pavement systems**. Journal of Environmental Engineering, v. 140, n. 11, 04014036, 2014. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000854.

EPA. **Stormwater technology fact sheet, porous pavement**. Environmental Protection Agency, EPA 832-F-99-023, Washington, DC, 1999.

FEBESTRAL. **Lês revêtements drainants en pavés de béton**. 2005. Disponível em:

<<http://www.febestral.be>>. Acesso: Setembro 2020.

FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 812p. 3ª ed. Rio de Janeiro, CPRM, LABHID, 2008.

FERGUSON, B. K. **Porous pavements – Integrative studies**. 577p. In: Water Management and Land Development, Taylor & Francis Group CRC Press, 2005.

FGSV. **Merkblatt für die wasserdurchlässige befestigung von verkehrsflächen**. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1998.

FIORITI, C. F. **Pavimento intertravado de concreto utilizado resíduos de pneus como material alternativo**. 218p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FUNASA. **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS**. 116p. Fundação Nacional de Saúde, Brasília, 2014.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado: Uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 157p. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável), Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GOEDE, W. G. **Pervious concrete: Investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods**. 198p. Thesis (Master in Engineering), Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Washington DC, 2009.

GONÇALVES, A.B.; OLIVEIRA, R.H. **Pavimentos permeáveis e sua influência sobre a drenagem**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-**

moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1999.

HEIN, D. K.; **Maintenance guidelines for permeable interlocking concrete pavement systems.** 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/290946715_Maintenance_Guidelines_for_Permeable_Interlocking_Concrete_Pavement_Systems>. Acesso: Outubro 2020.

HÖLTZ, F.C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: Análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HU, N.; ZHANG, J.; XIA, S.; HAN, R.; DAI, Z.; SHE, R.; CUI, X.; MENG, B. **A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement.** *Journal of Cleaner Production*, v. 263, 121463. 2020. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121463.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBLANDA, V.C. **Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties.** *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 524–529. 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022.

ICPI. **Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots.** Washington, USA. Tech Spec. n. 4, 2002.

ICPI. **Permeable interlocking concrete pavement: A comparison guide to porous asphalt and pervious concrete.** Washington, DC. 2008. Disponível em: <http://www.expconcrete.com/pdf/heavy-vehicle/PICP_Comparison_Brochure.pdf>. Acesso: Outubro 2020.

IDALGO, A.N; CASTRO, J.A; ALMEIDA, P.L.; SILVA, Y.C.; SILVA, M.J.M. **Determinação do coeficiente de permeabilidade de elementos drenantes de**

concreto. Revista Eletrônica Organizações e Sociedade, Iturama (MG), v. 7, n. 8, p. 4-13, jul/dez, 2018. doi: 10.29031/ros.v7i8.388.

INTERPAVE. **Permeable pavements: Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements**. Leicester, 2008.

INTERPAVE. **Permeable pavements: Guide to design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements**. Publicação L534:L217. Ed. 5. Leicester, 2010.

ISO. **Water quality — Determination of the chemical oxygen demand index (ST-COD) — Small-scale sealed-tube method – ISO 15705**. 18p. International Organization for Standardization, Genebra, 2002.

JIANG, W.; SHA, A.; XIAO, J.; LI, Y.; HUANG, Y. **Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement**. Construction & Building Materials, v. 100, p. 102-110, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055.

JOSHAGHANI, A.; RAMEZANIANPOUR, A.A.; ATAEI, O.; GOLROO, A. **Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method**. Construction and Building Materials, v. 101, p. 317–325, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.094.

KANT SAHDEO, S.; RANSINCHUNG R.N.; G.D.; RAHUL, K. L., & DEBBARMA, S. **Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures**. Construction and Building Materials, v. 255, 119260, 2020. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119260.

KAYHANIAN, M.; ANDERSON, D.; HARVEY, J.T.; JONES, D. **Balasingam Muhunthan, permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots**. Journal of Environmental Management, v. 95, n. 1, p. 114–123, 2012. doi:10.1016/j.jenvman.2011.09.021.

KAZEMI, F.; HILL, K. **Effect of permeable pavement basecourse aggregates on stormwater quality for irrigation reuse.** Ecological Engineering, v. 77, p. 189–195, 2015. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.01.020.

KEVERN, J.T.; WANG, K.; SCHAEFER, V.R. **Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 22, p. 469–475, 2010. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000049.

KEVERN, J.T.; BIDDLE, D.; CAO, Q. **Effects of macrosynthetic fibres on pervious concrete properties.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 27, n. 9, p. 61–66, 2014. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001213.

KIA, A.; HONG, S.; CHEESEMAN, C. **Clogging in permeable concrete: A review.** Journal of Environmental Management, Londres, v. 193, p. 221-233, 2016.

KIM, H.K.; LEE, H.K. **Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristic of porous concrete.** Journal of Sound and Vibration. p. 607–615, 2010.

KNAPTON, J. **The civil aviation authority recommendations for the use of pavers on aircraft pavements.** In: Fifth International Concrete Block Paving Conference, p. 493-499, Tel-Aviv, Israel, June, 1996.

LAMB, G.S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável.** 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

LEAL, C.E.F.; BARRETO, D.; NETO, J.C.M. **Análise do uso de pavimento intertravado permeável como dispositivo de retenção de água pluvial: Estudo de caso de São José do Rio Preto – SP.** In: Congresso ABES/Fenasan 2017, São Paulo, 2017.

LEDERLE, R.; SHEPARD, T.; DELA VEGA MEZA, V. **Comparison of methods for**

measuring infiltration rate of pervious concrete. Construction and Building Materials, v. 244, 118339. 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118339.

LEGRET, M.; COLANDINI, V.; LE MARC, C. **Effects of a porous pavement with reservoir structure on the quality of runoff water and soil.** Science of The Total Environment, v. 189-190, p. 335–340, 1996. doi:10.1016/0048-9697(96)05228-X.

LEGRET, M.; PAGOTTO, C. **Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway.** The Science of the Total Environment, v. 235, n. 1-3, p. 143-150, 1999. doi:10.1016/S0048-9697(99)00207-7.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. **Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 2664–2671, 2010. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057.

MADRID, G. **Pavimento intertravado: Mais ou menos permeável?** Revista Prisma, ed. 14, 2010.

MARQUES, G.L.O. **Pavimentação.** 210p. Laboratório de Pavimentação, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.

MONTES, F.; HASELBACH, L. **Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete.** Environmental Engineering Science, v. 23, p. 960-969, 2006.

MYERS, B.; BEECHAM, S.; VAN LEEUWEN, J. A. **Water quality with storage in permeable pavement basecourse.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management, v. 164, n. 7, p. 361–372, 2011. doi:10.1680/wama.2011.164.7.361.

NASSIRI, S.; RANGELOV, M.; CHEN, Z. **Preliminary study to develop standard acceptance tests for pervious concrete.** Washington State Transportation Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Pullman, Washington, 2017.

NEPTUNE, A.I.; PUTMAN, B.J. **Effect of aggregate size and gradation on pervious concrete mixtures**. ACI materials journal, v. 107, p. 625-631, 2010.

NEWMAN, A.P.; COUPE, S.J.; PUEHMEIER, T.; MORGAN, A. **Microbial ecology of oil degrading porous pavement structures**. Global solutions for urban drainage, Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage. p. 1-12. Portland, OR, USA, 8–13 September 2002.

NGUYEN, D.H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. **A modified method for the design of pervious concrete mix**. Construction and Building Materials, v. 73, p. 271–282, 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088.

NNADI, E. O.; NEWMAN, A. P.; COUPE, S. J.; MBANASO, F. U. **Stormwater harvesting for irrigation purposes: An investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system**. Journal of Environmental Management, v. 147, p. 246–256, 2015. doi:10.1016/j.jenvman.2014.08.020.

NRMCA. **Pervious Concrete pavement: When it rains**. 32p. National Ready Mixed Concrete Association, 2008. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org/index.html>>. Acesso: Outubro 2020.

OBLA, K.H. **Pervious concrete – An overview**. The Indian concrete jornal. August, 2010.

OLIVEIRA, L.C.B. **Análise da permeabilidade e da colmatção em concretos permeáveis com agregado reciclado de concreto**. 106p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana), Pontifícia Universidade Católica, Campinas, 2017.

ONO, B.W; BALBO, J.T; CARGNIN, A.P. **Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado**. Revista Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 25, n. 3, 2017.

OSPINA, C. M. M.; ERAZO, C. H. B. **Resistencia mecánica y condiciones de obra del concreto poroso en los pavimentos según el tipo de granulometría**. Universidade de Medellín, Medellín, 2007.

PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT. **Applications, benefits, construction, design, engineering properties, inspection and maintenance, materials and mix design, performance, resources**. 2011. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org>>. Acesso: Outubro 2020.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 250 p. 1ª ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2000.

PINTO, L.L.C.A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 283p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2011.

POTOCNIK, J. **Orientações sobre as melhores práticas para limitar, atenuar ou compensar a impermeabilização dos solos**. Comissão Europeia. Luxemburgo, 2012.

RISSON, K.D.B.S. **Proposta de procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis**. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

SALES, T. L. **Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade**. 188p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SANDOVAL, G.F.B. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis**. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e

Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

SANDOVAL, G.B.F.; GALOBARDES REYES, I.; SCHWANTES-CEZARIO, N.; CAMPOS MOURA, A.; MARTINS TORALLES, B. **Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC)**. DYNA, v. 86, n. 209, p. 151–159, 2019. doi:10.15446/dyna.v86n209.77613.

SANDOVAL, G.F.B. **Previsão da vida útil do concreto permeável submetido a colmatção**. 188p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

SCHAEFER, V.R.; WANG, K.; SULEIMAN, M.T.; WHITE, D.J. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates**. Ames, IA: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2006.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. **Review of permeable pavement systems**. Building and Environment. v. 42, n. 11, p. 3830-3836, 2007. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.016.

SELBIG, W. R.; BUER, N.; DANZ, M. E. **Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems**. Journal of Environmental Management, v. 251, 109510, 2019. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109510.

SHAH, S.; BHANDARI, S.S.; DESHMUKH, R.S.; NIGADE, S.R. **An experimental analysis of pervious concrete side drains to avoid urban water logging**. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 9, n. 5, p. 36-42, 2020.

SHACKEL, B. **Computer based procedures for the design and specification of concrete block pavements**. In: Fourth International Concrete Block Paving Conference, v. 1, p. 79-87, Auckland, New Zealand, February 1992.

SHU, X.; HUANG, B.; WU, H.; DONG, Q.; BURDETTE, E.G.; **Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures**.

Construction and Building Materials, v. 25, n. 8, p. 3187–3192, 2011. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002.

SINGH, A; GADDAM, S.; SAMPATH, P.V; BILIGIRI, K.P. **An innovative approach to estimate infiltration rate of pervious concrete pavements**. IRF Global R2T Expo & Conference, Las Vegas, NV, USA, 2018.

SINGH, A; JAGADEESH, G.S.; SAMPATH, P.V; BILIGIRI, K.P. **Rational approach for characterizing in situ infiltration parameters of two-layered pervious concrete pavement systems**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 31, n. 11, 04019258, 2019. Doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002898.

SILVA, F. B. **Pavimentos de concreto permeável**. Ed. 190. Revista Técnica, São Paulo, Novembro 2012.

SMITH, D. R. **Permeable interlocking concrete pavements**. 4th Edition, Interlocking Concrete Pavement Institute, Chantilly, VA, 2011.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: Conceitos e dimensionamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. EB.302.02, 36p. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, National Ready Concrete Association, Silve Spring, Maryland, USA, 2004.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2nd ed. John Wiley, New York, London, Sydney, 1967.

THOMLE J. N. **The declining pH of waters exposed to pervious concrete**. 160p. (Master in Science in Environmental Engineering), Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Washington DC, 2010.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. **The effect of the cementitious paste thickness**

on the performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 850–859, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas.** 389p. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 2007.

VIDAL, A. S. **Caracterização do concreto permeável produzido com agregado reciclado de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano.** 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

VIRGILIIS, A.L.C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias.** 213p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2009.

WANG, C.; SALMON, C.; PINCHEIRA, J. **Reinforced concrete design.** Hoboken, NJ: John Wiley and Sons Inc, 2007.

WANG, H.; LI, H.; LIANG, X.; ZHOU, H.; XIE, N.; DAI, Z. **Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio.** *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 387–395, 2019. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.044.

WU, H.; LIU, Z.; SUN, B.; YIN, J. **Experimental investigation on freeze–thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC).** *Construction and Building Materials*, v. 117, p. 63–71, 2016. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.130.

APÊNDICES

Apêndice A₁ – Resultados dos ensaios da estrutura E.Ref

E.Ref	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,10	5120	0,20
Ensaio 2	0,09	5606	0,05
Ensaio 3	0,08	6253	0,07
Ensaio 4	0,08	6042	0,10
Média	0,09	5755,25	0,105
Variância	0,00009	251932,91	0,004
Desvio padrão	0,009	501,92	0,06
Coefficiente de variação	10,00%	8,72%	57,14%

Fonte: Autor

Apêndice A₂ – Resultados dos ensaios da estrutura E.AM.B1

E.AM.B1	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,16	3221	0,08
Ensaio 2	0,14	3802	0,02
Ensaio 3	0,15	3554	0,11
Ensaio 4	0,14	3896	0,05
Média	0,15	3618,25	0,065
Variância	0,00009	90948,25	0,001
Desvio padrão	0,009	301,57	0,03
Coefficiente de variação	6,00%	8,33%	46,15%

Fonte: Autor

Apêndice A₃ – Resultados dos ensaios da estrutura E.AM.B0

E.AM.B0	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,11	4285	0,32
Ensaio 2	0,10	4974	0,20
Ensaio 3	0,12	4364	0,15
Ensaio 4	0,12	4350	0,075
Média	0,11	4493,25	0,18
Variância	0,00009	103904,91	0,01
Desvio padrão	0,009	322,34	0,10
Coefficiente de variação	8,18%	7,17%	55,55%

Fonte: Autor

Apêndice A4 – Resultados dos ensaios da estrutura E.AF.P

E.AF.P	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,10	5152	0,12
Ensaio 2	0,09	5949	0,04
Ensaio 3	0,09	5469	0,10
Ensaio 4	0,10	5292	0,075
Média	0,095	5465,5	0,08
Variância	0,00003	120723	0,001
Desvio padrão	0,005	347,45	0,03
Coefficiente de variação	5,26%	6,36%	37,50%

Fonte: Autor

Apêndice A5 – Resultados dos ensaios da estrutura E.AF.B1

E.AF.B1	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,25	2168	0,045
Ensaio 2	0,23	2330	0,02
Ensaio 3	0,21	2512	0,05
Ensaio 4	0,24	2238	0
Média	0,23	2312	0,02
Variância	0,0002	22178,67	0,0005
Desvio padrão	0,01	148,92	0,02
Coefficiente de variação	4,35%	6,44%	100,00%

Fonte: Autor

Apêndice A6 – Resultados dos ensaios da estrutura E.AF.B0

E.AF.B0	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,17	3131	0
Ensaio 2	0,15	3642	0,05
Ensaio 3	0,15	3504	0,02
Ensaio 4	0,18	2896	0,07
Média	0,16	3293,25	0,035
Variância	0,0002	116724,91	0,0009
Desvio padrão	0,015	341,65	0,031
Coefficiente de variação	9,37%	10,37%	88,57%

Fonte: Autor

Apêndice A7 – Resultados dos ensaios da estrutura E.AM.B0.B1

E.AM.B0.B1	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,16	3079	0,30
Ensaio 2	0,16	3312	0,10
Ensaio 3	0,13	4020	0,13
Ensaio 4	0,13	3824	0,24
Média	0,145	3558,75	0,19
Variância	0,0003	191384,9	0,008
Desvio padrão	0,02	437,47	0,09
Coefficiente de variação	13,79%	12,29%	47,37%

Fonte: Autor

Apêndice A8 – Resultados dos ensaios da estrutura E.AM.P.B1

E.AM.P.B1	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,13	4212	0,07
Ensaio 2	0,12	4444	0,10
Ensaio 3	0,11	4796	0,02
Ensaio 4	0,13	4143	0,03
Média	0,12	4398,75	0,055
Variância	0,00009	86712,91	0,001
Desvio padrão	0,009	297,47	0,03
Coefficiente de variação	7,50%	6,76%	54,54%

Fonte: Autor

Apêndice A9 – Resultados dos ensaios da estrutura E.AM.P.B0

E.AM.P.B0	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,14	3986	0
Ensaio 2	0,14	3797	0,08
Ensaio 3	0,12	4366	0,09
Ensaio 4	0,13	4140	0
Média	0,13	4072,25	0,04
Variância	0,00009	58026,92	0,002
Desvio padrão	0,009	240,88	0,04
Coefficiente de variação	6,92%	5,91%	100,00%

Fonte: Autor

Apêndice A₁₀ – Resultados dos ensaios da estrutura E.AF.B0.B1

E.AF.B0.B1	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,21	2490	0,16
Ensaio 2	0,19	2839	0,10
Ensaio 3	0,16	3273	0,04
Ensaio 4	0,18	3012	0,03
Média	0,185	2903,5	0,08
Variância	0,0004	107815	0,003
Desvio padrão	0,02	328,35	0,06
Coefficiente de variação	10,81%	11,31%	75,00%

Fonte: Autor

Apêndice A₁₁ – Resultados dos ensaios da estrutura E.AF.P.B1

E.AF.P.B1	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,15	3695	0
Ensaio 2	0,15	3535	0,12
Ensaio 3	0,12	4522	0,01
Ensaio 4	0,13	4130	0,005
Média	0,14	3970,5	0,03
Variância	0,0002	198384,3	0,003
Desvio padrão	0,015	445,40	0,06
Coefficiente de variação	10,71%	11,22%	200,00%

Fonte: Autor

Apêndice A₁₂ – Resultados dos ensaios da estrutura E.AF.P.B0

E.AF.P.B0	Permeabilidade (mm/s)	Tempo de escoamento (s)	Quantidade de água retida na estrutura (L)
Ensaio 1	0,15	3701	0
Ensaio 2	0,17	3210	0,02
Ensaio 3	0,13	4053	0,01
Ensaio 4	0,13	4103	0,10
Média	0,145	3766,75	0,03
Variância	0,0003	169765,6	0,002
Desvio padrão	0,02	412,02	0,04
Coefficiente de variação	13,79%	10,94%	133,33%

Fonte: Autor

Apêndice B₁ – ANOVA da permeabilidade dos corpos de prova do grupo I

ANOVA						
Fonte	Graus de liberdade (GL)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrados médios (QM)	F	p-valor	F crítico
Permeabilidade	5	0,058620833	0,011724167	85,26666667	6,85E-12	2,7728532
Resíduo	18	0,002247	0,0001375			

Fonte: Autor

Apêndice B₂ – ANOVA da permeabilidade dos corpos de prova do grupo II

ANOVA						
Fonte	GL	SQ	QM	F	p-valor	F crítico
Permeabilidade	5	0,00927083	0,00185417	7,37569061	6,42E-04	2,7728532
Resíduo	18	0,004525	0,00025139			

Fonte: Autor

Apêndice B₃ – ANOVA da permeabilidade dos corpos de prova do grupo III

ANOVA						
Fonte	GL	SQ	QM	F	p-valor	F crítico
Permeabilidade	11	0,06819167	0,00619924	31,8818182	2,91E-15	2,06660848
Resíduo	36	0,007	0,00019444			

Fonte: Autor

Apêndice B₄ – Teste de *Tukey* da permeabilidade dos corpos de prova do grupo I

Teste de Tukey						
Permeabilidade	E.Ref	E.AM.B1	E.AM.B0	E.AF.P	E.AF.B1	E.AF.B0
E.Ref		0,00015	0,3517	0,9997	0,00013	0,00013
E.AM.B1	8,606		0,04335	0,0004	0,00013	0,9247
E.AM.B0	3,586	5,02		0,8205	0,00013	0,00075
E.AF.P	1,076	7,53	2,51		0,00013	0,00013
E.AF.B1	20,8	12,19	17,21	19,72		0,00013
E.AF.B0	10,76	2,151	7,171	9,681	10,04	

Fonte: Autor

Apêndice B₅ – Teste de *Tukey* da permeabilidade dos corpos de prova do grupo II

Teste de Tukey						
Permeabilidade	E.AM.B0.B1	E.AM.P.B1	E.AM.P.B0	E.AF.B0.B1	E.AF.P.B1	E.AF.P.B0
E.AM.B0.B1		0,5064	0,9782	0,01179	0,9997	1
E.AM.P.B1	3,227		0,9964	0,0001358	0,9247	0,5064
E.AM.P.B0	1,793	1,434		0,0004017	1	0,9782
E.AF.B0.B1	5,737	8,964	7,53		0,001466	0,01179
E.AF.P.B1	1,076	2,151	0,7171	6,813		0,9997
E.AF.P.B0	0	3,227	1,783	5,737	1,076	

Fonte: Autor

Apêndice B₆ – Teste de *Tukey* da permeabilidade dos corpos de prova do grupo III

Teste de Tukey												
Permeabilidade	E.Ref	E.AM.B1	E.AM.B0	E.AF.P	E.AF.B1	E.AF.B0	E.AM.B0.B1	E.AM.P.B1	E.AM.P.B0	E.AF.B0.B1	E.AF.P.B1	E.AF.P.B0
E.Ref		0,00015	0,3517	0,9997	0,00013	0,00013	0,0001789	0,04335	0,002956	0,0001268	0,0007536	0,0001789
E.AM.B1	8,606		0,04335	0,0004	0,00013	0,9247	1	0,3517	0,9247	0,02293	0,9964	1
E.AM.B0	3,586	5,02		0,8205	0,00013	0,00075	0,07901	0,9964	0,6724	0,000127	0,3517	0,07901
E.AF.P	1,076	7,53	2,51		0,00013	0,00013	0,0007536	0,2271	0,022936	0,0001268	0,005943	0,0007536
E.AF.B1	20,8	12,19	17,21	19,72		0,00013	0,0001268	0,0001268	0,0001268	0,001466	0,0001268	0,0001268
E.AF.B0	10,76	2,151	7,171	9,681	10,04		0,8205	0,01179	0,1376	0,5064	0,3517	0,8205
E.AM.B0.B1	8,247	0,3586	4,661	7,171	12,55	2,51		0,5064	0,9782	0,01179	0,9997	1
E.AM.P.B1	5,02	3,586	1,434	3,944	15,78	5,737	3,227		0,9964	0,0001358	0,9247	0,5064
E.AM.P.B0	6,454	2,151	2,869	5,379	14,34	4,303	1,793	1,434		0,0004017	1	0,9782
E.AF.B0.B1	13,98	5,379	10,4	12,91	6,813	3,227	5,737	8,964	7,53		0,001466	0,01179
E.AF.P.B1	7,171	1,434	3,586	6,096	13,63	3,586	1,076	2,151	0,7171	6,813		0,9997
E.AF.P.B0	8,247	0,3586	4,661	7,171	12,55	2,51	0	3,227	1,783	5,737	1,076	

Fonte: Autor

Apêndice B₇ – ANOVA da quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova do grupo I

Fonte	GL	ANOVA				
		SQ	QM	F	p-valor	F crítico
Água retida	5	0,066842708	0,013368542	4,173593496	0,010784743	2,7728532
Resíduo	18	0,05765625	0,003203125			

Fonte: Autor

Apêndice B₈ – ANOVA da quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova do grupo II

Fonte	GL	ANOVA				
		SQ	QM	F	p-valor	F crítico
Água retida	5	0,07522188	0,01504438	4,18100936	0,01070345	2,7728532
Resíduo	18	0,06476875	0,00359826			

Fonte: Autor

Apêndice B₉ – ANOVA da quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova do grupo III

ANOVA						
Fonte	GL	SQ	QM	F	p-valor	F crítico
Água retida	11	0,14347292	0,01304299	3,83539087	0,00106405	2,06660848
Resíduo	36	0,122425	0,00340069			

Fonte: Autor

Apêndice B₁₀ – Teste de *Tukey* para a quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova do grupo I

Teste de Tukey						
Água retida	E.Ref	E.AM.B1	E.AM.B0	E.AF.P	E.AF.B1	E.AF.B0
E.Ref		0,9975	0,7089	1	0,7807	0,8577
E.AM.B1	1,372		0,1695	1	0,999	0,9998
E.AM.B0	2,787	4,158		0,38	0,02191	0,03227
E.AF.P	0,7288	0,6431	3,515		0,9686	0,9872
E.AF.B1	2,615	1,243	5,402	1,886		1
E.AF.B0	2,401	1,029	5,187	1,672	0,2144	

Fonte: Autor

Apêndice B₁₁ – Teste de *Tukey* para a quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova do grupo II

Teste de Tukey						
Água retida	E.AM.B0.B1	E.AM.P.B1	E.AM.P.B0	E.AF.B0.B1	E.AF.P.B1	E.AF.P.B0
E.AM.B0.B1		0,07226	0,03481	0,2823	0,02025	0,01871
E.AM.P.B1	4,716		1	0,9999	1	1
E.AM.P.B0	5,144	0,4287		0,9975	1	1
E.AF.B0.B1	3,773	0,9431	1,372		0,9872	0,9844
E.AF.P.B1	5,445	0,7288	0,3001	1,672		1
E.AF.P.B0	5,487	0,7717	0,343	1,715	0,04287	

Fonte: Autor

Apêndice B₁₂ – Teste de Tukey para a quantidade de água retida no interior da estrutura dos corpos de prova do grupo III

Teste de Tukey												
Água retida	E.Ref	E.AM.B1	E.AM.B0	E.AF.P	E.AF.B1	E.AF.B0	E.AM.B0.B1	E.AM.P.B1	E.AM.P.B0	E.AF.B0.B1	E.AF.P.B1	E.AF.P.B0
E.Ref		0,9975	0,7089	1	0,7807	0,8577	0,6115	0,9844	0,9264	1	0,8436	0,8289
E.AM.B1	1,372		0,1695	1	0,999	0,9998	0,1239	1	1	1	0,9997	0,9996
E.AM.B0	2,787	4,158		0,38	0,02191	0,03227	1	0,1017	0,05051	0,3626	0,02989	0,02768
E.AF.P	0,7288	0,6431	3,515		0,9686	0,9872	0,2974	0,9999	0,9967	1	0,9844	0,9812
E.AF.B1	2,615	1,243	5,402	1,886		1	0,01471	1	1	0,9733	1	1
E.AF.B0	2,401	1,029	5,187	1,672	0,2144		0,02191	1	1	0,9895	1	1
E.AM.B0.B1	3,001	4,373	0,2144	3,73	5,616	5,402		0,07226	0,03481	0,2823	0,02025	0,01871
E.AM.P.B1	1,715	0,343	4,501	0,986	0,9003	0,6859	4,716		1	0,9999	1	1
E.AM.P.B0	2,144	0,7717	4,93	1,415	0,4716	0,2572	5,144	0,4287		0,9975	1	1
E.AF.B0.B1	0,7717	0,6002	3,558	0,04287	1,843	1,629	3,773	0,9431	1,372		0,9872	0,9844
E.AF.P.B1	2,444	1,072	5,23	1,715	0,1715	0,04287	5,445	0,7288	0,3001	1,672		1
E.AF.P.B0	2,486	1,115	5,273	1,758	0,1286	0,08574	5,487	0,7717	0,343	1,715	0,04287	

Fonte: Autor

Apêndice C1 – Resultados das análises de água realizadas para a Amostra inicial

Amostra inicial	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,32	7,42	7,37	0,005	0,07	0,95%
Sólidos suspensos totais	41 mg/L	9 mg/L	25 mg/L	512	22,63	90,52%
Turbidez	200,0 NTU	177,7 NTU	188,85 NTU	248,645	15,77	8,35%
Condutividade elétrica	174,3 µS/cm	177,9 µS/cm	176,1 µS/cm	6,48	2,54	1,44%
DQO	21,75 mgO ₂ /L	19,25 mgO ₂ /L	20,50 mgO ₂ /L	3,125	1,77	8,63%
Ferro total	0,124 mg/L	0,111 mg/L	0,118 mg/L	0,00008	0,01	8,47%
Nitrogênio amoniacal	52,33 mgN-NH ₃ /L	-	52,33 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C2 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.Ref

E.Ref	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,96	7,96	7,96	0	0	-
Sólidos suspensos totais	11 mg/L	7 mg/L	9 mg/L	8	2,83	31,44%
Turbidez	68,70 NTU	40,67 NTU	54,685 NTU	392,84	19,82	36,24%
Condutividade elétrica	301,3 µS/cm	298,7 µS/cm	300,0 µS/cm	3,38	1,83	0,61%
DQO	26,75 mgO ₂ /L	31,75 mgO ₂ /L	29,25 mgO ₂ /L	12,50	3,53	12,06%
Ferro total	0,130 mg/L	0,141 mg/L	0,136 mg/L	0,00006	0,007	5,14%
Nitrogênio amoniacal	26,16 mgN-NH ₃ /L	-	26,16 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C3 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AM.B1

E.AM.B1	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,58	7,50	7,54	0,003	0,05	0,66%
Sólidos suspensos totais	98,0 mg/L	125,0 mg/L	111,5 mg/L	364,5	19,1	17,13%
Turbidez	28,88 NTU	31,47 NTU	30,175 NTU	3,35	1,83	6,06%
Condutividade elétrica	281,1 µS/cm	279,9 µS/cm	281,0 µS/cm	0,72	0,85	0,30%
DQO	144,25 mgO ₂ /L	141,75 mgO ₂ /L	143,00 mgO ₂ /L	3,13	1,77	1,23%
Ferro total	0,036 mg/L	0,027 mg/L	0,032 mg/L	0,00004	0,006	18,75%
Nitrogênio amoniacal	0 mgN-NH ₃ /L	-	0 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C4 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AM.B0

E.AM.B0	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,68	7,72	7,70	0,0008	0,03	0,39%
Sólidos suspensos totais	34 mg/L	58 mg/L	46 mg/L	288	16,97	36,89%
Turbidez	20,11 NTU	21,08 NTU	20,595 NTU	0,47	0,68	3,30%
Condutividade elétrica	251 µS/cm	255 µS/cm	253 µS/cm	8	2,83	1,12%
DQO	134,25 mgO ₂ /L	136,75 mgO ₂ /L	135,50 mgO ₂ /L	3,13	1,77	1,30%
Ferro total	0,046 mg/L	0,059 mg/L	0,053 mg/L	0,00008	0,009	16,98%
Nitrogênio amoniacal	2,26 mgN-NH ₃ /L	-	2,26 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C5 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AF.P

E.AF.P	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	8,01	8,11	8,06	0,005	0,07	0,87%
Sólidos suspensos totais	10 mg/L	6 mg/L	8 mg/L	8	2,83	35,37%
Turbidez	204,25 NTU	200,50 NTU	202,375 NTU	7,03	2,65	1,31%
Condutividade elétrica	314,5 µS/cm	335,5 µS/cm	325,0 µS/cm	220,5	14,85	4,57%
DQO	94,25 mgO ₂ /L	91,75 mgO ₂ /L	93,00 mgO ₂ /L	3,13	1,77	1,90%
Ferro total	0,119 mg/L	0,121 mg/L	0,120 mg/L	0,000002	0,001	0,83%
Nitrogênio amoniacal	26,16 mgN-NH ₃ /L	-	26,16 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C6 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AF.B1

E.AF.B1	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,50	7,71	7,605	0,02	0,15	1,97%
Sólidos suspensos totais	67 mg/L	93 mg/L	80 mg/L	338	18,38	22,97%
Turbidez	69,12 NTU	84,86 NTU	76,99 NTU	123,87	11,13	14,45%
Condutividade elétrica	276 µS/cm	272 µS/cm	274 µS/cm	8	2,83	1,03%
DQO	116,75 mgO ₂ /L	126,75 mgO ₂ /L	121,75 mgO ₂ /L	50	7,07	5,81%
Ferro total	0,114 mg/L	0,090 mg/L	0,102 mg/L	0,0003	0,02	19,61%
Nitrogênio amoniacal	6,8 mgN-NH ₃ /L	-	6,8 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C7 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AF.B0

E.AF.B0	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,55	7,30	7,425	0,03	0,18	2,42%
Sólidos suspensos totais	59,0 mg/L	74,0 mg/L	66,5 mg/L	112,5	10,61	15,95%
Turbidez	17,620 NTU	18,270 NTU	17,945 NTU	0,21	0,46	2,56%
Condutividade elétrica	283 µS/cm	281 µS/cm	282 µS/cm	2	1,41	0,50%
DQO	166,75 mgO ₂ /L	171,75 mgO ₂ /L	169,25 mgO ₂ /L	12,5	3,53	2,08%
Ferro total	0,113 mg/L	0,137 mg/L	0,125 mg/L	0,0003	0,02	16,00%
Nitrogênio amoniacal	7,18 mgN-NH ₃ /L	-	7,18 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C8 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AM.B0.B1

E.AM.B0.B1	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	8,18	7,88	8,03	0,05	0,21	2,61%
Sólidos suspensos totais	245 mg/L	245 mg/L	245 mg/L	0	0	-
Turbidez	212 NTU	224 NTU	218 NTU	72	8,48	3,88%
Condutividade elétrica	232,0 µS/cm	233,0 µS/cm	232,5 µS/cm	0,5	0,7	0,30%
DQO	99,25 mgO ₂ /L	106,75 mgO ₂ /L	103,00 mgO ₂ /L	28,125	5,3	5,14%
Ferro total	0,151 mg/L	0,175 mg/L	0,163 mg/L	0,0003	0,02	12,27%
Nitrogênio amoniacal	6,42 mgN-NH ₃ /L	-	6,42 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C₉ – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AM.P.B1

E.AM.P.B1	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,64	7,70	7,67	0,002	0,04	0,52%
Sólidos suspensos totais	36 mg/L	50 mg/L	43 mg/L	98	9,9	23,02%
Turbidez	126,0 NTU	127,0 NTU	126,5 NTU	0,5	0,7	0,55%
Condutividade elétrica	277 µS/cm	277 µS/cm	277 µS/cm	0	0	-
DQO	89,25 mgO ₂ /L	99,25 mgO ₂ /L	94,25 mgO ₂ /L	50	7,07	7,50%
Ferro total	0,140 mg/L	0,168 mg/L	0,154 mg/L	0,0004	0,02	12,98%
Nitrogênio amoniacal	7,56 mgN-NH ₃ /L	-	7,56 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C₁₀ – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AM.P.B0

E.AM.P.B0	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,55	7,88	7,715	0,05	0,23	2,98%
Sólidos suspensos totais	77,0 mg/L	72,0 mg/L	74,5 mg/L	12,5	3,53	4,74%
Turbidez	161,0 NTU	148,0 NTU	154,5 NTU	84,5	9,19	5,95%
Condutividade elétrica	385,0 µS/cm	384,0 µS/cm	384,5 µS/cm	0,5	0,7	0,18%
DQO	161,75 mgO ₂ /L	171,75 mgO ₂ /L	166,75 mgO ₂ /L	50	7,07	4,24%
Ferro total	0,182 mg/L	0,196 mg/L	0,189 mg/L	0,0001	0,01	5,29%
Nitrogênio amoniacal	0,76 mgN-NH ₃ /L	-	0,76 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C₁₁ – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AF.B0.B1

E.AF.B0.B1	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,57	7,38	7,475	0,02	0,13	1,67%
Sólidos suspensos totais	55 mg/L	67 mg/L	61 mg/L	72	8,48	13,90%
Turbidez	104,0 NTU	117,0 NTU	110,5 NTU	84,5	9,19	8,31%
Condutividade elétrica	274 µS/cm	276 µS/cm	275 µS/cm	2	1,41	0,51%
DQO	96,75 mgO ₂ /L	109,25 mgO ₂ /L	103,00 mgO ₂ /L	78,125	8,84	8,58%
Ferro total	0,131 mg/L	0,159 mg/L	0,145 mg/L	0,0004	0,02	13,79%
Nitrogênio amoniacal	1,13 mgN-NH ₃ /L	-	1,13 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C₁₂ – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AF.P.B1

E.AF.P.B1	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,64	7,69	7,665	0,001	0,03	0,39%
Sólidos suspensos totais	15,0 mg/L	14,0 mg/L	14,5 mg/L	0,5	0,7	4,82%
Turbidez	13,7 NTU	17,9 NTU	15,8 NTU	8,82	2,97	18,79%
Condutividade elétrica	324,0 µS/cm	323,0 µS/cm	323,5 µS/cm	0,5	0,7	0,21%
DQO	99,25 mgO ₂ /L	106,75 mgO ₂ /L	103,00 mgO ₂ /L	28,125	5,3	5,14%
Ferro total	0,104 mg/L	0,110 mg/L	0,107 mg/L	0,00002	0,004	3,74%
Nitrogênio amoniacal	1,51 mgN-NH ₃ /L	-	1,51 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C13 – Resultados das análises de água realizadas para a estrutura E.AF.P.B0

E.AF.P.B0	Resultados		Média	Variância	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Ensaio 1	Ensaio 2				
pH	7,48	7,46	7,47	0,0002	0,01	0,13%
Sólidos suspensos totais	23 mg/L	31 mg/L	27 mg/L	32	5,66	20,96%
Turbidez	63,30 NTU	74,40 NTU	68,85 NTU	61,6	7,85	11,40%
Condutividade elétrica	271 µS/cm	273 µS/cm	272 µS/cm	2	1,41	0,52%
DQO	171,75 mgO ₂ /L	151,75 mgO ₂ /L	161,75 mgO ₂ /L	200	14,14	8,74%
Ferro total	0,186 mg/L	0,178 mg/L	0,182 mg/L	0,00003	0,006	3,29%
Nitrogênio amoniacal	1,89 mgN-NH ₃ /L	-	1,89 mgN-NH ₃ /L	-	-	-

Fonte: Autor

Apêndice C14 – Resultados dos ensaios de sólidos suspensos totais, fixos e voláteis

Amostra	Sólidos suspensos totais	Sólidos suspensos fixos	Sólidos suspensos voláteis
Amostra inicial	25,0 mg/L	19,0 mg/L	6,0 mg/L
E.Ref	9,0 mg/L	7,5 mg/L	1,5 mg/L
E.AM.B1	115,5 mg/L	105,0 mg/L	10,5 mg/L
E.AM.B0	46,0 mg/L	42,0 mg/L	4,0 mg/L
E.AF.P	8,0 mg/L	6,0 mg/L	2,0 mg/L
E.AF.B1	80,0 mg/L	69,5 mg/L	10,5 mg/L
E.AF.B0	66,5 mg/L	57,0 mg/L	9,5 mg/L
E.AM.B0.B1	245,0 mg/L	241,0 mg/L	4,0 mg/L
E.AM.P.B1	43,0 mg/L	37,5 mg/L	5,5 mg/L
E.AM.P.B0	74,5 mg/L	68,0 mg/L	6,5 mg/L
E.AF.B0.B1	61,0 mg/L	47,0 mg/L	14,0 mg/L
E.AF.P.B1	14,5 mg/L	10,0 mg/L	4,5 mg/L
E.AF.P.B0	27,0 mg/L	19,5 mg/L	7,5 mg/L

Fonte: Autor

Apêndice C15 – Resultados de cada um dos ensaios de sólidos suspensos fixos e sólidos suspensos voláteis

Amostra	Sólidos suspensos fixos		Média	Sólidos suspensos voláteis		Média
	Ensaio 1	Ensaio 2		Ensaio 1	Ensaio 2	
Amostra inicial	34,0 mg/L	4,0 mg/L	19,0 mg/L	7,0 mg/L	5,0 mg/L	6,0 mg/L
E.Ref	10,0 mg/L	5,0 mg/L	7,5 mg/L	1,0 mg/L	2,0 mg/L	1,5 mg/L
E.AM.B1	92,0 mg/L	118,0 mg/L	105,0 mg/L	6,0 mg/L	7,0 mg/L	6,5 mg/L
E.AM.B0	30,0 mg/L	54,0 mg/L	42,0 mg/L	4,0 mg/L	4,0 mg/L	4,0 mg/L
E.AF.P	9,0 mg/L	3,0 mg/L	6,0 mg/L	1,0 mg/L	3,0 mg/L	2,0 mg/L
E.AF.B1	53,0 mg/L	86,0 mg/L	69,5 mg/L	14,0 mg/L	7,0 mg/L	10,5 mg/L
E.AF.B0	49,0 mg/L	65,0 mg/L	57,0 mg/L	10,0 mg/L	9,0 mg/L	9,5 mg/L
E.AM.B0.B1	240,0 mg/L	242,0 mg/L	241,0 mg/L	5,0 mg/L	3,0 mg/L	4,0 mg/L
E.AM.P.B1	29,0 mg/L	46,0 mg/L	37,5 mg/L	7,0 mg/L	4,0 mg/L	5,5 mg/L
E.AM.P.B0	68,0 mg/L	68,0 mg/L	68,0 mg/L	9,0 mg/L	4,0 mg/L	6,5 mg/L
E.AF.B0.B1	39,0 mg/L	55,0 mg/L	47,0 mg/L	16,0 mg/L	12,0 mg/L	14,0 mg/L
E.AF.P.B1	9,0 mg/L	11,0 mg/L	10,0 mg/L	6,0 mg/L	3,0 mg/L	4,5 mg/L
E.AF.P.B0	14,0 mg/L	25,0 mg/L	19,5 mg/L	9,0 mg/L	6,0 mg/L	7,5 mg/L

Fonte: Autor